



POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

PHS1102
CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Laboratoire III : Courbes d'hystérésis

Alexandre Dorais (1846642)
Gabriel-Andrew Pollo-Guilbert (1837776)

Remis à
Raouafi HAYKEL

28 septembre 2017

Table des matières

Table des matières	I
Table des figures	II
Liste des tableaux	II
1 Méthodologie expérimentale	1
1.1 Théorie	2
1.2 Prises de mesures	3
1.3 Perméabilité du matériau	3
1.4 Caractéristiques de la courbe d'hystérésis	3
2 Présentation des résultats	3
3 Discussion	5
3.1 Comparaison des perméabilités	5
3.2 Puissance dissipée	6
3.3 Sources d'erreurs	6
4 Conclusion	7
Annexe	8
A Calculs de la constante k_x	8
B Calculs de la constante k_y	8
C Calculs de μ_r	8
D Figures	9

Table des figures

1	Schéma de montage pour le tore A	1
2	Schéma de montage pour le tore B	1
3	V_c en fonction de V_1 pour le tore A	9
4	B en fonction de H pour le tore A	9
5	V_c en fonction de V_1 pour le tore B	10
6	B en fonction de H pour le tore B	10
7	Courbe de saturation pour le tore A	11
8	Courbe de saturation pour le tore B	11

Liste des tableaux

1	caractéristiques des tores	3
2	constantes k_x et k_y	3
3	données pour calculer la perméabilité du tore A	4
4	données pour calculer la perméabilité du tore B	4
5	caractéristiques des tores	5

Les matériaux ferromagnétiques sont une partie importante des technologies utilisées à tous les jours. Entre autres, elles sont au coeur de l'enregistrement digitale, des transformateurs électriques, des électroaimants et des moteurs électriques. 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.

1 Méthodologie expérimentale

Dans l'expérience un tore A et un tore B contenant chacun un enroulement primaire de N_1 spires et secondaire de N_2 spires sont utilisés.

Pour le tore A, la source de courant alternatif utilisée est celle provenant directement de l'établissement, soit approximativement 115 V à 60 Hz. Un transformateur et une inductance variable sont utilisés afin de réguler la puissance fournie au tore. Un oscilloscope mesure la tension V_1 aux bornes de la résistance R_1 et aussi la tension V_C aux bornes de la capacité C , comme le montre la figure 1.

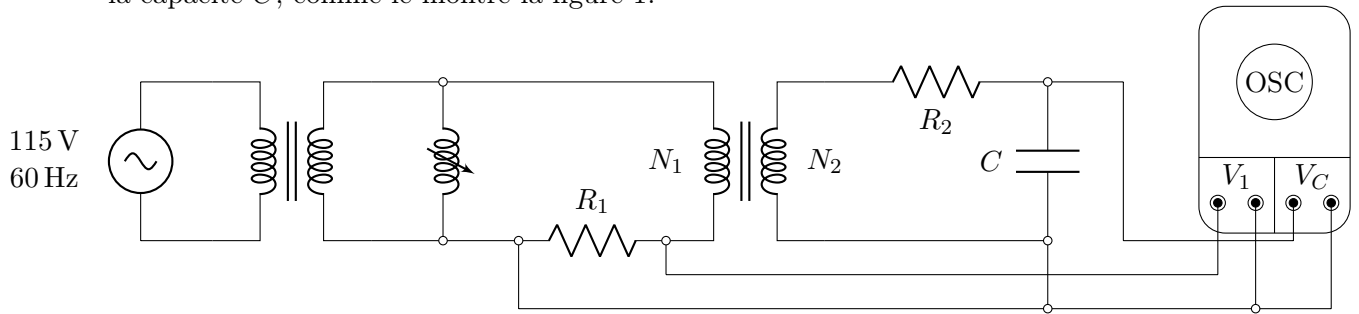


FIGURE 1 – Schéma de montage pour le tore A

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

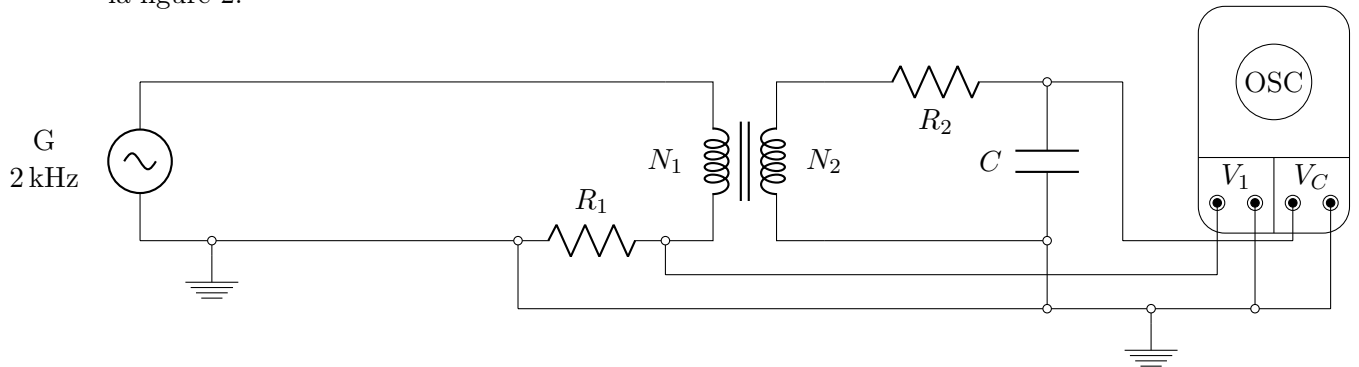


FIGURE 2 – Schéma de montage pour le tore B

1.1 Théorie

Selon la loi d'Ampère pour l'enroulement primaire, soit

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_1 I_1,$$

où C est un parcours fermé et I_1 le courant traversant la bobine, il est possible de prouver que le champ magnétique créé dans le tore est donné par l'équation

$$H = \frac{N_1 I_1}{L},$$

où L est la circonférence moyenne du tore. Avec la tension à la résistance R_1 et la loi d'Ohm, on remarque que le champ est directement proportionnel à V_1 , soit

$$H = \frac{N_1}{L R_1} \cdot V_1 = k_x V_1, \quad (1)$$

où $k_x = N_1 / L R_1$ est une constante.

Avec la loi de Faraday dans l'enroulement secondaire, soit

$$V_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

où Φ est le flux de la densité magnétique B traversant la surface A d'une spire, soit

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = AB,$$

alors la force électromotrice induite dans le secondaire est

$$V_2 = -N_2 A_2 \frac{dB}{dt}. \quad (2)$$

La tension V_C aux bornes de la capacité C est donnée en intégrant le courant par rapport au temps, soit

$$V_C = \frac{1}{C} \int_0^t I_2 dt,$$

et avec la loi d'Ohm et (2), soit

$$V_C = \frac{N_2 A}{C R_2} \int_0^t \frac{dB}{dt} dt = \frac{N_2 A B}{C R_2},$$

de sorte à obtenir la relation linéaire

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 A} \cdot V_C = k_y V_C, \quad (3)$$

où $k_y = R_2 C / N_2 A$ est une constante.

1.2 Prises de mesures

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. Puisque ces tensions sont linéairement proportionnelles à H et B avec les équations (1) et (3), cette courbe correspond aussi à la courbe d'hystérésis.

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.

1.3 Perméabilité du matériau

La perméabilité du matériau correspond graphiquement à la pente de la partie linéaire de la courbe d'hystérésis de première aimantation. Il est possible d'obtenir cette partie en faisant varier la taille de la courbe et en mesurant les maximums de V_1 et V_C .

Ensuite, il suffit d'utiliser les relations (1) et (3) pour obtenir les points de la courbe d'hystérésis. Finalement, une simple régression linéaire est utilisée pour obtenir la pente de cette droite, qui correspond à la perméabilité du matériau.

1.4 Caractéristiques de la courbe d'hystérésis

Afin d'obtenir la valeur du champ rémanent B_r , du champ coercitif H_c et le champ de saturation B_s , on tente d'obtenir la plus grande courbe d'hystérésis telle que les extrémités ne se dédoublent pas. Ensuite, ces valeurs sont facilement mesurables directement sur la courbe.

2 Présentation des résultats

La table 1 montre les caractéristiques des deux tores étudiés. À l'aide de ces valeurs, on calcule les constantes k_x et k_y des équations (1) et (3). La table 2 montre la valeur de ces constantes pour les deux tores respectivement.

TABLE 1 – caractéristiques des tores

	Tore A	Tore B
$L(\text{mm})$	76 ± 1	$67,5 \pm 0,5$
N_1	3420	46
N_2	820	18
$A(\text{mm}^2)$	$90,24 \pm 0,05$	$31,85 \pm 0,05$
$R_1(\Omega)$	$8,0 \pm 0,4$	$8,0 \pm 0,4$
$R_2(\text{k}\Omega)$	$270,0 \pm 13,5$	100 ± 5
$C(\text{nF})$	220 ± 19	$15,00 \pm 0,75$

TABLE 2 – constantes k_x et k_y

	k_x $1/(\Omega \text{ m})$	k_y $\Omega \text{ F/m}^2$
Tore A	5625 ± 355	$0,803 \pm 0,081$
Tore B	85 ± 5	$2,616 \pm 0,266$

Les tables 3 et 4 montrent les mesures des tensions V_1 et V_C maximums pour plusieurs courbes d'hystérésis différentes. Il est à noter que certaines de ces valeurs omises sont hors de la zone linéaire et ne sont pas prises en compte dans la régression linéaire.

TABLE 3 – 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)	$\mu_{r,A} \pm \Delta \mu_{r,A}$
8,0 \pm 0,4	45 \pm 4	4 \pm 2	32 \pm 3	2468 \pm 49
9,0 \pm 0,4	51 \pm 4	6 \pm 2	48 \pm 5	
10,0 \pm 0,4	56 \pm 4	8 \pm 2	64 \pm 7	
11,0 \pm 0,4	62 \pm 5	10 \pm 5	80 \pm 9	
13,0 \pm 0,4	73 \pm 5	150 \pm 5	120 \pm 13	
15,0 \pm 0,4	84 \pm 7	200 \pm 5	161 \pm 17	
18,0 \pm 0,4	101 \pm 7	250 \pm 10	201 \pm 22	
20,0 \pm 0,4	112 \pm 7	300 \pm 10	241 \pm 26	

TABLE 4 – données pour calculer la perméabilité du tore B

$V_1 \pm \Delta V_1$ (mV)	$H \pm \Delta H$ (A/m)	$V_c \pm \Delta V_c$ (mV)	$B \pm \Delta B$ (mT)	$\mu_{r,B} \pm \Delta \mu_{r,B}$
161 \pm 4	13,7 \pm 0,9	9,0 \pm 0,5	24 \pm 3	1997 \pm 70
216 \pm 10	18,4 \pm 1,4	12,1 \pm 0,5	32 \pm 4	
274 \pm 10	32,3 \pm 1,6	16,2 \pm 0,5	42 \pm 4	
366 \pm 10	31,2 \pm 2,0	23,4 \pm 1,0	61 \pm 7	
452 \pm 10	38,5 \pm 2,4	30,6 \pm 1,0	80 \pm 9	
585 \pm 20	49,8 \pm 3,3	40,0 \pm 1,0	105 \pm 11	
780 \pm 20	66,0 \pm 4,0	60,0 \pm 2,0	157 \pm 17	
975 \pm 20	83,0 \pm 5,0	75,0 \pm 2,0	196 \pm 21	

Les figures 3, 4, 5 et 6 en annexe montrent les graphiques des valeurs présentées ci-dessus. La permittivité du milieu est donné par le pente du graphique H-B de sorte qu'on obtient la permittivité relative en divisant par la permittivité du vide.

Le calcul de la régression linéaire fut effectué avec la librairie *scipy* de Python et l'incertitude associée aussi. Il est aussi important de préciser que seulement les valeurs comprises entre les deux lignes pointillées du graphique 3 ont été prises en compte, car elles se situaient dans la zone linéaire.

À l'aide des courbes de saturation présentées aux figures 7 et 8 présentées en annexe, on détermine les caractéristiques données à la table 5 suivante. Il est important de noter que ces graphiques sont en fonction de V_1 et V_c . Par conséquent, il faut multiplier par les constantes K_x et K_y pour obtenir les valeurs de la table.

TABLE 5 – caractéristiques des tores

Caractéristiques	Tore A	Tore B
$B_s \pm \Delta B_s$ (mT)	791 ± 11	198 ± 3
$B_r \pm \Delta B_r$ (mT)	700 ± 11	104 ± 2
$H_c \pm \Delta H_c$ (A/m)	229 ± 48	26 ± 3
P (W/(cycle m ³))	720 ± 92	21 ± 3

3 Discussion

3.1 Comparaison des perméabilités

Les perméabilités relatives des matériaux A et B sont toutes les deux très proches de 2000. Respectivement, elles sont 2468 ± 49 et 1997 ± 70 . Les incertitudes sur nos valeurs sont amplement acceptables, avec une erreur relative de 2 % pour A, et de 3,5 % pour B. Uniquement à l'aide de ces informations, il n'est pas facile de déterminer si ces matériaux sont des ferrites, avec un $\mu_r = 10^3$, ou de l'acier silicié, avec un μ_r entre 10^3 et 10^4 .

Pour chacun des matériaux, on va aussi chercher la valeur du champ de saturation afin de les différencier. En se référant à la table 5, pour le tore A, on trouve que $B_s = (0,79 \pm 0,11)$ T. Pour le tore B, on remarque que $B_s = (0,19 \pm 0,03)$ T.

Avec de telles valeurs, on peut identifier le tore A comme étant de l'acier silicié, qui devrait avoir un champ de saturation de 1,6 T, et le tore B comme étant une ferrite, qui devrait avoir un champ de saturation de 0,3 T.

Avant de décrire des applications technologiques possibles pour ces matériaux, nous irons chercher une dernière information, soit le champ coercitif. Au tableau 5, les valeurs qui ont été trouvées sont, pour A, $H_c = (229 \pm 48)$ A/m et, pour B, (26 ± 3) A/m.

On a besoin de ces trois caractéristiques, la perméabilité, le champ de saturation, et le champ coercitif, car ce sont eux qui vont définir quel genre d'applications nous pourrions donner au matériau.

Un matériau avec une perméabilité beaucoup plus élevée 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.

3.2 Puissance dissipée

La puissance dissipée par le tore A est de $(720 \pm 92) \text{ W}/(\text{cycle m}^3)$ et celle dissipée par le tore B est de $(21 \pm 3) \text{ W}/(\text{cycle m}^3)$. Les données enregistrées par l'oscilloscope furent transférées sur un ordinateur.

À l'aide d'un code écrit en Python, le bruit contenu dans les données fut premièrement filtré. Pour trouver l'aire de la courbe, on intègre numériquement les courbes supérieures et inférieures afin de soustraire la deuxième à la première. La méthode d'intégration numérique choisie fut les séries de Riemann avec des trapèzes, puisqu'elle converge plus rapidement vers la valeur.

Il s'avère que plusieurs courbes d'hystérésis légèrement différentes furent enregistrées. L'incertitude sur l'aire a été définie comme la plus grande différence par rapport à la moyenne. Cette méthode pourrait être améliorée en prenant compte du bruit filtré, mais il est estimé que la différence sera négligeable dans le cadre de cette expérience.

Dans le cadre d'un transformateur, il est souhaitable de diminuer au maximum la perte d'énergie par hystérésis. Pour le Tore A, cette perte est considérablement plus élevée que le Tore B fait en ferrite, un matériau souvent utilisé dans les transformateurs. Par conséquent, le silicié n'est pas un bon matériau pour un transformateur en raison de son inefficacité et probablement de la chaleur générée.

3.3 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 dans l'air et ne jamais se rendre à la bobine secondaire. Ensuite, l'impédance du circuit électrique peut causer des pertes de puissance qui pourraient être observables. Enfin, si la fréquence du générateur est mal ajustée, nous obtenons un dédoublement de la courbe d'hystérésis en saturation, ce qui idéalement ne devrait pas arriver.

4 Conclusion

Pour conclure, 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 avons affaire. Les différentes propriétés des matériaux ainsi identifiés ont guidé notre choix des applications possibles pour chacun des matériaux A et B.

Annexe

A Calculs de la constante k_x

En utilisant les données du tore A présentées dans la table 1 et l'expression de la constante dans (1), on obtient la valeur

$$k_x = \frac{N_1}{LR_1} = \frac{3420}{76 \text{ mm} \cdot 8 \Omega} = 5625/(\text{m} \Omega)$$

et l'incertitude absolue est donnée à l'aide de la différentielle, soit

$$\begin{aligned} \delta k_x &= \left| \frac{N_1}{L^2 R_1} \right| \delta L + \left| \frac{N_1}{L R_1^2} \right| \delta R_1 \\ &= \left| \frac{3420}{(76 \text{ mm})^2 \cdot 8 \Omega} \right| \cdot 1 \text{ mm} + \left| \frac{3420}{76 \text{ mm} \cdot (8 \Omega)^2} \right| \cdot 0,4 \Omega \\ &\approx 355/(\text{m} \Omega). \end{aligned}$$

B Calculs de la constante k_y

En utilisant les données du tore B présentées dans la table 1 et l'expression de la constante dans (3), on obtient la valeur

$$k_y = \frac{R_2 C}{N_2 A} = \frac{100 \text{ k}\Omega \cdot 15 \text{ nF}}{18 \cdot 31,85 \text{ mm}^2} = 2,616 \Omega \text{ F/m}^2$$

et l'incertitude absolue est donnée à l'aide de la différentielle, soit

$$\begin{aligned} \delta k_y &= \left| \frac{C}{N_2 A} \right| \delta R_2 + \left| \frac{R_2}{N_2 A} \right| \delta C + \left| \frac{R_2 C}{N_2 A^2} \right| \delta A \\ &= \left| \frac{15 \text{ nF}}{18 \cdot 31,85 \text{ mm}^2} \right| \cdot 5 \Omega + \left| \frac{100 \Omega}{18 \cdot 31,85 \text{ mm}^2} \right| \cdot 0,75 \text{ nF} \\ &\quad + \left| \frac{100 \Omega \cdot 15 \text{ nF}}{18 \cdot (31,85 \text{ mm}^2)^2} \right| \cdot 0,05 \text{ mm}^2 \\ &\approx 0,266 \Omega \text{ F/m}^2. \end{aligned}$$

C Calculs de μ_r

En prenant la pente calculée par *scipy* du tore A, soit $(21,74 \pm 0,43) \text{ H/m}$, on divise par μ_0 pour obtenir la permittivité relative, soit

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{(3,10 \pm 0,06) \text{ H/m}}{1,2566 \times 10^{-6} \text{ H/m}} = 2468 \pm 49.$$

D Figures

FIGURE 3 – V_c en fonction de V_1 pour le tore A

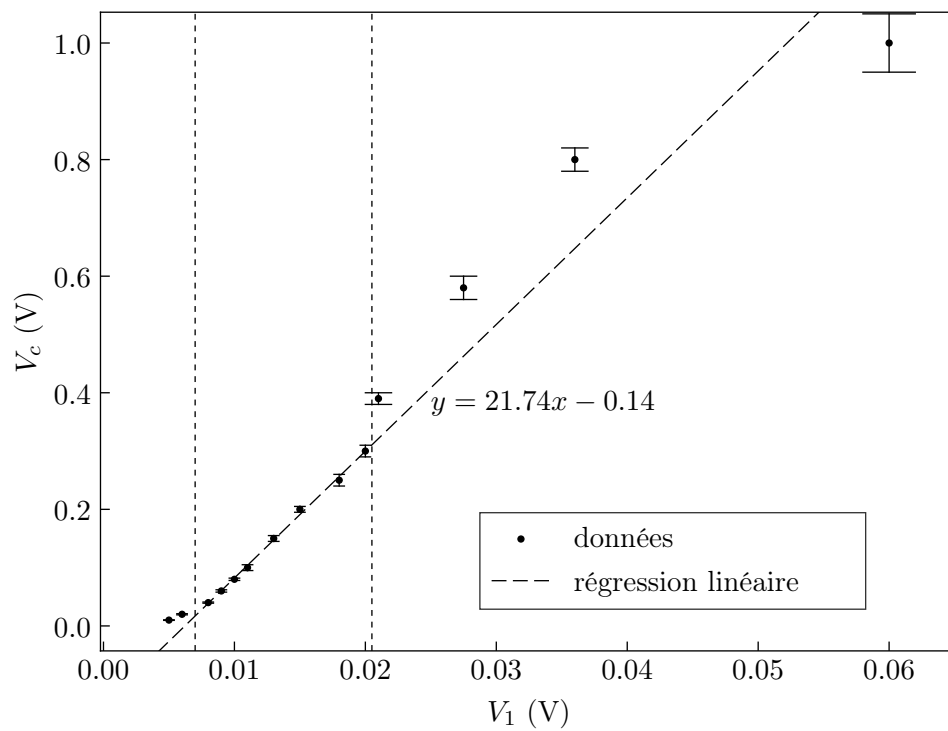


FIGURE 4 – B en fonction de H pour le tore A

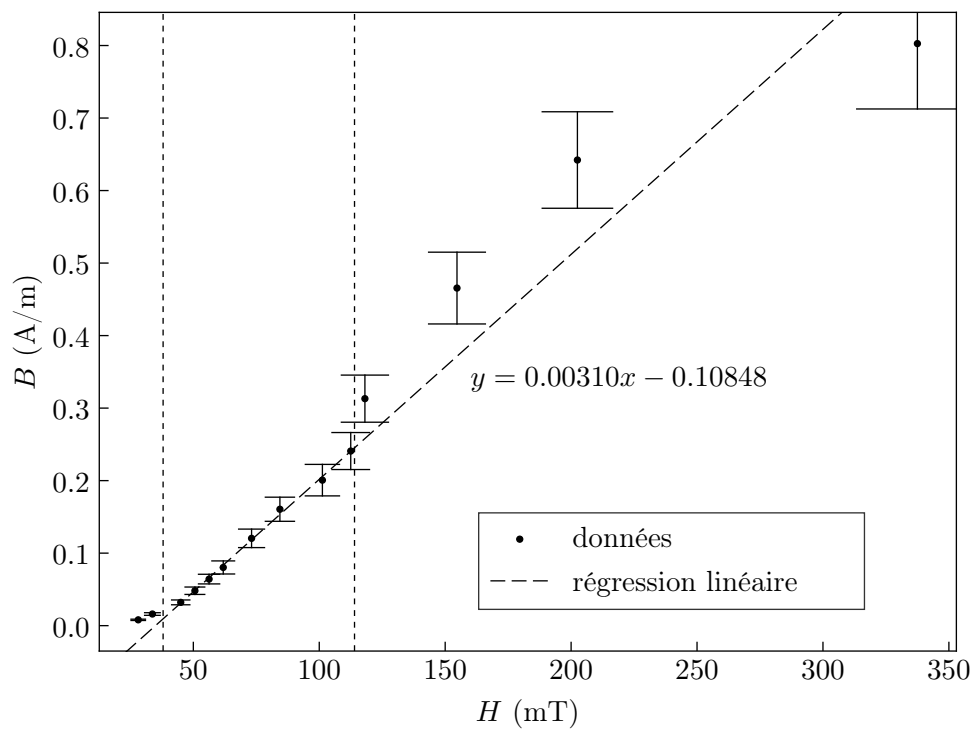


FIGURE 5 – V_c en fonction de V_1 pour le tore B

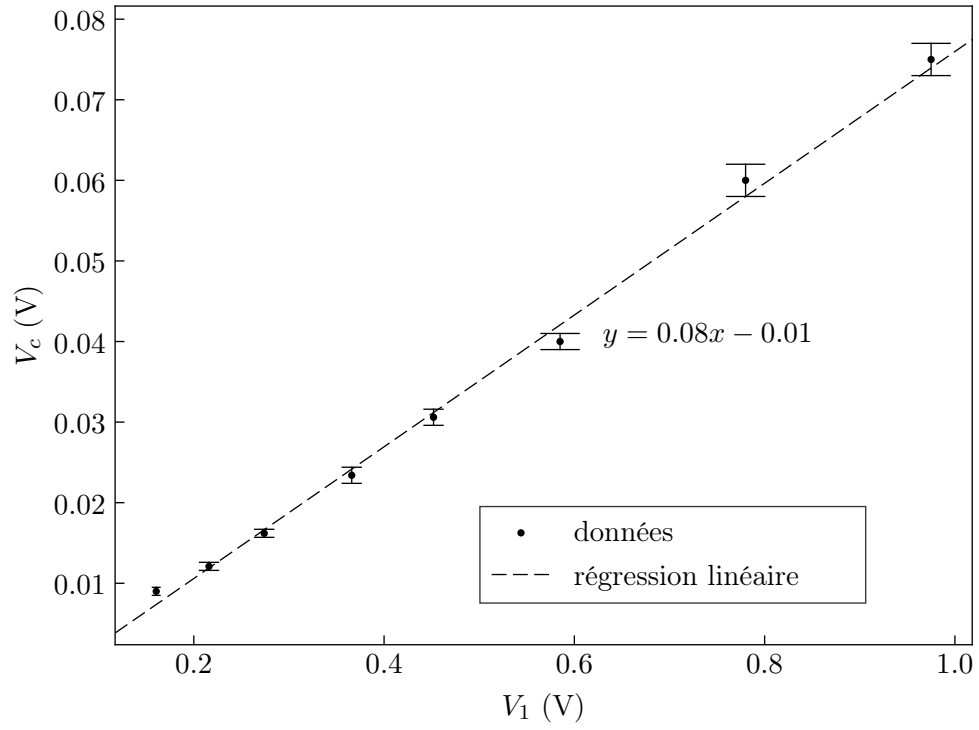


FIGURE 6 – B en fonction de H pour le tore B

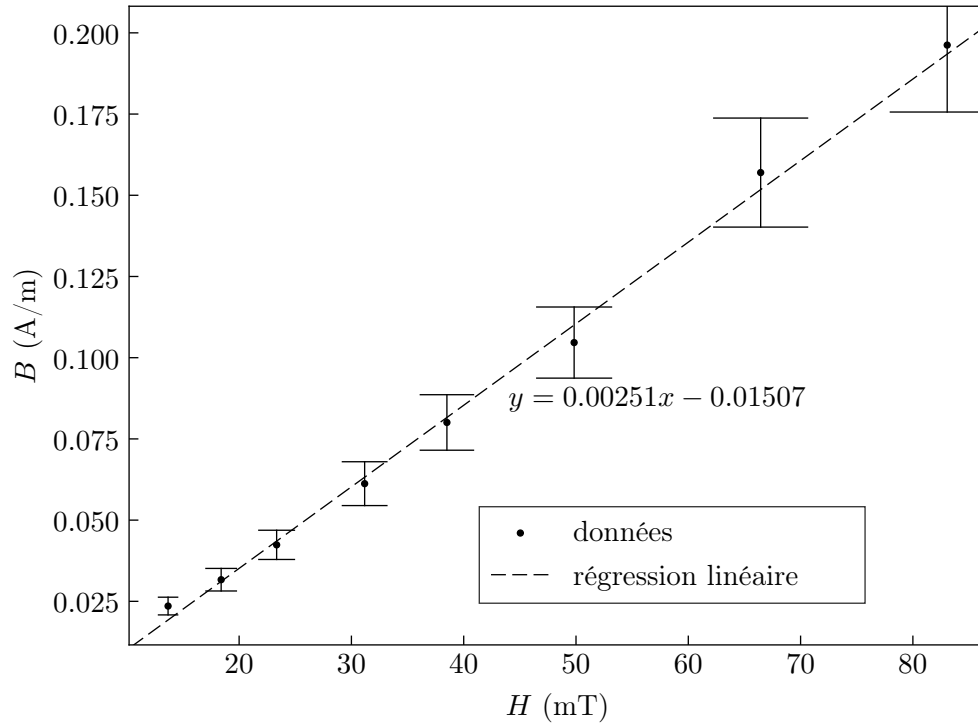


FIGURE 7 – Courbe de saturation pour le tore A

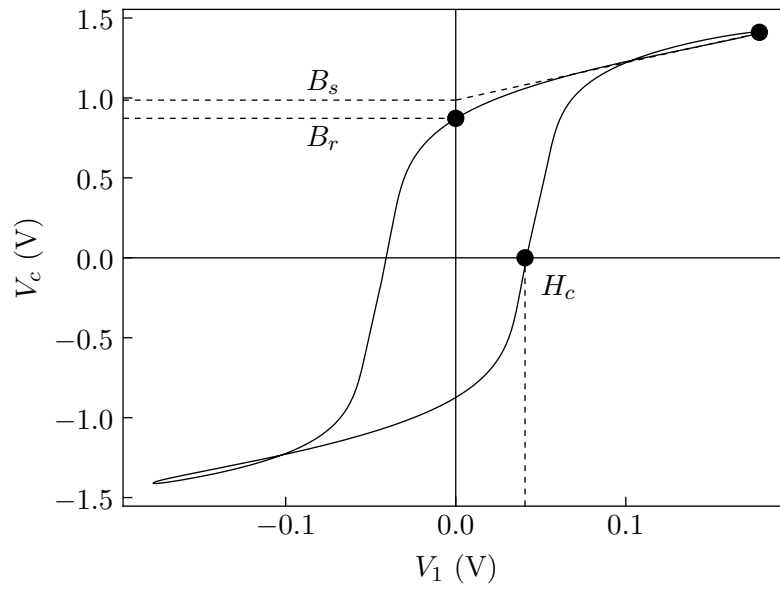


FIGURE 8 – Courbe de saturation pour le tore B

