MP-29-Mesure de champs magnétiques

Guillaume Deplus & Maud Viallet

24 mars 2022

Bibliographie

✍ Jolidon vert ✍ Quaranta III - Électronique ✍ Quaranta IV - Électricité et applications

Table des matières

1 Mesures directes du champs magnétiques **2**
1.1 Le fluxmètre . . . 2
1.2 Sonde à effet Hall . . . 2

2 Mesures indirectes de champs magnétiques **3**
2.1 Cycle d'hystérésis d'un ferromagnétique . . . 3
2.2 Moment magnétique d'un aimant . . . 4

3 Tableau **5**

4 Montage surprise **5**

5 Questions **5**

6 Commentaires **6**

1 Mesures directes du champs magnétiques

1.1 Le fluxmètre

Commençons par étudier un premier moyen de mesure relative d'un champ magnétique, le **fluxmètre**. Le principe est le suivant : on fait passer une collection de spires de courant (400 spires, surface de 1000 cm^2), dans le champ magnétique localement uniforme de l'électroaimant (on suppose ici qu'il l'est sur la totalité de la surface de la spire, d'où l'utilisation des pièces plates et pas tronconiques). La spire est branchée à un montage intégrateur ($R = 100$ kΩ, $C = 1$ μF) de telle sorte que la tension de sortie mesurée V_s s'écrive :

$$V_s = \frac{-1}{RC} \int V_e \mathrm{d}t \tag{1}$$

où on lie la tension d'entrée à la fem induite par la variation du flux du champ magnétique à travers les spires avec l'équation de Faraday :

$$V_e = \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

On relie donc la relation totale de tension au champ magnétique appliqué sous la forme :

$$\Delta V_s = \frac{BNS}{RC} \tag{3}$$

Manip - Caractérisation de l'électroaimant

Pour différents courants I allant de 1 à 8 A, par pas de 0.5 A, mesurer la tension résultante. On accède donc à caractéristique $B(I)$ de l'électroaimant. On peut faire ensuite un ajustement d'ordre quatre pour avoir une caractéristique facile d'utilisation. **Attention**, on doit parcourir la **même** portion du cycle d'hysérésis de l'électroaimant. Le ✍ jolidon vert p.134 explique comment s'arranger pour parcourir la courbe de première aimantation uniquement.

Remarque

- Cette mesure de champ magnétique est relative puisque l'on fait une différence de tension. Comme les champs appliqués sont très grands devant le champ magnétique terrestre, ça n'a pas d'influence sur la mesure (notamment pour une orientation nord-sud ou est-ouest de la spire)
- Pour produire des champs magnétiques plus importants, on se sert aujourd'hui de matériau supra conducteurs dans les bobinages. En effet, les principales pertes à constater ici sont dues par échauffement par effet joule des spires, ce qui n'a pas lieu pour des supras de résistivité nulle. Ainsi, un alliage Nicobium-Étain peut monter jusqu'à 20T. On refroidit généralement les supras à l'aide d'hélium liquide.
- Voir Quaranta IV - p.171 (électroaimant) et p.229 (fluxmètre)

1.2 Sonde à effet Hall

On a présenté ici une première méthode de mesure relative d'un champ magnétique (calcul de différence de potentiel). On propose ici de réaliser une mesure absolue du champ magnétique créé par l'électroaimant à l'aide de l'effet Hall. Le but va être de calibrer la sonde utilisée à l'aide de la caractéristique $B(I)$ obtenue en première partie.

On peut détailler dans un premier temps le fonctionnement de la mesure : à l'aide d'une alimentation stabilisée, on fait circuler un courant i constant à travers la plaque. Cette dernière est aussi soumise à un champ magnétique parallèle à sa petite longueur l_z. Ainsi, les électrons qui circulent sont soumis à une force de Lorentz ce qui crée une différence de potentiel aux bords de la plaque, les électrons chargés négativement étant attirés d'un côté. Ce champ induit $\mathbf{E}_H$ compense alors en régime permanent la force de Lorentz :

$$\mathbf{v} \wedge \mathbf{B} - e\mathbf{E}_H = 0 \tag{4}$$

donc avec $U_H \equiv E_H l_x$ et $j = n_{\mathrm{Ge}} ev = i/l_x l_z$, on aboutit à la relation :

$$U_H = \frac{i}{n_{\mathrm{Ge}} e l_z} B \tag{5}$$

Caractérisation de la sonde à effet Hall

Pour des intensités entre 1 et 8 A (en faisant bien attention à parcourir la bonne portion du cycle d'hystérésis), mesurer les tensions hall aux bornes de la plaque au multimètre. Faire les mesures dans les deux sens et prendre la moyenne des deux. On a choisi $i = 50$ mA et $l_z = 1$ mm (vérifier sur la notice de la plaque utilisée car une mesure au palmer est impossible). Par régression linéaire, on remonte à la densité en porteurs de charges (on doit trouver environ 10^{21} m^{-3})

Remarque

- On utilise des semi-conducteurs dopés et pas des des métaux car la densité en porteurs de charge est plus faible car elle ne concerne que les éléments dopants (typiquement 10^{22} contre 10^{28} m^{-3}). Donc les tensions Hall que l'on mesure sont plus hautes (inversement proportionnelles en densité de porteurs).
- Les soudures créent une inhomogénéité locale en porteurs de charges qui change légèrement la tension Hall mesurée en fonction du sens du champ magnétique.
- Des études plus poussées de l'effet hall se placent en régime alternatif.
- Il y a quelques informations dans le Quaranta III p.427 sur les semi-conducteurs. Entre autres, on peut citer le Germanium, le Silicium et le diamant.
- En regardant l'effet de la température sur la densité en porteurs de charge, on peut déterminer la valeur du gap avec la loi :

$$n_{\text{Ge}} \propto T^{3/2} \exp\left\{\frac{-\epsilon_g}{2k_B T}\right\}$$

2 Mesures indirectes de champs magnétiques

2.1 Cycle d'hystérésis d'un ferromagnétique

Maintenant que l'on a vu des méthodes directes de mesure de champ magnétique, on peut vouloir étudier d'autres systèmes qui présentent un champ magnétique permanent que l'on souhaite caractériser : c'est le cas des matériaux ferromagnétiques. Le but est donc ici de tracer le cycle d'hystérésis complet d'un tel matériau pour avoir accès à son champ rémanent B_r et son excitation coercitive H_c. De plus, l'aire de ces cycles donne accès aux pertes fer du matériau.

Le tracé du cycle d'hystérésis fonctionne comme suit : le courant sinusoïdal amplifié que l'on impose dans le circuit crée un camp H moyen sur la tranche du tore à base carrée qui s'écrit sous la forme :

$$H(t) = \frac{N_H \ln(b-a)}{2\pi(b-a)R} V_R \tag{6}$$

où $N_H = 100$ est le nombre de spires au circuit primaire, $a20$ mm et $b = 32$ mm sont les petits et grands rayons du tore. Cette excitation magnétique induit un champ magnétique B variable qui par induction créée une fem au circuit secondaire du tore. Avec un montage intégrateur ($R_i = 10$ kΩ et $C_i = 1$ μF), par mesure de tension on remonte au champ magnétique :

$$B(t) = \frac{R_i C_i}{N_B (b-a)^2} V_s(t) \tag{7}$$

où le circuit secondaire possède $N_B = 400$ spires.

Tracé d'un cycle d'hystérésis

On propose deux tracés pour deux ferromagnétiques toriques à base carrée (fer doux et ferrite de nickel).

- Générer un signal de faible fréquence (0.25 Hz) et d'amplitude 1 V que l'on rentre dans un amplificateur ($\times 10$).
- Prendre la tension aux bornes d'un rhéostat de résistance 33 Ohm en série avec le circuit primaire.
- Faire l'acquisition sur Latis-pro et exporter le tout sur un fichier texte pour pouvoir traiter plus facilement le signal.
- Il faut bien soustraire leurs moyennes aux tensions mesurées, le zéro étant (curieusement ?) mal défini

Remarque

- Il aurait été intéressant d'insister plus sur la notion des pertes fer, avec un calcul de puissance perdue peut-être. Le chapitre du ✍ Jolidon Vert sur les cycles d'hystérésis décrit très bien le phénomènes et les conclusions que l'on peut en tirer
- On se sert d'une géométrie **torique** pour les matériaux ferromagnéitques de telle sorte que l'excitation magnétique soit parfaitement imposée par le courant que l'on contrôle. En effet, l'aimantation initiale imposée par les courants induit une aimantation à divergence nulle au vu des symétries du problème. Ceci impose que le champ démagnétisant est identiquement nul. Le calcul de H se fait alors comme pour un champ B.
- La fem que l'on crée au circuit secondaire crée aussi un courant i_B qui s'ajoute au courant i_H qui circule dans le tore. On souhaite pouvoir le négliger : ceci est vérifié si l'impédance d'entrée du montage intégrateur est très grande.
- Si envoie une tension avec une fréquence trop élevée (par exemple 1 Hz pour le fer doux), le cycle apparaît sous forme de patatoïde. Ceci s'explique par l'apparition de courants de Foucault dûs à l'existence d'un champ magnétique dans un conducteur. Ces derniers créent un champ additionnel H_F qui s'oppose par loi de Lenz aux variations de $\partial_t B$ et dont l'amplitude est proportionnelle à la fréquence.

2.2 Moment magnétique d'un aimant

Nous pouvons finir ce montage par une dernière mesure détournée du champ créé par un aimant permanent en déterminant sont moment magnétique. En effet, la connaissance de sa norme et de sa direction donne directement accès à la carte de champ magnétique qu'il crée.

Pour ce faire on dispose deux bobines de rayon R en configuration anti-Helmotlz de telle sorte que l'on produise un gradient de champ magnétique au centre. On les espace de $\sqrt{2}R$ pour que l'approximation gradient constant soit vraie à l'ordre 5 (calcul fait dans le ✍ Jolidon Vert) :

$$\mathbf{B}(z) = \frac{48\sqrt{3}}{49\sqrt{7}} \frac{\mu_0 N I}{R} \left[\frac{z}{R} + O((z/R)^5) \right] \mathbf{e}_z \tag{8}$$

la force que l'aimant permanent $\boldsymbol{\mu}$ perçoit alors s'écrit alors :

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\nabla}(\boldsymbol{\mu}.\mathbf{B}) = \mu \partial_z B \mathbf{e}_z \tag{9}$$

en fonction de l'intensité du gradient de champ magnétique, on mesure le poids de l'aimant à l'aide d'une balance, l'écart avec son poids sans champ nous donne la force exercée par les bobines sur l'aimant.

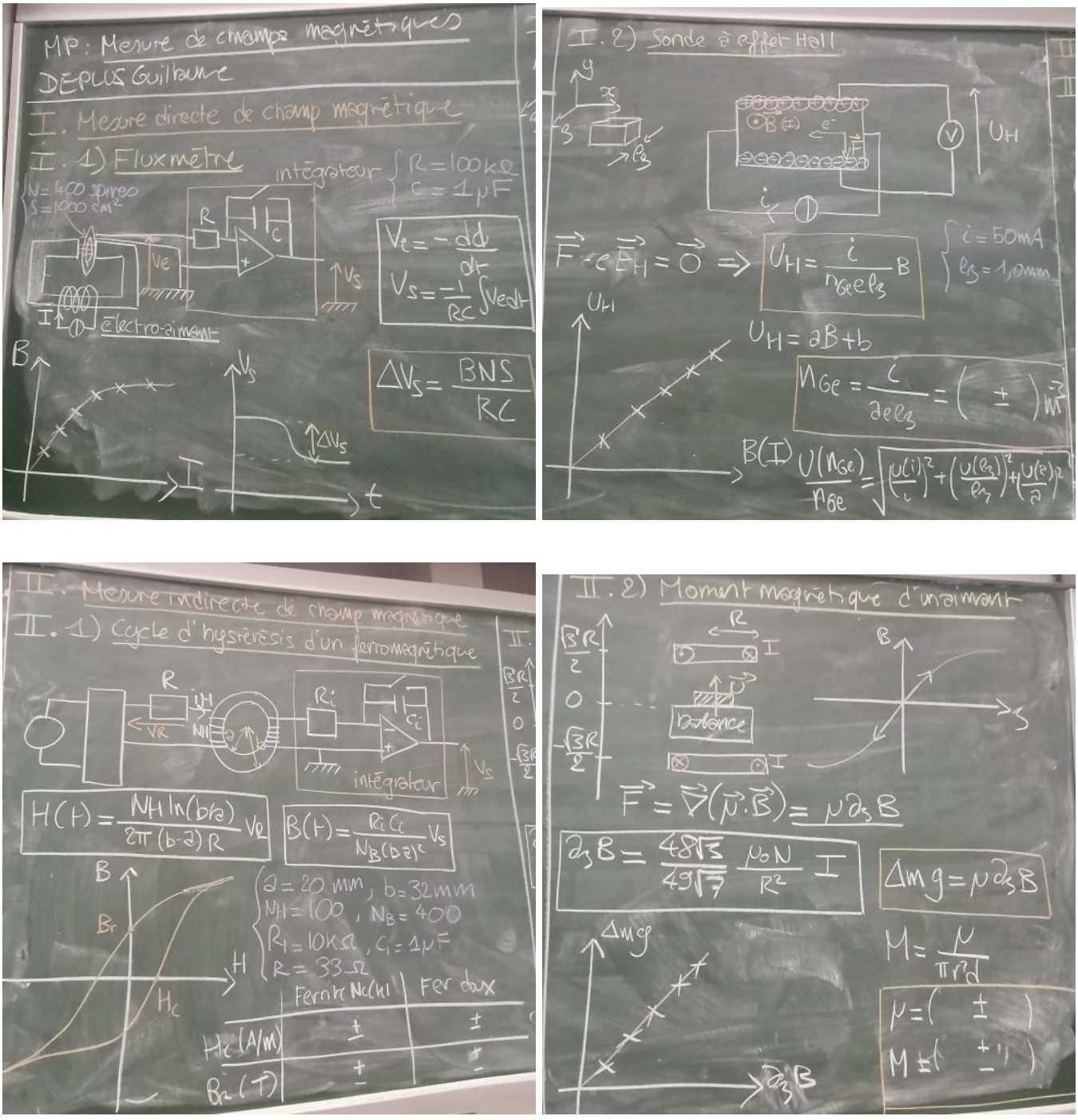
Mesure de moment magnétique

À l'aide d'une alimentation stabilisée capable d'imposer 25 V, on balaye une gamme entre 0 et 2.5 A.

- Pour chaque intensité voulue, faire 5 mesures de champ magnétique le long de l'axe à la sonde à effet Hall (on peut faire les mesures dans les deux sens pour s'affranchir des soudures), tous les 2 cm : on accède ainsi au gradient de B en fonction de i
- Faire une régression linéaire de Δmg en fonction de $\partial_z B$ pour retrouver μ

Pour avoir une mesure plus intéressante, on peut remonter à l'aimantation moyenne du matériau en divisant le moment magnétique déterminé par son volume.

3 Tableau



4 Montage surprise

On alimente deux haut-parleurs à deux fréquences différentes. Détermine les deux fréquences. Pourquoi quand les deux fréquences sont égales le son est plus "beau" ?

5 Questions

- application des champs magnétiques (plus courante) ? *haut-parleur, plaques à inducteur*

- explications mesure directe et indirecte ? *direct : tension directement proportionnelle au champs ; indirect : on a plus de travails avant d'obtenir un champ*
- électro-aimant, entre-fer permet d'obtenir constant, a quel point il est constant, uniforme et quelle est l'influence de l'entrefer sur le champ ? *ligne de champ dans l'entrefer sont rectiligne dans tout l'entrefer lorsque la surface est grande, dans le cas d'une surface plus faible, on un champs plus fort mais moins uniforme.*
- est ce que la surface de la spire capte un champs uniforme ?
- V_s est une différence de champs magnétique (différence par rapport au champs magnétique terrestre (mais c'est totalement négligeable non ?)
- ajustement polynomiale pour le fluxmétre, pourquoi ? *il y a pas de théorie derrière*
- entre le fluxmètre et la sonde à effet, lequel est le plus précis ?
- est ce que la présence de la sonde perturbe le champ magnétique ? proposer un protocole pour vérifier qu'on ne modifie pas le champs *on mets une deuxième sonde et on voit si la mesure est perturbative*
- dans la régression linéaire de la sonde à effet hall, on a pas la droite qui passe par les incertitudes, est ce un problème ?
- qu'est ce que représente l_z ? est ce que 10% d'incertitude dessus c'est pas surrestimé ? *aller voir les références*
- **QUE S'EST-IL PASSE AVEC LA CULCULATRICE ? ?**
- pourquoi on trace B en fonction de H et pas les deux en fonction de l'intensité ? *on s'affranchi de la géométrie du matériaux*
- qu'est ce que les pertes fer ? comment on les évalue ?
- qu'est ce que c'est que de la ferrite ?
- quelle est la différence entre une configuration Helmoltz et la configuration anti-Helmolt
- Si je mets mon cahier entre les armatures de l'électroaimant, est-ce que le flux va changer ?

6 Commentaires

- attention la différence entre constant (temporel) et uniforme (espace)
- la courbe qui passe pas par les incertitudes c'est pas ouff, faut mettre qq ch ou les incertitudes sont à 1σ et à 3σ on aurait pas pas de soucis
- faire attention au rapport des surfaces entre le flumétre et l'entrefer
- Cycle d'hystérésis ; il n'y a pas de de manip' , on peut refaire le circuit intégrateur
- utilise la fft, ne pas rester sur le mode défilement quand c'est pas nécessaire.
- pourquoi ca sonne bien ensemble ? un rapport de fréquence de 3/2 donc les harmoniques se superposent.
- perte fer pour les cycle d'hystérésis parce que la manip' apporte rien, elle est à la limite du sujet, aller un peu plus vite