

MP15 – PRODUCTION ET MESURE DE CHAMPS MAGNÉTIQUES

10 juin 2019

Lagoin Marc & Ramborghi Thomas

Commentaires du jury

- La mesure de champs de différents ordres de grandeur peut être intéressante. L'utilisation d'un électroaimant nécessite de savoir justifier le choix des pièces polaires, les non-linéarités champ-courant.
- Ne pas se limiter à un exemple de mesure et un exemple de production de champ magnétique.
- Maîtriser la théorie liée aux fonctionnements des éléments de montage présentés.

Bibliographie

- Clairement la source est le poly de TP de Jérémy Férrand et beaucoup de morceaux de ce montage en sont des copier-coller.
- Je citerai au fur et à mesure les ouvrages dans lesquels retrouver les expériences au cas où mais le poly devrait suffire à lui seul pour ce montage.

Expériences

- ☞ Production d'un champ magnétique par un aimant permanent (qualitatif)
- ☞ Production d'un champ magnétique par une bobine (configuration Helmholtz en préparation et anti-Helmholtz devant le Jury)
- ☞ Caractéristique $B(I)$ d'un électroaimant à l'aide d'un fluxmètre
- ☞ Détermination de la constante de Hall et de la densité de porteur d'une sonde à effet Hall en Germanium

Table des matières

1	Production de champs magnétiques	2
1.1	Utilisation d'un aimant permanent	2
1.2	Production d'un champ magnétique par une bobine	3
1.3	Production d'un champ magnétique par un électroaimant	4
2	Mesure de champs magnétiques	5
2.1	Le fluxmètre	5
2.2	La sonde à effet Hall	6

Introduction

Le montage d'aujourd'hui porte sur le champ magnétique, plus précisément sur sa production et sa mesure. Commençons par en donner une définition claire rappelant ces principales propriétés afin de mieux cerner l'objectif du montage. Nous choisissons pour tout l'exposé la convention française dans laquelle le champ magnétique désigne le vecteur \vec{B} apparaissant dans les équations de Maxwell par opposition à la convention anglaise qui l'appelle induction magnétique dans laquelle le champ magnétique est le vecteur \vec{H} .

Le champ magnétique est une grandeur ayant le caractère d'un champ vectoriel¹, c'est-à-dire caractérisée par la donnée d'une norme, d'une direction et d'un sens, définie en tout point de l'espace et permettant de modéliser et quantifier les effets magnétiques du courant électrique ou des matériaux magnétiques comme les aimants permanents.

Le champ magnétique se retrouve dans de nombreux problèmes de la physique car sa présence se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement (dite force de Lorentz) et par divers effets affectant certains matériaux (diamagnétisme, paramagnétisme, ferromagnétisme, etc ...).

Les différentes sources de champ magnétique sont les aimants permanents, le courant électrique (c'est-à-dire le déplacement d'ensemble de charges électriques), ainsi que la variation temporelle d'un champ électrique (par induction électromagnétique). Les techniques de mesure sont elles aussi nombreuses et nous essayerons d'en présenter plusieurs si le temps nous le permet.

1 Production de champs magnétiques

Je pense que le fil directeur de cette partie, ainsi que celui de la seconde, est de bien comparer les champs obtenus avec les différentes méthodes notamment leur directivité, leur amplitude, le coût du matériel nécessaire à son obtention, etc ...

1.1 Utilisation d'un aimant permanent

Comme premier exemple nous prendrons les matériaux ferromagnétiques durs qui ont la capacité de conserver un champ magnétique rémanent B_r en l'absence d'excitation magnétique extérieure. Ils sont utilisés pour produire des aimants permanents.



aimant permanent

↗️ retrouvable dans le Quaranta IV à Ferromagnétisme ⊕ expérience qualitative rapide

Observer la direction des lignes de champs produites par des aimants permanents (tous les essayer et prendre celui qui marche le mieux pour le passage) en les posant sur la plaquette P63.5 composée de petites boussoles (il est possible de projeter cette expérience en posant la plaquette sur un rétroprojecteur).

On obtient typiquement des champs de 10 à 100 mT pour ces aimants^a.

a. Ne pas faire la mesure car ça serait spoiler la partie II!

🎵 Transition :

Les aimants permanents ont de nombreuses applications : disque dur, haut-parleur, moteur, etc ... Le champ magnétique produit par un aimant peut être intense, mais il est difficile de le faire varier. On préférera dans ce cas le générer avec une bobine.

1. La densité de champ magnétique est en réalité un pseudo-vecteur différent d'un vecteur lors de l'application d'une opération de symétrie.

1.2 Production d'un champ magnétique par une bobine

D'après la loi de Biot et Savart, une bobine plate constituée de N spires de rayon R et parcourue par un courant I produit sur son axe x un champ magnétique :

$$B(x) = \frac{\mu_0 N I}{2 R} \left(1 + \frac{x^2}{R^2}\right)^{-\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Le champ produit par un tel dispositif est maximal au centre de la bobine, mais il décroît rapidement en s'éloignant. Nous n'allons donc pas nous attarder à ce cas et passer à un autre dispositif permettant d'obtenir un champ dont la variation est contrôlée en alimentant deux bobines : ce sont les bobines de Helmholtz. Il existe 2 configurations possibles : la configuration Helmholtz et la configuration anti-Helmholtz.

NB : Nous effectuerons la configuration Helmholtz en préparation et donnerons uniquement la courbe obtenue et nous ferons la configuration anti-Helmholtz en direct.

* Le dispositif en configuration Helmholtz :

Il est constitué de deux bobines identiques de même rayon R , de même axe, distantes de R et parcourues par la même intensité I de manière à obtenir les deux champs magnétiques dans le même sens. Le champ résultant entre les deux bobines est alors quasi-constant et vaut :

$$B(|x| \leq R) \approx \frac{8}{5\sqrt{5}} \frac{\mu_0 N I}{R} \quad (2)$$

bobine en configuration Helmholtz

↻ retrouvable dans le Quaranta IV à Ferromagnétisme ☹ expérience à faire en préparation +30s max à l'oral !

Espacer les deux bobines de Helmholtz de $R = 6,5\text{cm}$, puis les alimenter toutes les deux en série avec le générateur, de manière à obtenir les deux champs magnétiques dans le même sens (alimenter les bobines l'une après l'autre pour vérifier).

Pour un courant $I = 5\text{A}$, mesurer le champ B en différentes positions x . On mesure I à l'aide d'un ampèremètre en série (attention à ne pas dépasser 7A), il faut vérifier qu'elle ne varie pas au cours de l'expérience. Pour mesurer le champ magnétique sur l'axe de la bobine, on utilise le teslamètre ^a P64.35 car la sonde peut se fixer sur l'axe du dispositif. (Il s'agit du teslamètre qui ressemble à un jouet pour enfant ! Il marche par effet Hall que nous étudierons en détail en partie 2.) Régler la mesure sur B_x , calibre sur 20mT , et réaliser la mise à zéro loin de la bobine.

Constater en traçant B en fonction de la position sur Regressi qu'il est à peu près constant entre les deux bobines. Si l'on pense que le temps peut nous manquer, nous pouvons montrer en direct qu'en bougeant B reste un peu près constant ^b.

a. plus le choix, on doit spoiler la partie II

b. De manière générale toujours finir par ses manip non traitées en direct car se sont les moins importantes par définition.

🎵 Transition :

Les bobines de Helmholtz permettent de produire un champ constant, mais elles peuvent aussi permettre d'obtenir un gradient de champ constant.

* Le dispositif en configuration anti-Helmholtz :

En inversant le sens du courant pour l'une des bobines de Helmholtz, on obtient des bobines en configuration "anti-Helmholtz". Le champ résultant entre les deux bobines est alors à gradient constant et vaut :

$$B(|x| \leq R) \approx \frac{48}{25\sqrt{5}} \frac{\mu_0 N I}{R^2} x \quad (3)$$

bobine en configuration anti-Helmholtz

↗️ retrouvable dans le Quaranta IV à Ferromagnétisme ☹️ quelques points en direct

Inverser les branchements de l'une des bobines de Helmholtz pour passer en configuration anti-Helmholtz. Attention il s'agit de fort courant et faut le couper avec de débrancher un fil ! Pour un courant $I = 5\text{A}$, mesurer le champ $B(x)$ pour différentes positions x . Voir expérience précédente pour mesure de I et B si elle a été sautée en première lecture. Constaté qu'il évolue linéairement à entre les deux bobines à l'aide d'un graphique sur Regressi, puis remonter à μ_0 .

🎵 Transition :

Le champ magnétique produit par une bobine est facilement contrôlable, mais son amplitude est faible (environ 0,1T au maximum). Pour obtenir des champs intenses et contrôlés, nous allons coupler les champs produits par des bobines aux propriétés des matériaux ferromagnétiques : c'est le principe de l'électroaimant.

1.3 Production d'un champ magnétique par un électroaimant

Le principe d'un électroaimant est illustré en figure 1. Il est constitué d'un circuit magnétique de longueur L , ouvert au niveau d'un entrefer d'épaisseur e , et enlacé par une ou plusieurs bobines comprenant au total N spires alimentées par un courant I .

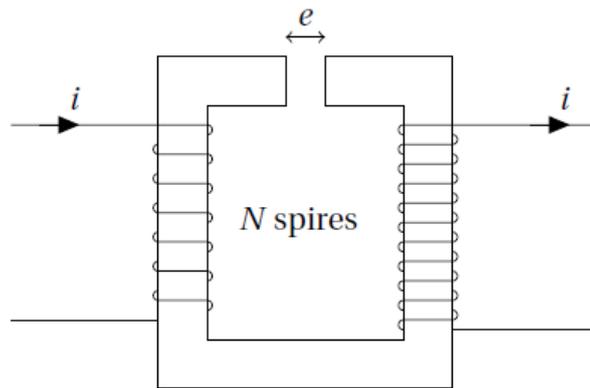


FIGURE 1 – Principe d'un électroaimant. Cette image, tout comme la majorité de la leçon, a été prise dans le poly de Jérémy Ferrand.

Le circuit, composé d'un matériau ferromagnétique (fer doux le plus souvent), permet d'obtenir un champ magnétique intense et de le canaliser le long du circuit. Le fer doux présente l'avantage d'avoir une hystérésis magnétique faible, et il peut être feuilleté (assemblage de fines plaques les unes sur les autres) pour réduire l'apparition de courant de Foucault lorsqu'il est alimenté en courant alternatif.

En faisant l'approximation que le champ magnétique B est constant et continu dans le fer et l'entrefer, on a :

$$B = \mu_0 \mu_r H_{fer} = \mu_0 H_{entrefer} \quad \text{avec : } H \text{ l'excitation magnétique} \quad (4)$$

Or en appliquant le théorème d'Ampère le long d'une ligne de champ, on obtient :

$$H_{fer} L + H_{entrefer} e = N I \quad (5)$$

On en déduit :

$$B = \frac{\mu_0 N I}{e + \frac{L}{\mu_r}} \quad (6)$$

La perméabilité relative μ_r du fer doux est généralement très grande (de 10^2 à 10^4). On peut alors considérer que $e \gg \frac{L}{\mu_r}$ pour un entrefer d'épaisseur supérieure à quelques millimètres, d'où un champ magnétique :

$$B \approx \frac{\mu_0 N I}{e} \quad (7)$$

Sur la plupart des électroaimants, il est possible de changer la forme des pièces de l'entrefer. On préférera utiliser des pièces plates (cylindriques) pour obtenir un champ uniforme sur toute la surface, et des pièces tronconiques (trons de cônes) pour obtenir un champ plus intense mais non-uniforme.

Quelques précautions à prendre pour la manip :

- L'électroaimant P66.30 est ancien et mal isolé, il faut éviter de le toucher lorsqu'il est alimenté.
- Ne jamais éteindre brutalement le générateur de l'électroaimant : l'inductance des bobines étant importante, une variation brutale d'intensité provoque une surtension qui risque de l'endommager. Il faut réduire progressivement l'intensité jusqu'à zéro avant de l'arrêter.

Transition :

Les électroaimants permettent de produire des champs magnétiques très intenses, pouvant atteindre plusieurs dizaines de teslas. Ils sont utilisés dans beaucoup d'applications : moteur, relais électromécanique, RMN, ect ... Jusqu'ici nous nous sommes servis d'outils de mesure du champs B sans détailler leur fonctionnement ; comment fonctionne-il ?

2 Mesure de champs magnétiques

2.1 Le fluxmètre

L'idée la plus intuitive d'un capteur de champ magnétique est un objet sensible aux variations de flux magnétique $\varphi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$ à travers sa surface. Il s'agit du principe de fonctionnement du fluxmètre.

Il est constitué d'une bobine plate de N spires de section S . Lorsque le fluxmètre passe d'une région où le champ magnétique est nul à une région où règne un champ magnétique uniforme \vec{B} (normal à $d\vec{S}$), il subit une variation de flux :

$$\Delta\varphi = B N S \quad (8)$$

Or d'après la loi de Faraday, cette variation génère une force électromotrice :

$$e = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (9)$$

En intégrant cette tension aux bornes de la bobine sur un temps τ , on remonte au champ :

$$B = \frac{\Delta\varphi}{N S} = - \frac{1}{N S} \int_0^\tau e dt \quad (10)$$

Plusieurs moyens sont possibles pour intégrer cette tension :

- électroniquement : à l'aide d'un montage intégrateur,
- numériquement : en intégrant le signal sur un ordinateur ou un oscilloscope.

Nous choisirons la première méthode d'intégration. En reliant la tension e aux bornes du fluxmètre à un montage intégrateur RC à AO, on mesure une tension U en sortie de l'intégrateur :

$$U = - \frac{1}{RC} \int_0^\tau e dt = \frac{BNS}{RC} \quad (11)$$

Expérimentalement, la dérive de cette tension en sortie de l'intégrateur peut rendre la mesure délicate. Celle-ci provient entre-autre de l'intégration de la tension d'offset. Pour la réduire, on utilisera le boîtier intégrateur P42.45, plutôt que de réaliser le circuit soi-même. On veillera également à décharger le condensateur avant chaque mesure en appuyant sur le bouton RAZ du boîtier.

caractéristique $B(i)$ d'un électroaimant

♣ Quaranta IV à Fluxmètre ou Duffait CAPES p.85-87 ☹ faire quelques points à l'oral

Relier les bornes d'une bobine plate de 400 spires P50.8 à l'entrée DC d'un boîtier intégrateur P42.45, réglé sur OFF avec $R_{int} = 100k\Omega$ et alimenté par un boîtier P42.39. Mesurer la tension en sortie U avec un voltmètre. On impose une largeur de l'entrefer $e = 2$ centim entre les pièces plates de l'électroaimant P66.30.

Pour des intensités I croissantes dans l'électroaimant allant de 1A à 8A : éloigner la bobine de l'électroaimant, appuyer brièvement sur le bouton RAZ du boîtier pour décharger le condensateur, puis amener la bobine dans l'entrefer et mesurer la tension U .

Déduire le champ B à partir de U (sachant que $NS = 0,4m^2$ pour P50.8), puis tracer la caractéristique $B(I)$ de l'électroaimant sur Regressi. Observer la linéarité aux faibles intensités, puis le début de la saturation du matériau ferromagnétique (au-delà de 5A environ). Modéliser la courbe $B(i)$ par un polynôme d'ordre 3 (ou plus) et noter ses coefficients, ils nous serviront d'étalonnage de l'électroaimant pour la suite.

♫ Transition :

Le fluxmètre réalise une mesure de flux, c'est-à-dire une mesure intégrée du champ. Pour remonter au champ, nous faisons l'hypothèse que celui-ci est uniforme à travers la surface de la bobine. Cette approximation est raisonnable ici car nous utilisons des pièces plates dans l'entrefer, mais ce ne serait pas le cas avec des pièces tronconiques ou en utilisant une bobine de diamètre important. Dans le cas où le champ n'est pas uniforme ou trop faible, nous pouvons utiliser un teslamètre qui réalise une mesure locale du champ B . Il utilise pour cela l'effet Hall.

2.2 La sonde à effet Hall

Insister sur le fait que le teslamètre utilisé en première partie repose sur ce principe.

Pour la théorie sur l'effet Hall, il faut aller voir la LP47 – Mécanismes de la conduction électrique dans les solides. Nous repartons du résultat :

$$E_y = -\frac{\omega\tau}{\sigma} j_x \quad \text{avec : } \sigma \text{ la conductivité électrique, } \omega = \frac{eB}{m_e} \text{ et } \tau \text{ temps de libre parcours moyen.} \quad (12)$$

En remplaçant σ par $\frac{ne^2\tau}{m_e}$ et ω par son expression, nous trouvons :

$$E_y = -\frac{B}{en} j_x = -\frac{iB}{nel_y l_z} \quad (13)$$

La différence de potentiel entre les deux faces dans la direction y est appelée tension de Hall, elle s'exprime :

$$U_H = \int_0^{l_y} E_y dy = -\frac{iB}{nel_z} = R_H \frac{iB}{l_z} \quad \text{avec : } R_H = -\frac{1}{ne} \quad (14)$$

En connaissant les propriétés géométriques et électroniques de la plaque, on peut donc remonter au champ magnétique B à partir de la mesure de la tension de Hall U_H . C'est le principe de la sonde à effet Hall.

2 info pratiques :

- Intérêt des semi-conducteurs : La tension de Hall est inversement proportionnelle à la densité de porteurs de charge du matériau. Dans le cas d'un métal, cette densité est importante, de l'ordre de $10^{29}m^{-3}$, ce qui rend la mesure de la tension de Hall difficile. C'est pour cette raison que la plupart des sondes à effet Hall sont constituées de matériaux semi-conducteurs, pour lesquels la densité de porteurs de charge est de l'ordre de $10^{21}m^{-3}$. La tension de Hall est alors plus facile à mesurer.
- Défaut d'alignement des soudures : Lorsque l'on mesure un champ au teslamètre, si l'on mesure la tension de Hall entre deux points (deux soudures) qui ne sont pas parfaitement alignés selon l'axe y , on obtient une tension $U = U_H + U_{ohm}$ qui contient un terme résistif supplémentaire U_{ohm} . Pour s'affranchir de U_{ohm} , on tourne la sonde de 180° , ce qui inverse le sens du champ B et donc la tension U_H . La mesure entre les deux points donne alors $U = -U_H + U_{ohm}$. En moyennant les deux mesures (en valeur absolue), on retrouve U_H .

Nous allons mesurer la tension de Hall aux bornes d'une plaquette en germanium dopé P. On utilise le module P64.36 dans lequel on insère une plaquette en germanium P64.30.

La soudure reliant la plaque de germanium au circuit est fragile, il faut donc manipuler la plaquette avec précaution et éviter de lui faire subir des chocs.

Alimenter les bornes à l'arrière du module sous 12V exclusivement avec le générateur P64.37. Si la diode correspondante au chauffage est allumée, il faut l'éteindre en appuyant sur le bouton à l'arrière du module.

L'intensité i dans le circuit est contrôlable à l'aide de la molette I_p , sa valeur s'affiche sur le module. On passe de l'affichage de l'intensité à celui de la température à l'aide du bouton Display.

Détermination de la constante de Hall et de la densité de porteur

☛ Quaranta IV à Champ magnétique et Conduction ☹ faire quelques points à l'oral
Quaranta III à Semi-conducteur

Régler l'intensité sur $i = 50\text{mA}$ à l'aide de la molette. Mesurer la tension de Hall U_H avec un voltmètre Fluke 187 P69.25. Elle doit être nulle lorsque le champ est nul, si ce n'est pas le cas on peut utiliser la molette U_H Comp pour régler le zéro.

Insérer la plaquette entre les pièces plates de l'entrefer de l'électroaimant P66.30, on conserve une épaisseur de l'entrefer $e = 2\text{cm}$. Il faut utiliser des câbles coudés pour mesurer la tension U_H si on ne veut pas être gêné par les bobines.

Pour des intensités I croissantes dans l'électroaimant allant de 1 à 8mA, mesurer la tension U_H . On compense les problèmes d'alignements des soudures en retournant la sonde pour chaque intensité et en réalisant la moyenne des deux mesures comme précédemment. Tracer U_H en fonction de I , puis en fonction de B à l'aide des coefficients de la modélisation de la courbe d'étalonnage de l'électroaimant. On obtient une droite. En déduire la constante de Hall R_H du germanium (sachant que $l_z = 1\text{mm}$), puis sa densité de porteurs de charge n_{Ge} (de l'ordre de $7 \cdot 10^{20}\text{m}^{-3}$ à température ambiante).

NB Évolution avec la température : À basse température le germanium a un comportement extrinsèque, sa densité de porteurs de charge est constante. À l'inverse, à haute température le germanium a un comportement intrinsèque, sa densité de porteurs de charge évolue alors telle que :

$$n_{Ge} \propto T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\epsilon_g}{2k_B T}} \simeq e^{-\frac{\epsilon_g}{2k_B T}} \quad \text{avec : } \epsilon_g \text{ l'énergie de gap du germanium} \quad (15)$$

Conclusion

Pour moi, le point important du montage est de comparer les champs produits par les différentes techniques présentées en partie I et les avantages et inconvénients des instruments de mesure de la partie II.

Tout d'abord, nous avons vu différents procédés permettant la création d'un champ magnétique. Chacun d'eux possède leurs qualités et leurs défauts. Citons l'aimant permanent dont le champ crée peut-être fort mais difficile à faire varier. Pour un contrôle fin, nous préférons utiliser des bobines éventuellement couplé à un cœur ferromagnétique pour en accroître l'intensité. Nous donnons quelques grandeurs à avoir en tête :

- Champ magnétique terrestre : la composante horizontale vaut environ 0,2 G et la verticale 0,4 G
- Dans l'entrefer d'un électroaimant entre 0,1 – 2T
- Aimant permanent au Néodyme (Nd) : 1,25T
- IRM : 6T
- Champ pulsé : 100T maximum sans destruction et jusqu'à 2800T avec explosion
- Pulsar : $4 \cdot 10^8\text{T}$

Puis nous avons vu 2 types d'instrument permettant la mesure d'un champ B : le fluxmètre et la sonde à effet Hall. Ce second semble posséder de nombreux avantages par rapport au premier en étant plus sensible et ne repose pas sur l'hypothèse d'un champ uniforme. Cependant nous n'avons pas insisté sur l'un de ses désavantages : l'étalonnage. En effet la constante de Hall, reliant la tension de Hall mesurée et la variable d'intérêt le champ B , dépend de la densité de porteur qu'il est compliqué de déterminer. En effet, elle dépend du dopage qui a été réalisé et, à priori, chaque plaque a sa valeur de R_H !

Annexe

2 définitions :

- 1 Weber : correspond au flux permettant par induction de créer une force électromotrice de 1 Volt si on annule de façon entrante 1 champ magnétique en 1 seconde dans une spire.
- 1 Tesla : correspond à un champ uniforme qui permet d'avoir un flux de 1 Weber par mètre carré. $1Gauss = 10^{-4}T$