

# MP 15 - PRODUCTION ET MESURE DE CHAMP MAGNÉTIQUE

26 février 2015

Manon Valet & Benoît Vincenti

*"Magnetism, you recall from physics class, is a powerful force that causes certain items to be attracted to refrigerators. "*

PETER ARCHER, **The quotable intellectual**  
*"MAGNET, n. Something acted upon by magnetism.*  
*MAGNETISM, n. Something acting upon a magnet."*  
AMBROISE BIERCE, **The Devil Dictionary**

## Commentaires du jury

**2013, 2014 :** La sonde à effet Hall est souvent le seul instrument de mesure présenté dans ce montage. Trop de candidats ignorent son principe de fonctionnement. D'autre part, les mesures de champs magnétiques ne sont pas limitées à ceux qui règnent dans l'entrefer d'un électro-aimant. L'étalonnage de l'électroaimant permet cependant une étude quantitative

**2012 :** Cette année encore, l'utilisation de la sonde à effet Hall a été mieux maîtrisée et les expériences présentées plus variées. Les différentes stratégies de production de champ magnétique peuvent être mises en regard des applications éventuelles.

**2005 :** L'ordre de grandeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre doit être connu. Il en est de même de l'existence d'un décalage systématique du zéro d'une sonde à effet Hall également.

## Bibliographie

- *Electromagnétisme T4*, **BFR** → Champ Helmholtz, calcul entrefer électroaimant, ordres de grandeur et théorie
- *Magnétisme T2, du Trémolet de Lacheisserie* → Applications pour les aimants permanents et l'électroaimant, détails techniques sur la nature des alliages ferromagnétiques utilisés
- *Quaranta T4, électricité et applications*, **Quaranta** → Mesure de la composante du champ magnétique terrestre, électroaimant
- *Montages CAPES Agrégation*, **Duffait** → Helmholtz (Quaranta pour la formule)
- *Notice plaquette effet Hall* → effet Hall

## Expériences

- ☞ Expérience qualitative carte de champ aimant
- ☞ Gradient linéaire de champ configuration anti-Helmholtz
- ☞ Electroaimant : étalonnage et influence de l'entrefer
- ☞ Mesure de la composante transverse du champ magnétique terrestre
- ☞ Sonde à effet Hall

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Production de champs magnétiques</b>	<b>2</b>
1.1	Production à l'aide d'un aimant permanent . . . . .	2
1.2	Production à l'aide d'une bobine . . . . .	2
1.3	Caractérisation d'un électro-aimant . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Mesures de champs magnétiques</b>	<b>4</b>
2.1	Sonde à effet Hall . . . . .	5
2.2	Mesure de la composante horizontale du champ magnétique terrestre . . . . .	5

## Introduction

La production de champs magnétiques bien contrôlés (c'est-à-dire possédant la valeur, la direction, le sens que l'on veut quand on veut et où on veut) et intenses est très importante non seulement en industrie (exemple des électroaimants utilisés dans les casse-autos pour soulever des véhicules; transformateurs électriques) mais aussi en recherche (exemple de la résonance magnétique nucléaire qui nécessite l'utilisation de champs de plusieurs teslas voire dizaines de teslas). Dans ce montage, nous allons présenter des techniques permettant de créer des champs magnétiques, en montrant à chaque fois comment elles ont été améliorées pour créer des champs toujours plus contrôlés et intenses. Dans une deuxième partie, nous étudierons quelques méthodes permettant de mesurer un champ magnétique. La mesure de champ magnétique est importante car elle permet d'avoir accès aux cartes de champs et de connaître précisément les caractéristiques des champs que l'on crée (lien avec la première partie<sup>1</sup>).

## 1 Production de champs magnétiques

Dans cette partie, on s'intéresse à différentes techniques pour créer des champs magnétiques. L'idée est ici de raconter une histoire en partant d'un simple aimant permanent et en aboutissant à l'électroaimant.

### 1.1 Production à l'aide d'un aimant permanent

Pour créer un champ magnétique, on commence par penser utiliser un aimant permanent. L'aimant est fait d'un matériau ferromagnétique dur possédant une aimantation permanente. On peut s'intéresser à la forme du champ magnétique créé par un tel aimant en utilisant une plaquette pédagogique avec des petites flèches aimantables.

#### Lignes de champ d'un aimant permanent



⊖ 1 min

Le but de cette expérience est de montrer une carte de la composante horizontale du champ créé par un aimant permanent. On utilise un rétroprojecteur pour améliorer la visibilité. On discute de ce champ : on ne connaît pas sa valeur et la forme est complexe. Il n'est pas uniforme et ne présente pas de directivité particulière. Pas très intéressant pour créer des champs bien contrôlés. Autre défaut : on ne peut pas faire varier l'intensité du champ. **Ordres de grandeur** : on peut arriver à produire des champs jusqu'à 1 Tesla avec des matériaux très spéciaux (alliages type Alnico), mais la technique se révèle très coûteuse. Les applications principales des aimants permanents sont : les systèmes électro-mécaniques (couplage aimant/courants électriques) tels que les moteurs, les systèmes magnéto-mécaniques (couplage entre plusieurs aimants) tels que les amortisseurs ou les capteurs magnétiques.

↓ *On préférera utiliser une autre source que des aimants permanents. On a vu en électromagnétisme qu'une boucle de courant pouvait créer un champ magnétique. Pourquoi ne pas utiliser alors des bobines ?*

### 1.2 Production à l'aide d'une bobine

On peut faire passer un courant dans une bobine. On peut éventuellement le faire avec un fil bouclé pour voir (peut-être comme manip introductive, mais ça fait bcp de manip introductives). Ici, on étudie le champ créé par une bobine "plate" de 95 spires, de rayon 6,5 cm et de largeur 2,5 cm (voir notice Jeulin, qui explique notamment pourquoi on peut considérer que le champ créé par cette bobine est celui d'une bobine plate). Pour cela, on fait une mesure du champ sur l'axe de la bobine avec le teslamètre Jeulin. On montre le résultat obtenu en préparation. On peut fitter le champ avec l'expression théorique (voir BFR). Pour créer un champ d'intensité à peu près constante sur l'axe de la bobine, on a recours à une configuration dite Helmholtz où deux bobines sont montées en série. On peut également rapidement montrer le résultat obtenu en préparation. On a aussi recours à la configuration anti-Helmholtz si on veut créer un champ à gradient constant (les deux bobines sont montées à l'envers).

1. NB : il faut commencer par la poule ou l'oeuf. Les champs produits doivent être caractérisés et les instruments de mesure aussi, de préférence en utilisant des champs magnétiques connus.

### Carte de champ pour bobines en configuration anti-helmholtz

⚡ Quaranta

⌚ 5 mins

On note en préparation l'intensité utilisée pour faire la carte de champ pour la configuration anti-Helmholtz. On prend un point en direct. On fait ensuite une régression linéaire. La pente est donnée en faisant un DL au 1<sup>er</sup> ordre de la somme des champs créés par les deux bobines.

$$B(x) = \frac{\mu_0 NI}{2} \frac{R^2}{(x^2 + R^2)^2} \quad (1)$$

Lorsqu'on met les deux bobines côte à côte, à  $x = -x_0 = -\frac{R}{2}$  et  $x = x_0 = \frac{R}{2}$ , on obtient :

$$B(x) = \frac{\mu_0 NI}{2} \frac{R^2}{((x + x_0)^2 + R^2)^2} - \frac{\mu_0 NI}{2} \frac{R^2}{((x - x_0)^2 + R^2)^2} \quad (2)$$

On fait un développement limité du champ autour de  $x = 0$  pour obtenir finalement, au 1<sup>er</sup> ordre :

$$B(x) = \frac{48\sqrt{5}}{125} \frac{\mu_0 NI}{R^2} x \quad (3)$$

On calcule la pente pour  $N = 95$  spires et  $R = 6,5$ cm. On obtient, un gradient égal à :

$$\|\vec{\text{grad}}B\| = 1,43 \cdot 10^{-1} \text{ T.m}^{-1} \quad (4)$$

On mesure le gradient expérimentalement : on obtient  $\|\vec{\text{grad}}B\| = 1,1 \pm 0,5 \cdot 10^{-1} \text{ T.m}^{-1}$ .

Les ordres de grandeur des champs créés par les bobines est, au maximum, de l'ordre du millitesla pour une intensité à la limite de fonctionnement des bobines. Ce dispositif n'est donc pas optimal pour produire des champs intenses. Par contre, utiliser des bobines peut-être pratique pour créer des champs sans avoir d'hystérésis. Une manière d'augmenter l'intensité du champ est de placer un matériau ferromagnétique au centre des bobines.

### 1.3 Caractérisation d'un électro-aimant

Les matériaux ferromagnétiques, de par leur réponse à un champ magnétique, permettent d'amplifier le champ magnétique des bobines de manière importante, même si l'intensité du courant n'est que de quelques ampères. Pour donner un ordre de grandeur, à intensité égale, on arrive à amplifier 1000 fois la valeur du champ magnétique par rapport au cas sans ferromagnétique.

On propose ici de caractériser la réponse en courant d'un électroaimant. Pour ce faire, on va mesurer la valeur du champ magnétique avec une sonde à effet Hall (on mentionne bien qu'on va discuter son fonctionnement plus tard), pour différentes valeurs de courant, dans l'entrefer.



### Caractérisation d'un électroaimant



⊖ 5 mins

On fait le zéro de la sonde à effet Hall loin de l'électroaimant. On prend B et -B avec la sonde à effet Hall pour augmenter la précision. En préparation, on fait également une caractérisation de l'électroaimant en inversant les bornes de l'alimentation pour être sûr que la réponse soit la même pour les deux sens du courant. On met en évidence une partie linéaire et une non linéaire (pour les grandes intensités). On fitte la partie linéaire. On trouve un coefficient directeur :

$$a = (84,3 \pm 0,8) 10^{-3} \text{ T.A}^{-1} \quad (5)$$

Cela donne la calibration de l'électroaimant qui nous servira ensuite.

#### Remarques

Avant de faire la calibration, on a démagnétisé l'électroaimant car, même si le matériau ferromagnétique utilisé est doux, le champ rémanent est non négligeable (de l'ordre de 20mT) après avoir magnétisé au-dessus de 5A.

On fait les mesures en montant pour éviter l'hystérésis.

On utilise des pièces d'entrefer plates pour que le champ soit le plus uniforme possible dans l'entrefer.

Cela minimise les erreurs dues au remplacement de la sonde dans l'entrefer et assure la reproductibilité des mesures.

On peut également montrer quantitativement l'influence de la largeur de l'entrefer sur la valeur du champ. On montre ainsi qu'on a mesuré auparavant l'entrefer au pied à coulisse et ce, encore une fois, pour la reproductibilité des mesures.

### Dépendance du champ produit avec l'entrefer

Quaranta p.172

⊖ 5 mins

On suppose que le champ magnétique est uniforme dans l'entrefer. En appelant  $l$  la longueur du ferro-magnétique et  $e$  l'épaisseur de l'entrefer, on a :

$$H_i l + H_e e = NI \quad (6)$$

$$B = \mu_0 \left( \frac{NI}{e} - \frac{l}{e} H_i \right) \quad (7)$$

Pour la mesure de l'entrefer, on mesure au palmer (attention à la petite difficulté technique : on ne peut pas mesurer directement l'entrefer pour cause d'accessibilité du palmer à l'intérieur de l'électro-aimant, on mesure donc séparément la taille des pièces plates et la distance entre les deux gros rouleaux de l'électro-aimant). L'ensemble des pièces plates mesure  $6.24 \pm 0.01 \text{ cm}$ . On utilise le gros électro-aimant vert et l'alimentation stabilisée Agilent P53.10. Dans notre cas, la taille de l'électro-aimant est environ 10 fois plus grande que celle de l'entrefer et on ne trouve pas de relation linéaire entre  $B$  et  $\frac{1}{e}$ . On utilise donc la relation exacte et on trace la régression linéaire :

$$\frac{I}{B} = \frac{1}{\mu_0 N} \left( e + \frac{l}{\mu_r} \right) \quad (8)$$

*Nous avons vu, dans cette partie, quelles sont les principales techniques de production de champs magnétiques. Il faut savoir qu'il existe des méthodes permettant de stabiliser les champs créés (refroidissement à l'hélium liquide utilisé en RMN). Pour les mesures de champ magnétique effectuées précédemment, nous avons utilisé une sonde à effet Hall. Nous allons voir son principe de fonctionnement dans la deuxième partie. Nous verrons également une autre technique de mesure de champs magnétiques.*

## 2 Mesures de champs magnétiques

On a pu, dans la partie précédente, faire des mesures de champ magnétique avec une sonde à effet Hall. Nous allons voir dans cette partie quel en est le principe à travers la caractérisation d'une sonde au germanium dopé N (PHYWE 11802.00).

## 2.1 Sonde à effet Hall

Explication brève du principe de fonctionnement. On veut montrer la linéarité de la tension de Hall avec le champ magnétique produit par l'électroaimant au niveau de l'entrefer.

### Caractérisation d'une sonde à effet Hall (sonde Germanium dopé N)



⊖ 5 mins

On souhaite tracer la caractéristique champ magnétique-tension d'une sonde à effet Hall. On utilise la plaquette PHYWE 11802. On montre, grâce à l'étalonnage de l'électroaimant fait précédemment, la linéarité de la réponse de la sonde. On aura auparavant pris soin de faire la zéro de la sonde avec le potentiomètre. Cet étalonnage permet d'avoir accès à la résistance de Hall de la sonde, inversement proportionnelle à la densité de porteurs  $n$  de charge  $q$  du semi-conducteur :

$$R_H = \frac{1}{nq} = \frac{Vd}{BI} \quad (9)$$

où  $d$  est l'épaisseur du semi-conducteur. On obtient une densité de porteurs de  $9,8 \cdot 10^{20}$  pour une valeur tabulée de  $1 \cdot 10^{21}$ .

#### Sources d'incertitudes quantifiables

Incertaines sur la valeur du champ magnétique mesurée lors de l'étalonnage de l'électroaimant. Si on fait ça, on sous-estime un peu les incertitudes puisque le semi-conducteur de la plaquette est bien plus gros que la sonde à effet Hall utilisée pour l'étalonnage. Une manière d'avoir une estimation plus fidèle des incertitudes est de regarder comment le champ varie sur toute la largeur et l'épaisseur de l'entrefer.

Sinon, on peut mentionner la température qui peut jouer sur le nombre de porteurs.

Autre source : Mesure de la tension avec voltmètre, vraiment négligeable par-rapport au reste !

↓ La sonde à effet Hall permet d'accéder à une valeur relative du champ magnétique. En effet, le point important de la manip précédente est qu'on est obligé de faire un zéro, qui n'est pas vraiment un zéro dans le sens où, ce que l'on fait en réalité, c'est qu'on néglige le champ à l'extérieur de l'électroaimant.

## 2.2 Mesure de la composante horizontale du champ magnétique terrestre

Tout à l'heure, on a utilisé des bobines simples pour produire des champs magnétiques peu intenses mais dont on connaissait théoriquement la valeur sur l'axe. On va se servir de ça pour essayer de déterminer la valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre.



## Mesure de la composante horizontale du champ magnétique terrestre

⚡ Quaranta

⊖ 5 mins

On utilise une boussole pour indiquer le Nord. Une fois le Nord pointé, on place la boussole au centre d'une bobine simple (Jeulin) de sorte que l'axe de révolution de la bobine soit perpendiculaire à l'aiguille. On impose alors un faible courant dans la bobine de façon à faire dévier la boussole de sa direction. L'angle de déviation  $\alpha$  par-rapport à l'axe Nord-Sud est directement lié au rapport du champ créé par la bobine et de la composante horizontale du champ  $B_t$  terrestre :  $\tan(\alpha) = \frac{B_b}{B_t}$ . On mesure les angles de déviation pour différentes valeurs de courant et donc de  $B_b$ . On a ainsi accès à  $B_t$ .

### Sources d'incertitudes quantifiables

Un grosse source d'incertitudes est la mesure de l'angle  $\alpha$ . C'est très peu précis car il faut aligner son oeil avec les graduations et la boussole. Les graduations sont espacées de 2 degrés ! On estime à 4 degrés l'erreur sur l'angle, ce qui est énorme.

Par ailleurs, on ne sait pas précisément si l'aiguille de la boussole est bien au centre de la bobine et si l'axe de révolution de la bobine est bien perpendiculaire à l'aiguille (à cause de l'épaisseur de la bobine).

Les frottements solides au niveau de la liaison entre l'aiguille de la boussole et son support font que le Nord n'est pas bien pointé. On peut estimer cette incertitude en faisant relaxer l'aiguille plusieurs fois.

. Elle est d'une graduation environ soit 2 deg. On relève  $\tan(\theta)$  pour  $I$  et  $-I$  sur une plage où  $\theta$  n'est pas trop important (30 deg). On trouve une valeur de champ  $B_T = 3,3 \cdot 10^{-5}$  T. On insiste sur le fait que cette manip ne permet d'accéder qu'à un ordre de grandeur. Une valeur tabulée de la composante transverse du champ terrestre donne  $B_T = 2,5 \cdot 10^{-5}$  T.

## Conclusion

Au cours de ce montage, on a pu mettre en évidence la difficulté qu'il y a de produire des champs magnétiques bien contrôlés. La mesure de champs magnétiques permet d'accéder aux caractéristiques du champ magnétique produit. On aurait pu également parler d'un autre outil de mesure de champ magnétique : le fluxmètre.