

# MP15 – PRODUCTION ET MESURE DE CHAMPS MAGNÉTIQUES

17 mars 2016

*"Je sais pas si vous êtes au courant mais tout va de mal  
ampère!"*  
ANONYME

Romain BERTHELARD & Paul EPRON

## Niveau : L3

## Commentaires du jury

2015 La sonde à effet Hall est souvent le seul instrument de mesure présenté dans ce montage. D'autre part, les mesures de champs magnétiques ne sont pas limitées à ceux qui règnent dans l'entrefer d'un électroaimant.

## Bibliographie

- *Dictionnaire de Physique*, **TAILLET** → Pour les définitions
- *Expériences de Physique Capes*, **DUFFAIT** → Pour le cours et manip.
- *Magnétisme II*, **TREMOLET de LACHEISSERIE** → ODG

## Expériences

- ☞ Spectre magnétique d'un aimant permanent
- ☞ Spectre magnétique sur l'axe des bobines de Helmholtz
- ☞ Caractéristique  $B=f(I)$  d'un électroaimant
- ☞ Mesure de champs magnétique au fluxmètre électronique
- ☞ Caractéristique  $B=f(V_H)$  d'une sonde à effet Hall

## Table des matières

|          |                                         |          |
|----------|-----------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Production de champs magnétiques</b> | <b>2</b> |
| 1.1      | Avec des aimants permanents . . . . .   | 2        |
| 1.2      | Avec des bobines . . . . .              | 2        |
| 1.3      | Avec un électroaimant . . . . .         | 3        |
| <b>2</b> | <b>Mesure de champs magnétiques</b>     | <b>4</b> |
| 2.1      | Fluxmètre électronique . . . . .        | 4        |
| 2.2      | Teslamètre à effet Hall . . . . .       | 5        |

## Introduction

La production et le contrôle de champs magnétiques est une problématique importante pour les industriels. En effet produire le champ magnétique désiré (direction, sens et intensité) sans qu'il n'interfère avec d'autre équipement n'est pas évident. Ainsi la mesure de champs magnétiques est tout aussi important car elle permet de les caractérisés et de s'assurer de la compatibilité électromagnétique (CEM) des équipements.

↓ Dans ce montage nous allons commencer par présenter les techniques classiques de production de champs magnétiques puis nous nous intéresserons à deux technique de mesure.

## 1 Production de champs magnétiques

Dans cette partie nous allons présenter deux manières différentes de produire un champ magnétique :

- ★ Aimant permanent : aimantation rémanente de matériaux ferromagnétiques
- ★ Bobines : champ magnétique créé par des charges en mouvement

### 1.1 Avec des aimants permanents

✍ [TAILLET] [DUFFAIT]

Ils sont constitués de matériaux ferromagnétiques durs dont l'aimantation rémanente est suffisamment important pour qu'un champ magnétique notable soit produit et dont l'excitation coercitive est suffisamment importante pour que l'aimantation rémanent ne soit pas réduite après application d'un champ externe.

Application : générateur électrique, moteur électrique, haut parleur etc ...

#### ☞ Spectre de champ d'un aimant permanent

✍ [DUFFAIT]

⌚ 2 mins

On montre le spectre de champ d'un aimant droit et d'un aimant en U à l'aide de la plaquette et d'un rétro-projecteur. On remarque que l'intensité du champ est inconnue et que la direction est contrôlé par la géométrie de l'aimant.

**ODG** Les aimants les plus puissants sont en alliages.

| Matériaux        | B <sub>rémanent</sub> (T) | H <sub>coercitive</sub> (kA/m) | Remarques                 |
|------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Aciers           | 0.001 à 0.01              | 10                             | Aimants historiques       |
| Ferrites         | 0.1 T                     | 200                            | les moins chers           |
| Neodyme/fer/bore | 1                         | 1500                           | Contient des terres rares |

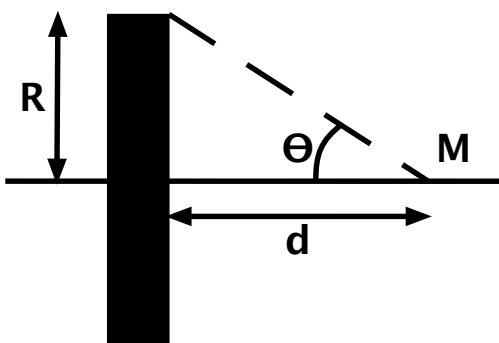
↓ Cette manière de produire des champs est très utile et pas que pour coller des images sur les portes de frigo mais pour produire un champ mieux contrôlé il faut une autre technique : la bobine

### 1.2 Avec des bobines

✍ [TAILLET][DUFFAIT]

Le passage d'un courant électrique dans une boucle de courant crée un champ magnétique dont nous allons étudier quelques propriétés. D'après la loi de Biot et Savart le module du champ magnétique sur l'axe en un point M est :

$$|B| = \frac{\mu_0 N I}{2R} \sin^3(\theta) = \frac{\mu_0 N I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}$$



## ☕ Spectres de champ sur l'axe des bobines de Helmholtz

🔧 [DUFFAIT]

⌚ 15 mins

On utilise des bobines de Helmholtz Jeulin (p64.18) alimentées par un générateur de courant continu 0.30V/0.10A (p53.13) au travers d'un rhéostat de  $3.3\Omega$  supportant un courant de 10 A (p62.1) pour réduire les fluctuations du courant dues à la faible résistance des bobines. Ces bobines plates de  $N = 95$  spires et de rayon  $R = 6.5$  cm supportent un courant de 7 A pour une différence de potentiel de 5 V maximum soit une résistance interne de l'ordre de  $\frac{5}{7} = 0.7\Omega$  (non précisé dans la notice). On mesure le champ sur l'axe avec le teslamètre Phytex (le seul qui marche à l'heure actuelle) (p64.28) d'une précision constructeur de 2% au travers de la sortie analogique et d'un voltmètre d'une précision de  $0.1\% + 1$  dont on négligera l'erreur. On explique le principe de la mesure en alimentant une seule bobine et on montre l'accord entre le modèle théorique et l'expérience. Puis on fait une mesure en configuration Helmholtz et anti-Helmholtz plus une régression linéaire du gradient de champ créé par la configuration anti en vérifiant l'accord avec le modèle théorique.

## ODG

Les bobines sont limitées par leur capacité à dissiper l'énergie thermique dû à l'effet Joule dans l'enroulement. Dépendant de la taille des bobines et du système de refroidissement :  $B \approx 0.01$  à 100 mT.

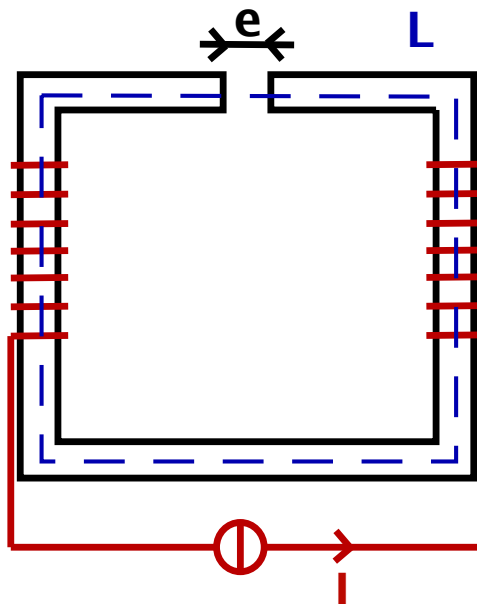
Typiquement les bobines que l'on a utilisé ne peuvent pas créer des champs plus grand que la dizaine millitesta sans être détruite.

↓ Les bobines permettent donc de produire des champs mieux contrôlés mais pas très intense. Le dernière appareil de production de champ combine les deux techniques de productions précédentes : l'électroaimant

## 1.3 Avec un électroaimant

🔧 [TAILLET][DUFFAIT]

Aimant dont le moment magnétique est dû au passage d'un courant électrique dans une bobine l'enlaçant. Les électroaimants sont utilisés pour produire des champs magnétiques intenses, par exemple pour soulever des objets métalliques, pour soumettre des échantillon à ce champ ou dans un spectromètre RMN par exemple.



L'induction créée croît avec l'intensité du courant qui traverse la bobine d'après le théorème d'ampère :  $H_{fer}L_{fer} + H_{air}e = NI$  en faisant l'approximation de champ constant dans le fer et l'entrefer. ( $N = 7300$  spires). Or par définition :  $B = \mu_0 H_{air} = \mu_0 \mu_r H_{fer}$ . On en déduit :

$$B = \frac{\mu_0 NI}{e + \frac{L}{\mu_r}}$$

Or la permittivité relative  $\mu_r$  est très grande de tel sorte qu'en première approximation  $\frac{L}{\mu_r}$  est négligeable devant  $e$  et ainsi  $B$  dans l'entrefer est proportionnel à  $I$  et inversement proportionnelle à  $e$ .

### Caractéristique $B=f(I)$ de l'électroaimant

⚡ [DUFFAIT]

⌚ 5 mins

On utilise un électroaimant avec des pièces magnétiques cylindriques (p66.30) et on mesure les champs avec un teslamètre HIRST (p64.34) muni d'une sonde à effet Hall transverse d'une précision constructeur de 1%. Pour un entrefer donné on mesure  $B=f(I)$ , on vérifie la linéarité et on compare à la pente théorique. Pour un entrefer trop petit on observe la saturation du milieu ferromagnétique à fort intensité du courant.

### Caractéristique $B=f(\frac{1}{e})$ de l'électroaimant

⚡ [DUFFAIT]

⌚ 5 mins

On reprend le même matériels que précédemment mais cette fois pour une intensité du courant donnée, on mesure  $B=f(\frac{1}{e})$  et on vérifie la linéarité

Le champ produit par des électroaimants est limité par 3 phénomènes :

- ★ Comme précédemment il y a échauffement des bobines par effet Joule. Cependant on peut contourner ce problème avec un système de refroidissement (ventilation, azote liquide etc...) et/ou des bobines supraconductrices.
- ★ Les forces de Laplace agissant sur les bobines elles-même peuvent les détruire.
- ★ Le milieu ferromagnétique peut atteindre sa saturation magnétique ce qui limite le champ magnétique dans l'entrefer.

**ODG**  $B \approx 1$  à 100 T pour les électroaimant à bobinage.

 Nous venons de voir les principales techniques de production de champ que nous avons caractérisées à l'aide de teslamètres commerciaux dont nous n'avons pas discuté le principe de fonctionnement. Dans cette seconde partie nous allons aborder le principe de fonctionnement de deux appareils de mesure de champ : le fluxmètre et la sonde à effet Hall.

## 2 Mesure de champs magnétiques

### 2.1 Fluxmètre électronique

⚡ [TAILLET][DUFFAIT]

Cette technique de mesure utilise le phénomène d'induction : une sonde (bobine plate de surface  $nS$  connue) est déplacée d'une région de champ nul (au champ magnétique terrestre près) jusque dans une région où règne un champ  $B$  (ou inversement). Elle subit donc une succession de variation élémentaire de flux magnétique,  $\Delta\phi = \Delta B nS$ . Cette variation génère une force électromotrice induite donnée par la loi de Faraday :  $e = -\frac{d\phi}{dt}$ . On peut alors utiliser un circuit intégrateur à AO pour obtenir la variation de flux total :  $V_S = -\frac{1}{RC} \int V_e dt = \frac{\Delta\phi}{RC}$ . On a donc finalement :

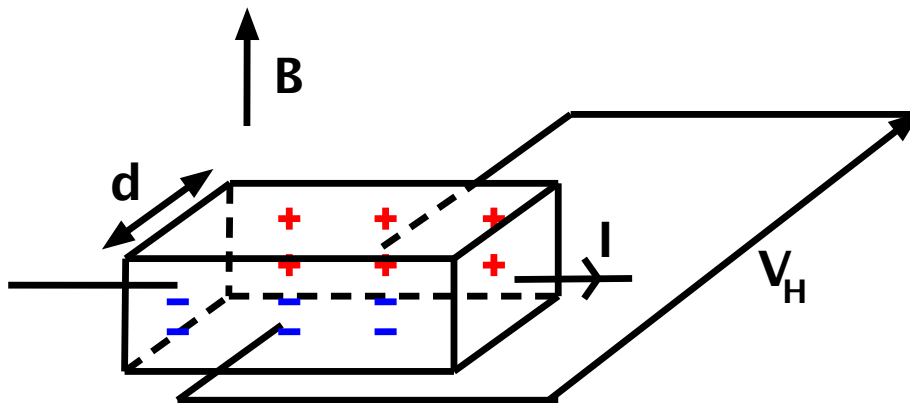
$$B = \frac{RCV_S}{nS}$$

### Mesure de champ magnétique absolue au fluxmètre électronique

⚡ [DUFFAIT]

⌚ 5 mins

On fait la mesure d'un champ magnétique produit par l'électroaimant calibré précédemment et on discute du caractère absolu de la mesure (pas de courbe d'étalonnage). La mesure peut être faite avec Latis-Pro ou un oscilloscope avec un temps de balayage grand.



## 2.2 Teslamètre à effet Hall

Cet appareil de mesure est basé sur l'apparition d'une différence de potentiel électrique, notée  $V_H$  dans un conducteur parcouru par un courant  $I$  en présence d'un champ magnétique  $\vec{B}$  perpendiculaire à la direction du courant. Ce phénomène est dû au fait que les porteurs de charge subissent une force de Lorentz qui les pousse dans la direction du vecteur  $\vec{j} \times \vec{B}$  les faisant s'accumuler sur les bords du conducteur jusqu'à ce que le champ  $\vec{E}_H$  ainsi créé compense la force de Lorentz. En régime permanent les trajectoires des porteurs de charge sont parallèles à la direction de  $I$  et la force magnétique est exactement opposée à la force électrique due au champ de Hall :

$$F_E = nqE_H = nq \frac{V_H}{d} \quad n : \text{étant la densité de porteur } (7 \times 10^{-20})$$

$$F_B = JB = \frac{IB}{de} \quad q : \text{charge des porteurs de charge } (1,6 \times 10^{-19})$$

$$\text{On en déduit que } \Rightarrow B = \frac{nqe}{I} V_H$$



### Caractéristique $B=f(V_H)$ d'une sonde à effet Hall



⌚ 5 mins

On utilise la sonde à effet Hall didactique en germanium (p64.27) qui l'on alimente en courant de 30 mA avec une alimentation de courant continue 0..30V/0..3A (p53.17) au travers d'une résistance de 900  $\Omega$ . On mesure la tension Hall avec un voltmètre d'une précision de 0.1% + 1. On utilise le champ produit par l'électroaimant calibrer précédemment. On mesure la caractéristique  $B=f(V_H)$  et on vérifie l'accord avec le modèle théorique.

## Conclusion

Pendant ce montage nous avons donc vu, dans une première partie, trois techniques de production de champs magnétiques. Tout d'abord nous avons vu les aimants permanents qui permettent de créer des champs permanents mais peut intense et difficilement contrôlable. Puis nous avons vu les bobines qui permettent de créer des champs contrôlables mais peu intense mais sur une grande région de l'espace. Enfin nous avons vu les électroaimants qui permettent de produire des champs contrôlables, intense mais sur une petite zone de l'espace. Dans une seconde partie nous nous sommes intéressés à deux techniques de mesure de champs magnétiques. D'abord une technique de mesure absolue : le fluxmètre basé sur le phénomène d'induction. Finalement la sonde à effet Hall basée sur l'effet du même nom.