

## MP15 – Production et mesure de champs magnétiques

Sandrine Guerraz et Emmanuel Guillaud

8 février 2013

### Références

- [1] P. BRENDERS, L. DOUCHET et M. SAUZEUX, *Electrotechnique : conversion de puissance*, PSI, Bréal (2004).
- [2] L. QUARANTA et J.M. DONNINI, *Dictionnaire de Physique Expérimentale, tome 4 : électricité et applications*, Pierron (2004).
- [3] C. GARING, *Magnétisme : statique, induction et milieux*, Ellipses (1999).
- [4] J. PEREZ et al., *Physique MP15 - PCSI PTSI (collection Cap prépa)*, Pearson Education (2009).

### Remarques issues des rapports de jury

- « 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. » (2012)
- « Cette année, l'utilisation de la sonde à effet Hall a été mieux maîtrisée et les expériences présentées plus variées. » (2011)
- « 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... » (2010)
- « La sonde à effet Hall est souvent le seul instrument de mesure présenté dans ce montage. Trop de candidats ignorent son principe de fonctionnement. » (2009)
- « Il est nécessaire de bien maîtriser le montage de la sonde à effet Hall et pour cela connaître son principe de fonctionnement. » (2008)
- « La maîtrise du montage de la sonde de Hall et une connaissance sommaire de son principe de fonctionnement sont indispensables. » (2007)
- « L'ordre de grandeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre être connu. Il en est de même de l'existence d'un décalage systématique du zéro d'une sonde à effet Hall également. » (2005)

### Table des matières

|       |                                  |   |
|-------|----------------------------------|---|
| 1     | Production de champs magnétiques | 2 |
| 1.1   | Champs fixes                     | 2 |
| 1.1.1 | Aimant permanent                 | 2 |
| 1.1.2 | Bobine                           | 3 |
| 1.1.3 | Electroaimant [2] (p. 171)       | 3 |
| 1.2   | Champs tournants [1, 2]          | 5 |
| 2     | Mesure de champs magnétiques     | 7 |
| 2.1   | Sonde à effet Hall               | 7 |
| 2.2   | Fluxmètre                        | 9 |

## Plan du montage

### Introduction

Sur Terre, il règne un champ magnétique terrestre qui serait engendré par la présence d'un noyau métallique au centre de la Terre. En France, la composante horizontale de ce champ magnétique est de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-5}$  T. De plus, ce champ magnétique peut être utilisé pour s'orienter dans l'espace avec une boussole. En effet, une boussole est constituée d'une petite aiguille aimantée qui s'oriente le long d'une ligne de champ du champ magnétique terrestre, indiquant ainsi la direction des pôles magnétiques. Par convention, on appelle pôle nord magnétique de la boussole l'extrémité qui pointe vers le Nord géographique.

Expérience. Détermination du Nord avec la boussole.

Remarque. En fait, il existe un angle de  $11,5^\circ$  entre le pôle magnétique et le pôle géographique.

Historiquement, les boussoles étaient utilisées en navigation, dans l'armée... Elles tendent aujourd'hui à être remplacées par le GPS. A travers cette application, on voit toute l'importance de connaître les notions relatives au champ magnétique et dans ce montage nous verrons tout d'abord comment produire un champ magnétique puis quelles sont les méthodes de mesure de ce champ.

## 1 Production de champs magnétiques

### 1.1 Champs fixes

#### 1.1.1 Aimant permanent

L'utilisation d'aimants permanents est une première méthode pour produire un champ magnétique.

Expérience. On pose un aimant droit sur une plaquette composée de petites aiguilles en réseau (projeter avec le rétro).

Expérience. Idem avec un aimant en U.

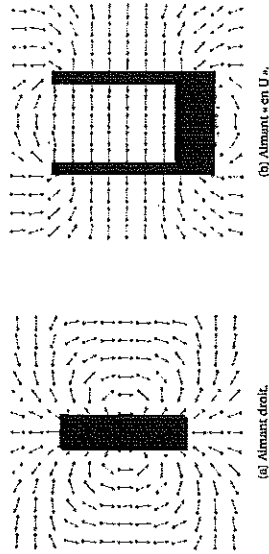


Figure 1. Observation de l'allure des lignes de champ du champ magnétique créée par deux aimants permanents.

Les différentes aiguilles s'orientent suivant les lignes du champ magnétique (cf. fig. 1).

Expérience. Mesure du champ au teslamètre.

On trouve  $B_{\text{aimant}} \approx 5$  mT. L'ordre de grandeur typique des champs créés par des aimants permanents est de  $10^{-3}$  à  $10^{-1}$  T.

## 1.1.2 Bobine

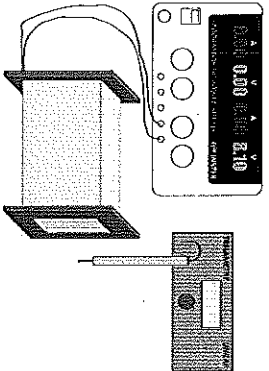


Figure 2. Bobine alimentée en courant continu.

**Expérience.** Pour  $I = 0$  et  $I \neq 0$ , mesure de  $B$  au testamètre UniLab.  
(bobine de 1000 spires,  $L = 47,81$  mH,  $R = 8,75$   $\Omega$ )

On trouve :  $B_{I=0} = 0$  T et  $B_{I \neq 0} = 27$  mT. On peut créer un champ  $\vec{B}$  grâce à un courant.

**Expérience.** Même l que précédemment, ajout d'un noyau de fer doux dans la bobine et mesure de  $B$ .  
Bremte  $\approx 19$  mT,  $B_{\text{sat}} \approx 11$  mT. On constate que le champ mesuré à la sortie du noyau est plus intense alors que légèrement au dessus, il est plus faible : il y a eu canalisation des lignes de champs.

Nous allons maintenant voir comment mettre à profit ce système de canalisation des lignes de champ pour créer des champs  $B$  localisés intenses.

### 1.1.3 Electroaimant [2] (p. 171)

Afin de comprendre le fonctionnement d'un électroaimant, nous avons monté un électroaimant « maison ». Pour cela, deux bobines de 1000 spires sont placées sur un noyau en U en fer doux, puis deux noyaux tronconiques en fer doux sont fixés au sommet afin d'assurer une bonne canalisation des lignes de champ. On note  $e$  l'entrefer de l'électroaimant. N le nombre total de spires,  $L$  la longueur du noyau,  $S$  la section du noyau,  $s$  la section au niveau de l'entrefer et l'intensité.

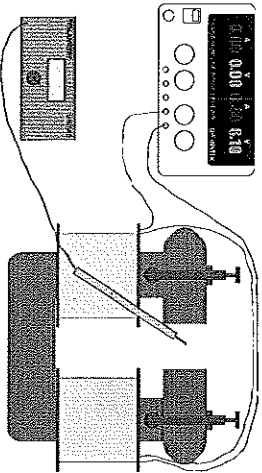


Figure 3. Electroaimant rudimentaire.

Par conservation du flux magnétique ( $\text{div}(\vec{B}) = 0$ ), soit  $B_{\text{int}}$  le champ à l'intérieur du noyau et  $B_{\text{ext}} = B$  le champ dans l'entrefer, il vient :  $B_{\text{int}} \cdot S = B_{\text{ext}} \cdot s$ .

En appliquant le théorème d'Ampère, on trouve :  $H_{\text{int}} \cdot L + H_{\text{ext}} \cdot e = N \cdot I$ .

On suppose que la perméabilité magnétique relative  $\mu_r$  est constante, d'où :  $B_{\text{int}} = \mu_0 \mu_r H_{\text{int}}$ . De plus, l'air dans l'entrefer est assimilé au vide d'où  $B = \mu_0 H_{\text{ext}}$ .

En réinjectant dans l'équation :

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{B \cdot s}{S} \cdot L + \frac{B}{\mu_0} \cdot e = N \cdot I,$$

soit :

$$B = \frac{\mu_0 N \cdot I}{e + \frac{L \cdot S}{\mu_r \cdot s}}.$$

Pour un entrefer suffisamment grand (cette condition est généralement respectée), on obtient finalement :

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{e}.$$

(1)

**Expérience.**  $NI = 0,50$  A fixé, on mesure avec le testamètre UniLab l'évolution de  $B$  suivant la longueur de l'entrefer. Pour éviter une erreur systématique lors de la mesure du champ, on mesure  $B_+$  et  $B_-$  en inversant les bornes de l'alimentation et on fait une moyenne de ces deux valeurs.

On trace  $B = f(1/e)$  (cf. fig. 4).

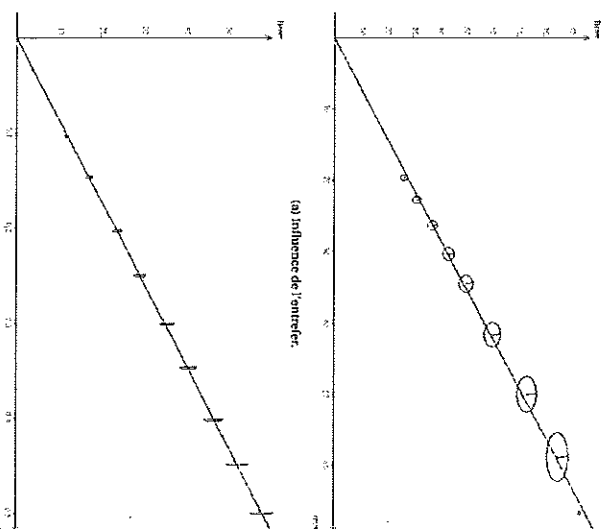


Figure 4. Evolution du champ magnétique en fonction de l'intensité traversant l'électroaimant et de l'entrefer.

La régression permet de remonter à  $\mu_0$ , on obtient  $\mu_0 = 1,536 \cdot 10^{-6} \pm 0,013 \cdot 10^{-6}$  H.m<sup>-1</sup> or,  $\mu_0^{\text{théorique}} = 1,257 \cdot 10^{-6}$  H.m<sup>-1</sup>. On trouve une valeur du bon ordre de grandeur mais la valeur théorique n'est pas dans nos bornes d'erreur. Les pertes de flux magnétique auraient plutôt tendance à nous conduire à une valeur plus faible que la valeur théorique. Peut être que l'une des bobines est endommagée, diminuant ainsi le nombre  $N$  de spires.

**Expérience.**  $A = 2,5$  cm fixé, on mesure au testmètre Unilab l'évolution de  $B$  avec  $I$ . On fait là encore la moyenne de  $B_x$  et  $B_y$ .

On trouve bien une loi linéaire entre  $B$  et  $I$ ,  $B = a \cdot I$  avec  $a = 117,5 \pm 0,57 \cdot A^{-1}$ . On peut aussi remonter à  $\mu_0$ . On obtient :  $\mu_0 = 1,468 \cdot 10^{-6} \pm 0,059 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ . Là encore, la valeur théorique n'est pas dans les barres d'erreur. Par contre, les deux valeurs que nous avons obtenues sont très proches et donc cohérentes.

Un électroaimant de laboratoire ressemble en fait à ceux de la figure 5.

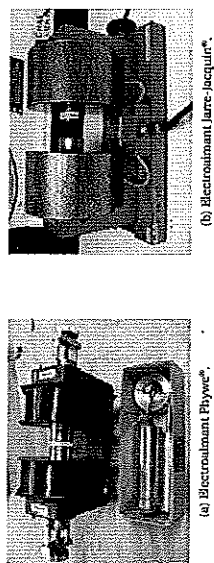


Figure 5. Electroaimants de laboratoire. On reconnaît la carcasse et les bobinages (masqués sur le modèle de droite) (© Base de données de la collection de Physique de l'ENSL - <http://perso.ens-lyon.fr/benoit.capitaine/job/BDD/>).

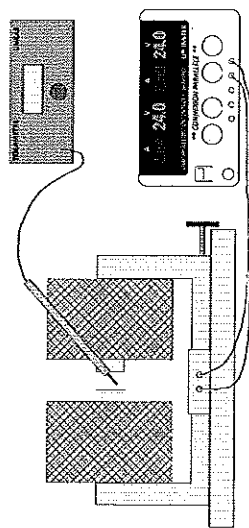


Figure 6. Montage pour l'alimentation de l'électroaimant de laboratoire. Pour pouvoir alimenter l'électroaimant jusqu'à 6 A, bien penser à mettre les deux alimentations de l'alimentation double en parallèle via les boutons sur la façade (ou éventuellement en faisant la liaison à la main avec des fils si vous voulez vous compliquer la vie !...). Dans ce cas, il faut impérativement se brancher sur le bloc maître et non esclave.

## 1.2 Champs tournants [1, 2]

### Matériel.

Aimant en U : aimant en U, potence, noix, pince, aiguille aimantée sur axe.

Champ triphasé : aiguille articulée réglable, alternostat triphasé, bouton « coup-de-poing », 3 bobines identiques (1000 spires,  $L = 47,81 \text{ mH}$ ,  $R = 8,75 \Omega$ ) avec noyaux, stroboscope.  
Champ monophasé : G.B.F., amplificateur H.F. (HSA 4011), aiguille aimantée sur axe, deux bobines identiques (5000 spires, 0,6 A) avec noyaux, deux capacités chimiques de 47  $\mu\text{F}$  montées en série et de polarités inversées l'une par rapport à l'autre, oscilloscope avec sondes.

On vient de voir comment créer des champs permanents. Mais dans la pratique, la grosse application des champs magnétiques, c'est les machines tournantes, les moteurs. Le but n'est pas ici de voir comment fabriquer un moteur, cela nous emmènerait trop loin, mais voir qualitativement comment créer un champ magnétique tournant à l'aide de dispositifs simples. Pour visualiser la rotation, on va placer une petite aiguille aimantée dans les lignes de champ.

**Définition.** On appelle champ magnétique tournant un champ de norme constante dont la direction varie dans un plan avec une vitesse angulaire  $\omega$  constante, soit :

$$\vec{B} = B_0 \cdot \left( \cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x + \sin(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_y \right). \quad (2)$$

où  $\omega$  représente la pulsation du champ tournant.

Commençons par une technique assez naïve. Si on place l'aiguille dans l'entrefer d'un aimant « en U », elle s'aligne suivant l'axe de ce dernier. On pourra donc créer un champ tournant simplement en faisant tourner l'aimant.

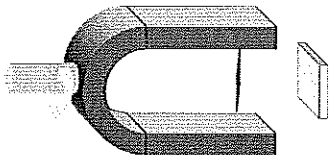


Figure 7. Champ tournant créé par la rotation d'un aimant « en U ».

Néanmoins, cette technique n'a pas vraiment d'intérêt pour créer un moteur puisqu'elle nécessite elle-même l'utilisation d'un moteur pour créer le champ.

Dans l'industrie, on va utiliser mettre à profit le réseau triphasé EDF. On considère trois bobines identiques disposées en étoile et alimentées par les trois phases du réseau EDF.

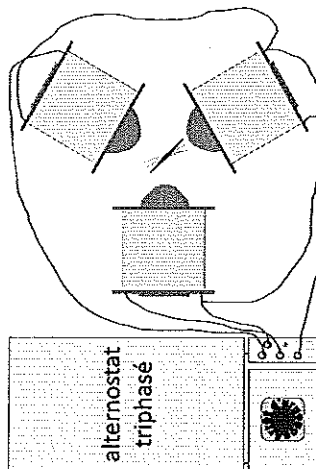


Figure 8. Champ tournant triphasé.

On peut montrer que le champ créé est un champ tournant. Attention ! Ce n'est vrai qu'à l'intersection des axes des trois bobines, c'est pourquoi ce dispositif n'est pas un vrai moteur synchrone. En effet, sur leurs axes respectif, les bobines créent un champ :

$$\begin{aligned} \vec{B}_1 &= k \cdot i_1 \cdot \vec{u}_1 = k \cdot I \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x \\ \vec{B}_2 &= k \cdot i_2 \cdot \vec{u}_2 = k \cdot I \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot \vec{e}_x + \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot \vec{e}_y\right) \\ \vec{B}_3 &= k \cdot i_3 \cdot \vec{u}_3 = k \cdot I \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \left(\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \cdot \vec{e}_x + \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \cdot \vec{e}_y\right). \end{aligned}$$

d'où, tous calculs faits (cf. page 184 [1]), à l'intersection des trois axes :

$$\vec{B} = \frac{3 \cdot k \cdot I}{2} \cdot (\cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x + \sin(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_y). \quad \blacksquare \quad (3)$$

On a effectivement affaire à un champ tournant. On peut par ailleurs mesurer la fréquence de rotation au stroboscope. On trouve 50 Hz, la fréquence du signal électrique : c'est le théorème de Ferraris.

Cependant, cette méthode n'est pas encore pleinement satisfaisante. A la maison, on ne dispose que d'une seule phase. Pourtant, on dispose de moteurs (a) synchrones (dans les machines à laver par exemple). Est-il possible de créer un champ tournant avec une seule phase ? C'est ce que nous allons voir avant de passer à la seconde partie de l'exposé. Intéressons-nous au champ créé par une seule bobine sur son axe.

$$\begin{aligned} \vec{B} &= k \cdot I \cdot \vec{e}_x = k \cdot I \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x \\ &= \frac{k \cdot I}{2} \cdot (\cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x + \sin(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_y) + \frac{k \cdot I}{2} \cdot (\cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x - \sin(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_y). \end{aligned}$$

Le champ se décompose comme la somme de deux champs tournants à la même vitesse angulaire  $\omega$  mais dans des sens opposés (théorème de Loblanc). Si on fait le montage, on remarque que l'aiguille de tourne pas spontanément. Il faut la lancer à la main pour l'accrocher à l'un des deux champs tournants. En revanche, on peut la faire tourner indifféremment dans un sens ou dans l'autre.

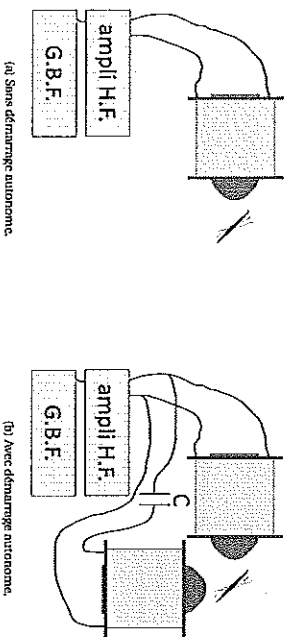


Figure 9. Champ tournant monophasé avec ou sans démarrage autonome.

Du coup, ça n'est pas pratique : il faut lancer le tambour de la machine à laver à la main pour qu'il tourne... on risque se mouiller les pieds. On peut y remédier en créant simultanément un champ biphasé. Au croisement des axes, on a :

$$\begin{aligned} \vec{B} &= k \cdot I \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x + k \cdot I \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \vec{e}_y \\ &= k \cdot I \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x - k \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_y. \end{aligned}$$

On obtient un champ tournant unique. Il permet donc de lancer l'aiguille aimantée (à basse fréquence). Une fois l'aiguille en mouvement, la deuxième bobine peut être retirée du circuit puisque l'aiguille tourne d'ores et déjà suivant l'un des deux champs vas précédemment. On peut montrer que pour obtenir le bon déphasage, la capacité doit vérifier :

$$C = \frac{L}{L^2 \cdot \omega^2 + R^2},$$

avec  $L$  et  $R$  l'inductance propre et la résistance interne de chacune des bobines (cf. page 183 [1]).

## 2 Mesure de champs magnétiques

### 2.1 Sonde à effet Hall

Le principe du testmètre que nous avons utilisé jusqu'à présent repose sur l'effet Hall.

Si on considère la plaque de Germanium dopée N de la sonde (cf. fig. 10), elle est soumise à un champ  $\vec{B} = B \cdot \vec{e}_z$  uniforme et est parcourue par un courant selon  $\vec{e}_x$ . Les porteurs de charges (les électrons ici) se déplacent à la vitesse  $\vec{v} = -v \cdot \vec{e}_x$  et subissent la force de Lorentz  $\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} = q \cdot v \cdot B \cdot \vec{e}_y$ , ainsi les porteurs de charges sont déviés vers la face avant de la plaque et il y a accumulation de charge, ce qui crée un champ électrique de Hall  $\vec{E}_H$ . A l'équilibre :  $q \cdot \vec{E}_H + q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} = \vec{0}$  or,  $\vec{j} = n \cdot q \cdot \vec{v}$  avec  $n$  la densité de porteurs d'où :  $\vec{E}_H = -\frac{j \wedge \vec{B}}{nq} = \frac{jB}{nq} \cdot \vec{e}_y$ . On,  $dV = -\vec{E}_H \cdot d\vec{y} \cdot \vec{e}_y$ , donc par intégration, on trouve finalement :

$$U_H = \frac{j \cdot B \cdot b}{n \cdot q} = \frac{1}{n \cdot q \cdot a} \cdot B. \quad \blacksquare \quad (4)$$

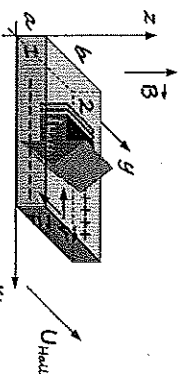


Figure 10. Principe de l'effet Hall.

**Expérience.** On réalise le montage de la figure 11, la plaquette de germanium est fixée entre les pièces polaires de l'électroaimant (l'entrefer est fixé à 3 cm), la sonde est alimentée avec un générateur de courant continu Hameg à 15 mA. On mesure l'évolution de la tension de Hall en fonction de l'intensité. On fait bien attention à mesurer  $U_H$  et  $U$ , et à faire la moyenne car les soldures de la plaque ne sont pas forcément symétriques de part et d'autre.

En préparation, on a réalisé une droite étalon qui nous donne la correspondance entre la valeur de l'intensité et le champ magnétique, on peut alors tracer directement l'évolution de  $U_H$  avec  $B$ .

$$I = 2,760 \text{ A}, U_H = -18,10 \text{ V}, U = 23,61 \text{ V}$$

La régression permet de remonter jusqu'à la densité en porteurs de charges : on trouve :  $n = (1,081 \pm 0,001) \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$ . C'est le bon ordre de grandeur attendu.

**Remarque.** On utilise le testmètre qui fonctionne selon le principe de l'effet Hall pour illustrer l'effet Hall... c'est un choix.

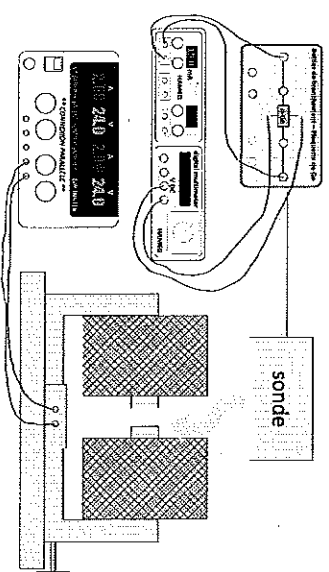


Figure 11. Enlèvement de la sonde à effet Hall : mesure de la densité de porteurs de charge.

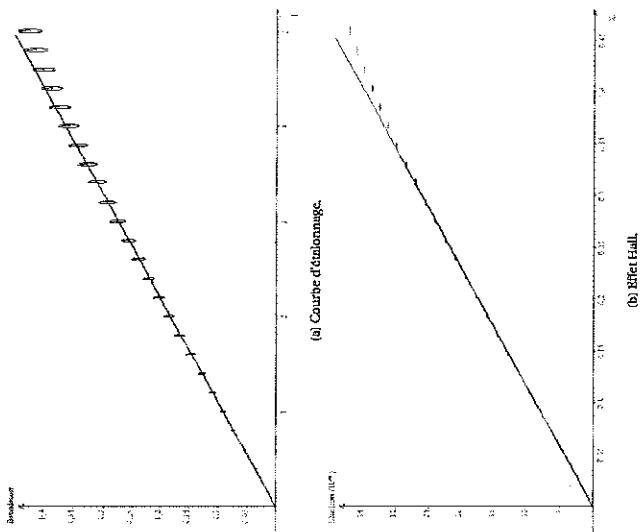


Figure 12. Mesure du champ magnétique par effet Hall.

## 2.2 Fluxmètre

Un seconde façon de mesurer un champ magnétique est d'utiliser un fluxmètre qui est une sonde constituée d'un enroulement de  $N$  spires de surface totale  $S = N \cdot S_{\text{spire}}$ . Pour un intégrateur,  $V_s = \frac{1}{RC} \cdot \int e(t) \cdot dt$ . De plus, la loi de Faraday donne :  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ , soit finalement :

$$V_s = \frac{\Delta\Phi}{R \cdot C} = \frac{S \cdot B}{R \cdot C} \quad (5)$$

Le fluxmètre est donc sensible à une variation de flux magnétique.

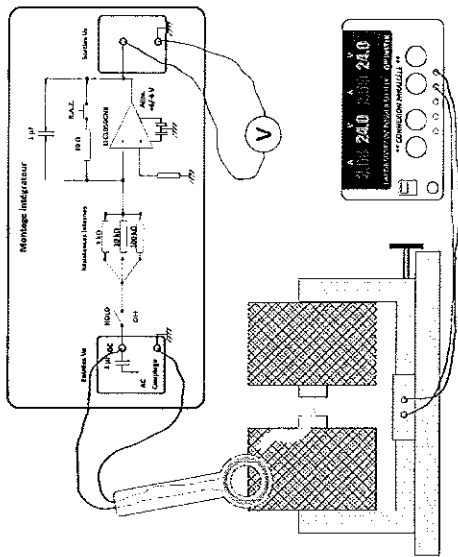


Figure 13. Mesure du flux magnétique lors de la mise sous tension de l'électroaimant.

**Expérience.** On règle l'offset de l'A.O. à 0, on mesure la tension très rapidement et on en déduit la valeur du champ.

$R = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $S = 430 \text{ cm}^2$ ,  $V_s = 92 \text{ mV}$  d'où  $B = 214 \text{ mT}$ .

**Remarque.** On a volontairement pris la boîte avec l'intégrateur tout fait car sa dérive temporelle est vraiment plus lente qu'avec un intégrateur classique. Cependant, il faut faire attention, cet AO sature à  $\pm 6 \text{ V}$ .

**Expérience.** Comparaison avec une mesure au teslamètre.

$B = 241 \text{ mT}$ . On trouve une valeur supérieure à celle mesurée au fluxmètre. En effet, le teslamètre mesure un champ local alors que le fluxmètre mesure un champ moyen.

## Conclusion

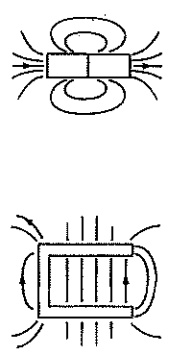
On a vu différentes méthodes pour créer et mesurer des champs magnétiques. On a notamment évoqué leur rôle majeur dans les moteurs, ce qui nécessite une bonne maîtrise de ces champs. Aujourd'hui, ils ont des applications encore plus cruciales, par exemple en médecine avec l'IRM.

# MP 15 - Production et mesure de champs magnétiques

## 1) Production des champs magnétiques

### a) Champs fixes

Aimant permanent



Solénoïde  $U = mT$

Bobine

$$= A \Rightarrow B \approx mT$$

$$= A \Rightarrow B \approx mT$$

Avec noyau de fer doux

$$B_{\text{cœur}} \approx mT$$

$$B_{\text{ext}} \approx mT$$

→ canalisation des lignes de champ

Electroaimant

$$B \approx \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{e}$$

$N = 2000$  spires  
 $e = \text{entrefer}$   
 $\mu_0 \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

$$e = 2,5 \text{ cm} \quad I = 0,5 \text{ A}$$

$$B_+ = mT \quad B_- = mT$$

$$* B = f(I)$$

$$\Rightarrow \mu_0 \approx (\pm) \quad H \cdot \text{m}^{-1}$$

$$* B = f(I)$$

$$\Rightarrow \mu_0 \approx (\pm) \quad H \cdot \text{m}^{-1}$$

### 2) Champs tournants

Un champ magnétique tournant :

$$\vec{B} = B_0 \cdot (\cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x + \sin(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_y)$$

$\omega$  : vitesse angulaire

Aimant en U

Champ tournant triphasé

$$\vec{B} = \frac{3 \cdot k \cdot I}{2} \cdot (\cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x + \sin(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_y)$$

Fréquence de rotation :  $f = \text{Hz}$

Champ tournant monophasé

$$* \vec{B} = \frac{k \cdot I}{2} \cdot (\cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x + \sin(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_y)$$

$$+ \frac{k \cdot I}{2} \cdot (\cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x - \sin(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_y)$$

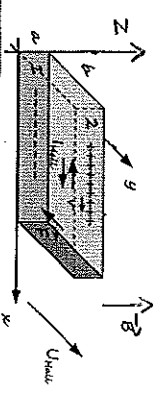
→ somme de 2 champs tournants à  $\omega$  mais de sens opposés

\* Champ transitoirement biphase

$$\vec{B} = k \cdot I \cdot (\cos(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_x - \sin(\omega \cdot t) \cdot \vec{e}_y)$$

## 1) Mesure de champs magnétiques

### a) Sonde à effet Hall



$$U_H = \frac{i \cdot B}{n \cdot q \cdot a}$$

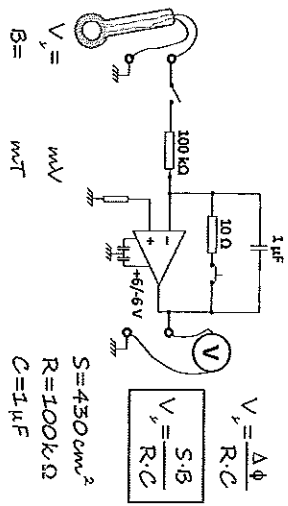
$n$  : densité de porteurs de charge

$$e = 3 \text{ cm} \quad I = \text{A} \quad U = \text{mV}$$

$$i = 15 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow n = \pm \text{ m}^{-3}$$

### 2) Fluxmètre



$$V_y = \frac{\Delta \Phi}{R \cdot C}$$

$$V_y = \frac{S \cdot B}{R \cdot C}$$

$$S = 450 \text{ cm}^2$$

$$R = 100 \text{ k}\Omega$$

$$C = 1 \mu\text{F}$$

$$V_y = \text{mV}$$

$$B = \text{mT}$$