

MP15 Production et mesure de champs magnétiques

Stéphanie Lockhart, Typhaine Déchelette

06/02/2014

Bibliographie

- [1] J.M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de la physique expérimentale : Tome 4, Electricité et applications*. Ed. Pierron, 2004.
- [2] R. Duffait. *Capes de sciences physiques : Expériences de physique*. Bréal, 2008.
- [3] C. Garing. *Magnétisme : statique, induction et milieux*. Ellipses, 1999.

Rapports de jurys

- 2013** : 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, 2010** : 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.

Table des matières

1	Production de champs magnétiques	1
1.1	Champs fixes	1
1.2	Champs tournants [1, p. 106]	5
2	Mesures de champs magnétiques	6
2.1	Sonde à effet Hall	6
2.2	Fluxmètre [2, p. 85]	7

Introduction

Le champ magnétique est une grandeur vectorielle se mesurant en Tesla dans laquelle nous sommes constamment plongés puisque la Terre peut être considérée comme un aimant permanent. La composante horizontale du champ magnétique terrestre est de l'ordre de $B_H \approx 2.10^{-5}T$.

Objectif du montage : Comprendre les différentes manières de produire des champs magnétiques et les ordres de grandeur associés. Comprendre le fonctionnement des appareils de mesure du champ magnétique.

1 Production de champs magnétiques

1.1 Champs fixes

1.1.1 Aimant permanent

Intéressons-nous d'abord aux aimants qui nous sont les plus familiers.

Expérience : Champ créé par des aimants permanents

1. Poser un aimant droit puis un aimant en U sur des plaquettes à aiguilles. Celles-ci s'orientent dans le sens des lignes de champ.
2. Observer l'allure des lignes de champ en les projetant au rétroprojecteur : direction et sens du champ B (cf. figure 1).
3. Mesurer la valeur du champ créé au teslamètre. $B_{droit} = \dots mT$, $B_U = \dots mT$, $B_{fort} = \dots mT$.

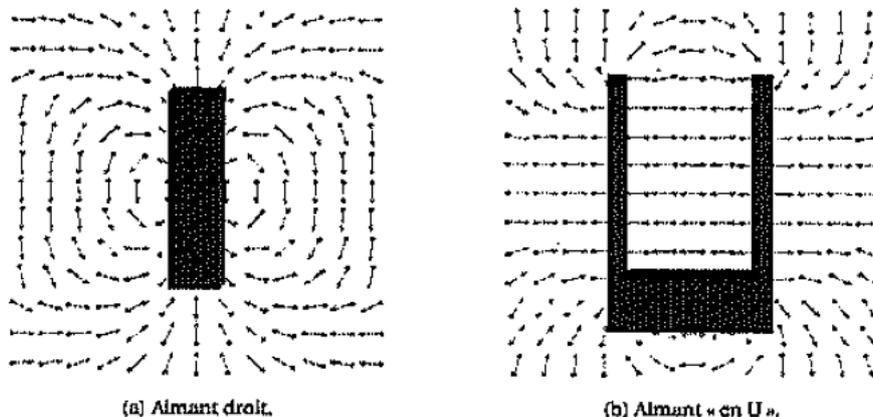


FIGURE 1 – Allure des lignes de champ magnétique créées par deux aimants permanents

L'ordre de grandeur typique du champ créé par des aimants permanents est de $20mT$. Il en existe des plus forts dont le champ peut aller jusqu'à quelques dixièmes de Tesla (oxydes de fer ou métaux de transition).

Transition : limite de l'aimant droit : sa valeur est fixée, pas modifiable, difficile de contrôler le champ obtenu. Autant ces matériaux sont connus depuis longtemps pour leur propriétés particulières, autant il a fallu attendre 1820 pour qu'on découvre qu'un courant dans un fil créait un champ (cf. manip d'Oersted). Comment qualifier le champ créé par un fil enroulé sur lui-même ? deux modélisations sont possibles : la spire et le solénoïde infini. ici, nous faisons le choix de nous intéresser à la spire : comment cartographier le vecteur champ : sa direction et son amplitude.

1.1.2 Bobine plate

Un champ magnétique peut également être créé par une bobine parcourue par un courant. Intéressons-nous à l'allure du champ sur l'axe de la bobine. On veut vérifier la loi de Biot et Savart :

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2} \frac{R^2}{(d^2 + R^2)^{3/2}} \quad (1)$$

où N désigne le nombre de spires, ici $N = 95$, I l'intensité du courant, ici $I = 4,0A$, R le rayon d'une spire, ici $R = 6,5cm$ et d la distance au centre de la bobine.

Expérience [2, p.89] : Champ sur l'axe créé par une bobine plate

1. La sonde de Hall est placée sur l'axe de la bobine et on relève point par point le champ créé à la distance d du centre afin de tracer $B = f(d)$.
2. On fait un ajustement avec la courbe théorique, de la forme $B - B_o = \frac{\mu_0 N I}{2} \frac{R^2}{[(d-d_o)^2 + R^2]^{3/2}}$ et on discute les valeurs de B_o et d_o qui traduisent des offsets dûs aux erreurs systématiques.

Exploitation La courbe obtenue est présentée figure 2. On vérifie bien que le champ sur l'axe est maximal au centre de la bobine. La loi de Biot permet donc bien de prévoir le phénomène. Toutefois, cela reste valable pour un petit nombre de spires (au-delà, il faut modéliser par un solénoïde).

Transition : Le champ créé par cette bobine reste cependant peu intense et décroît très vite en s'éloignant de son centre. Pour produire des champs plus intenses, nous allons chercher à canaliser les lignes de champ.

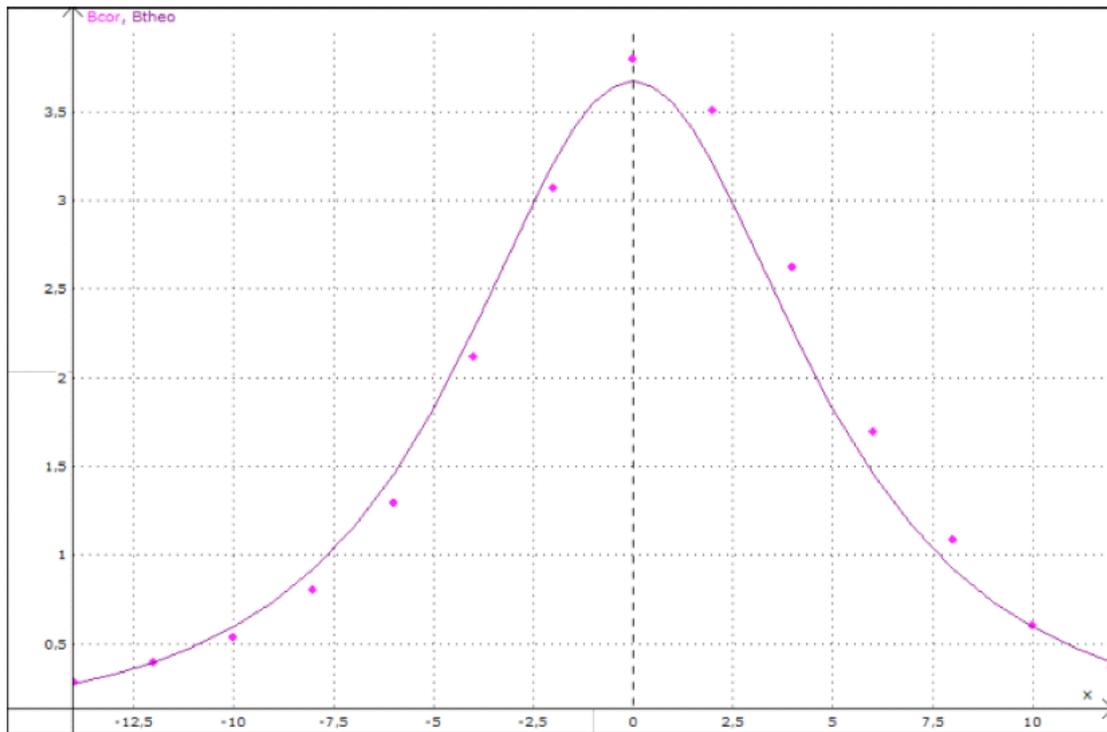


FIGURE 2 – Champ mesuré sur l'axe de la bobine (points) et courbe théorique attendue

1.1.3 Electroaimant

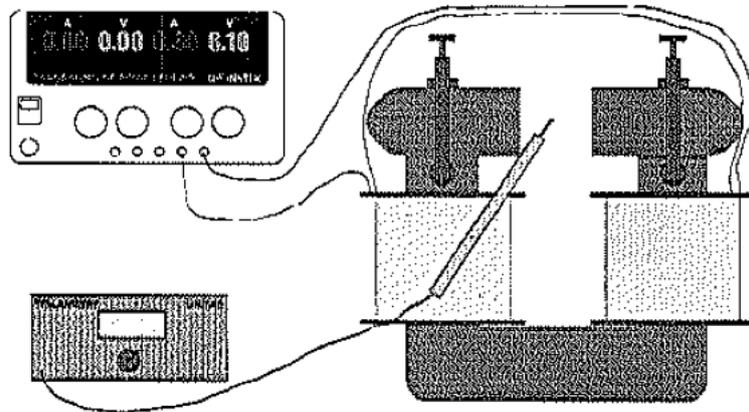


FIGURE 3 – Constitution d'un électroaimant : deux bobines identiques sont montées sur un noyau de fer doux en U, surmonté de deux pièces tronconiques de fer doux. Cela assure la canalisation des lignes de champ.

On crée un champ magnétique plus intense, à courant comparable, grâce à un électroaimant. On fait passer un courant continu dans les deux bobines qui le constituent. Si la largeur de l'entrefer est assez faible devant ses dimensions transversales, les lignes de champ sont à peu près parallèles et équidistantes, le champ magnétique est alors constant sur presque tout le volume de l'entrefer. Sur les bords, les lignes de champ s'épanouissent et le champ est moins homogène.

Expérience : Principe de fonctionnement On monte un électroaimant "maison" : deux bobines de 1000 spires sont placées sur un noyau de fer doux en U, puis deux noyaux tronconiques de fer doux sont fixés au sommet pour assurer une bonne canalisation des lignes de champ.

On peut prévoir l'ordre de grandeur de B connaissant le courant I dans les bobines, le nombre de spires N et la largeur de l'entrefer e . On applique le théorème d'Ampère le long d'une ligne de champ (celles-ci sont en effet canalisées dans le matériau et équidistantes)

$$H_{fer}.L + H_{air}.e = NI \quad (2)$$

et on utilise les relations entre B et H dans l'entrefer et dans le matériau :

$$B = \mu_0 H_{air} = \mu_0 \mu_r H_{fer} \quad (3)$$

On obtient donc :

$$B = \frac{\mu_0 NI}{e + \frac{L}{\mu_r}} \quad (4)$$

La perméabilité relative μ_r du matériau est en général très grande (> 100) de sorte que $L/\mu_r \ll e$. Avec cette approximation, le champ est proportionnel au courant I qui traverse les bobines (pour des petites valeurs de I telles que le matériau garde un comportement linéaire) et inversement proportionnel à la largeur e de l'entrefer :

$$B \approx \frac{\mu_0 NI}{e} \quad (5)$$

Expérience : Champ créé par l'électroaimant

1. A e fixé, on mesure les valeurs du champ créé par l'électroaimant en faisant varier I mesuré à l'ampèremètre. On fait une première série de mesures B_+ puis une deuxième B_- en inversant le sens du courant (au niveau du branchement) et en faisant varier I de la même façon.
2. A I fixé, on mesure les valeurs du champ créé par l'électroaimant en faisant varier e , mesuré au pied à coulisse. On fait une première série de mesures B_+ avec la sonde dans une position puis on la retourne et on fait une deuxième série de mesures B_- .

Taille de l'entrefer : Pour mesurer la taille e de l'entrefer, on mesure la distance d entre les deux bobines de l'électroaimant et on retranche l'épaisseur des deux pièces tronconiques $E = 2,60 \pm 0,05cm$:

$$e = d - 2E = 1,88cm$$

La distance d est mesurée avec une incertitude plus grande que celle donnée simplement par le pied à coulisse puisque suivant la position d'où l'on prend la mesure, on obtient des valeurs de d différentes. On évalue ainsi l'incertitude sur d à $\sigma_d = 0,2cm$. L'incertitude sur la taille e de l'entrefer vaut donc :

$$\sigma_e = \sqrt{\left(\frac{\partial e}{\partial d} \sigma_d\right)^2 + \left(\frac{\partial e}{\partial E} \sigma_E\right)^2} = \sqrt{\sigma_d^2 + 4\sigma_E^2} = 0,22cm. \quad (6)$$

Exploitation : On trace $B = f(I)$ et $B = f(1/e)$ et on effectue une régression linéaire. On trouve, pour $N = 2300$ spires, en préparation :

$$B = aI + b \text{ où } a = (143 \pm 2).10^{-3} H/m^2 \text{ et } b = -0,84.10^{-3} T \\ \Rightarrow e = 2,02 \pm 0.03cm$$

On remonte à une valeur d'entrefer comparable à 7% près à la valeur que nous avons mesurée à la main. Le modèle choisi permet de rendre compte en première approximation des observations puisqu'on retrouve le bon ordre de grandeur. Néanmoins, la valeur mesurée n'est pas dans les barres d'erreur de la valeur calculée. Il faut en effet bien voir que l'on a fait une modélisation linéaire qui est une approximation, valable seulement pour des valeurs d'intensité, donc de champ pas trop grandes. Il n'est pas certain qu'en allant jusqu'à 1A on reste dans ce domaine de validité.

Transition : Nous avons vu comment créer des champs permanents mais une application importante des champs magnétiques est la machine tournante, c'est-à-dire le moteur. Nous allons seulement nous intéresser ici à la manière de créer des champs tournants à partir de dispositifs simples.

1.2 Champs tournants [1, p. 106]

Définition : Un champ tournant est représenté par un vecteur \vec{B} de module constant et dont l'angle par rapport à une direction fixe est donné par ωt :

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t)\vec{u}_x + B_0 \sin(\omega t)\vec{u}_y \quad (7)$$

Ces champs sont le plus souvent créés par des bobines alimentées en courant alternatif occupant une position fixe dans l'espace. La vitesse angulaire ω est alors définie à partir de la fréquence du courant qui alimente les bobines.

En principe, on peut créer un tel champ avec du courant triphasé. Dans nos maisons, on ne dispose que de courant monophasé et pourtant, la machine à laver tourne! On illustre le principe de telles machines grâce à un dispositif qui permet la mise en rotation d'une aiguille aimantée : on utilise deux champs rectilignes déphasés l'un par rapport à l'autre. On réalise cela en plaçant en série avec l'une des bobines un dipole purement réactif, le plus souvent un condensateur.

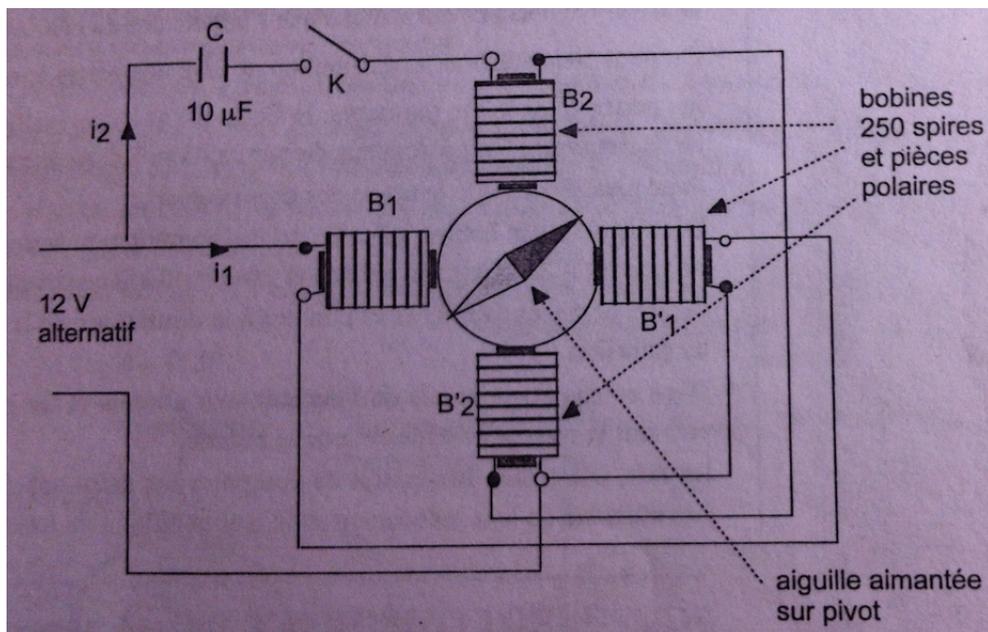


FIGURE 4 – Production d'un champ tournant capable d'entraîner l'aiguille aimantée

Expérience [1, p. 109] : Création d'un champ tournant par un courant monophasé (2)

1. On réalise le montage de la figure 4, avec des valeurs numériques différentes de celles indiquées dans le Quaranta : bobines de 1000 spires, courants de l'ordre de l'ampère, capacité de l'ordre de $50\mu F$ et résistance réglable de 300Ω .
2. Vérifier le déphasage en observant les courants arrivant dans les bobines à l'oscilloscope.
3. Lorsqu'on ferme l'interrupteur (ou plus simplement à la mise sous tension du circuit), l'aiguille se met à tourner toute seule.

Interprétation : Pour un calcul complet, se reporter à [3]. On crée ici un champ tournant au centre du dispositif, à la fréquence du secteur (50Hz). L'extrémité du vecteur \vec{B} décrit une ellipse plus ou moins aplatie suivant le dimensionnement choisi pour les composants (R et C). Ce dispositif est le plus utilisé dans les machines de petite et moyenne puissance ($< 1kW$). La plupart des moteurs synchrones et asynchrones utilisent un condensateur de démarrage.

Transition : Intéressons-nous à présent aux différentes manières de mesurer des champs magnétiques.

2 Mesures de champs magnétiques

2.1 Sonde à effet Hall

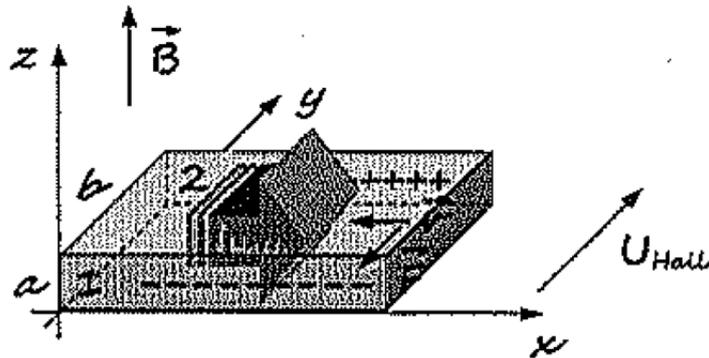


FIGURE 5 – Principe de l'effet Hall

Principe de l'effet Hall [2, p. 84] On considère une plaque parcourue par un courant I et soumise au champ magnétique \vec{B} . Les porteurs de charge sont soumis à la force de Lorentz $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$. Cette force déforme les trajectoires jusqu'à ce qu'il se crée un champ électrostatique \vec{E} entre les faces C et D qui exerce une force $\vec{F}_e = q\vec{E}$ qui équilibre la force magnétique (donc $\vec{E} = \vec{v} \wedge \vec{B}$). Ce champ se manifeste par une différence de potentiel V entre les faces C et D distantes de d avec $V = E.d$. Le sens du champ (donc le signe de la tension V) dépend de celui de la vitesse \vec{v} des porteurs de charges, c'est-à-dire de leur signe pour un courant I de sens donné. Le matériau de la sonde est en général un semi-conducteur : en effet à courant fixé, la vitesse des porteurs est plus grande que dans un métal car leur densité est bien plus faible.

Teslamètre Pour réaliser un teslamètre, la sonde de Hall est associée à un boîtier comprenant :

1. un générateur de courant I
2. un amplificateur dont le gain a été réglé de manière à avoir une correspondance simple entre la tension mesurée et la valeur du champ magnétique. Il est sensible aux tensions de décalage du composant actif et aux éventuelles dérives thermiques des composants. Il faut donc régler le zéro de l'appareil avant de s'en servir.

Pour effectuer une mesure correcte, le champ \vec{B} doit être perpendiculaire au plan de la plaquette.

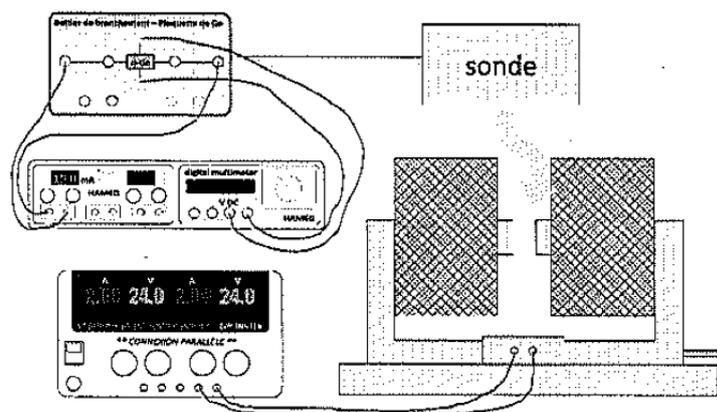


FIGURE 6 – Etalonnage de la sonde à effet Hall : mesure de la densité de porteurs de charge

Expérience : Principe de l'étalonnage d'une sonde de Hall

1. Fixer une plaquette de germanium dopée N entre les pièces polaires d'un électroaimant (l'entrefer étant fixé à quelques centimètres).
2. Alimenter la plaquette par un générateur de courant continu Hameg à 15mA.
3. Mesurer les tensions de Hall U_+ et U_- en fonction de l'intensité imposée dans l'électroaimant (donc du champ magnétique créé par l'électroaimant).

Remarques et commentaires

1. Les porteurs de charge d'un SC dopé N sont les électrons. L'utilisation de pièces polaires permet de créer un champ bien uniforme dans l'entrefer.
2. RAS
3. On fait la moyenne des tensions U_+ et U_- car les soudures de la plaque ne sont pas nécessairement symétriques. La droite d'étalonnage donnant la valeur du champ B en fonction de l'intensité imposée I est réalisée en préparation avec... une sonde à effet Hall! Il faut juste en être bien conscient.

Exploitation : On trace U_H en fonction de B pour vérifier la relation :

$$U_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot q \cdot a} \quad (8)$$

où $I = (17 \pm 1) \text{mA}$ désigne l'intensité du courant dans la plaquette, $a = 1 \text{mm}$ son épaisseur et $n = 7.10^{20} \text{m}^{-3}$ la densité de porteurs de charge. La valeur de la charge est notée $q = 1,6.10^{-19} \text{C}$. Par modélisation affine de la courbe $U_H = f(B)$, on trouve :

$$m = 97 \pm 6 \text{ et } p \approx 0$$
$$m_{theo} = \frac{I}{nqa} = (152 \pm 9) \cdot 10^{-3}$$

On obtient bien une droite avec un coefficient directeur m qui est du bon ordre de grandeur. Cette valeur n'est pas dans les barres d'erreur, on peut proposer comme sources d'erreur : l'influence du positionnement de la plaquette dans l'entrefer, une sous-estimation des erreurs de mesure.

Transition : Intéressons-nous à présent au fluxmètre qui utilise un autre effet physique pour faire une mesure de champ magnétique.

2.2 Fluxmètre [2, p. 85]

La mesure d'un champ magnétique avec un fluxmètre utilise le phénomène d'induction : une sonde formée par une bobine plate de surface $n \cdot s$ connue est déplacée d'une région de champ nul (au champ magnétique terrestre près) jusque dans l'entrefer de l'électroaimant où règne un champ B . La variation de flux s'écrit :

$$\Delta\varphi = \Delta B \cdot n \cdot s \quad (9)$$

Cette variation de flux génère une tension induite donnée par la loi de Faraday :

$$e = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (10)$$

On intègre cette tension pour remonter à $\Delta\varphi$ et donc à ΔB :

$$\Delta B = \frac{-1}{n \cdot s} \int_{B=0}^B e(t) dt \quad (11)$$

Cette intégration peut être réalisée :

- mécaniquement au moyen d'un fluxmètre à aiguille (qui est un galvanomètre sans couple de rappel)
- au moyen d'un montage intégrateur à AO
- par une intégration numérique (à l'ordinateur ou avec un oscilloscope numérique)

Nous allons illustrer expérimentalement la dernière méthode d'intégration.

Message à faire passer : Insister sur le fait qu'on obtient ici une grandeur intégrée c'est-à-dire moyennée.

On réalise une mesure de flux avec une sonde de $N = 500$ spires et de surface $S = 2000\text{cm}^2$. Celle-ci est directement reliée à un oscilloscope numérique capable de faire une intégration des signaux.

Expérience [2, p. 86] : Mesure du champ créé par un aimant à l'aide d'un fluxmètre et d'un oscillo numérique

1. Se mettre d'abord en mode "roll" avec une vitesse de balayage faible (1s/carreau). Approcher rapidement la sonde de l'aimant, la laisser, puis l'enlever rapidement. Se mettre sur une sensibilité suffisante (100mV ou moins). On utilise le bouton "RUN-STOP" de l'oscillo.
2. Pour faire une mesure de B, passer en mode normal "main" et utiliser la fonction "MATH" de l'oscilla pour obtenir la courbe intégrée. Il faut alors étaler au maximum la figure horizontalement pour mesurer la variation de flux $\Delta\varphi$. On lit $\Delta\varphi = \dots\dots\text{mVs}$ donc $\Delta B_{\text{Fluxmetre}} = \frac{\Delta\varphi}{4000 \cdot 10^{-4}} = \dots\dots\text{mT}$.
3. On compare à la valeur lue au teslamètre $B_{\text{Teslametre}} = \dots\dots$

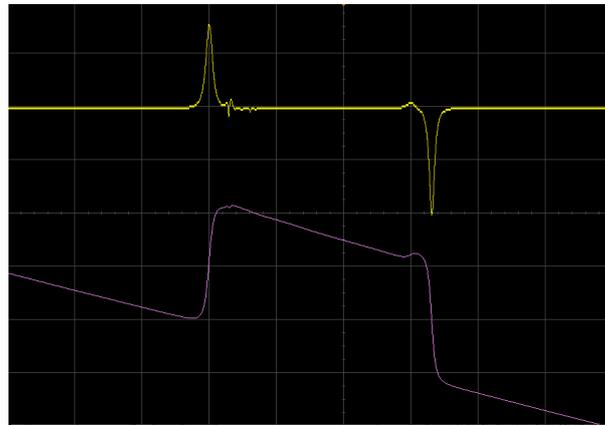


FIGURE 7 – En jaune, tension induite par le passage de la sonde dans l'entrefer de l'aimant, mesurée à l'oscilloscope. En violet, résultat de l'intégration de ce signal qui permet de remonter à la valeur du champ magnétique.

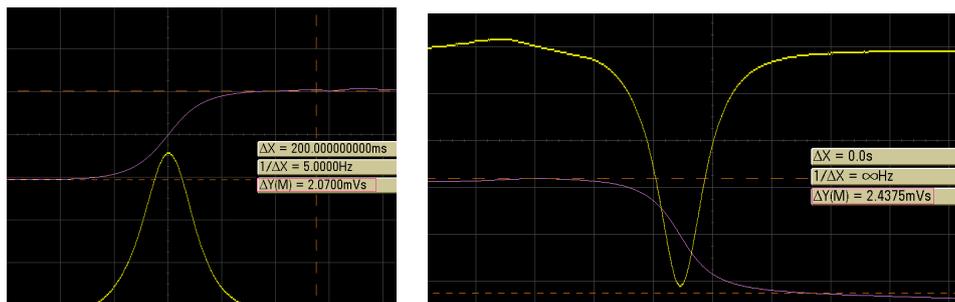


FIGURE 8 – Détails de la figure précédente avec les valeurs numériques qui permettent de faire deux mesures distinctes.

Les figures 7 et 8 donnent l'allure de la courbe obtenue en jaune et de son intégration en violet. On observe une "dérive" due à la composante continue du signal qui ne nous intéresse pas, on mesure seulement la "hauteur" du signal intégré.

Conclusion : Le fluxmètre présente un intérêt pédagogique puisqu'il illustre le fait que le courant est créé par une variation du flux du champ à travers la sonde. En revanche, il ne donne pas accès à une mesure directe, il faut une étape supplémentaire d'intégration pour avoir accès au champ. Cette valeur n'est pas une valeur locale. Le fonctionnement de cette mesure est contraignant car il est lié à une variation du champ et non à son existence même.

Conclusion

Nous avons étudié le fonctionnement du fluxmètre et de la sonde à effet Hall. Le premier donne une mesure intégrée tandis que le second donne une mesure locale ce qui est le plus souvent recherché.

Il existe des champs magnétiques dans la nature allant de $10^{-5}T$ pour le champ magnétique terrestre à 10^8T dans les étoiles à neutrons par exemple. Entre les deux, on trouve des aimants permanents ayant des champs de l'ordre du mT au tesla. On est aussi capable de produire des champs magnétiques intenses en faisant circuler du courant dans des bobines. Par ailleurs, de nombreux objets de notre quotidien nécessitent de fabriquer des champs magnétiques tournants. L'expérience que nous avons présentée donne une idée de principe mais la réalité technologique du fonctionnement des moteurs et autres est souvent plus complexe.