

CHAMP MAGNÉTIQUE INDUIT

1 But

Cette expérience¹ a pour but d'observer un système qui illustre le lien entre le magnétisme et l'électricité, et qui découle de la loi de Biot-Savart². Pour ce faire, nous devons nous familiariser avec la sonde de Hall (Annexe à la page 10). Nous allons vérifier qu'un courant direct passant dans un fil conducteur crée un champ magnétique dans le voisinage de ce conducteur. Nous allons étudier deux types bien spécifiques de conducteur enroulé: les bobines de Helmholtz et le solénoïde.

2 Théorie

2.1 Formule de Biot-Savart

Au cours de l'hiver 1819, Hans Christian Oersted enseignait le cours "Électricité, galvanisme et magnétisme" à l'université de Copenhague. Cherchant à mettre en évidence son hypothèse selon laquelle le magnétisme est une "forme cachée" de l'électricité, il essaya devant ses étudiants de faire passer un courant à travers un fil tendu au-dessus et à angle droit d'une aiguille aimantée. Aucun effet ne fut observé. Après le cours, il recommença l'expérience, mais en mettant cette fois le fil parallèle à l'aiguille aimantée. Cette fois-ci l'aiguille dévia largement; et quand il inversa le courant, elle dévia dans l'autre sens! Il avait démontré expérimentalement que des courants électriques produisent des champs magnétiques.

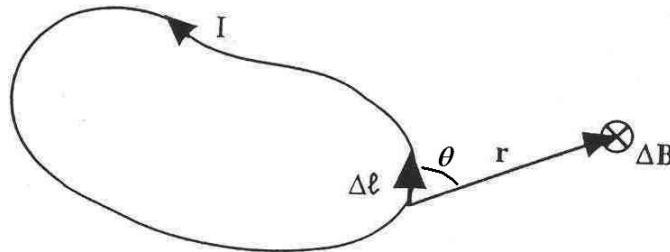


Figure 1: Formule de Biot-Savart.

La Figure 1 représente une boucle de fil conducteur reposant *dans le plan de la page*, et par lequel passe un courant I (sens anti-horaire à la Figure 1). Si on décompose ce fil en un

¹Adaptation et traduction de: Experiment 18 - Magnetic Fields, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

²La loi de Biot-Savart n'est utilisée que dans cette expérience; vous n'avez pas besoin de la connaître pour le reste du cours.

très grand nombre de segments infinitésimaux de longueur Δl , on peut doter ces segments d'une nature vectorielle, la direction du vecteur $\Delta \mathbf{l}$ étant déterminée par le sens du courant électrique I (c.-à-d. à la Figure 1, $\Delta \mathbf{l}$ pointe *vers le haut* de la page). La formule de Biot-Savart stipule qu'en *un point donné de l'espace*, situé à un déplacement \mathbf{r} du segment $\Delta \mathbf{l}$, la contribution de ce petit segment au champ magnétique ΔB à *ce point dans l'espace* est donnée par

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \Delta l \sin \theta}{r^2} \quad (1)$$

où θ est l'angle entre les vecteurs du segment $\Delta \mathbf{l}$ et du déplacement \mathbf{r} , μ_0 est la constante de la perméabilité du vide ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m/A}$). La direction du vecteur $\Delta \mathbf{B}$ est donnée par la règle de la main droite: *initialement avec votre main droite ouverte, alignez vos quatre doigts (autre que le pouce) dans la direction du segment $\Delta \mathbf{l}$, puis enroulez ces doigts vers le vecteur \mathbf{r} . Votre pouce pointe alors dans la direction du vecteur $\Delta \mathbf{B}$.* (À la Figure 1, votre pouce, et la direction de $\Delta \mathbf{B}$, *entre dans la page*.) À titre d'information personnelle, l'équation (1) peut être écrite sous la forme vectorielle suivante:

$$\Delta \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\Delta \mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}.$$

Vous aurez certainement reconnu le produit vectoriel, que nous avons utilisé pour le moment de force en Physique 124! Consolerez-vous, vous ne devez pas être familiers avec la loi de Biot-Savart dans ce cours...

Il est à remarquer que la relation (1) n'est valide que pour des segments de longueur infinitésimale Δl . Pour un conducteur de forme quelconque, et décomposé en une suite de petits éléments de longueurs $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_N$, contribuant chacun des champs magnétiques $\Delta \mathbf{B}_1, \dots, \Delta \mathbf{B}_N$, le champ magnétique total est obtenu en faisant la somme de ces champs magnétiques, c.-à-d. $\mathbf{B} = \Delta \mathbf{B}_1 + \dots + \Delta \mathbf{B}_N$. Autrement dit, dans la limite où chaque Δl tend vers zéro, et que N tend vers l'infini, le champ magnétique total est donné par une *intégrale*. Nous ne considérerons pas ce type de problème dans ce qui suit.

2.2 Champ magnétique dans des bobines de Helmholtz

Considérez la bobine représentée à la Figure 2, ci-dessous³. En un point situé sur l'axe central de la bobine, l'intégrale de la formule de Biot-Savart montre que le champ magnétique B est parallèle à l'axe central, et a comme grandeur:

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

³Un schéma plus réaliste, et semblable à ce que vous utiliserez dans cette expérience, est montré à la Figure 3.

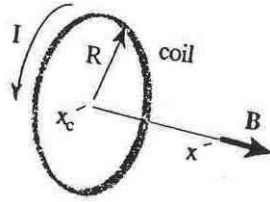


Figure 2: Bobine.

Le symbole N représente le nombre d'enroulements, R est le rayon de la bobine, I le courant dans la bobine, x la position où l'on calcule B , et x_c la position du centre de la bobine.

Si une autre bobine, semblable à la première, est placée parallèlement à la première, le long du même axe (voir Figure 3, ci-dessous) et qu'une distance R (égale au rayon de chaque bobine) sépare les deux bobines, alors cette paire est appelée "bobines de Helmholtz". Le champ magnétique le long de l'axe et à mi-chemin entre ces bobines, est donné par

$$B_H = \frac{8}{\sqrt{125}} \frac{\mu_0 N I}{R}. \quad (3)$$

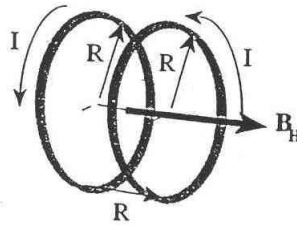


Figure 3: Bobines de Helmholtz.

2.3 Champ magnétique de long de l'axe central d'un solénoïde

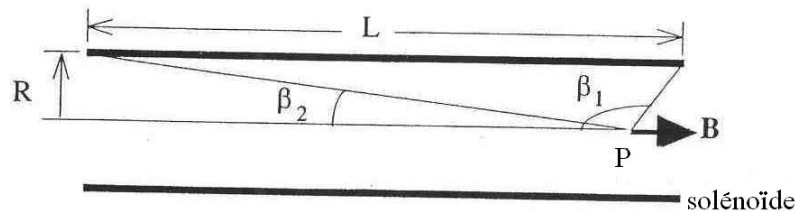


Figure 4

Un solénoïde peut aussi être utilisé pour générer un champ magnétique. Notre but n'est pas ici de déterminer l'expression générale du champ magnétique d'un solénoïde. Les expressions du champ magnétique d'un solénoïde sont trop compliquées, à l'exception de

celle à son axe central. Pour un point P le long de cet axe (illustré à la Figure 4), le champ magnétique est parallèle à l'axe central du solénoïde et sa grandeur est donnée par

$$B = \frac{1}{2}\mu_0 n(\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad (4)$$

où $n = N/L$ est le nombre de tours par unité de longueur de la bobine et β_1, β_2 sont les angles. Ces angles β_1 et β_2 sont compris entre 0° et 180° , et on a toujours $\beta_1 \geq \beta_2$.

Si le point P est situé à l'intérieur d'un solénoïde très long ($L \gg R$) et éloigné de ses extrémités, alors $\beta_1 \approx 180^\circ$ et $\beta_2 \approx 0^\circ$. En substituant ces angles dans l'équation (4), la grandeur du champ B à l'intérieur d'un long solénoïde est

$$B = \mu_0 n I. \quad (5)$$

3 Procédures

3.1 Partie I : Champ magnétique induit en fonction du courant dans des bobines de Helmholtz

1. Chaque bobine a le même nombre d'enroulements N . Notre but est de déterminer la valeur de N en mesurant B_H .
2. Placez les deux bobines en position parallèle et à une distance égale au rayon des bobines R . Pour ce faire, assurez-vous que les bobines soient bien au centre des rectangles blancs dessinés sur la base métallique.
3. Sur chaque bobine, on trouve trois prises de courants: deux blanches et une noire (voir Figure 5). Reliez la prise blanche externe de chacune des bobines par un fil conducteur. Branchez ensuite la source de courant à la prise blanche interne de chacune des bobines.

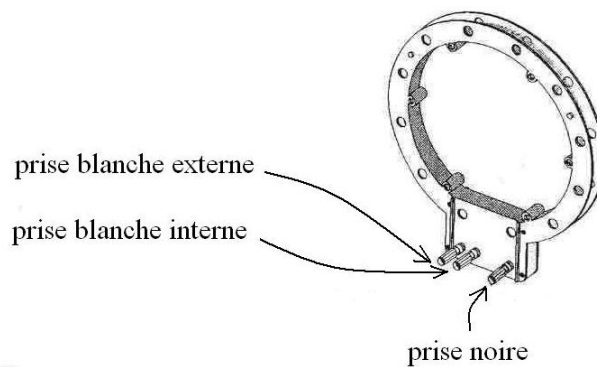


Figure 5: Bobines

4. Avant d'allumer la source de courant, les deux boutons du voltage devraient être en position pour le voltage le plus fort, c'est-à-dire tourner vers la droite (ils sont situés sur le côté droit de l'appareil, #3 et #4 à la Figure 6). Vérifiez aussi que l'appareil soit ajusté à la petite échelle du courant en vous assurant que le bouton #14 est à la position enfoncée (bouton juste à côté de ceux du réglage du voltage #3 et #4).
5. Branchez la source de courant et appuyez sur le commutateur vert (#13 à la Figure 6) pour mettre l'appareil en marche. Vérifiez que l'affichage soit au mode AMPS (#12 à la Figure 6).
6. Ajustez le courant I à ≈ 0.000 A en utilisant les boutons du courant qui sont situés sur le côté gauche de l'appareil (#5 pour les grands ajustements et #6 pour les petits).
7. Branchez le dispositif bleu *Passport* au détecteur de champ magnétique qui est un autre dispositif bleu (voir Figure 7). Placez l'extrémité de la sonde de Hall au centre des bobines aussi précisément que possible.
8. Il apparaîtra à l'ordinateur l'image illustrée à la Figure 8 (l'image sera plus lisible à l'ordinateur!). Cliquez sur l'icône *EZscreen* et l'image illustrée à la Figure 9 apparaîtra. Cliquez sur l'icône en bas à droite jusqu'à ce que les unités de la valeur qui apparaît dans la fenêtre en bas à gauche soit des mT (millitesla).
9. Cliquez sur la flèche qui est en haut à gauche de l'écran. La mesure de l'intensité du champ magnétique B_H apparaîtra dans la fenêtre en bas à gauche (si la valeur est négative, inversez les fils branchés à la source de courant), prenez-la en note ($B_H \pm \Delta B_H$) ainsi que la mesure du courant $I \pm \Delta I$. Cliquez de nouveau sur la flèche en haut à gauche pour l'arrêt de la prise de mesure du champ magnétique.
10. Faites varier le courant I , par exemple, par saut de ≈ 0.100 A jusqu'à 1.000 A. (Ceci dépend du nombre d'enroulements N ; pour 500 tours, variez le courant par sauts de 0.050 A jusqu'à un courant maximal de 0.500 A.). Prenez les mesures du courant $I \pm \Delta I$ et du champ magnétique $B_H \pm \Delta B_H$ à chaque fois. Gardez votre montage des bobines de Helmholtz, vous l'utiliserez à la partie II de ce laboratoire.
11. Tracez le graphique linéarisé, en utilisant l'équation (3), et déduisez-en la valeur du nombre d'enroulements $N \pm \Delta N$. Prenez le rayon des bobines indiqué sur les bobines. Comparez votre valeur expérimentale de $N \pm \Delta N$ à la valeur théorique, indiquée sur les bobines.

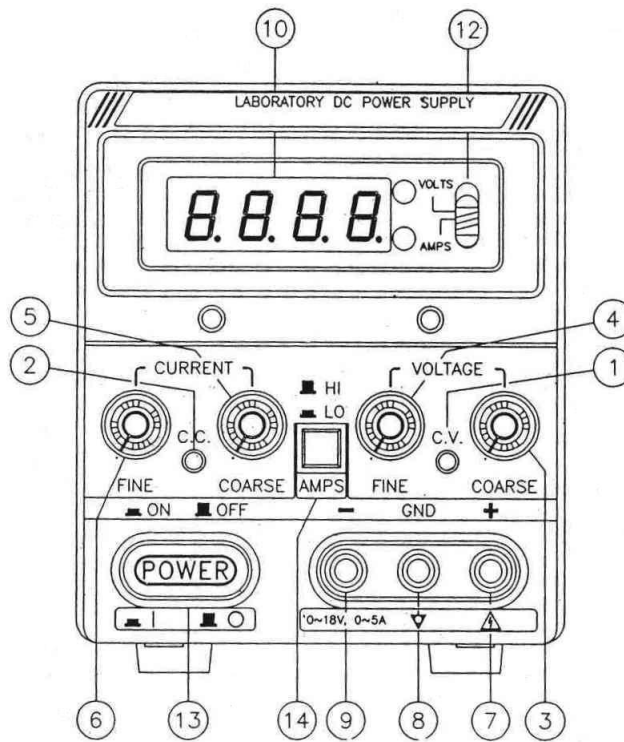


Figure 6: Source de courant

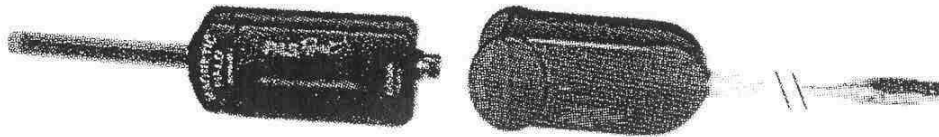


Figure 7: Dispositifs pour détecter le champ magnétique

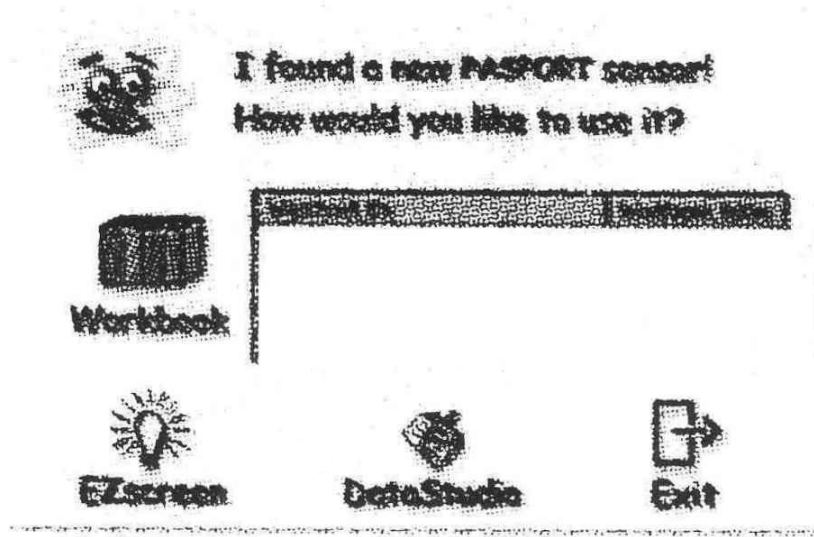


Figure 8

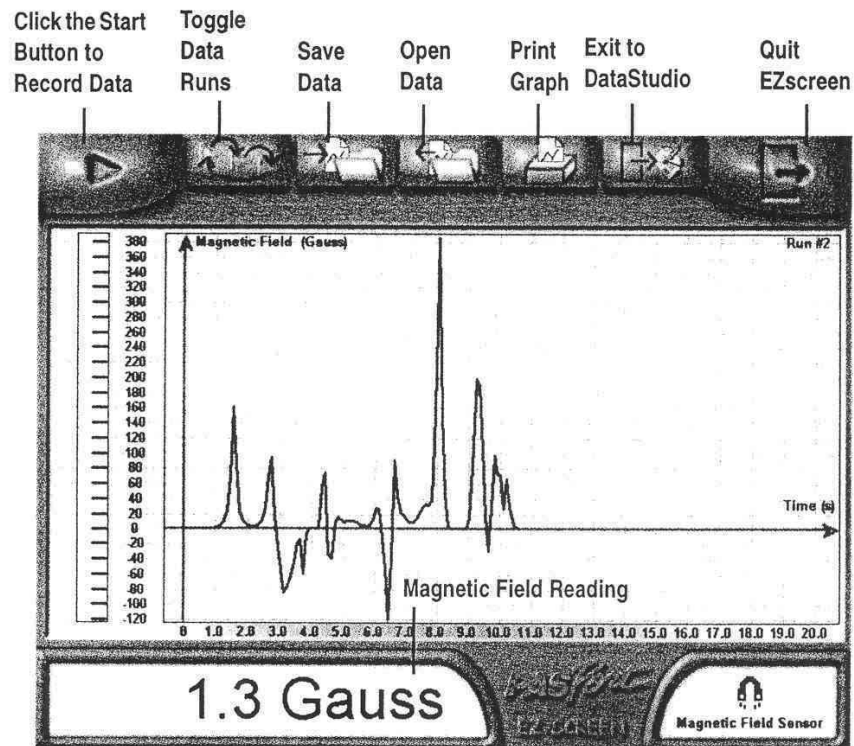


Figure 9: Écran EZscreen

3.2 Partie II: Champ magnétique le long de l'axe central des bobines de Helmholtz et d'un solénoïde

1. Placez la base du support de la sonde de Hall sur un banc optique. Ajustez la sonde de sorte que l'axe de la sonde et l'axe central des bobines soient communs.
2. Ajustez la source de courant à 1.000 A. Notez la mesure du champ magnétique et sa position à une distance de 5.0 cm à l'extérieur d'une bobine. Déplacez la sonde vers les bobines et par saut de 1.0 cm, et jusqu'à ce que la position soit 5.0 cm à l'extérieur de l'autre bobine, tout en notant la valeur du champ magnétique et la position à chaque saut. Un exemple est décrit au tableau ci-dessous pour expliquer les différentes positions des mesures du champ magnétique.

Position (cm)	Signification
30.0	Première mesure du champ magnétique (à 5.0 cm de la première bobine)
35.0	Début de la première bobine
40.0	Centre des deux bobines
45.0	Fin de la deuxième bobine
50.0	Dernière mesure du champ magnétique (à 5.0 cm de la deuxième bobine)

- Tracez le graphique du champ magnétique en fonction de la position sur l'axe central des bobines. Sur votre graphique, identifiez aussi la position des bobines. Quelles informations peuvent être obtenues de ces graphiques?
- Répétez les étapes de (1) à (3) en remplaçant les bobines de Helmholtz par un solénoïde.

4 Questions

(Insérez vos réponses dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.)

- Si le courant I est modifié tout en ayant une sonde de Hall dans le milieu de bobines de Helmholtz, comment pouvez-vous linéariser l'équation (3) à l'aide d'un graphique? Que représentent la pente et l'ordonnée à l'origine?
- Montrez comment l'équation (3) est obtenue à partir de l'équation (2).
- Montrez comment l'équation (5) est obtenue à partir de l'équation (4).

ANNEXE: Sonde de Hall

Une sonde de Hall, tel qu'illustré à la Figure 1A, ci-dessous, consiste en un petit bloc d'un matériau superconducteur.

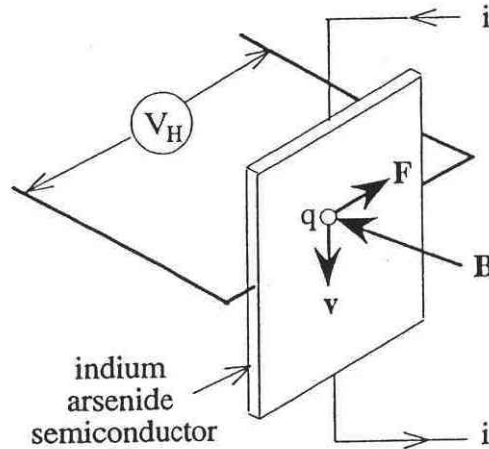


Figure 1A: Sonde de Hall.

Des fils électriques sont attachés au bloc comme illustré à la Figure 1A, et on y fait passer un courant I de grandeur constante à travers le superconducteur. Les charges positives se déplaceront donc à une vitesse donnée par le vecteur \mathbf{v} . Si le bloc est plongé dans un champ magnétique \mathbf{B} , alors celui-ci cause une force latérale sur les charges en mouvement, en accord avec la relation de $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Il y aura donc une accumulation de charges sur les côtés du bloc, ce qui engendrera à son tour une différence de potentiel, appelée “voltage de Hall” V_H . La valeur de V_H est proportionnelle au courant I , ainsi qu’à la composante du champ magnétique \mathbf{B} qui est *perpendiculaire* à la fois au courant et aux fils électriques utilisés pour mesurer le voltage V_H .

Dans notre expérience, ce système nous permettra de mesurer le champ magnétique. La sonde de Hall sera reliée à un amplificateur qui convertira la tension de Hall, V_H , en une valeur accessible à un enregistrement.