

1. Introduction

Ce TP se décompose en quatre parties :

1. Analyse qualitative du champ magnétique d'un aimant et application aux aiguilles d'une boussole
2. Mesure des caractéristiques d'une bobine de Helmotz
3. Mesure du champ au centre de la bobine
4. Crédation d'un champ magnétique continu avec 2 bobines de Helmotz

2. Protocole

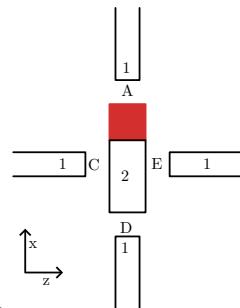
2.1. Analyse qualitative du champ d'un aimant

2.1.1. Matériel

- Barreau aimanté
- Aiguille montée sur son support
- Un teslamètre à sonde Hall (REF)

2.1.2. Description du montage expérimental

Nous plaçons la sonde du teslamètre (1) à différents points particuliers choisis autour du barreau aimanté (2).



2.1.3. Mesures à effectuer

1. Étalonner la sonde de Hall
2. Placer la sonde de Hall face à l'aimant, au premier point de mesure, à une distance de 1 cm.
3. Relever la valeur B_x pour obtenir la valeur du champ dans la direction parallèle à la sonde
4. Relever la valeur de B_z pour obtenir la valeur du champ dans la direction perpendiculaire à la sonde.
5. En déduire les valeurs de B_x et B_z dans le repère lié à l'aimant.
6. Répéter ces étapes pour les 3 autres points.
7. Répéter ces étapes avec une distance de 2cm entre la sonde et le barreau

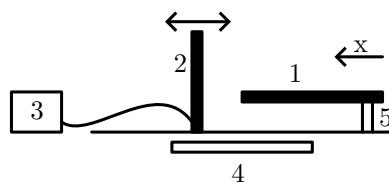
2.2. Mesure des caractéristiques d'une bobine de Helmotz

2.2.1. Matériel

- Bobine de Helmotz
- Règle graduée, câbles électriques, support pour sonde de Hall
- Alimentation continue
- Un teslamètre à sonde Hall (REF)

2.2.2. Description du montage expérimental

Nous plaçons la sonde du teslamètre (1) sur le support fixe (5) afin que son extrémité se trouve au centre de la bobine (2). Nous déplaçons la bobine en la faisant glisser sur son support et nous relevons la distance de déplacement avec la règle graduée (4). La bobine est branchée à l'alimentation continue (3).



2.2.3. Protocole

1. Étalloner la sonde de Hall
2. Placer la sonde de Hall dans son support de façon à ce que son extrémité se trouve à environ 10 cm (graduation de la règle). La précision de la position de l'extrémité n'est pas critique.
3. Paramétriser l'alimentation continue à 1.5 A.
4. Placer la bobine à 10 cm.
5. Relever la valeur de B_x sur le teslamètre.
6. Translater la bobine de $\pm 1\text{cm}$.
7. Relever la nouvelle valeur de B_x
8. Répter les deux étapes précédentes pour obtenir une dizaine de valeur.

2.3. Mesure du champ au centre de la bobine

2.3.1. Matériel & Description du montage expérimental

Le matériel utilisé et le montage expérimental sont les mêmes que dans la partie précédente, à l'ajout d'un ampèremètre près.

2.3.2. Protocole

- Étalloner la sonde de Hall
- Placer la sonde au centre de la bobine (si la sonde n'a pas bougé, on peut se servir de la valeur de x_0 trouvée en partie précédente pour placer précisément la sonde.)
- Régler l'intensité sur 0.5 A
- Mesurer B_x
- Répéter ces 2 étapes pour les autres valeurs de I

2.4. Crédit d'un champ magnétique continu avec 2 bobines de Helmotz

2.4.1. Matériel & Description du montage expérimental

Le matériel utilisé et le montage expérimental sont les mêmes que dans la partie précédente, à l'ajout d'une deuxième bobine, mobile, près.

2.4.2. Protocole

- Étalloner la sonde de Hall
- Placer la sonde au centre des 2 bobines.
- Tracer sur la sonde une marque au niveau de la vis de maintient
- Tracer sur la sonde les graduations correspondants aux distances pour lesquelles on souhaite mesurer une valeur de champ, en prenant comme origine la marque précédente.
- Replacer la sonde dans le support au niveau de la graduation 0.
- Mesurer la valeur du champ
- Répéter ces 2 étapes pour chaque graduation.

3. Mesures

3.1. Analyse qualitative d'un aimant

3.1.1. Données

| Point | Distance d (cm) | Valeur de champ Bx (mT) | Valeur de champ Bz (mT) |
|-------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| A | 1.0 | 4.0 | 0.25 |
| A | 2.0 | 2.2 | 0.1 |
| E | 1.0 | -2.9 | 1.0 |
| E | 2.0 | -1.7 | 0.5 |
| C | 1.0 | -2.7 | -1.0 |
| C | 2.0 | -1.4 | -0.5 |
| D | 1.0 | 4.2 | 0.9 |
| D | 2.0 | 2.1 | 0.0 |

3.1.2. Incertitude

Les incertitudes concernent la mesure de la distance entre le barreau et la sonde et la mesure du champ. Ces dernières sont toutes les 2 de type B. Pour la mesure de la distance, l'incertitude est lié à la graduation de la règle utilisée, ici d'une précision au dixième de cm. Celle sur la mesure du champ est liée à la précision du teslamètre, au maximum de 0.01 mT. On a donc :

$$u(d) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{ cm}$$

et

$$u(Bx) = u(Bz) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \text{ mT}$$

3.2. Mesure des caractéristiques d'une bobine de Helmotz

3.2.1. Données

| Distance (cm) | Bx (mT) |
|---------------|---------|
| -5.0 | 0.40 |
| -4.0 | 0.53 |
| -3.0 | 0.68 |
| -2.0 | 0.85 |
| -1.0 | 1.06 |
| 0.0 | 1.22 |
| 1.0 | 1.36 |
| 2.0 | 1.40 |
| 3.0 | 1.31 |
| 4.0 | 1.17 |
| 5.0 | 0.99 |
| 6.0 | 0.80 |
| 7.0 | 0.63 |
| 8.0 | 0.49 |
| 9.0 | 0.38 |
| 10.0 | 0.27 |

3.2.2. Incertitude

La mesure de distance et de champ magnétique ont une incertitude de type B. De la même façon que dans la partie précédente, l'incertitude liée à la mesure de la distance est de¹

$$u(d) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{ cm}$$

L'incertitude liée à la mesure du champ est, comme dans la partie précédente

$$u(Bx) = u(Bz) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \text{ mT}$$

¹. L'incertitude liée à la position de l'extrême de la sonde n'a pas d'importance ici, car le potentiel décalage sera pris en compte dans notre modélisation. On ne va donc pas ajouter d'incertitude systématique liée au décalage entre le centre de la bobine et la position de l'extrême de la sonde.

3.3. Mesure du champ au centre de la bobine

3.3.1. Données

| Intensité (A) | Champ Bx (mT) |
|---------------|---------------|
| 0.50 | 0.48 |
| 1,00 | 0.99 |
| 1.25 | 1.20 |
| 1.50 | 1.43 |
| 1.75 | 1.69 |
| 2.00 | 1.92 |

l'intensité du courant et une sur le champ magnétique, toutes de type B. Celle sur l'intensité est liée à la précision de l'ampèremètre :

$$u(I) = \frac{0.1}{\sqrt{3}}$$

3.3.2. Incertitude

Nous avons une incertitude sur la position de la sonde par rapport à la bobine, une incertitude sur

et celle sur le champ magnétique est toujours la même :

$$u(Bx) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} mT$$

L'incertitude la plus importante est celle sur la position de la sonde. En effet, bien que la graduation nous servant pour la placer a une précision de l'ordre du mm, il est difficile de savoir exactement où se trouve l'origine de la sonde. On estime donc cette incertitude à 1.5 cm, largeur du bout de la sonde. C'est l'incertitude qui domine cette manipulation, on peut négliger les autres. Ainsi, pour cette série de mesure, on suppose que $x \in [-0.75, 0.75] \text{cm}$ ou $x = (0 \pm 0.75) \cdot 10^{-2} \text{m}$.

3.4. Crédation d'un champ magnétique continu avec 2 bobines de Helmotz

3.4.1. Données

Nous avons choisie de faire les mesures pour des intensités de 1, 1.5 et 2 A² avec des distances dépendant du rayon de la bobine : $\pm R, \pm \frac{R}{2}, \pm \frac{R}{4}$ avec un rayon mesuré à 6.75 cm.

| I (A) \d (cm) | 0 | 1.7 | -1.7 | 3.4 | -3.4 | 6.8 | -6.8 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1.00 | 1.30 | 1.30 | 1.30 | 1.25 | 1.25 | 0.77 | 0.79 |
| 1.50 | 1.97 | 1.97 | 1.98 | 1.91 | 1.87 | 1.15 | 1.19 |
| 2.00 | 2.61 | 2.61 | 2.62 | 2.55 | 2.50 | 1.54 | 1.60 |

FIGURE 1 – Données pour une distance entre les bobines de $D = R$

| I (A) \d (cm) | 0 | 1.7 | -1.7 | 3.4 | -3.4 | 6.8 | -6.8 | 10.3 | -10.3 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1.50 | 0.91 | 1.00 | 1.00 | 1.19 | 1.21 | 1.54 | 1.59 | 0.94 | 0.99 |
| 2.00 | 1.23 | 1.33 | 1.34 | 1.57 | 1.62 | 2.06 | 2.01 | 1.28 | 1.31 |

FIGURE 2 – Données pour une distance entre les bobines de $D = 2R$ avec des intensités de 1.5 et 2 A

| I (A) \d (cm) | 0 | 1.7 | -1.7 | 3.4 | -3.4 | 5.5 | -5.5 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1.50 | 2.44 | 2.26 | 2.26 | 1.95 | 1.95 | 1.35 | 1.36 |
| 2.00 | 3.26 | 3.01 | 3.04 | 2.64 | 2.62 | 1.81 | 1.82 |

FIGURE 3 – Données pour une distance entre les 2 bobines collées avec des intensités de 1.5 et 2 A

2. Nous avons choisie de ne pas faire les mesures pour I = 1 A pour les distances 2R et pour les bobines collées par manque de temps. Pour avoir l'incertitude la plus faible, nous avons gardé les 2 valeurs de I les plus élevées.

3.4.2. Incertitude

Nous avons comme dans les parties précédentes une incertitude sur I et B_x liées à la précision des appareils de mesure. L'incertitude liée à la distance entre les bobines est aussi de l'ordre du mm. Ces dernières sont négligeables devant l'incertitude liée à la position de la sonde de Hall. Comme expliqué en 3.3.2, la méconnaissance de l'emplacement précis de l'origine de la sonde crée une incertitude systématique de $\pm 0.75\text{cm}$ environ. Cette incertitude est grande devant celle liée à la graduation effectuée sur la règle. Cependant, nous nous servons de la vis du support pour positionner la graduation effectuée. Cette vis un diamètre de 5mm^3 , on peut donc raisonnablement ajouter une incertitude $\pm 2\text{mm}$ sur les décalages successifs de la sonde. L'incertitude finale liée à la distance de la sonde est donc de

$$u(d) = \pm 1\text{cm}$$

4. Graphiques

4.1. Mesure des caractéristiques d'une bobine de Helmotz et Mesure du champ au centre de la bobine

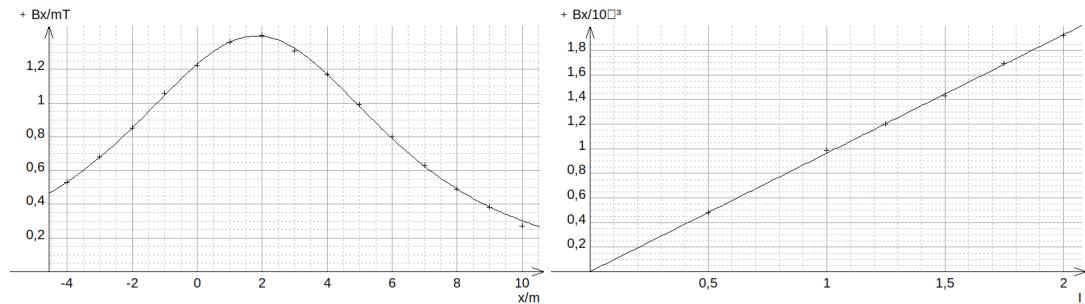


FIGURE 4 – Évolution du champ magnétique en fonction de la distance à la bobine puis en fonction de l'intensité. Les ordonnées sont en mT et les abscisses en cm pour le premier graphique et en A pour le deuxième.

3. L'incertitude obtenue avec cette méthode est bien plus petite qu'en mesurer directement la distance avec la règle fournie. C'est pourquoi nous avons utilisé cette méthode.

4.2. Création d'un champ magnétique continu avec 2 bobines de Helmotz

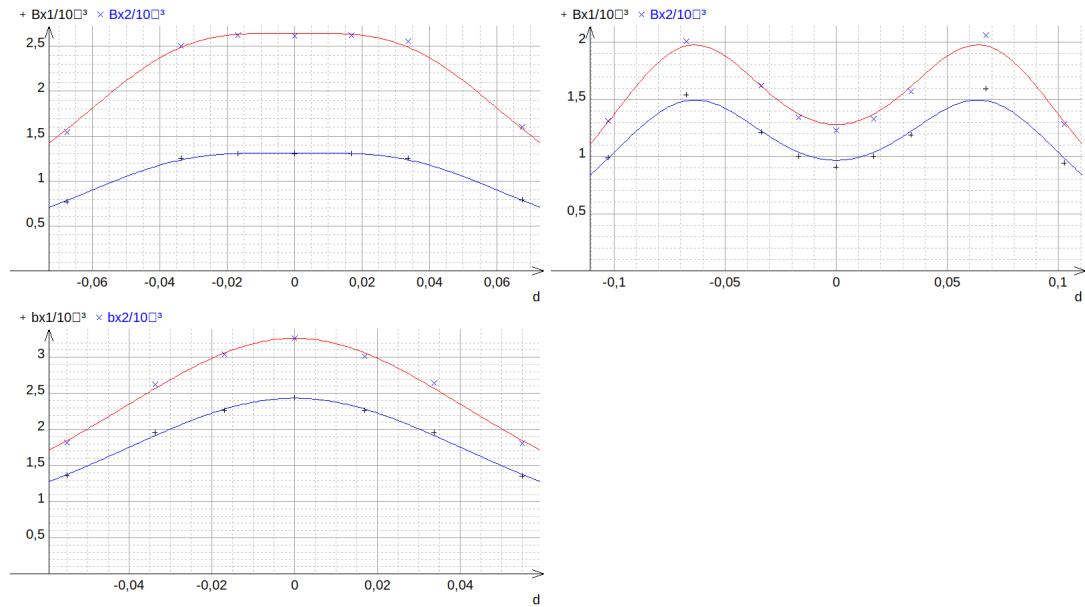


FIGURE 5 – Évolution du champ magnétique en fonction de la distance à la bobine et en fonction de l'intensité (1.5A en bleu et 2A en rouge). On représente les cas $D = R$, $D = 2R$, $D \approx 0$. Les ordonnées sont en mT et les abscisses en m.

5. Exploitation des résultats

5.1. Analyse qualitative d'un aimant

On retrouve bien le spectre de champ d'un aimant. De plus, comme l'aiguille rouge de la boussole est attirée par le pole - de l'aimant, on en déduit que le pole nord magnétique (le +) se trouve au sud et que le pole sud magnétique se trouve au nord !

5.2. Mesure des caractéristiques d'une bobine de Helmotz

5.2.1. Détermination du rayon

On peut modéliser la courbe obtenue par

$$B_x = A \frac{R^2}{(R^2 + (x - x_0)^2)^{3/2}} \quad (1)$$

avec A, R, x_0 à déterminer. Ici, x_0 correspond en fait au décalage entre la position de l'origine de notre repère (normalement au centre de la bobine) avec le vrai centre de la bobine. C'est pour cette valeur de x que le champ est maximal. Plus x est petit, plus le positionnement expérimental de l'origine est proche de la position théorique. On obtient $A = (8.55 \pm 0.047) \cdot 10^{-5} S.I$, $R = (6.13 \pm 0.05) cm$, $x_0 = (1.83 \pm 0.02) cm S.I$. Le rayon trouvé est proche de la valeur mesurée expérimentalement avec la règle graduée, qui est de $(R_2 = 6.8 \pm 0.5) cm$. L'incertitude sur cette valeur est liée à l'épaisseur de la bobine et à la difficulté de mesurer précisément le diamètre des fils de bobine et non le support en lui-même.

5.2.2. Vérification du résultat

On peut calculer B_x avec

$$B_x = \mu_0 \frac{NI}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (2)$$

Par identification, avec 1, on a

$$N = \frac{2A}{\mu_0 I}$$

On peut donc déterminer N. Avec les valeurs trouvées et données fournies, on trouve $N = 90,7$.

Avec la formule de propagation des incertitudes, ici sur I et sur A, on obtient

$$\frac{u(N)}{N} = \sqrt{\left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2}$$

En prenant $u(I) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} A$ et $u(A) = 0.45 \cdot 10^{-6}$ SI, on obtient

$$N = 91 \pm 3.5$$

ce qui est cohérent avec les indications du fabricant (95 spires).

5.3. Mesure du champ au centre de la bobine

Comme au centre de la bobine, $x = 0$, avec 2, on a

$$B_x = \mu_0 \frac{NI}{2} \frac{1}{R} = AI$$

avec $A = \frac{\mu_0 N}{2R}$.

Les incertitudes sur R sont uniquement liées à celles sur A. Par la propagation des incertitudes, on obtient que $u(R) = R \frac{u(A)}{A}$.

On trouve $A = (962.7 \pm 4.1) \cdot 10^{-6}$ SI puis $R = (6.200 \pm 0.026) \cdot 10^{-2} m$

5.4. Crédation d'un champ magnétique continu avec 2 bobines de Helmotz

Dans cette situation, on trouve que

$$B(x) = \frac{\mu_0 NI}{2} R^2 \left[\frac{1}{\left(R^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2\right)^{3/2}} + \frac{1}{\left(R^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2\right)^{3/2}} \right] \quad (3)$$

au point M d'abscisse x. On peut modéliser les valeurs obtenues dans les cas $d = R, 2R, 0$ en remplaçant la valeur de d dans cette équation. Pour modéliser le cas où $d = 0$, comme il n'est pas possible en pratique d'obtenir de telle conditions, on peut modéliser les bobines comme une seule spire de largeur infiniment petite. On aura alors une distance $d = 4.5 \pm 0.2$ cm. L'incertitude est liée au fait qu'expérimentalement, même si les supports des bobines sont collés, ces dernières ne le sont pas complètement car déformées.

5.4.1. Cas d=R

On remarque un plateau centré en l'origine. Sur 5 cm environ, le champ magnétique présente des valeurs semblables et peut être qualifié d'uniforme (plateau de Helmotz). Cette configuration est donc utilisée pour obtenir des conditions expérimentales où le champ doit être uniforme le long d'un axe.

5.4.2. Cas d=2R

La distance est trop grande pour que les 2 bobines puissent interagir efficacement pour produire le plateau de Helmotz. On obtient donc des valeurs pour un champ produit par 2 bobines distinctes, avec 2 maxima disjoints.

5.4.3. cas d=0

Bien que la distance ne soit pas nulle, les valeurs obtenues peuvent être modélisées comme provenant d'une bobine de $2 \times N$ spires. Les 2 bobines se confondent alors en une seule.

6. Conclusion

Ce TP a permis d'étudier les champs magnétiques générés par un aimant puis par deux bobines.

Nous avons d'abord mené une analyse qualitative du champ d'un aimant, confirmant la structure dipolaire des lignes de champ.

L'étude d'une bobine de Helmholtz nous a permis de déterminer certaines de ses propriétés.

En analysant la variation du champ B_x le long de l'axe de la bobine (Partie 4.2), nous avons déterminé son rayon R par modélisation. La valeur obtenue est en accord avec la celle obtenue par la mesure du champ au centre. Nous avons pu en déduire le nombre de spires, $N = 91 \pm 3.5$, ce qui est cohérent avec les données constructeur (95 spires).

Enfin, le champ champ généré par deux bobines a été étudiée pour différentes distances D .

La configuration $D = R$ permet ainsi de créer un champ magnétique uniforme sur une zone centrale significative (un plateau de ≈ 5 cm), ce qui peut être utile pour de nombreuses expériences physiques.

Les incertitudes ont montré que la position précise de l'origine de la sonde de Hall était le facteur limitant le plus important dans nos manipulations. Il faudrait donc trouver un moyen de rendre ces mesures plus précises, en indiquant sur le bout de la sonde où se trouve précisément l'origine du capteur, puis en positionnant la sonde sur un rail afin de la déplacer selon un seul axe de façon plus précise.