TP7a - Mesure de champ magnétique

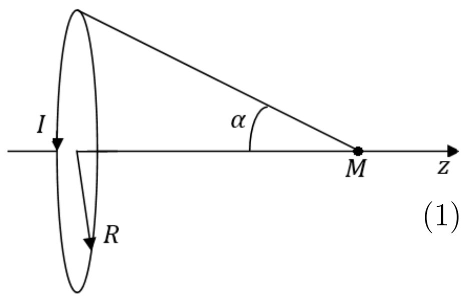
Objectifs : Utiliser soigneusement un capteur (ici sonde à effet Hall) pour mesurer une grandeur vectorielle (ici champ magnétique) : position et orientation. Évaluation d'incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A). Comparer deux valeurs dont les incertitudes-types sont connues à l'aide de leur écart normalisé. Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques

Matériel : Générateur de courant, solénoïde, bobines de Helmholtz, teslamètre.

1 Préambule

1.1 Formules admises de champ magnétique

1.1.1 Champ créé par une spire



Soit une bobine plate[1] circulaire de N enroulements, de rayon R, parcourue par un courant I. En un point M de son axe z (orienté en cohérence avec I), où la spire est vue sous un angle α, le champ magnétique est :

$$\overrightarrow{B} = \frac{\mu_0 N I}{2R} \sin^3(\alpha) \overrightarrow{u_z} \tag{1}$$

1.1.2 Champ créé par deux spires

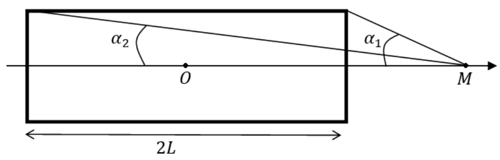
Considérons deux spires plates identiques (rayon R, N spires fines et courant I), de même axe orienté z (avec origine au centre O entre les deux bobines) et séparées de d. Le champ magnétique sur l'axe est :

$$\overrightarrow{B} = \frac{\mu_0 N I}{2} \left(\frac{R^2}{\left((z+d/2)^2 + R^2\right)^{3/2}} + \frac{R^2}{\left((z-d/2)^2 + R^2\right)^{3/2}} \right) \overrightarrow{u_z} \tag{2}$$

⋆ Si les axes orientés sont dans le même sens, on parle de « *bobines de Helmholtz* ». On admet que pour avoir un champ le plus uniforme possible près de O, il faut choisir $d = R$.

⋆ Si les axes orientés sont dans des sens opposés, on parle de « *bobines anti-Helmholtz* ». On admet que pour avoir un gradient de champ le plus uniforme possible près de O, il faut choisir $d = \sqrt{3}R$.

1.1.3 Champ créé par un solénoïde

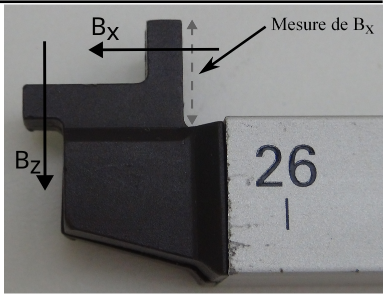


Soit un solénoïde[2] de N spires, de longueur $2L$ et parcouru par un courant I. On définit la densité linéique de spires $n = \frac{N}{2L}$. Pour un point M sur son axe, où les spires extrêmes sont vues depuis les angles α_1 et α_2, le champ magnétique est :

$$\overrightarrow{B} = \mu_0 n I \frac{\cos(\alpha_2) - \cos(\alpha_1)}{2} \overrightarrow{u_z} \tag{3}$$

Dans la limite d'un solénoïde infini, le champ est uniforme dans le solénoïde et vaut $\boxed{\overrightarrow{B} = \mu_0 n I \overrightarrow{u_z}}$, et est nul à l'extérieur.

1. Une bobine est dite « plate » si son épaisseur est négligeable devant son rayon.
2. Un solénoïde est le contraire d'une bobine plate, sa longueur est bien plus grande que son rayon.



1.2 Teslamètre : sonde à effet Hall

Une sonde à effet Hall[3] permet de mesurer la composante d'un champ magnétique orthogonal à une plaque fine parcourue par un courant[4]. Pour mesurer le champ magnétique en un point donné, il faut donc placer la bonne plaque en ce point et l'orienter convenablement, cf schéma.

En plus du système étudié, de nombreuses autres sources de champ magnétiques sont présentes dans l'environnement de l'expérience : appareils électriques, téléphones portables, écouteurs dans la poche de l'expérimentateur, notre planète, etc. Comment s'en affranchir ?

⋆ Éloigner le plus possible le système étudié des autres appareils électriques, notamment des alimentations/oscilloscope/téléphone.

⋆ « **Faire le zéro** » : tourner le bouton sur le boitier de mesure pour qu'il affiche 0 pour un courant nul dans la configuration exacte de la suite de l'expérience.[5]

1.3 Le solénoïde utilisé

L'objet utilisé est constitué de deux solénoïdes concentriques de même longueur totale $2L$, même nombre de spires $N = 200$, quasiment même diamètre $D = 49$ mm, de diamètre de fil $d = 1$ mm.

Le solénoïde accessible par les bornes noires ne comporte pas de jonction intermédiaire, on ne peut l'utiliser qu'en entier. Le solénoïde accessible par les bornes rouges comporte des jonctions intermédiaires, ce qui permet d'utiliser un solénoïde plus court. Le tableau suivant donne la longueur L et le nombre de spire N_L d'un demi-solénoïde à partir du milieu :

jonction	L (mm)	N_L
1	10,3	5
2	20,6	10
3	40,3	20
4	60,9	30
5	101,2	50
6	141,6	70
7	202,5	100

1.4 Les bobines de Helmholtz utilisées

On dispose de deux bobines coaxiales de diamètre 130 mm et comportant chacune 95 spires en fil de 1,3 mm de diamètre réparties sur 5 couches. L'intensité maximale est de 7 A.

1.5 Attention au courant maximum

Pour produire un champ magnétique important par un circuit électrique, on utilise des courants intenses. Ainsi :

⋆ avant d'alimenter le circuit, vérifier l'intensité maximale supportable par les différents composants. Ne surtout pas la dépasser.

⋆ pour limiter le gaspillage d'énergie, remettre le courant à 0 quand on ne fait pas de mesure.

3. Autres méthodes de mesure de champ magnétique : magnétorésistance, fluxmètre (intégrer la fem induite en déplaçant une bobine donne la variation de flux magnétique), SQUID (deux jonctions Josephson montées en parallèle dans une boucle supraconductrice), etc.
4. Cf chapitre de cours E1.
5. Ce qui veut dire ne surtout pas déplacer le dispositif entre deux points de mesure.

2 Mesure de μ_0

La constante fondamentale μ_0 est la *perméabilité magnétique du vide* (parfois appelée *constante magnétique*). Elle relie les champs magnétiques aux phénomènes qui leur ont donné naissance. Sa valeur approchée [6] est $\mu_0 \simeq 4\pi.10^{-7} = 12,56637.10^{-7}$ H.m^{-1}. L'objectif est de mesurer μ_0 en admettant juste une formule précédente.

1. Proposer un protocole de mesure de μ_0 avec son incertitude, estimée par une méthode de type A, en utilisant un solénoïde et la sonde à effet Hall. Il faudra notamment préciser où placer la sonde et justifier quel solénoïde utiliser.
2. Effectuer cette mesure et comparer à la valeur attendue.

3 Influence de la longueur du solénoïde

3. Mesurer le champ magnétique au centre du solénoïde en fonction de sa longueur. Utiliser `Regressi` pour comparer sur un graphe avec la formule théorique. Conclure sur la validité de l'approximation de solénoïde infini.

4 Production d'un gradient de champ

En utilisant les deux bobines de Helmholtz, on souhaite produire un gradient de champ magnétique le plus uniforme possible. On note d la distance entre les bobines et R leur rayon.

4. Effectuer les branchements pour produire un gradient de champ au voisinage du milieu du couple de bobines.
5. Déterminer pour quelle valeur de d/R le gradient semble le plus uniforme possible.

5 Calculs théoriques

6. (*) À partir de la formule 3 du champ d'un solénoïde fini, démontrer la formule du champ dans la limite infinie.
7. (**) En utilisant le théorème de superposition, démontrer la formule 2 du champ formé par deux spires à partir de la formule 1 du champ d'une seule spire.
8. (***) En découpant le solénoïde en spires infinitésimales de longueur dz, démontrer la formule 3 du champ d'un solénoïde à partir de la formule 1 du champ d'une seule spire.
9. (****) On note $f(z) = \frac{\mu_0 NI}{2} \frac{R^2}{(R^2+z^2)^{3/2}}$. Exprimer le champ en un point M de l'axe d'une configuration anti-Helmholtz en faisant intervenir la fonction f sans en reporter l'expression. Effectuer un développement limité à l'ordre quatre en z et en déduire que le gradient du champ est le plus uniforme possible si la dérivée troisième de f s'annule en $d/2$, soit $f^{(3)}(d/2) = 0$. En déduire alors la valeur de d en fonction de R.

Après avoir fait le chapitre *E3-Magnétostatique* :

10. (*) Déterminer la direction du champ produit par une spire sur son axe.
11. (*) Déterminer le champ à l'intérieur d'un solénoïde infini en admettant la nullité du champ à l'extérieur.

6. Jusqu'à la redéfinition des unités du système international le 20 mai 2019, la valeur de μ_0 était fixée exactement à $4\pi.10^{-7}$ H.m^{-1}.