DEVOIR EN TEMPS LIBRE

INDUCTION

Exercice n°1

Mesure du champ magnétique terrestre

Dans un laboratoire situé à Paris, on souhaite déterminer la norme $||\overrightarrow{B_h}||$ de la composante horizontale locale $\overrightarrow{B_h}$ dont le sens et la direction sont donnés sur la figure 1.

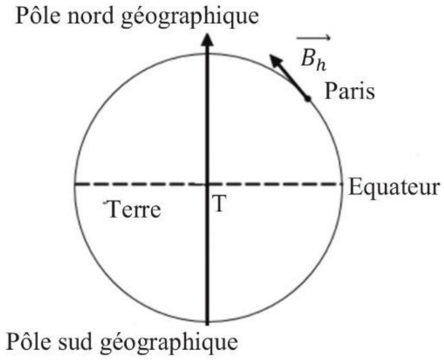


Figure 1 – Sens de la composante horizontale locale du champ magnétique terrestre à Paris.

Matériel disponible :

- Une aiguille aimantée libre de pivoter sans frottement sur son axe, fixé à un socle transparent et un fil de cuivre relié à deux bornes de sécurité fixées au même socle transparent, de courant admissible 5A, représenté figure 2 ;
- Un rapporteur ;
- Des fils électriques ;
- Un interrupteur ;
- Une alimentation électrique stabilisée 0V-30V/5A ;
- Un ampèremètre ;
- Un teslamètre à sonde de Hall biaxiale de gamme 0,1mT à 100mT.

Donnée : le champ magnétique créé par un fil infini parcouru par un courant I s'exprime, dans un système de coordonnées cylindriques d'axe z orienté par le sens réel du courant, par

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\overrightarrow{u_\theta}$$

où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \mathrm{H \cdot m^{-1}}$. On admet que le champ créé par le fil du dispositif d'Ørsted est convenablement décrit par cette expression.

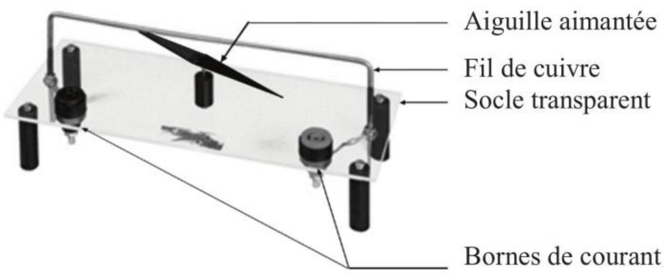


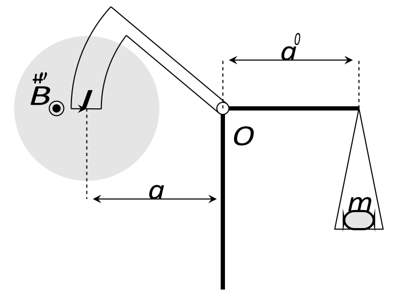
Figure 2 – Dispositif d'Ørsted.

On souhaite établir un protocole permettant de mesurer la composante horizontale locale du champ magnétique terrestre à Paris en exploitant le principe de superposition des champs magnétostatiques.

1. Pour quelle raison ne peut-on pas se servir directement du teslamètre pour effectuer la mesure ?
2. On suppose que le fil est parcouru par un courant d'intensité $\mathrm{I} = 1\mathrm{A}$. Calculer la valeur du champ magnétique à $r = 2\mathrm{cm}$ du fil.
3. Décrire et schématiser l'expérience à réaliser en vous servant du matériel mis à votre disposition, exception faite du teslamètre.
4. Préciser les mesures à réaliser.
5. Donner un ordre de grandeur des grandeurs physiques à employer pour réaliser l'expérience.

Exercice n°2

Balance de Cotton



La balance de Cotton est un dispositif ancien, développé au tout début du XXᵉ siècle par Aimé Cotton pour mesurer avec précision des champs magnétiques. Elle est constituée de deux bras rigidement liés l'un à l'autre en O. La partie de gauche comprend sur sa périphérie un conducteur métallique qui est parcouru par un courant et dont une partie est placée dans le champ magnétique uniforme et permanent à mesurer, représenté par la zone grisée. Dans cette partie, les conducteurs aller et retour sont des arcs de cercle de centre O, reliés par une portion horizontale de longueur L. La partie droite comporte un plateau sur lequel est déposée une masse m afin d'équilibrer la balance.

La balance peut tourner sans frottement dans le plan de la figure autour du point O. À vide, c'est-à-dire sans champ magnétique ni masse m, la position du plateau est ajustée afin que la balance soit à l'équilibre avec le bras de droite parfaitement horizontal.

1. Montrer que le moment en O des forces de Laplace s'exerçant sur les parties en arc de cercle est nul.

2. À l'équilibre, en présence de courant et de champ magnétique, établir l'expression du moment en O des forces de Laplace.

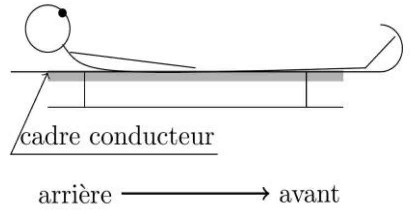
3. En déduire la relation entre la masse m à poser sur le plateau pour retrouver la configuration d'équilibre et le champ magnétique B, à exprimer en fonction de a, a', L, et de l'intensité de la pesanteur g.

4. La sensibilité de la balance étant de δ_m = 0,05g, en déduire la plus petite valeur de B mesurable pour a = a' = 25cm, L = 5cm et I = 5A. En comparant cette valeur avec une ou des références connues, conclure quant à l'utilisabilité de la balance.

Exercice n°3

Freinage d'une luge

La luge est devenue un sport olympique en 1964 à Innsbruck (Autriche). Le lugeur est allongé sur le dos et les pieds en avant, sur la luge qui glisse sur une piste de glace. Pour freiner, le lugeur ne peut compter que sur ses pieds car la luge ne comporte pas de frein. Les spécialistes peuvent atteindre des vitesses supérieures à 100km.h^{-1}. Pour le freinage une fois l'arrivée franchie, un simple ralentissement mécanique est insuffisant : du freinage par induction est utilisé en complément.



On considère une luge de masse totale 100kg, lugeur compris, franchissant la ligne d'arrivée à la vitesse v_a = 30m.s^{-1}. Sous la luge est fixé un cadre métallique rigide, conducteur, rectangulaire, de résistance totale $R_c = 10^{-3}\,\Omega$ et de côtés $\ell \times L$ (ℓ = 50,0cm et L = 100cm). La piste est horizontale et le long de l'axe Ox, dont l'origine O est fixée sur la ligne d'arrivée, avant la zone de freinage. L'origine des temps est également fixée au passage de la ligne d'arrivée. L'axe Oz désigne la verticale ascendante. Un dispositif crée un champ magnétique $\vec{B} = B\,\vec{u_z}$ (B = 1,00T) sur toute la piste de décélération.

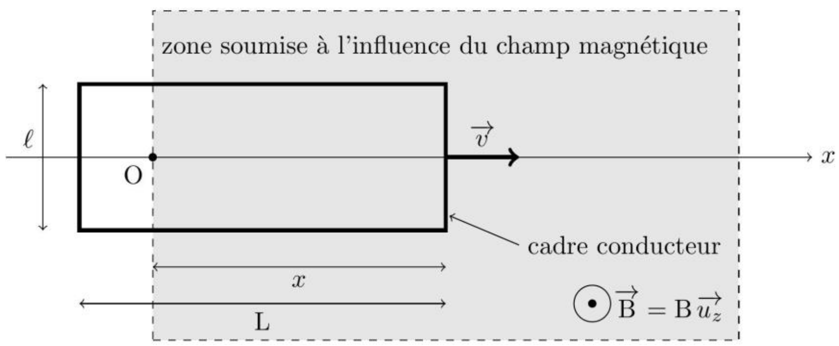


Figure 2 – Cadre conducteur de la luge entrant dans la zone magnétique.

1. Décrire (sans calcul) les différentes phases du mouvement de la luge depuis la ligne d'arrivée jusqu'à ce qu'elle ait franchi complètement la zone soumise au champ magnétique, supposée ici d'une longueur supérieure à L. Indiquer à chaque étape le sens du champ et du courant induits.

2. Le champ magnétique a une valeur de 1T. Est-ce élevé ? Quel dispositif pourrait, par exemple, créer un champ de cette intensité ? Quel est l'ordre de grandeur du champ magnétique terrestre ?

Dans la suite, on s'intéresse au mouvement du cadre lorsqu'il n'a pas entièrement pénétré dans la zone soumise à l'influence du champ magnétique $\vec{B}$.

3. Exprimer la force électromotrice e qui apparaît dans le cadre en fonction de la vitesse v du cadre, de sa largeur ℓ et du champ magnétique B.

Le circuit électrique équivalent au cadre rectangulaire est constitué de la force électromotrice e et de la résistance R_c. On néglige l'inductance propre du cadre.

4. Exprimer l'intensité i induite dans le cadre en fonction de *B*, ℓ, *v* et R_c.

5. Exprimer la force de Laplace élémentaire $\overrightarrow{dF_L}$ qui s'exerce sur un élément de cadre $\overrightarrow{d\ell}$, parcouru par l'intensité i. En déduire la résultante $\overrightarrow{F_L}$ qui s'exerce sur le cadre, en fonction de R_c, v, ℓ et B. Commenter le sens de cette force.

6 - Établir l'équation différentielle qui porte sur la vitesse v de la luge. La solution de cette équation différentielle s'écrit $v(t) = v_a \exp(-t/\tau)$, où τ est le temps caractéristique du mouvement lorsque la luge pénètre dans la zone soumise au champ magnétique.

7. Exprimer τ en fonction de B, m, ℓ et R_c. Application numérique.

8. Exprimer la position x(t) de la luge en fonction de t, τ et v_a.

9. Calculer la durée T que met le cadre pour pénétrer entièrement dans la zone magnétique.

10. En déduire l'expression de v(T). Calculer numériquement la variation $\Delta v = v_0 - v(T)$ de vitesse de la luge entre les instants t = 0 et T.

11. Quelle est la vitesse de la luge une fois que le cadre est entièrement dans la zone soumise au champ magnétique ? Justifier. En déduire la longueur idéale de la zone soumise au champ magnétique.

12. La zone soumise au champ magnétique est limitée à la longueur idéale déterminée à la question précédente. Que se passe-t-il lorsque le cadre conducteur sort de cette zone ?

13. On installe une alternance de zones magnétiques et non magnétiques. Combien de zones magnétiques sont nécessaire pour que la vitesse de la luge diminue jusque environ $5 m\cdot s^{-1}$, vitesse à partir de laquelle le lugeur peut freiner avec ses pieds ? Quelle est alors la longueur de la piste de ralentissement ?

14. Citer un autre exemple d'utilisation du freinage par induction.