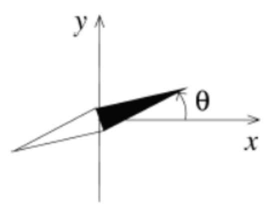
TD n°18 Ferromagnétisme

ENCPB - Pierre-Gilles de Gennes

Résumé
⋆ Exercice niveau CCP
• Exercice niveau Centrale/Mines-Ponts.
⋄ Exercice nécessitant un sens physique particulier.

1. Mesure du champ magnétique terrestre⋆



Sur une paillasse de laboratoire, une boussole assimilable à un dipôle magnétique de moment dipolaire $\vec{\mathscr{M}}$ est libre de tourner autour de l'axe vertical $\Delta = O_z$. On note J son moment d'inertie par rapport à Δ. Elle est plongée dans un champ magnétique horizontal uniforme $\vec{B} = B\vec{e}_x$, les frottements sont négligés.

1. On rappelle l'expression de l'énergie potentielle pour un tel moment $E_p = -\vec{\mathscr{M}}.\vec{B}$. On libère la boussole sans vitesse angulaire initiale, alors qu'elle fait un angle droit avec la direction du champ. Décrire le mouvement et préciser sa plus grande valeur de vitesse angulaire.
2. Dans cette question, aucun autre champ n'est présent que le champ magnétique terrestre, dont la composante horizontale est dirigée selon O_x et d'intensité notée B_0. On constate que, libérée avec un petit angle par rapport à cet axe, la boussole oscille avec une période T_0. Quelle relation relie B_0 à T_0 ? Quelle difficulté rencontre-t-on pour déduire la valeur B_0 de la mesure de T_0 ?
3. On crée un champ magnétique supplémentaire $\vec{B}_1 = B_1\vec{e}_x$, d'intensité réglable et connue, à l'aide d'un ensemble de bobines de Helmholtz parcourues par un courant électrique. On mesure la période T des petites oscillations autour de l'axe O_x lorsque le champ supplémentaire et le champ géomagnétique ont même direction et même sens. En inversant alors le sens de l'intensité du courant électrique, on constate que les oscillations ont toujours lieu autour de la même position angulaire, mais qu'elles s'effectuent avec une période T'. Relier B_0 à B_1, T et T'. A-t-on remédié aux difficultés citées précédemment ?

2. Réfraction des lignes de champ magnétiques•

Considérons l'interface entre deux milieux magnétiques indicés 1 et 2 de perméabilité respective μ_1 et μ_2. On admettra les relations de passage suivantes :

— *A l'interface entre deux milieux, la composante normale du champ magnétique est continue.*

— *En l'absence de courant surfacique, la composante tangentielle de l'excitation magnétique est continue.*

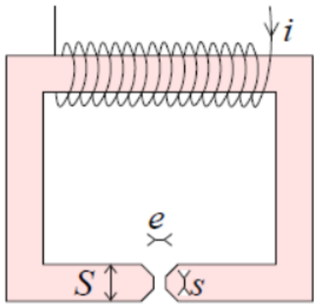
1. À partir des relations de passage, démontrer la loi de la réfraction du champ magnétique à l'interface entre deux MLHI doux sans courant surfacique :

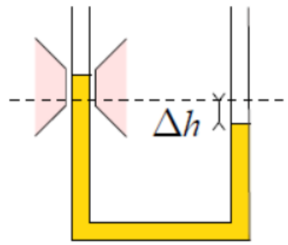
$$\frac{\tan(i_1)}{\mu_1} = \frac{\tan(i_2)}{\mu_2}$$

où les angles des lignes de champ sont repérés par rapport à la normale à l'interface entre les deux milieux.
2. Conclure en ce qui concerne l'interface entre un milieu magnétique et l'air.

3. Mesure d'une susceptibilité⋆

On souhaite mesurer la susceptibilité d'une solution de $FeCl_3$, de masse volumique ρ. Pour cela, on place cette solution dans un tube en U. L'une des extrémités est placée entre les pièces polaires d'un électroaimant, l'autre extrémité est loin de toute source de champ magnétique. Lorsqu'on allume l'électroaimant, le niveau du fluide varie de Δh (tout en restant dans l'entrefer de l'aimant). Le champ magnétique dans l'entrefer est mesuré par un teslamètre à effet Hall.

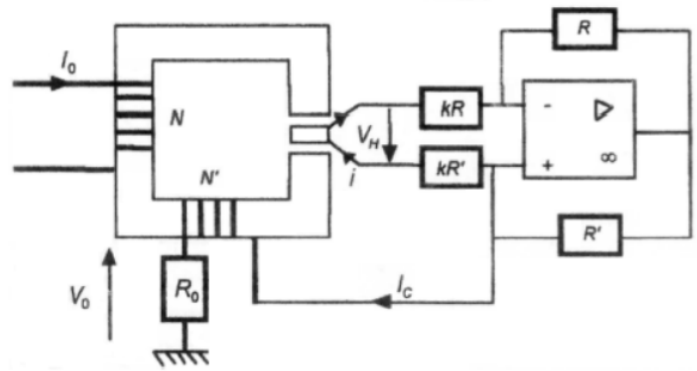




1. L'électroaimant est constitué d'un noyau ferromagnétique de perméabilité relative μ_r, de longueur ℓ et de section S sur la quasi-totalité de la longueur. Les extrémités ont une section $s = \frac{S}{10}$. Sur ce matériau est enroulée une bobine de N spires parcourue par un courant d'intensité i. L'entrefer est de largeur $e' = \frac{\ell}{100}$. Montrer que le champ dans l'entrefer peut s'écrire :
$$B = \frac{\mu_0 N i}{\frac{\ell s}{\mu_r S} + e} \approx \frac{\mu_0 N i}{e}$$
2. On admet que la force magnétique par unité de volume s'écrit : $\vec{f} = (\vec{M}.\overrightarrow{\text{grad}})\vec{B}$. Montrer qu'on a aussi :
$$\vec{f} = \frac{\chi_m}{2\mu_0}\overrightarrow{\text{grad}}(B^2)$$
où χ_m est la susceptibilité magnétique de la solution, la solution étant paramagnétique ($\chi_m \approx 10^{-3}$).
3. En déduire la relation entre B et Δh. Le niveau du fluide s'élève-t-il ou s'abaisse-t-il dans l'entrefer ?
4. A.N. : on a $\rho = 1,1.10^3 \text{kg.m}^{-3}$. On mesure $\Delta h = 8$ mm pour $B = 2,0$ T. En déduire la susceptibilité de la solution.

4. Capteur d'intensité électrique•

Le dispositif ci-dessous est utilisé comme sonde ampèremétrique dans divers dispositifs de régulation de commande de forte puissance. Le circuit magnétique est constitué d'un matériau magnétique de très forte perméabilité et d'un entrefer d'épaisseur e faible devant la longueur totale ℓ du circuit. Le courant I_0 dont on cherche à mesurer l'intensité est injecté dans un circuit électrique comportant N spires bobinées autour du circuit magnétique. Une sonde de Hall, placée dans l'entrefer, mesure alors une tension V_H proportionnelle à l'intensité du champ magnétique B_e qui y règne (on note α cette constante de proportionnalité). La tension V_H est appliquée aux bornes d'un dispositif électronique à amplificateur linéaire intégré, dont l'une des branches est enroulée (N_0 spires) autour du circuit magnétique précédent. On suppose que l'ALI fonctionne en régime linéaire. Données : $e = 1,0$ mm ; $\alpha = 0,1$ V.T^{-1} ; $kR' = 0,1\Omega$; $N = 1$ et $N_0 = 1000$.

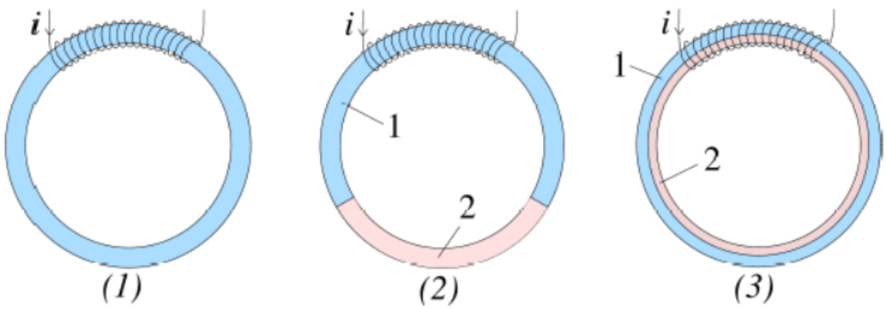


1. Donner une relation entre V_H, N, N_0, I_0 et I_c. On précisera les hypothèses effectuées.

2. Déterminer la relation entre I_c et V_H lorsque l'ALI fonctionne en régime linéaire.

3. Déterminer la valeur de la résistance R_0 permettant d'obtenir, en sortie de dispositif, une tension V_0 telle que $V_0 = \gamma I_0$ avec $\gamma = 0,25 V.A^{-1}$.

5. Reluctance et analogie électrique⋆◇

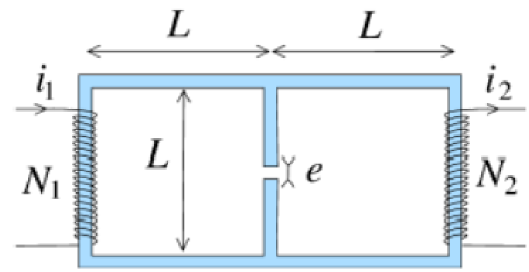


1. On considère le circuit magnétique (1), constitué d'un milieu ferromagnétique torique de perméabilité μ, de longueur ℓ, section S. Une bobine de N spires parcourue par un courant I est enroulée autour du ferromagnétique. Montrer qu'on peut écrire une « loi d'Ohm magnétique » $\mathscr{F} = \mathscr{R}\Phi$, où $\mathscr{F} = Ni$ est appelée force magnétomotrice, et Φ est le flux du champ $\vec{B}$ à travers une section du tore. Donner l'expression de la réluctance $\mathscr{R}$ en fonction des paramètres du ferromagnétique.

2. On considère le circuit magnétique (2) constitué de deux matériaux ferromagnétiques différents (même section S, perméabilité μ_1, longueur ℓ_1 pour le premier, μ_2, ℓ_2, pour le second). Montrer qu'on peut définir une réluctance $\mathscr{R}_{\mathrm{eq}}$ équivalente dont on donnera l'expression en fonction des réluctances $\mathscr{R}_1$ et $\mathscr{R}_2$ des deux ferromagnétiques.

3. On considère le circuit magnétique (3) constitué de deux matériaux ferromagnétiques différents (même longueur ℓ, perméabilité μ_1, section S_1 pour le premier, μ_2, S_2, pour le second). Même question.

4. On considère l'électroaimant ci-dessous, constitué d'un milieu ferromagnétique de section $S = 4,0\ \mathrm{cm}^2$ et de perméabilité relative $\mu_r = 10^4$ et de deux bobines de nombres de spires $N_1 = 200$ et $N_2 = 300$ parcourues par des courants d'intensité respectives $i_1 = 3,0$ A et $i_2 = 2,0$ A. Calculer le champ dans l'entrefer de largeur $e = \frac{L}{100}$, avec $L = 20$ cm.



6. Transition paramagnétique-ferromagnétique•

On considère un milieu constitué d'atomes (densité volumique n) possédant chacun un moment magnétique $\vec{m} = \pm\mu_B\vec{u}_z$z où μ_B est le magnéton de Bohr. Ce milieu est placé dans un champ magnétique $\vec{B}_0 = B_0\vec{u}_z$, à température T. On posera$x = \frac{\mu_B B_0}{k_B T}$.

1. Donner les valeurs possibles E_i de l'énergie d'interaction magnétique d'un atome dans le champ magnétique.

2. On admet que le nombre d'atomes dans chaque état d'énergie E_i est proportionnel à $\exp^{\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right)}$ (statistique de Boltzmann). Calculer la densité volumique n_i d'atomes dans chaque état.

3. Exprimer l'aimantation du matériau $\vec{M}$. Donner son allure en fonction de x. Interpréter cette courbe.

4. Pour expliquer le comportement des corps ferromagnétiques, on suppose que chacun des atomes est soumis, outre à l'action du champ magnétique $\vec{B}_0$, à celle d'un champ moyen $\vec{B}_W$ (ou « champ moléculaire » de Weiss) qui traduit l'action du milieu sur lui-même. Celui-ci est supposé proportionnel à l'aimantation, soit $\vec{B}_W = \mu_0\alpha\vec{M}$ où α est une constante positive indépendante de la température. On suppose applicables les résultats obtenus à condition de remplacer $\vec{B}_0$ par $\vec{B}_0 + \vec{B}_W$. Montrer qu'en l'absence de champ appliqué, il peut exister une aimantation non nulle à condition que la température T soit inférieure à une température T_c (appelée température de Curie) que l'on exprimera en fonction deμ_0, α, n, μ_B et k_B.