



## Devoir surveillé n°1

Samedi 20 septembre 2025

N.B. : vous attacherez la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.

Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

### RAPPEL DES CONSIGNES :

Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé non effaçable pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs, excepté le vert, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.

Ne pas utiliser de correcteur.

Écrire le mot FIN à la fin de votre composition.

## Première partie

# Un modèle simplifié de génératrice linéaire : le rail de Laplace

Le moteur Stirling fournit de la puissance mécanique sous la forme d'un mouvement linéaire du piston. Pour utiliser cette puissance, il faut la convertir en électricité. Pour cela, une génératrice linéaire est utilisée. Un modèle très simplifié de cette conversion est celui du rail de Laplace.

## I Présentation du système

On considère le dispositif des rails de Laplace représenté figure A du document réponse. Il est constitué de :

- deux rails fixes conducteurs parallèles distants de  $L$  ;
- une barre conductrice rectiligne mobile  $MN$  de masse  $m$ , pouvant se déplacer suivant la direction des deux rails fixes. Les frottements sont négligés.

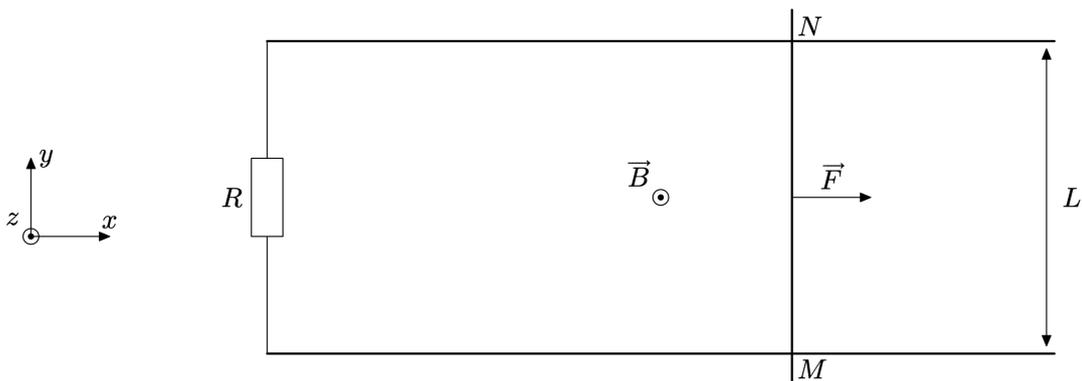
L'ensemble forme un circuit déformable, plongé dans un champ magnétique  $\vec{B} = B\vec{e}_z$  stationnaire et uniforme.

On considère que le circuit ainsi formé possède une résistance électrique totale  $R$ . La tige est initialement immobile.

On néglige tout phénomène d'auto-induction.

À partir de  $t = 0$ , un opérateur extérieur applique à la barre une force  $\vec{F} = F\vec{e}_x$  constante sur la tige initialement immobile. On repère la position de la tige par son abscisse  $x$ .

1. Prévoir qualitativement l'évolution de la vitesse de la tige.
2. Donner l'expression de la force de Laplace s'exerçant sur une barre conductrice  $MN$  parcourue par un courant  $i$  dans un champ magnétique uniforme et stationnaire.
3. On suppose la tige en mouvement. Reproduire sur votre copie le schéma de la figure A suivante en représentant la force électromotrice d'induction  $e(t)$ , le courant ainsi que la force de Laplace. On ne cherchera pas à donner les valeurs de ces grandeurs pour le moment.



**Figure A** Schéma de l'expérience des rails de Laplace

## II Étude temporelle

4. Établir l'expression de la force électromotrice d'induction  $e(t)$  en fonction de  $v(t)$ ,  $L$  et  $B$ .
5. Établir l'équation électrique du système liant  $e(t)$ ,  $i(t)$  et les paramètres du problème.
6. Établir l'équation mécanique du système liant  $\dot{v}(t)$ ,  $F$ ,  $i(t)$  et les paramètres du problème.
7. Dédire des équations précédentes une équation différentielle sur  $v(t)$ .
8. En déduire la dimension de  $\frac{mR}{B^2L^2}$ .
9. Résoudre cette équation différentielle et puis tracer  $v(t)$  en fonction du temps. On fera apparaître sur le graphe le temps caractéristique  $\tau$  du problème. Ces résultats sont-ils en accord avec la prédiction de la question 1 ?

## III Bilan de puissance

10. Exprimer la puissance de la force de Laplace  $\mathcal{P}_L$
11. Donner l'expression de la puissance dissipée par effet Joule  $\mathcal{P}_J$  en fonction de  $i(t)$ ,  $L$ ,  $B$  et  $v(t)$ , puis en fonction de la puissance de la force de Laplace  $\mathcal{P}_L$ . Interpréter cette relation.
12. Donner l'expression de la puissance fournie par l'opérateur extérieur  $\mathcal{P}_{op}$ .
13. À partir de l'équation mécanique, effectuer un bilan de puissance global et interpréter chacun des termes.

## Deuxième partie

# Transferts de charges par effet Hall

Nous allons nous intéresser aux transferts de charges dans une portion de conducteur.

## I Présentation

Soit une particule ponctuelle de charge  $q$  en mouvement à la vitesse  $\vec{v}$  soumise à l'action d'un champ magnétique  $\vec{B}$ .

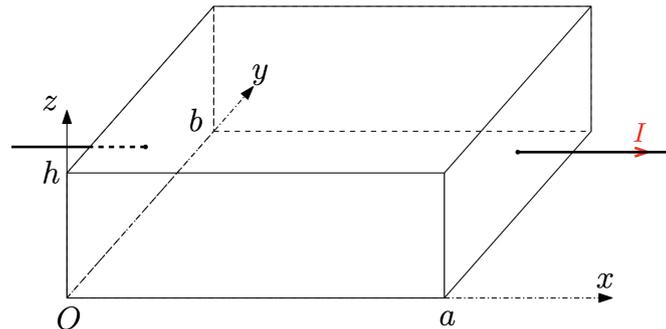


Figure 1

Soit une portion de conducteur de dimensions  $a$ ,  $b$ ,  $h$  (figure 1). Ce conducteur est inséré dans un circuit parcouru par un courant d'intensité  $I > 0$  (comme indiqué sur la figure 1).

On notera  $n$  la densité volumique de porteurs de charge et  $\vec{v}$  la vitesse d'un porteur de charge dans le volume. Les particules portent la charge  $q$  dont on ne connaît a priori pas le signe. On suppose dans un premier temps qu'il n'y a qu'un seul type de porteurs.

1. Rappelez l'expression de  $\vec{j}$  vecteur densité volumique de courant, en fonction de  $n$ ,  $q$  et du vecteur vitesse d'un porteur de charge.

## II Approche qualitative de l'effet Hall

2. Si les porteurs de charges sont des électrons de charge  $-e$ , quel est le sens de  $\vec{j}$ ? Quel est le sens de  $\vec{v}$ ?
3. Mêmes questions si les charges des porteurs sont positives  $q = +e$ .

On place le volume dans un champ magnétique  $\vec{B} = B_0 \vec{u}_y$  (où  $B_0 > 0$ ) supposé uniforme à l'échelle de l'échantillon.

4. En considérant la direction et le sens de la force exercée par le champ magnétique sur un porteur de charge, expliquer en quelques mots pourquoi on voit apparaître une tension entre les faces d'équations  $z = 0$  et  $z = h$  du parallélépipède.
5. Faire deux schémas indiquant le signe des charges apparaissant sur chaque face : dans le cas où  $q = -e$  et dans le cas où  $q = +e$ .

### III Approche quantitative de l'effet Hall (cas des électrons porteurs)

On se place dans le cas où les charges mobiles sont des électrons, donc  $q = -e$ . On notera  $n_e$  leur densité volumique et  $\vec{v}_e$  leur vitesse.

On suppose qu'après un régime transitoire au cours duquel des charges ont commencé à s'accumuler sur l'une des faces, on atteint un régime permanent où la quantité de charges accumulées sur les faces ne varie plus, donnant lieu à la création d'un champ électrique de Hall uniforme entre les faces noté  $\vec{E}_H$ .

Par ailleurs les porteurs de charges mobiles ont repris leur mouvement d'ensemble à la vitesse  $\vec{v}_e$  uniforme et constante suivant  $(Ox)$  l'intensité du courant électrique est toujours  $I$ .

6. En utilisant la partie précédente, expliquer quel est le sens de  $\vec{E}_H$ .
7. Établir, en s'intéressant au mouvement d'un porteur de charge, l'expression de  $\vec{E}_H$ .
8. En projetant suivant  $(Oz)$  la relation précédente, donner l'expression de  $E_H$  en fonction de  $B_0$  et  $v_e$ ; puis en fonction de  $B_0$ ,  $e$ ,  $n_e$ ,  $I$  et des dimensions du conducteur.
9. Exprimer  $U_H = V(z = h) - V(z = 0)$ , la tension de Hall.

### IV Applications numériques

10. Dans le cas d'un conducteur comme le cuivre, les seuls porteurs sont des électrons. On suppose que dans le cristal chaque atome de cuivre libère un électron de conduction. En utilisant les données du tableau 2, calculer la tension de Hall  $U_H$ .

Masse molaire atomique du cuivre	$M_{\text{Cu}} = 63,5 \text{ g.mol}^{-1}$
Masse volumique du cuivre	$\mu_{\text{Cu}} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
Constante d'Avogadro	$\mathcal{N}_a = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Charge élémentaire	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Champ magnétique	$B_0 = 0,1 \text{ T}$
Dimensions du conducteur	$h = 5,5 \text{ mm}, a = b = 0,2 \text{ mm}$
Intensité du courant	$I = 0,1 \text{ A}$

11. Commenter la valeur obtenue.
12. Reprendre le calcul pour un semi-conducteur, comme le germanium, dopé  $N$  de sorte que  $n_e = 7 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ . Conclure.

## Troisième partie

## Cuivre et supraconductivité

## I Création d'un champ magnétique intense à l'aide d'un solénoïde

L'imagerie médicale a besoin de champ magnétique intense, permanent et uniforme. On se propose ici de dimensionner une bobine dans laquelle règne un champ magnétique de 2 T.

Résistance électrique d'un conducteur ohmique :

On considère un conducteur ohmique (figure 1), de conductivité électrique  $\gamma$ , de section  $S$ , de longueur  $h$ , parcouru par un courant électrique continu uniformément réparti de densité  $\vec{j}_e = j_e \vec{e}_z$ .

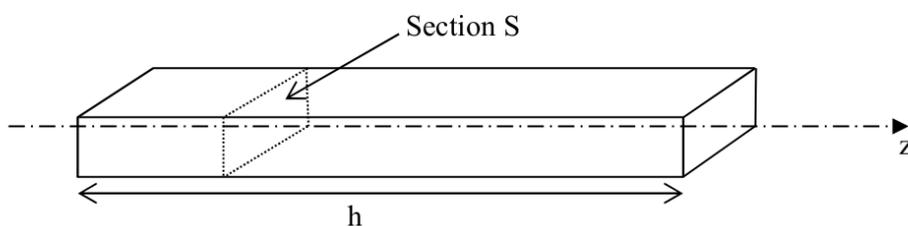


Figure 1 : conducteur ohmique

1. Exprimer, en fonction de  $\gamma$  et de  $\vec{j}_e$ , le champ électrique qui règne à l'intérieur de ce conducteur.
2. Donner, en fonction de  $\gamma$ ,  $j_e$  et des caractéristiques géométriques de ce conducteur, les expressions du courant électrique  $I$  traversant ce conducteur et de la différence de potentiel  $U$  aux bornes de ce conducteur.
3. En déduire, en fonction de  $\gamma$  et des caractéristiques géométriques de ce conducteur, la résistance électrique  $R_\Omega$  de ce conducteur.

Caractéristiques de la bobine à température ambiante :

On suppose ici que la bobine est maintenue à température ambiante  $T = 300$  K.

La bobine (figure 2, ci-après) est assimilée à un solénoïde d'axe  $Oz$ , de longueur  $L$ , de rayon  $R_{moy}$  avec  $R_{moy} \ll L$ . Les effets de bords sont négligés, le solénoïde est donc considéré comme infini. Il est constitué de spires jointives d'un fil de cuivre de diamètre  $d$  et de conductivité électrique  $\gamma_{Cu}$ . Chaque spire est parcourue par un courant  $I$ . Il comporte  $p$  couches de bobinage superposées.

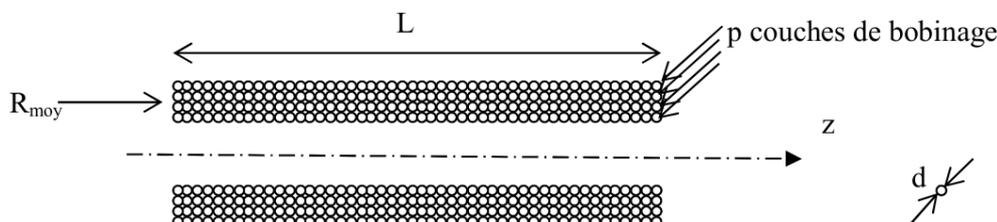


Figure 2 : bobine

4. (a) Sur une seule couche de bobinage, combien y a-t-il de spires jointives par unité de longueur de solénoïde ?  
(b) Combien de spires par unité de longueur comporte ce solénoïde ?
5. (a) Donner, en fonction de  $d$ ,  $p$ ,  $I$  et  $\mu_0$ , l'expression du champ magnétique créé à l'intérieur du solénoïde.  
(b) Application numérique :  $B = 2,0$  T,  $d = 3,0$  mm,  $I = 35$  A. Déterminer  $p$ .

6. (a) En assimilant le rayon de chaque spire au rayon moyen  $R_{moy}$ , exprimer la longueur,  $L_{fil}$ , de fil nécessaire à la réalisation de cette bobine en fonction de  $R_{moy}$ ,  $d$ ,  $p$  et  $L$ .  
 (b) Application numérique :  $L = 1,8$  m et  $R_{moy} = 50$  cm. Évaluer  $L_{fil}$ .
7. (a) Exprimer en fonction de  $\gamma_{Cu}$ , de  $L_{fil}$  et de  $d$  la résistance électrique  $R_{elec}$  de la bobine.  
 (b) Application numérique : évaluer la puissance  $P_J$ , dissipée par effet Joule dans la bobine. Commenter.

Caractéristiques de la bobine refroidie à 77 K :

On suppose ici que la bobine est maintenue à la température de 77 K.

Pour diminuer la puissance dissipée, on peut envisager de refroidir le conducteur en cuivre par l'intermédiaire d'un bain d'azote liquide à 77 K. On peut alors imposer dans un conducteur de cuivre, de même diamètre  $d = 3$  mm, un courant plus important  $I' = 80$  A. On réduit ainsi le nombre de spire de la bobine et donc sa résistance électrique et son rayon moyen.

8. (a) Quel est alors le nombre de couches de bobinage,  $p'$ , à superposer pour obtenir un champ magnétique de 2 T ?  
 (b) En assimilant le rayon de chaque spire au nouveau rayon moyen  $R'_{moy} = 40$  cm, évaluer la nouvelle puissance dissipée par effet Joule,  $P'_J$ , dans la bobine.

Compte-tenu du coût de la réfrigération à 77 K, il faut tenir compte de l'efficacité de la machine thermique assurant le maintien de cette basse température.

9. On considère une machine frigorifique cyclique et réversible qui assure, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur, les transferts thermiques entre deux sources de températures constantes  $T_f$  et  $T_c$ .  
 (a) En effectuant un bilan énergétique et un bilan entropique sur un système bien défini, exprimer l'efficacité  $e_{rev}$ , de cette machine en fonction de  $T_f$  et  $T_c$ .  
 (b) Application numérique :  $T_f = 77$  K et  $T_c = 300$  K. Évaluer  $e_{rev}$ .
10. Évaluer la puissance  $P'$ , minimale, nécessaire pour absorber la puissance  $P'_J$ , dissipée dans la bobine en cuivre refroidi. Commenter.

## II Puissance dissipée dans le supraconducteur lors des régimes transitoires :

Si les supraconducteurs sont dépourvus de pertes en régime continu, il n'en est pas de même en régime variable. Pour les bobines alimentées en régime continu, ces pertes ont lieu lors des deux régimes transitoires qui correspondent en début d'utilisation de la bobine à l'installation du courant dans le conducteur, puis en fin d'utilisation de la bobine, lors de la redescente à zéro de ce courant.

On se propose ici déterminer l'ordre de grandeur de la puissance dissipée par unité de longueur du conducteur, lors de la première montée de courant, dans une situation dite de champ propre, c'est-à-dire lorsqu'une portion de conducteur est soumise aux variations temporelles du champ magnétique qu'il crée sur lui-même.

On assimile le supraconducteur (figure 3) à un fil rectiligne infini suivant l'axe  $Oz$ , de rayon  $R$ . On adopte les coordonnées cylindriques.

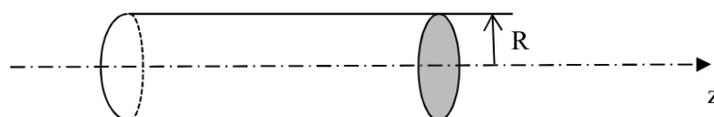


Figure 3 : supraconducteur

Compte-tenu des invariances du problème, la densité volumique de courant, notée  $\vec{j}_e$ , dans le supraconducteur ne dépend que de  $r$  et est portée par le vecteur  $\vec{e}_z$ . On a  $\vec{j}_e = j_e(r)\vec{e}_z$ . Pour un courant de transport  $I$  donné, la densité de courant n'est pas uniforme dans le supraconducteur, son amplitude vaut  $\pm j_0$  ou 0, où  $j_0$  est

une constante. Ce courant se distribue de façon à protéger le centre du supraconducteur de toute variation de champ magnétique.

11. Déterminer en fonction de  $j_0$  et de  $R$  la valeur maximale  $I_c$ , dite valeur critique du courant de transport de ce conducteur.

Étude de la première montée de courant dans le supraconducteur :

On ne s'intéresse ici qu'à la première montée du courant  $I(t)$  dans le supraconducteur.

On suppose que cette première montée s'effectue, pendant une durée  $T$ , suivant une consigne en rampe de sorte que :  $I(t) = \frac{I_0}{T}t$ , où  $I_0$  est la valeur finale du courant dans le supraconducteur.

Ce courant se distribue de façon à protéger le centre du supraconducteur de toute variation de champ magnétique, de sorte qu'il se répartit, à un instant  $t$  de cette première étape, à la périphérie du supraconducteur dans la zone :  $r_1(t) < r < R$  (figure 4).

On a :  $j_e(r, t) = 0$  pour  $r < r_1(t)$  et  $j_e(r, t) = j_0$  pour  $r > r_1(t)$ .

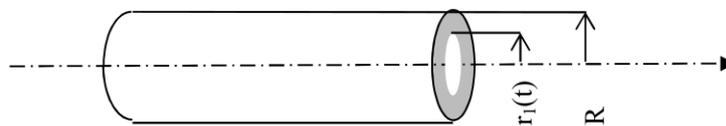


Figure 4 : répartition du courant dans le supraconducteur

12. On définit par  $u = \frac{I_0}{I_c}$  le taux d'utilisation du supraconducteur. Exprimer  $u$  en fonction de  $j_0$ ,  $R$  et  $I_0$ .
13. (a) Déterminer la relation qui existe entre  $I(t)$ ,  $j_0$ ,  $r_1(t)$  et  $R$ .  
 (b) En déduire l'expression de  $r_1(t)$  en fonction de  $R$ ,  $u$ ,  $T$  et  $t$ .  
 (c) Exprimer  $r_1(T)$  en fonction de  $u$  et  $R$ .

On montre que le champ électrique  $\vec{E}(M, t)$  au sein du supraconducteur a pour expression :

$$\vec{E} = E(r, t)\vec{e}_z = \vec{0} \text{ pour } r < r_1(t) \text{ et } \vec{E} = E(r, t)\vec{e}_z = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi T} \ln\left(\frac{r}{r_1(t)}\right)\vec{e}_z \text{ pour } r \in [r_1(t), R].$$

14. Quelle est l'unité de  $\vec{E}$  ?
15. Donner l'expression de la densité volumique locale et instantanée de puissance dissipée dans le supraconducteur, notée  $p_v(r, t)$  :
- (a) dans la zone  $r \in [0, r_1(t)]$   
 (b) dans la zone  $r \in [r_1(t), R]$ .
16. Par intégration sur l'espace, en déduire, en fonction de  $\mu_0$ ,  $I_0$ ,  $T$ ,  $L_{supra}$ ,  $u$  et  $t$ , l'expression de la puissance  $P_{elec}(t)$  dissipée dans une longueur  $L_{supra}$  de supraconducteur à l'instant  $t$  lors de la première montée de courant.
17. (a) Par intégration sur le temps, déterminer l'énergie  $Q$  dissipée lors de la première montée du courant dans un supraconducteur de longueur  $L_{supra}$  en fonction de  $\mu_0$ ,  $I_0$ ,  $L_{supra}$  et  $u$ .  
 (b) Est-il utile d'augmenter la durée  $T$  d'établissement de ce courant pour réduire l'énergie dissipée dans le supraconducteur ?
18. La machine thermique qui assure le refroidissement du supraconducteur à 4,2 K a une efficacité de  $1,5 \cdot 10^{-3}$ .  
 On donne  $I_0 = 445$  A,  $L_{supra} = 14000$  m et  $u = 0,7$ . Évaluer l'énergie consommée  $Q_{amb}$  par le réfrigérateur devant absorber l'énergie  $Q$  dissipée lors de la première montée de courant. Commenter.

**Données :**

**Constantes physiques :**  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H.m<sup>-1</sup>.

**Conductivité électrique du cuivre :**  $\gamma_{\text{Cu}}(77 \text{ K}) = 3,3 \cdot 10^8 \text{ S.m}^{-1}$ ,  $\gamma_{\text{Cu}}(300 \text{ K}) = 6 \cdot 10^7 \text{ S.m}^{-1}$ .

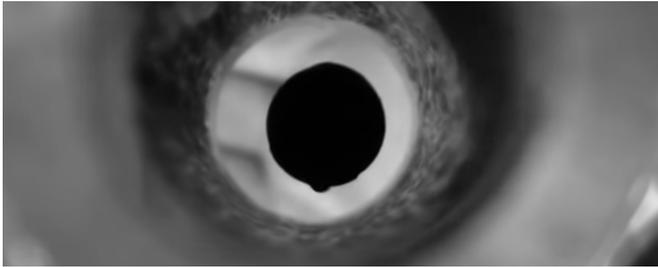
**Formulaire mathématique**

Fonction : $f(x)$	Primitive : $F(x)$
$x \ln \frac{x}{x_0}$	$\frac{x^2}{2} \ln \left( \frac{x}{x_0} \right) - \frac{x^2}{4} + cste$
$\ln(1 - \alpha x)$	$\frac{(1 - \alpha x) - (1 - \alpha x) \ln(1 - \alpha x)}{\alpha} + cste$

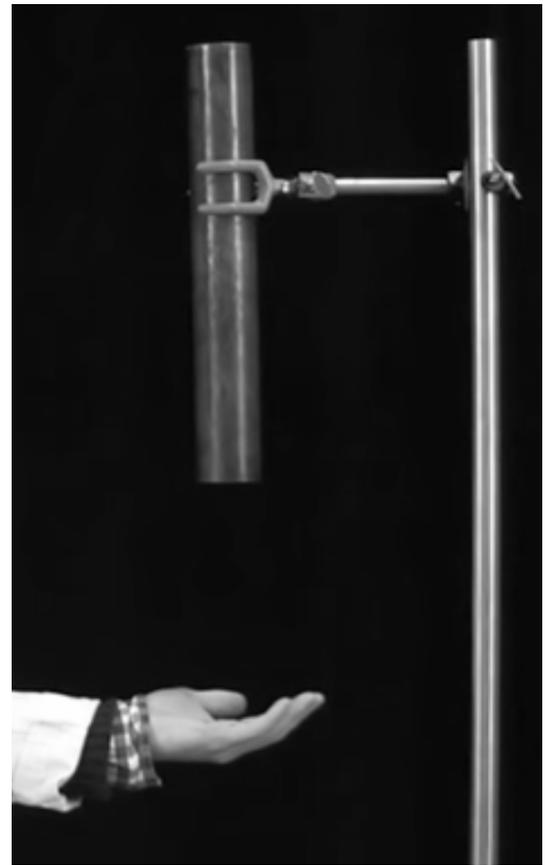
## Quatrième partie

# Freinage d'une chute libre par induction

On s'inspire ici d'une vidéo de vulgarisation du MIT. D'après le commentaire proposé, « Un aimant est abandonné le long d'un tube de cuivre et y subit une force résistive. La chute de l'aimant induit un courant dans le tube de cuivre et, du fait de la loi de Lenz, ce courant crée un champ magnétique qui s'oppose aux variations du champ dues à la chute de l'aimant. Ce dernier est ainsi repoussé et tombe plus lentement. »



On voit (photographie ci-contre à droite) l'expérimentateur attendre plusieurs secondes l'arrivée de l'aimant à la base du tube alors que la même chute sans les effets inductifs dure quelques centièmes de seconde. Une vue par le haut (ci-dessus) montre l'aimant, sphérique, dans le tube pendant sa chute.



Le tube de cuivre a pour rayon intérieur  $r_i = 15$  mm et pour épaisseur  $e = 7$  mm. On s'intéresse à une situation où l'aimant progresse vers le bas à la vitesse  $v$  supposée constante le long de l'axe  $(Oz)$  du tube (figure 2).

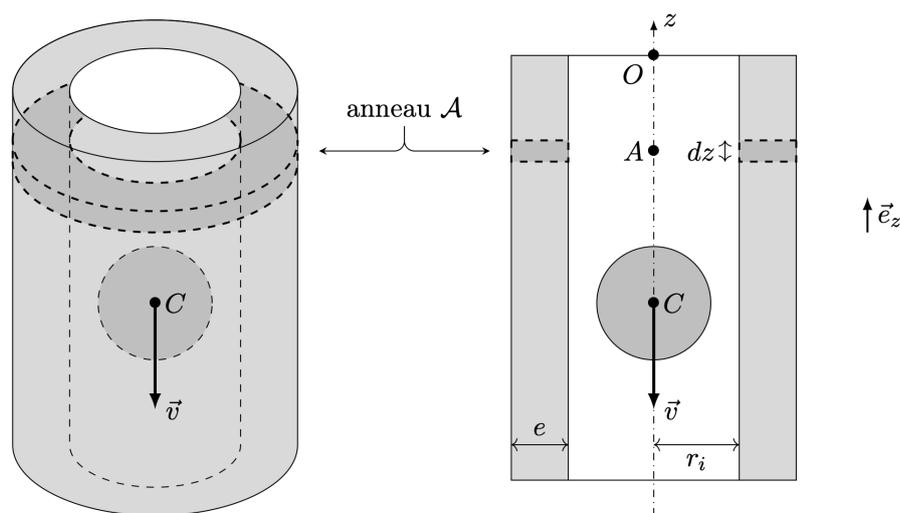


Figure 2 – Représentation perspective et en coupe de la chute de l'aimant (échelles non respectées)

Le mouvement de l'aimant crée un courant induit en volume dans le tube. Nous admettrons que l'aimant est équivalent à un dipôle magnétique ponctuel de moment dipolaire  $\vec{M} = M_0 \vec{e}_z$  disposé en son centre  $C$ . Il descend à la vitesse  $\vec{v} = -v \vec{e}_z$  avec  $v > 0$ . Nous admettrons aussi que les courants induits sont de géométrie orthoradiale : ils tournent dans le tube autour de l'axe  $(Oz)$  de la chute.

1. On étudie d'abord une partie du tube délimitée par un anneau ( $\mathcal{A}$ ) de centre  $A$ , de hauteur  $dz$ , disposé à l'ordonnée  $z$ , compris entre les rayons  $r_i$  et  $r_i + e$  (cf. figure 2) au sein du cuivre, matériau vérifiant la loi d'Ohm avec la conductivité  $\gamma$ .

Le courant induit circulant orthoradialement, on considère que l'on a  $\vec{j}(M) = j_0 \vec{u}_\theta$ . Tout se passe comme si on avait un potentiel  $V_1$  sur la section  $dz.e$  en  $\theta = 0^+$  et un potentiel  $V_2$  sur la section  $dz.e$  en  $\theta = 2\pi^-$ . On cherche à déterminer la résistance  $dR$  de ce conducteur.

On considère que  $e \ll r_i$  (même si cette approximation n'est pas pertinente au vu des valeurs numériques).

- Donner l'expression de  $\vec{E}$  en fonction de  $j_0$  et  $\gamma$ .
- Déterminer l'expression de la tension  $U = V_1 - V_2$  aux "bornes" du conducteur anneau.
- Déterminer l'expression de l'intensité  $I$  du courant à travers une section de l'anneau.
- En déduire l'expression de la résistance de l'anneau  $dR$  puis de sa conductance  $dG$ .

2. On admet que le flux  $\Phi(t)$  du champ magnétique créé par l'aimant à travers ce même anneau ( $\mathcal{A}$ ) s'écrit

$$\Phi(t) = \Phi_0 \frac{r_i^3}{(r_i^2 + (z + vt)^2)^{3/2}} \text{ où } \Phi_0 \text{ est une constante dont on admettra qu'elle s'écrit sous la forme}$$

$$\Phi_0 = \mu_0^a M_0^b r_i^c \text{ où } \mu_0 \text{ est la perméabilité magnétique du vide.}$$

Tracer l'allure de la courbe  $\Phi(t)$  (vous prendrez  $z < 0$ ).

Déterminer les exposants  $a$ ,  $b$  et  $c$  par analyse dimensionnelle.

3. On pose  $x = (z + vt)/r_i$ . Montrer que la puissance dissipée par effet Joule dans l'anneau ( $\mathcal{A}$ ) s'écrit :

$$d\mathcal{P}_J = \frac{9\gamma e \mu_0^2 M_0^2}{2\pi r_i^4} \frac{x^2 dx}{(1 + x^2)^5} v^2$$

4. Justifier que la puissance totale dissipée par effet Joule puisse être approchée par l'intégrale :

$$\mathcal{P}_J \simeq \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} d\mathcal{P}_J$$

- Tous calculs faits, on obtient  $\mathcal{P}_J = KM_0^2 v^2$  où  $K = 2,3$  SI. En admettant la conversion totale de l'énergie mécanique en énergie électrique lors du freinage inductif, donner l'expression littérale de la force de freinage  $\vec{F}$  exercée sur l'aimant pendant sa chute, en fonction de  $K$ ,  $M_0$  et  $\vec{v}$ .
- Le temps de chute est  $\Delta t_{th} = 4,0$  s pour un tube de 20 cm de haut. Quel serait le résultat de la même expérience avec un tube de même longueur en aluminium ? en acier ?
- Calculer le moment dipolaire  $M_0$  de l'aimant utilisé.

## Données numériques

Accélération de la pesanteur au sol	$g_0 = 10 \text{ m.s}^{-2}$
Masse de l'aimant	$m = 33 \text{ g}$
Conductivité électrique du cuivre	$\gamma_{\text{Cu}} = 5,7 \cdot 10^7 \text{ S.m}^{-1}$
Conductivité électrique de l'aluminium	$\gamma_{\text{Al}} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ S.m}^{-1}$
Conductivité électrique de l'acier	$\gamma_a = 7,7 \cdot 10^6 \text{ S.m}^{-1}$
Perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ H.m}^{-1}$