

10 février 2018**Problème 1 : LE COUP DE Foudre**

Le coup de foudre est dans tous les cas un phénomène très rapide et souvent inattendu. Malgré la proximité de la Saint Valentin, on va s'intéresser uniquement à celui concernant la physique terrestre.

La Terre est le siège de phénomènes électriques générés par l'électrosphère, la plus haute couche de l'atmosphère, située à 50 km d'altitude, chargée en permanence du fait du rayonnement cosmique provenant du soleil qui ionise les constituants de l'atmosphère.

Ainsi, l'électrosphère et la Terre constituent les armatures d'un gigantesque condensateur sphérique (figure 1), entre lesquelles la troposphère et la stratosphère forment le diélectrique, *ie* l'isolant.

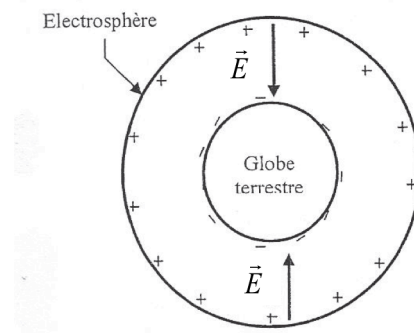


Figure 1 : le condensateur terrestre

Le champ électrique par beau temps est dirigé de l'électrosphère vers la Terre et atteint en moyenne environ 100 à 120 $V.m^{-1}$.

L'air comprend en permanence des charges électriques, positives et négatives, créées aussi par les rayonnements cosmiques ou la radioactivité de la Terre. Par beau temps, il en résulte un courant électrique de densité volumique tendant à décharger le condensateur.

Suite aux perturbations atmosphériques et sous certaines conditions, il se forme des nuages orageux en général du type cumulo-nimbus (figure 2 et 3) en forme caractéristique d'enclume, dont la base et le sommet sont respectivement à environ 2 km et 15 km d'altitude.

Sa constitution est rendue possible par l'élévation d'air chaud par des courants ascendants dont la vitesse est de quelques mètres par seconde. Lors de son ascension, cette masse d'air se charge en humidité jusqu'à devenir un nuage. La partie supérieure, où il fait froid, est occupée par les particules de glace, tandis que les gouttes d'eau s'établissent dans la partie inférieure.

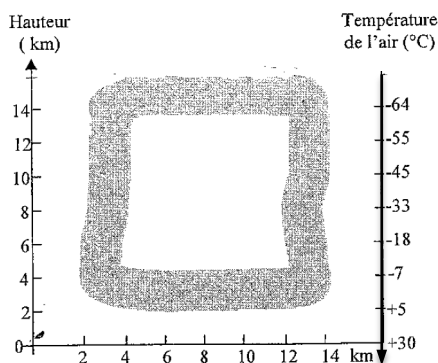


Figure 2 : cumulo-nimbus



Figure 3 : cumulo-nimbus

Les violents courants ascendants provoquent des collisions entre les gouttes d'eau et les micro-particules de glace, ce qui produit la création de charges électriques par frottement. Ces micro-particules de glace, plus légères et chargées positivement, sont emportées vers le haut par le courant d'air ascendant et occupent ainsi la partie supérieure du nuage qui forme le pôle positif. Tandis que les gouttes d'eau chargées négativement s'établissent dans la partie inférieure et créent le pôle négatif.

Si le champ électrique externe entre la base du nuage et la surface de la Terre atteint une valeur critique de l'ordre de 20 kV.m^{-1} , il finit par provoquer une grande décharge entre le nuage et la Terre : c'est le coup de foudre.

Données pour l'ensemble du problème

Constante :

- permittivité diélectrique de l'air $\epsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ SI}$.

Le condensateur terrestre

- altitude de l'électrosphère : $h = 80 \text{ km}$
- Rayon terrestre $R = 6\,370 \text{ km}$

ligne électrique

- conductivité électrique de l'almélec : $\gamma_{alm} = 32,5.10^{-9} \text{ SI}$
- rayon du câble $r_0 = 3 \text{ cm}$
- masse volumique de l'almélec : $\rho = 2700 \text{ kg.m}^{-3}$
- capacité thermique de l'almélec : $c = 945 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- conductivité thermique de l'almélec : $\lambda = 200 \text{ SI}$
- inductance linéique : $L = 1,5 \text{ mH.km}^{-1}$
- capacité linéique $C = 10 \text{ nF.km}^{-1}$

les risques de la foudre

- $\gamma_{sol} = 10^{-2} \text{ S.m}^{-1}$
- $R_h = 2,5 \text{ k}\Omega$

I Echauffement : Etude d'un condensateur sphérique.

- 1) Déterminer l'expression du champ électrique entre les armatures d'un condensateur sphérique de rayons R_1 et $R_2 > R_1$. On notera Q la charge portée par l'armature de rayon R_1 .
Le domaine entre les armatures est rempli d'air dont la permittivité diélectrique est assimilable à celle du vide.
- 2) En déduire la différence de potentiel $U = V_1 - V_2$ entre les deux armatures, V_1 étant le potentiel de l'armature de rayon R_1
- 3) En déduire l'expression de la capacité C de ce condensateur sphérique.
- 4) Le diélectrique n'est pas parfait. Il possède une résistivité électrique certes grande mais finie. Il circule alors un courant de densité volumique \vec{j} dans tout l'espace inter-conducteur.
Préciser, éventuellement à l'aide d'un schéma, l'allure et le sens des lignes de courant dans le cas où $Q > 0$.

II Analyse du condensateur terrestre

- 5) a) Déterminer l'expression de la capacité C du condensateur terrestre.
b) Compte tenu des dimensions en jeu, en déduire une expression approchée de la capacité C et justifier que le condensateur terrestre peut être assimilé localement à un condensateur plan.
c) AN : calculer la valeur de la capacité du condensateur terrestre.
- 6) La charge de l'électrosphère est modélisée par une densité surfacique homogène $\sigma = 1,1.10^{-9} \text{ C.m}^{-2}$.
Cette valeur est-elle cohérente avec celle de l'ordre de grandeur du champ électrique proposée ?
- 7) Quel est l'ordre de grandeur de l'énergie électrique stockée par beau temps dans ce condensateur ?
- 8) Le champ électrique qui règne à la surface de la Terre est-il, en général, dans le même sens ou en sens opposé suivant que le temps est clément ou orageux ?
- 9) Quel est le phénomène physique correspondant à la foudre ? et à un éclair ?
- 10) Quel est l'ordre de grandeur de la différence de potentiel entre la Terre et le nuage juste avant l'arrivée de la foudre ?

- 11) Quel est l'ordre de grandeur de l'énergie véhiculée par un coup de foudre de courant $I = 50 \text{ kA}$ et d'une durée de 10 ms ?

Dans le cadre des énergies renouvelables, vous paraît-il judicieux de vouloir récupérer cette énergie ?

Une argumentation de quelques mots est attendue.

III Coup de foudre sur une ligne électrique

L'impact direct de la foudre (figure 4) sur une ligne électrique ou une ligne téléphonique, génère une onde qui se propage dans les deux sens. Le courant de foudre I peut atteindre 50 kA et produire une tension supérieure à 106 V.

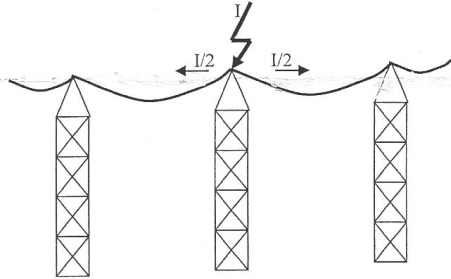


Figure 4

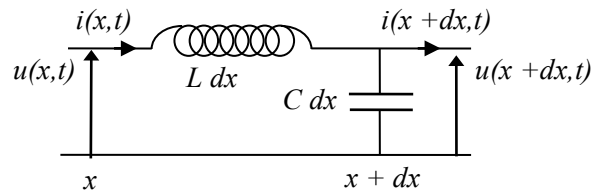


Figure 5

Aspect dynamique

On modélise pour cet aspect dynamique, une portion de ligne électrique, de longueur dx , par la cellule (figure 5) où L et C représentent respectivement l'inductance *linéique* et la capacité *linéique* de la ligne.

Le réseau de distribution électrique de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$ est protégé des surintensités accidentelles par des disjoncteurs. Cependant, compte tenu des inductances des lignes, il n'est pas rare d'attendre un temps de l'ordre de quelques millisecondes avant que le disjoncteur ouvre le circuit.

- 12) Justifier qualitativement pourquoi : « il n'est pas rare d'attendre un temps de quelques millisecondes... »
- 13) a) Sans expliciter ni résoudre le système d'équations aux dérivées partielles vérifié par les fonctions $u(x,t)$ et $i(x,t)$, établir par analyse dimensionnelle la vitesse de propagation de l'onde de tension ou l'onde de courant liée à la foudre sur une ligne électrique ? On pourra exploiter les expressions des énergies capacitatives et inductives.
- b) Evaluer jusqu'à quelle distance d peut se faire ressentir un coup de foudre 1 ms après son impact ?

Aspect thermique

On se propose ici d'estimer un ordre de grandeur de l'élévation de température, notée ΔT_{foudre} , atteinte par un tronçon de ligne électrique, en almélec traversé par un courant de foudre d'intensité constante et égale à 25 kA pendant une durée $\Delta t = 10 \text{ ms}$.

- 14) Ecrire une relation traduisant l'échange d'énergie thermique entre le courant de foudre et un tronçon de ligne électrique, et conclure sur les risques subis au niveau thermique si la foudre frappe la ligne. On fera en particulier une hypothèse, à vérifier a posteriori, sur le phénomène éventuel de diffusion thermique.

IV Attirer la foudre

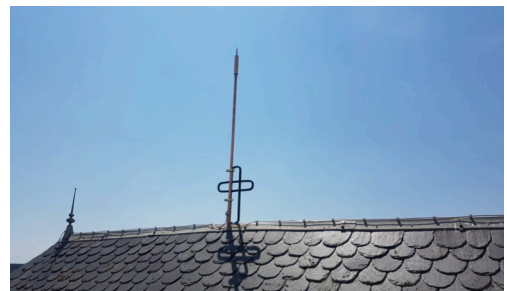
Le paratonnerre proprement dit est constitué d'une tige métallique dirigée vers le ciel, et reliée à une prise de terre.

- 15) a) Etablir l'expression du champ électrique et du potentiel créés par un conducteur sphérique de rayon R seul dans l'espace et portant une charge q . On prendra un potentiel nul à l'infini.

En déduire que si deux conducteurs sont au même potentiel V , c'est le plus pointu qui produira un champ électrique plus intense.

- b) Expliciter la fonction d'un paratonnerre.

Quels sont les endroits où il faut éviter de se tenir en cas d'orage ?



V ...puis la canaliser et s'en protéger

Le courant de foudre, qu'il soit attiré volontairement par un paratonnerre ou qu'il tombe accidentellement sur un bâtiment doit être dévié vers la terre. Une prise de terre (figure 8) est constituée d'une coque hémisphérique métallique de centre O , de rayon intérieur R_a et de rayon extérieur R_b .

Elle est destinée à recevoir un courant I provenant d'un paratonnerre. Il sera supposé indépendant du temps et descendant.

On note $\gamma_{mét}$ la conductivité électrique du métal qui la constitue.

Cette prise est enfoncée dans le sol, assimilé au demi espace $z < 0$ et de conductivité électrique γ_{sol} .

On admettra que si un conducteur porte une charge, celle ci reste en surface du conducteur.

On suppose que le courant traversant la prise de terre, est radial, avec une densité de la forme $\vec{j} = j(r)\vec{u}_r$ en coordonnées sphériques de centre O , le point de contact de la tige avec le sol.

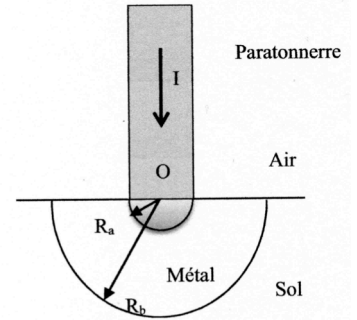


Figure 8 Modèle simplifié d'une prise de terre

16) a) Etablir les expressions du champ électrique \vec{E} et du potentiel électrique V régnant dans le sol.

On supposera que le potentiel est nul loin du paratonnerre.

b) Quelle est la forme des équipotentielles correspondantes dans le sol et à la surface du sol.

Comment évolue le potentiel ?

On admet que le modèle précédent s'applique aussi quand la foudre frappe le sol en un point quelconque.

On appelle tension de pas U_p la tension qui apparaît entre les deux pieds d'une personne se tenant sur un sol frappé par la foudre.

L'électrocution survient quand le corps est traversé par un courant supérieur à une valeur limite I_h^{max}

On appelle R_h la résistance du corps humain mesurée entre ses deux pieds.

17) Estimer la distance critique D_c au point d'impact de la foudre à laquelle doit se trouver une personne pour ne pas être électrocutée.

18) Expliquer les faits suivants :

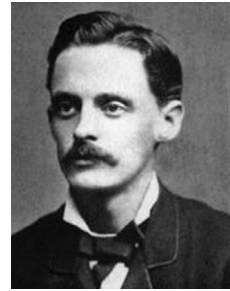
- Des personnes sont électrocutés par la foudre bien qu'éloignées de plus de 80 m du point d'impact,
- Il est conseillé de ne pas courir sous un orage,
- Les vaches sont plus souvent foudroyées que les lapins,
- Il est conseillé de s'éloigner des arbres,

19) a) Comparer le champ critique de 20 kV.m^{-1} au champ disruptif de l'air, et lever la contradiction.

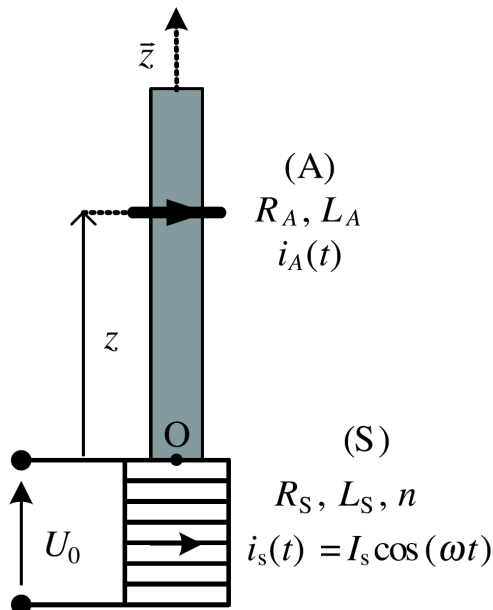
b) Que se passerait-il si les orages n'existaient pas ?

Problème 2 L'EXPERIENCE D'ELIHU THOMSON

Elihu Thomson (1853 - 1937) était un ingénieur et inventeur américain d'origine anglaise qui a contribué à la fondation de grandes compagnies électriques aux États-Unis, au Royaume-Uni et en France .



Ce problème présente l'expérience d'Elihu Thomson encore appelée expérience de l'anneau sauteur.



Une réalisation de l'expérience d'Élihu Thomson.

Un solénoïde (S), de section circulaire, d'axe vertical ascendant Oz , de rayon b et comprenant n spires jointives par unité de longueur est parcouru par un courant, d'intensité instantanée $i_s(t) = I_s \cos \omega t$. On note R_S la résistance électrique de l'enroulement et L_S son inductance propre (le rôle du cylindre central, nommé noyau et représenté en grisé sur le schéma, sera précisé ultérieurement). L'origine O de l'axe Oz est au centre de la face supérieure du solénoïde. ce dernier est donc situé dans la région $z < 0$. Un anneau métallique indéformable circulaire (A), de masse m , de rayon a , d'épaisseur négligeable et d'axe Oz , est initialement maintenu en $z = 0$. Cet anneau est mobile sans frottement et sans jeu, parallèlement au plan horizontal et en restant centré sur l'axe. Il comprend selon les expériences $N = 1$ ou 2 spires toujours identiques, en série et parcourues par un courant instantané noté $i_A(t)$.

Les vecteurs horizontaux \vec{u}_x et \vec{u}_y complètent la base orthonormée directe $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$.

L'ensemble du dispositif présente une symétrie cylindrique autour de l'axe Oz , et les conventions d'orientation des deux circuits sont les mêmes.

On note μ_M la masse volumique de l'anneau, et σ_M sa conductivité électrique.

On a donc $m \propto N\mu_M$, où le symbole « \propto » signifie : « est proportionnel à... ».

On note r_A la résistance d'une spire et l_A son inductance propre ; la résistance de l'anneau est donc $R_A = Nr_A \propto \frac{N}{\sigma_M}$

L'inductance mutuelle entre (S) et (A), notée M , dépend de z et bien sûr de N .

On dispose de divers anneaux, en cuivre ou en aluminium, avec $\mu_{Cu} \approx 3\mu_{Al}$ et $\sigma_{Cu} \approx 1,7\sigma_{Al}$.

On note ϕ le flux magnétique envoyé par le solénoïde à travers un anneau donné.

Données numériques : l'anneau est constitué d'une spire unique de cuivre, de masse $m_1 = 12 \cdot 10^{-3}$ kg, avec

$r_A = 1,0 \cdot 10^{-4} \Omega$, $l_A = 1,0 \cdot 10^{-7}$ H, l'intensité de la pesanteur est $g \approx 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; pour simplifier le traitement, on conviendra que le diamètre du noyau est $D = 2a \approx 4 \cdot 10^{-2}$ m.

Dans une première série d'expériences, le noyau n'a pas de propriété électromagnétique particulière, il ne sert qu'à guider le mouvement de l'anneau et tout se passe comme si ce dernier évoluait dans le vide.

Dans une seconde série d'expériences, le noyau en fer doux, aura un rôle supplémentaire qui sera précisé le moment venu.

Dans tout le problème, on note, en coordonnées cylindriques, $\vec{B}(r, z, t) = \vec{B}(r, z) \cos \omega t$ le champ créé en un point $P(r, \theta, z)$ par le solénoïde. La relation $\vec{B}(0, z) = \vec{B}_o(z) = B_o(z) \vec{u}_z$ définit la fonction $B_o(z)$, champ sur l'axe Oz .

À l'instant initial, l'anneau est libéré. On constate les faits suivants :

- F1 L'anneau (A), projeté vers le haut, se stabilise à une certaine hauteur z_0 . La position d'équilibre est stable.
- F2 Un anneau constitué de deux spires identiques (masse totale $m = m_2 = 2m_1$) se stabilise plus haut qu'un anneau constitué d'une seule spire, identique aux deux premières.
- F3 Les cotes d'équilibre pour deux anneaux géométriquement identiques, mais constitués l'un en aluminium l'autre en cuivre sont différentes : $z_0(\text{Al}) > z_0(\text{Cu})$.

A Considérations générales

- 1) Etablir l'expression de la composante axiale, notée B_z du champ magnétique créé par le solénoïde.
- 2) On donne la valeur du champ magnétique créé par une spire de rayon a parcourue par un courant i en son centre : $\vec{B} = \frac{\mu i}{2a} \vec{u}_z$ avec \vec{u}_z le vecteur unitaire de l'axe de révolution de la spire.
Justifier qualitativement qu'il apparaît dans la bobine un champ magnétique propre, noté \vec{B}_p , et donner l'expression du champ total axial B_{Tz} au centre de l'anneau.
- 3) En considérant le flux d'un champ magnétique (vecteur \vec{B}) à travers un cylindre élémentaire d'axe Oz , de rayon r et de hauteur dz , montrer que la composante radiale du champ en un point $P(r, \theta, z)$ au voisinage immédiat de l'axe est $B_r(r, z, t) \approx -\frac{1}{2} r \frac{dB_o}{dz} \cos \omega t$.
On supposera pour cela que dans le domaine d'espace étudié, et à un terme d'ordre 2 près, le champ axial B_z est peu dépendant de r , et le champ radial B_r peu dépendant de z .
Cette relation devra être gardée en tête lors de questions ultérieures.
- 4) Rappeler la relation liant le flux propre et l'inductance propre d'un circuit, ainsi que la relation entre le flux d'un champ extérieur et l'inductance mutuelle d'un circuit.
- 5) Dans le cadre de l'hypothèse $a \ll b$, montrer que l'inductance propre de (A) est $L_A = N^2 l_A$ et que l'inductance mutuelle, M , varie linéairement avec N ; on notera $M = N M_1$, ce qui définit M_1 .
- 6) On note $i_A(t)$ le courant qui circule dans l'anneau (A), maintenu à une cote z constante.
Justifier qualitativement et simplement que la résultante instantanée $\vec{F}(z, t)$ des forces de Laplace qui s'exercent sur cet objet est axiale.
Exprimer $\vec{F}(z, t)$.
- 7) En utilisant l'énergie potentielle d'interaction entre un moment dipolaire magnétique et un champ magnétique extérieur, justifier que la composante axiale de la force de Laplace qui s'exerce sur l'anneau s'écrit :
 $F_z(z, t) = i_A(t) \frac{\partial \phi}{\partial z}$, avec ϕ le flux du champ créé par le solénoïde à travers l'anneau.
Comparer avec l'expression obtenue à la question précédente.
- 8) Donner l'expression générale de la force électromotrice $e(t)$ induite par (S) dans (A), en fonction de $i_S(t)$ et de M .
- 9) Expliciter $e(t)$ en fonction de ω , $\phi_0(z) = \pi a^2 B_o(z)$, et $\sin \omega t$ lorsque l'inégalité $a \ll b$ est satisfaite.

B Modélisations de la première série d'expériences

Le but de cette partie est d'interpréter les observations F1-F3.

On suppose que l'anneau n'est sensible qu'à la valeur moyenne dans le temps de la résultante des forces de Laplace, $\langle \vec{F}_L(t) \rangle_t$. On abandonne l'hypothèse $a \ll b$; on n'explicite plus la forme du champ \vec{B} , seuls

interviendront les inductances et les autres paramètres des circuits. On impose toujours $i_s(t) = I_s \cos \omega t$ et on suppose que l'anneau est fixe (il n'y a pas de variation de flux, et donc de f.é.m. associée à un mouvement).

10) On suppose provisoirement que l_A est nulle. Montrer que : $\langle \vec{F}_L(t) \rangle_t = \vec{0}$.

11) On suppose que l_A n'est pas nulle, mais que r_A est nulle. Calculer $\langle \vec{F}_L(t) \rangle_t$ dans ce cas.

12) La modélisation de la question précédente est-elle compatible avec les faits expérimentaux observés ?

13) Aucune des grandeurs R_s, L_s, r_A et l_A n'est supposée désormais nulle. La tension aux bornes du solénoïde est notée $u_s(t) = U_0 \cos \omega t$. Exprimer la loi des mailles pour le solénoïde et pour l'anneau.

14) On note en représentation complexe I_A et I_s les amplitudes complexes des intensités $i_A(t)$ et $i_s(t)$,

$$Z_A = R_A + jL_A\omega = |Z_A| \exp(j\varphi_A), \quad Z_S = R_S + jL_S\omega = |Z_S| \exp(j\varphi_S), \quad Z_{AS} = jM\omega \text{ et}$$

$$D^2 = Z_A Z_S + M^2\omega^2 = |D|^2 \exp(2j\varphi_D).$$

Exprimer I_A et I_s en fonction de Z_A, D, U_0 et Z_{AS} . En déduire les expressions de $i_s(t)$ et de $i_A(t)$.

15) Établir la relation suivante pour la force moyenne subie par un anneau constitué de N spires :

$$\langle F \rangle_t \propto \frac{N^2}{\left[r_A R_S + N\omega^2 (M_1^2 - l_A L_S) \right]^2 + \omega^2 (r_A L_S + N l_A R_S)^2}$$

Rq : cette question est assez calculatoire, un peu longue et pas très passionnante...

16) Application numérique : Calculer $\frac{F(2)}{F(1)}$, rapport des forces magnétiques agissant respectivement sur un

anneau constitué de deux spires et sur un anneau d'une spire pour $R_s \approx 2 \Omega$, $l_A = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ H}$, $L_s \approx 0,1 \text{ H}$, $M_1 \approx 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ H}$ et $\omega = 100 \pi \text{ rad.s}^{-1}$ (50 Hz).

17) Interpréter F2.

18) Interpréter F3.

C Modélisations de la deuxième série d'expériences

Cette série concerne une spire unique (r_A, l_A, M_1) . On garde le même dispositif expérimental, à ceci près que le matériau du noyau, de hauteur $H = 0,5 \text{ m}$, est ferromagnétique, et provisoirement supposé isolant. En plus de son rôle de guidage de l'anneau, le noyau canalise et augmente sensiblement le champ produit par la bobine.

Dans ces conditions, l'inductance l_A de l'anneau est influencée par le noyau et devient \tilde{l}_A qui dépend de l'altitude. Pour simplifier les calculs, on remplacera \tilde{l}_A par sa valeur moyenne spatiale \tilde{l} . Numériquement, la spire est choisie de telle manière que $\tilde{l} \approx 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ H}$. On garde l'hypothèse que l'anneau n'est sensible qu'à la valeur moyenne dans le temps de la résultante des forces de Laplace, $\langle \vec{F}_L(t) \rangle_t$.

Le champ magnétique dans le noyau diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la bobine pour s'annuler au-delà de $z = H$. Le flux du champ dans le noyau est alors modélisé par la relation :

$$\tilde{\Phi}(z, t) = \Phi(z) \cos \omega t = \Phi_0 \left(1 - \gamma \frac{z}{H} \right) \cos \omega t \quad \text{pour } 0 \leq z \leq H \quad \text{et} \quad \tilde{\Phi}(z, t) = 0 \quad \text{pour } z \geq H$$

Pour $0 \leq z \leq H$, on établit que la force électromotrice induite dans l'anneau positionné à la cote z est

$$e(z, t) = -\frac{d\tilde{\Phi}}{dt} = \omega \tilde{\Phi}(z) \sin \omega t, \text{ que le courant induit en régime permanent est}$$

$$i_A(t) = \omega \Phi(z) \left[\frac{r_A}{r_A^2 + (\tilde{l}\omega)^2} \sin \omega t - \frac{\tilde{l}\omega}{r_A^2 + (\tilde{l}\omega)^2} \cos \omega t \right]$$

et que l'expression du champ radial à la surface du noyau est $B_r = \frac{\gamma \Phi_0}{\pi D H} \cos \omega t$.

19) Établir l'expression suivante de la composante F_z selon Oz de la résultante des forces de Laplace

$$\text{s'exerçant sur l'anneau : } F_z = -\omega \frac{\gamma \Phi_0}{H} \Phi(z) \left[\frac{r_A}{r_A^2 + (\tilde{l}\omega)^2} \sin \omega t \cos \omega t - \frac{\tilde{l}\omega}{r_A^2 + (\tilde{l}\omega)^2} \cos^2 \omega t \right]$$

20) Montrer que la moyenne temporelle $\langle F_z \rangle_t$ se met sous la forme $\langle F_z \rangle_t = F_0 \left(1 - \gamma \frac{z}{H} \right)$ et préciser F_0 .

Donner l'équation du mouvement de (A) , sous l'action de $\langle F_z \rangle_t$.

21) Quelle inégalité doit être satisfaite entre F_0 , m et g pour que l'anneau, positionné initialement en $z = 0$, décolle ? Cette condition étant satisfaite, à quelle cote z_0 l'anneau se stabilisera-t-il ?

22) Application numérique : Calculer z_0 pour $\omega = 100 \pi \text{ rad.s}^{-1}$ et $\Phi_0 = 5.10^{-4} \text{ Wb}$.

23) Résoudre l'équation du mouvement obtenue en question 20) avec les conditions initiales $z(0) = 0$ et $\dot{z}(0) = 0$

24) L'inégalité établie à la question 21 étant satisfaite, quel est l'effet, négligé dans la modélisation, qui provoque l'amortissement du mouvement et permet d'atteindre la position d'équilibre ?

25) À partir de maintenant, l'anneau, avant d'être positionné, est refroidi de telle sorte que sa résistance soit abaissée d'un facteur 10 (on le trempe dans de l'azote liquide, dont la température d'ébullition est de 77 K). Calculer numériquement z_0 . Est-ce une position d'équilibre ?

26) Dans les conditions expérimentales de la question précédente l'inégalité de la question 21) étant satisfaite et les conditions initiales étant celles de la question 23), calculer numériquement la vitesse de l'anneau lorsqu'il arrive à l'extrémité du noyau et la durée τ pour y parvenir.

27) Dans quelle mesure l'utilisation d'une force moyennée temporellement est-elle dans ce cas justifiée ?

28) On suppose que, une fois séparé du noyau, l'anneau n'est soumis qu'à la pesanteur. Quelle est l'altitude maximale qu'il atteint ?