

# DEVOIR N° 0

Pour préparer la rentrée

## Exercice 1.

On fabrique une lunette de Galilée en utilisant comme objectif une lentille mince convergente de focale  $f'_1$  et comme oculaire une lentille mince divergente de distance focale  $f'_2$ .

a. Comment faut-il placer les deux lentilles pour obtenir un système afocal ? Représenter dans ce cas le cheminement d'un faisceau de trois rayons parallèles, formant par rapport à l'axe optique un angle  $\alpha$ . On fera apparaître de manière bien visible les éléments qui justifient le tracé.

b. Définir puis exprimer le grossissement  $G$ .

c. On considère maintenant un faisceau incident parallèle à l'axe optique. Sur une nouvelle figure, représenter son cheminement à travers la lunette. Soit  $R$  le rayon de la monture circulaire de la lentille  $L_1$ . Quel est le diamètre  $\Phi$  du faisceau émergent ?

d. L'image au travers de  $L_2$  de la monture de  $L_1$  est appelée cercle oculaire. Déterminer sa position puis exprimer son rayon. Retrouver ainsi l'expression de  $\Phi$ .

e. On souhaite que  $\Phi$  soit égal au diamètre  $d$  de la pupille de l'œil. Le grossissement correspondant est appelé grossissement équipupillaire. Le calculer numériquement pour  $R = 3$  cm et  $d = 2$  mm.

## Exercice 2.

Les satellites d'orbite basse sont soumis à des forces de frottements sur l'atmosphère raréfiée qu'ils rencontrent. La résultante de ces forces est modélisée par  $\vec{F} = -\alpha \vec{v}$  où  $\vec{v}$  désigne le vecteur vitesse instantané du satellite dans le référentiel géocentrique. On étudie l'évolution de la trajectoire. On note  $G$  la constante de gravitation universelle,  $M$  la masse de la Terre et  $m$  celle du satellite.

1. Relier la vitesse du satellite au rayon  $r$  de sa trajectoire circulaire. On admet dans la suite que cette expression reste valable même si la trajectoire n'est pas exactement circulaire.

2. Exprimer l'énergie cinétique  $E_c$ , l'énergie potentielle  $E_p$  et l'énergie mécanique  $E_m$  du satellite en fonction de  $r$ ,  $G$ ,  $M$  et  $m$ .

3. Montrer que ces trois énergies sont proportionnelles et les relier les unes aux autres.

4. En appliquant le théorème de l'énergie mécanique, montrer que le satellite perd de l'altitude et que sa vitesse augmente petit à petit.

5. À un instant donné, le rayon de la trajectoire est  $r_1$ . Quelle sera sa valeur  $r_2$  après une révolution autour de la Terre ?

6. En appliquant le théorème de l'énergie ou de la puissance mécanique, obtenir une équation différentielle dont  $r(t)$  est solution. La résoudre et décrire l'évolution de la trajectoire.

## Exercice 3.

Une gomme de masse  $m$  est posée sur l'extrémité d'une règle de masse  $M$  et de longueur  $2\ell$ . Le contact entre ces deux solides est caractérisé par un coefficient de frottement statique  $\mu_s$ . Cette règle initialement immobile et horizontale peut pivoter, par une liaison parfaite, autour d'un point fixe  $O$  confondu avec son milieu (figure 1). L'ensemble est plongé dans le champ de pesanteur vertical  $g$ . Initialement, l'ensemble est au repos puis bascule vers la gauche. On note  $\theta(t)$  l'angle dont la règle s'est inclinée à l'instant  $t$ .

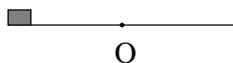


FIGURE 1 –

On rappelle que le moment d'inertie d'une barre de longueur  $\ell$  par rapport à un axe passant par son centre est  $J = \frac{1}{3}m\ell^2$ .

1. En exploitant la conservation de l'énergie mécanique du système constitué de la barre et de la gomme, trouver l'expression de la vitesse angulaire  $\dot{\theta}$  en fonction de  $\theta$ ,  $M$ ,  $m$  et  $g$ .

2. En déduire l'expression de  $\ddot{\theta}$ .
3. Retrouver le résultat précédent en appliquant le théorème du moment cinétique au même système que dans la première question.
4. Exprimer la réaction normale  $N$  et la réaction tangentielle  $T$  que la barre exerce sur la gomme.
5. Déterminer de quel angle aura pivoté la règle à l'instant où la gomme commencera à glisser.

#### Exercice 4.

Une corde homogène inextensible de longueur  $\ell$ , de masse  $m$  et de masse linéique  $\mu = m/\ell$  repose en partie sur une table alors que l'autre partie pend verticalement dans le vide jusqu'à la cote  $z_0$  (figure 2). Ayant été ainsi disposée, elle est abandonnée sans vitesse initiale.

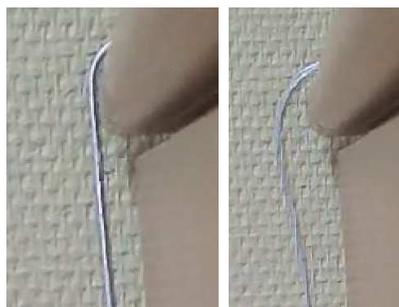
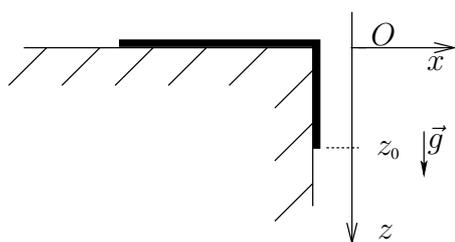


FIGURE 2 – À gauche : modèle de la corde glissant sur le rebord d'un table. À droite : photos montrant le décoller. Sur la première,  $t < t_{\text{dec}}$  et sur la seconde,  $t > t_{\text{dec}}$ .

1. On repère la position de la corde par la cote  $z(t)$  de son point le plus bas. Expliquer pourquoi tous les points de la corde ont, en norme, la même vitesse, puis exprimer son énergie cinétique.
2. On prend l'origine des énergies potentielles à la hauteur du point  $O$ . Quelle est la cote  $z_{G1}$  de la partie verticale de la corde? Exprimer son énergie potentielle de pesanteur.
3. On suppose pour l'instant que la corde glisse sans frottement. Trouver une équation différentielle du second ordre régissant l'évolution de  $z(t)$ .
4. Déterminer la loi horaire  $t \mapsto z(t)$  de la glissade de la corde.
5. On suppose désormais que la corde glisse sur la table avec un coefficient de frottement statique  $\mu_s$ . On admet aussi que le bord légèrement arrondi de la table agit comme une poulie idéale et transmet parfaitement la force de tension dans la corde : la tension à l'extrémité droite de la partie horizontale est égale à la tension à l'extrémité supérieure de la partie verticale. Montrer que la corde, abandonnée à la cote  $z_0$ , restera immobile si  $z_0 \leq z_{\text{lim}}$  et donner l'expression de  $z_{\text{lim}}$ . Pour répondre à cette question, il convient de raisonner séparément sur la partie verticale de la corde d'une part,
6. Pour  $\ell = 49,5$  cm, on mesure  $z_{\text{lim}} = 11,5$  cm. Calculer  $\mu_s$ .
7. On suppose dorénavant  $z_0 > z_{\text{lim}}$  de sorte que la corde se met à glisser et on note  $\mu_d$  le coefficient de frottement dynamique. En raisonnant à nouveau sur les deux parties de corde et en supposant toujours le rebord idéal, déterminer l'équation différentielle dont  $z(t)$  est solution. puis sur sa partie horizontale d'autre part. On écrira la loi de Newton sous la forme  $M\vec{a} = \Sigma \vec{F}_{\text{ext}}$ .
8. Retrouver cette équation par un raisonnement énergétique.
9. Déterminer la loi horaire  $t \mapsto z(t)$  de la glissade de la corde.
10. On raisonne dans cette question et la suivante sur le système formé de la corde entière. Exprimer sa quantité de mouvement  $\vec{p}(t)$  à l'instant  $t$ .
11. Déterminer en projection sur la base  $(\vec{e}_x, \vec{e}_z)$  la réaction  $\vec{R} = R_x \vec{e}_x + R_z \vec{e}_z$  exercée par le coin de la table sur la corde, en fonction de  $\mu = m/\ell$ ,  $g$ ,  $z$ ,  $\dot{z}$  et  $\ddot{z}$ . Vérifier que  $|R_z| = R_x$ .
12. Trouver l'expression de  $\dot{z}^2$  en fonction de  $z$ ,  $z_0$  et d'autres paramètres du problème.

L'élimination de  $\dot{z}$  et de  $\ddot{z}$  dans les résultats précédents conduit à l'expression

$$R_x = -R_z = \mu g \left[ z(1 + 3\mu_d) + (1 + \mu_d) \frac{z_0^2}{\ell} - 2 \frac{z^2}{\ell} (1 + \mu_d) - 2\mu_g z_0 \right] .$$

13. Le modèle étudié ici suppose implicitement que toute la partie de la corde qui a quitté la table suit une droite verticale à l'aplomb du rebord de la table. Cependant, une analyse vidéo révèle que cette description est erronée au bout d'un certain temps. À un instant  $t_{\text{dec}}$ , la corde se décolle du rebord et sa partie pendante n'est plus verticale (observer les photographies de la figure 2). À partir des expressions précédentes, trouver l'expression de  $z_{\text{dec}} = z(t_{\text{dec}})$ .

14. Pour une chaîne de masse  $m = 100$  g et de longueur  $\ell = 49,5$  cm, le mouvement est bien reproduit par le modèle si on prend  $\mu_d = 0,33$ . Calculer numériquement  $z_{\text{dec}}$ . Pour information, on a mesuré  $z_{\text{dec}} = 33$  cm avec une incertitude de 3 cm.

Le modèle développé ici paraît assez satisfaisant mais, pour reproduire les résultats expérimentaux, on doit prendre  $\mu_d > \mu_s$ , ce qui n'a pas lieu d'être. En réalité, l'hypothèse de rebord idéal est incorrecte et il faudrait étudier les frottements dans la partie de corde qui épouse la forme du rebord.

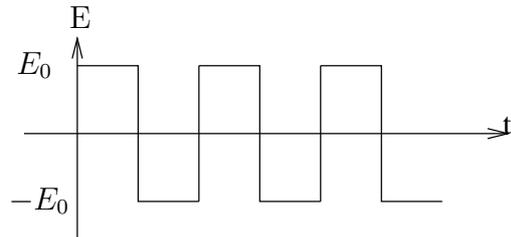
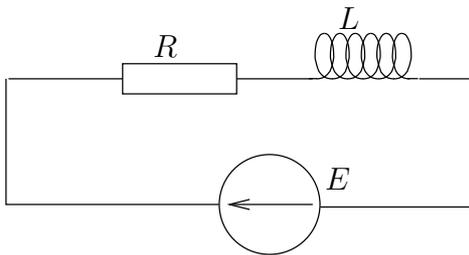
### Exercice 5.

Dans le référentiel géocentrique, une sonde spatiale est lancée depuis la position  $r_0 \vec{u}_{r_0}$  avec un vecteur vitesse  $\vec{v}_0$  perpendiculaire au vecteur position. On a  $v_0 = \sqrt{\frac{3GM}{2r_0}}$ , où  $M$  désigne la masse de la Terre et  $G$  la constante de gravitation.

- Montrer que la trajectoire est plane.
- En utilisant la conservation du moment cinétique et celle de l'énergie mécanique, déterminer la distance maximale à laquelle la sonde s'éloignera de la Terre. Vous pourrez vous appuyer sur le concept d'énergie potentielle effective.

### Exercice 6.

Le circuit RL ci-dessous est alimenté par un générateur dont la fem varie au cours du temps selon la loi représentée à droite.



- Écrire l'équation différentielle dont est solution l'intensité  $i(t)$  sur chacun des intervalles  $]nT, nT + T/2[$  et  $]nT + T/2, nT + T[$ .
- En régime permanent, l'intensité est T-périodique. Déterminer  $i(t)$  sur chacun des intervalles précédents en introduisant deux constantes d'intégration et une constante de temps  $\tau$ .
- Déterminer les constantes. On posera pour simplifier  $\delta = \exp[-T/(2\tau)]$ .
- Applications numériques :  $L = 10$  mH,  $R = 7\Omega$ ,  $T = 10$  ms. Calculer numériquement  $\tau$  et  $\delta$ . Tracer l'allure du graphe de  $i(t)$ .

### Exercice 7.

- En régime sinusoïdale forcé, déterminer les fonctions de transfert  $\underline{H}_1(j\omega)$ ,  $\underline{H}_2(j\omega)$  et  $\underline{H}_3(j\omega)$  de chacun des trois montages de la figure 3. On suppose que tous les ALI sont idéaux et fonctionnent en régime linéaire.
- On considère le montage de la figure 4. Déterminer sa fonction de transfert  $H = \frac{s}{s}$ . On simplifiera l'expression finale en posant

$$\omega_0^2 = \frac{R'_1}{R_1 R_2 R_3 C^2} \quad \text{et} \quad Q = RC\omega_0 \quad \text{c'est à dire} \quad \frac{RR'_1}{R_1 R_2 R_3 C} = Q\omega_0 \quad . \quad (1)$$

- On choisit  $R_1 = R_2 = R_3 = R'_1 = 1$  k $\Omega$ ,  $R = 10$  k $\Omega$  et  $C = 159$  nF. Calculer  $\omega_0$  et  $Q$ .
- Tracer le diagramme de Bode (on pourra prendre la fréquence réduite  $x = f/f_0$  comme variable).

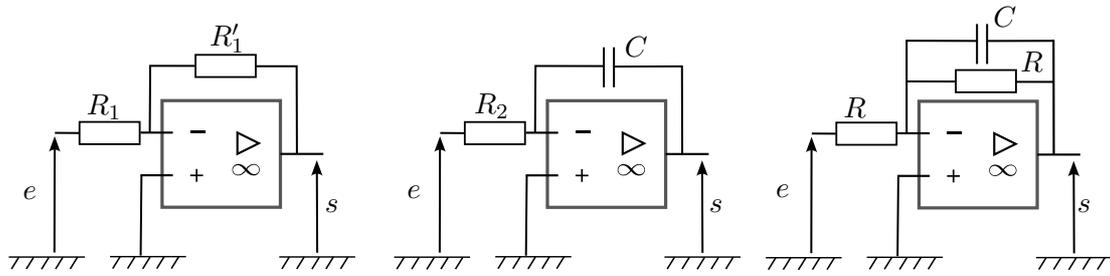


FIGURE 3 -

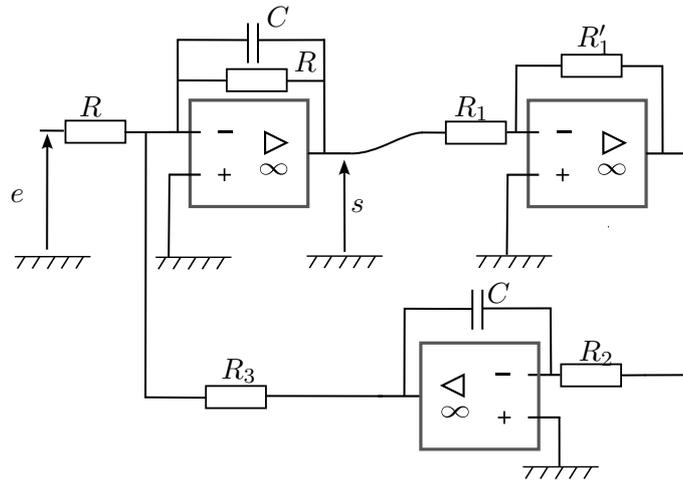


FIGURE 4 -

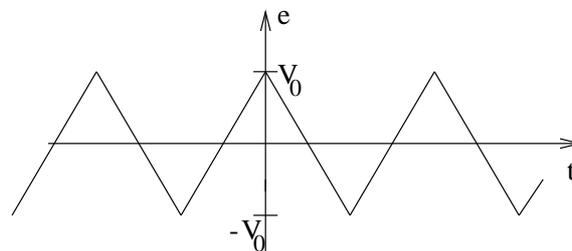


FIGURE 5 -

e. On applique sur le montage un signal triangulaire  $e(t)$  de fréquence  $f$  et d'amplitude  $V_0$  (figure 5). En supposant  $Q$  « suffisamment grand », écrire approximativement le signal de sortie pour  $f = 1 \text{ kHz}$  et représenter les chronogrammes de  $e(t)$  et  $s(t)$  tels qu'on pourrait les observer sur un oscilloscope. Reprendre la question pour  $f = 333 \text{ Hz}$ . Dans chacun des deux cas

On rappelle que le signal triangulaire se décompose sous la forme

$$e(t) = \frac{8V_0}{\pi^2} \left( \cos \omega t + \frac{1}{9} \cos(3\omega t) + \frac{1}{25} \cos(5\omega t) + \dots \right) \quad \text{avec} \quad \omega = 2\pi f \quad .$$

**Exercice 8.**

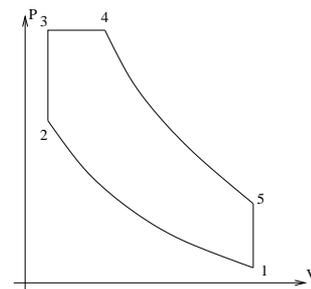
On suppose l'atmosphère en équilibre à la température uniforme  $T = 270, \text{K}$  et on la traite comme un gaz parfait diatomique de masse molaire  $M = 29 \text{g.mol}^{-1}$ . Établir l'expression de la pression et de la masse volumique en fonction de l'altitude en notant  $P_0$  et  $\rho_0$  leurs valeurs au niveau du sol. À quelle altitude la pression est-elle divisée par 2 par rapport à la valeur au sol ?

**Exercice 9.**

Soit une pompe à chaleur cyclique destinée à chauffer une maison de température constante égale à  $20^\circ\text{C}$  en exploitant l'air extérieur de température égale à  $10^\circ\text{C}$ . Majorer son efficacité et la comparer à celle d'une machine commerciale (à rechercher en ligne). Commenter l'écart des deux valeurs.

**Exercice 10.**

On modélise les transformations de l'air dans un moteur à explosion par un cycle de Sabathe (figure ci-contre). Les étapes  $1 \rightarrow 2$  et  $4 \rightarrow 5$ , adiabatiques et réversibles, correspondent aux mouvements du piston. La combustion de l'essence s'effectue pendant les étapes  $2 \rightarrow 3$  et  $3 \rightarrow 4$ . On note  $a = V_1/V_2$  le rapport volumétrique de compression,  $b = P_3/P_2$  la surpression et  $s = V_4/V_3$  le rapport de surchauffe. L'air est assimilé à un gaz parfait diatomique.



1. On rappelle que l'entropie d'un gaz parfait s'exprime à une constante près par

$$S = nC_{vm} \ln T + nR \ln V \quad S = nC_{pm} \ln T - nR \ln P \quad .$$

Représenter ce cycle dans un diagramme ayant l'entropie  $S$  en abscisse et la température  $T$  en ordonnée.

2. Exprimer le rendement en fonction des températures  $T_i$  ( $i \in \{1..5\}$ ) puis en fonction de  $a$ ,  $b$ ,  $r$  et  $\gamma$ .
3. Application numérique :  $a = 9$ ,  $b = 2,5$ ,  $s = 1,5$ . Comparer le rendement à la valeur maximale théorique pour un cycle ditherme dont la source froide et la source chaude posséderaient respectivement les températures minimales et maximales de l'air dans le cycle de Sabathe.

**Exercice 11.**

À pression ambiante, un récipient calorifugé contient  $1 \text{kg}$  l'eau liquide à une température  $T_0$  inférieure à sa température de fusion  $T_f = 273 \text{K}$ .

- a. Comment s'appelle ce phénomène ?
- b. Par un léger choc, on provoque le passage d'une partie (ou de toute) l'eau liquide à l'état de glace. Quelle doit être  $T_0$  pour que dans l'état final, 50 % de l'eau soit solidifiée ? À quelle condition peut-elle se solidifier entièrement ?
- c. Dans le cas où l'eau se solidifie entièrement, exprimer la température finale  $T_1$  en fonction de  $T_0$ ,  $c_\ell$ ,  $c_g$  et  $l_f$ . Calculer  $T_1$  pour  $T_0 = -100^\circ\text{C}$ .
- d. Dans les deux situations envisagée, exprimer l'entropie créée. La calculer numériquement dans les deux cas de la question b. puis pour  $T_0 = -100^\circ\text{C}$ .

Données : enthalpie de fusion de l'eau  $l_f = 330 \text{kJ.kg}^{-1}$ , capacité calorifique de l'eau liquide  $c_\ell = 4,18 \text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , capacité calorifique de la glace :  $c_g = 2,09 \text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

**Exercice 12.**

L'espace est divisé en deux régions par le plan d'équation  $y = 0$ . L'une d'elles ( $y > 0$ ) est le siège d'un champ magnétique  $\vec{B}_1 = B_1 \vec{u}_z$ , l'autre ( $y < 0$ ) d'un champ magnétique  $\vec{B}_2 = B_2 \vec{u}_z$ , avec  $B_2 > B_1 > 0$ . À  $t = 0$ , un électron de masse  $m$  et de charge  $-e$  est émis depuis l'origine des coordonnées avec un vecteur vitesse  $\vec{v}_0 = v_0 \vec{u}_y$  ( $v_0 > 0$ ) et pénètre dans la région où règne  $\vec{B}_1$ .

- a) Quel est le mouvement de l'électron durant les premiers instants ? Le représenter par un dessin et démontrer l'expression d'une longueur caractérisant la trajectoire.
- b) À quelle date l'électron pénètre-t-il dans la région où règne  $\vec{B}_2$  ? Quel son mouvement tant qu'il reste dans cette seconde région ?

c) Représenter par un dessin son mouvement ultérieur puis définir une vitesse de dérive caractérisant le mouvement moyen. L'exprimer en fonction de  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $e$ ,  $m$  et  $v_0$ .

### Exercice 13.

On considère le montage de la figure 6 dans lequel on note  $M = kL$  le coefficient de mutuelle induction, avec  $|k| < 1$ . On pose par ailleurs  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  et  $Q = RC\omega_0$ .

À l'instant  $t = 0$ , le condensateur est déchargé et on ferme l'interrupteur. Déterminer l'évolution du courant  $i'$  traversant la résistance  $R$ . On simplifiera les calculs en utilisant les valeurs numériques  $Q = 1$ ,  $k = 1/2$ .

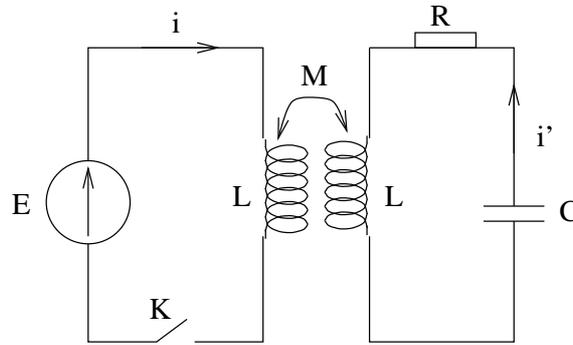


FIGURE 6 – Circuits couplés en régime transitoire

*Pour les exercices d'induction qui suivent, on prendra soin de préciser sur un schéma les orientations choisies pour le calcul flux, la fem induite et l'intensité.*

### Exercice 14.

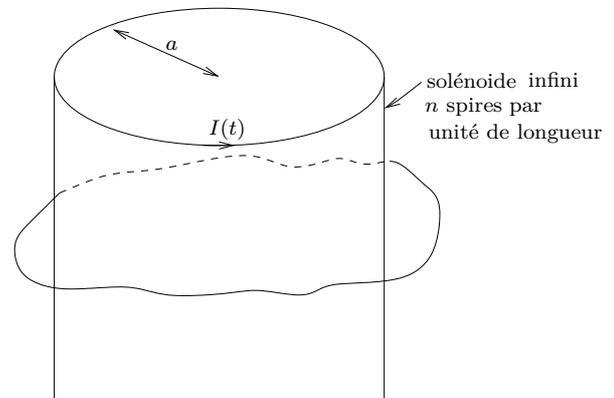
1. Un solénoïde infini de rayon  $a$  comportant  $n$  spires par unité de longueur est parcouru par un courant d'intensité  $I = I_0 \cos(\omega t)$ . Décrire le champ magnétique qu'il produit et donner son expression.

2. Ce solénoïde est entouré par un fil électrique de résistance totale  $r$  formant un circuit fermé. Pourquoi un courant circule-t-il dans ce fil? Quelle est son intensité  $i$ ?

3. Un autre fil de même résistance, formant une boucle circulaire de rayon  $r < a$ , est placé à l'intérieur du solénoïde, de sorte que son axe de symétrie soit parallèle celui du solénoïde. Même question.

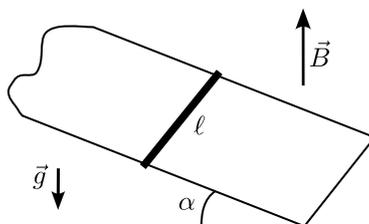
4. Dans chacun des deux cas précédents, donner l'expression du coefficient de mutuelle induction entre le fil et le solénoïde.

5. C'est maintenant le fil qui est alimenté par un générateur assurant l'intensité  $i(t) = i_0 \cos \omega t$ . Les bornes du solénoïde sont connectées entre elles en court-circuit et il présente une résistance  $R$ . Exprimer dans chacune des deux cas l'intensité qui circule dans le solénoïde.



### Exercice 15.

Une barre conductrice de masse  $m$ , de longueur  $\ell$  et de résistance électrique  $R$  forme un circuit fermé avec deux rails parallèles et un fil de cuivre de résistances négligeables. Ces rails sont disposés parallèlement l'un à l'autre selon la ligne de plus grand pente d'un plan incliné d'un angle  $\alpha$  sur l'horizontale. La barre leur est perpendiculaire et peut glisser sans frottement à leur contact. L'ensemble est plongé dans le champ de pesanteur et dans un champ magnétique constant uniforme vertical  $\vec{B}$ .

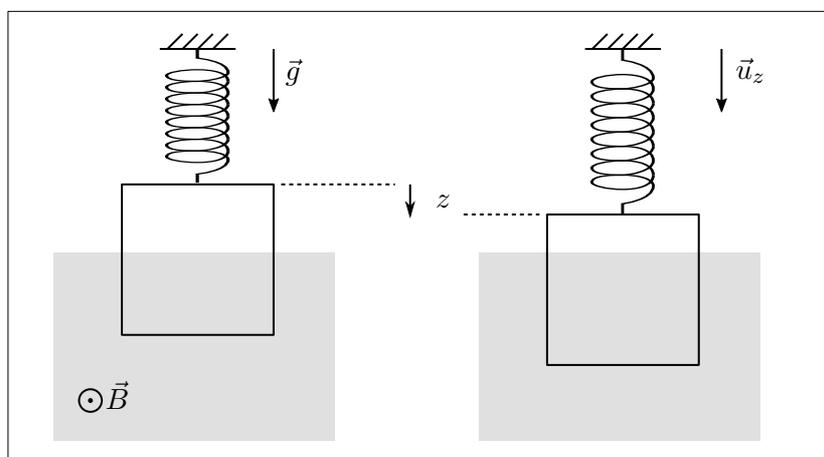


Étudier le mouvement de la barre abandonnée sans vitesse initiale à la surface des rails. Procéder à un bilan énergétique.

### Exercice 16.

Un cadre de cuivre filiforme, de masse  $m$  et de résistance électrique  $R$ , a la forme d'un carré de côté  $a$ . Il est suspendu verticalement à un ressort de raideur  $k$  de sorte qu'à l'équilibre, la moitié inférieure du cadre est située dans une région où règne un champ magnétique  $\vec{B}$  horizontal et uniforme.

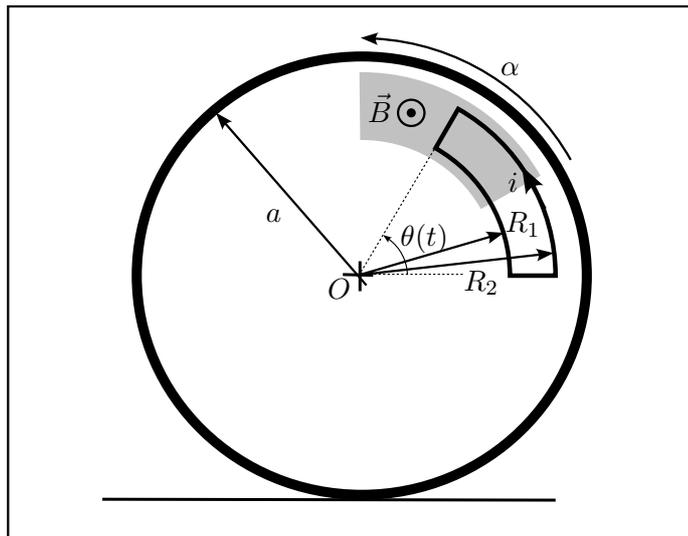
On abaisse de cadre d'une distance  $a/2$  et on l'abandonne sans vitesse initiale. On repère son mouvement par son déplacement  $z$  par rapport à position de repos.



1. Décrire qualitativement, le plus précisément possible, les phénomènes qui se déroulent un fois qu'on a lâché le cadre.
2. Exprimer en fonction de  $z$ ,  $B$  et  $a$  le flux magnétique traversant le cadre.
3. En déduire une expression de l'intensité  $i$  circulant dans le cadre en précisant bien l'orientation choisie.
4. Exprimer la somme des forces magnétiques s'exerçant sur le cadre.
5. Étudier le mouvement du cadre et exprimer  $z$  en fonction du temps en distinguant divers cas.

**Exercice 17.**

Un cycliste soucieux d'économiser ses patins de frein met à profit ses connaissances en physique et installe sur son vélo un dispositif électromagnétique. À la demande du cycliste, un électroaimant crée un champ magnétique  $\vec{B} = B \vec{u}_z$  horizontal, stationnaire et colinéaire à l'axe de rotation de la roue. Il est uniforme sur la zone grisée de la figure, d'extension angulaire  $\alpha$ , et nul en dehors. Sur la roue est fixé un contour en cuivre (contour en trait gras) de même largeur angulaire  $\alpha$ , de rayons intérieur et extérieur  $R_1$  et  $R_2$ . Comme le montre la figure, le contour peut pénétrer entièrement dans la zone où règne un champ magnétique lorsque la roue tourne. On note  $R$  la résistance électrique du contour de cuivre.



1. Expliquer sans calculs les mécanismes par lesquels ce dispositif est en effet capable de freiner le vélo.
2. La route tourne dans le sens trigonométrique et on repère sa position angulaire par l'angle  $\theta(t)$  défini par l'un des côtés rectilignes du contour de cuivre. Lorsque  $\theta = \theta_0$ , ce segment pénètre dans la zone magnétique puis, lorsque  $\theta = \theta_0 + \alpha$ , il en ressort et c'est l'autre partie rectiligne du cuivre qui y pénètre. On se place dans une situation où, comme sur le dessin,  $\theta \in [\theta_0, \theta_0 + \alpha]$ . Exprimer l'intensité électrique  $i$  du courant qui circule dans le cuivre, en fonction de  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\dot{\theta}$  et  $R$ .
3. En déduire le moment en  $\Gamma_{Oz}$  par rapport à l'axe ( $Oz$ ) des forces magnétiques s'exerçant sur le cuivre.
4. Reprendre les deux questions précédentes dans le cas où  $\theta \in [\theta_0 + \alpha, \theta_0 + 2\alpha]$ , c'est à dire pendant que le contour de cuivre émerge de la zone magnétique. Vérifier que  $\Gamma_{Oz}$  prend la même expression que précédemment.
5. L'étude du mouvement du vélo en cours de freinage est trop difficile. Pour simplifier, on suppose que le cycliste procède à quelques essais « statiques » dans son atelier. Il soulève légèrement le vélo pour que la roue ne touche plus le sol, puis il la lance avec une vitesse angulaire  $\omega_0 > 0$  depuis une position où  $\theta < \theta_0$ , et actionne aussitôt le système magnétique. À l'instant  $t = 0$ ,  $\theta$  atteint  $\theta_0$  et le cuivre pénètre dans le champ magnétique. On note  $J$  le moment d'inertie de la roue. Déterminer l'évolution temporelle de la vitesse angulaire  $\omega = \dot{\theta}$  de la roue au cours de son premier tour. De combien cette vitesse angulaire est-elle réduite à la fin de ce tour ?
6. Combien de tours sont nécessaires pour un arrêt complet de la roue ?
7. Quel phénomène gênant apparaît dans le fil de cuivre ? Avec quelle(s) conséquence(s) ?
8. Procéder à un bilan énergétique au cours d'un tour de roue.

Les applications numériques seront effectuées avec les données suivantes :

- Zone de champ magnétique :  $\alpha = 0,20 \text{ rad}$ ,  $B = 1,0 \text{ T}$ .
- $R_1 = 25 \text{ cm}$ ,  $R_2 = 30 \text{ cm}$ , même ouverture angulaire  $\alpha$  que la zone de champ magnétique.
- $\omega_0 = 120 \text{ tour/min}$ .
- Roue lenticulaire de diamètre  $2a = 700 \text{ mm}$ , de masse  $m = 1,2 \text{ kg}$ , de moment d'inertie par rapport à son axe de rotation  $J = ma^2/2$ .
- $R = 1,4 \Omega$ .