# TD n°21 Transducteurs électromécaniques

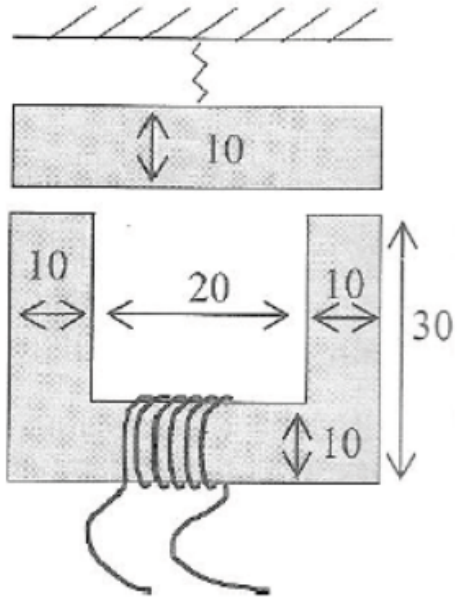
ENCPB - Pierre-Gilles de Gennes

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

## 1. Contacteurs

### 1.1 Electroaimant⋆

On considère l'électroaimant suivant, dont les dimensions sont en mm. Sa profondeur dans la direction perpendiculaire au plan de la figure est de 10 mm. La perméabilité relative du noyau est de 1500. Le ressort maintient la partie mobile dans une position telle que l'on ait un entrefer de $e = 3$ mm.




1. Exprimer l'énergie $\mathscr{E}_{\text{em}}$ emmagasinée par la bobine en fonction du flux $\Phi$ à travers une section du circuit magnétique, du nombre de spires et du courant $I$ qui la traverse.

2. Exprimer le champ magnétique $B$ en un point de l'électroaimant.

3. Donner l'inductance en fonction de $e$.

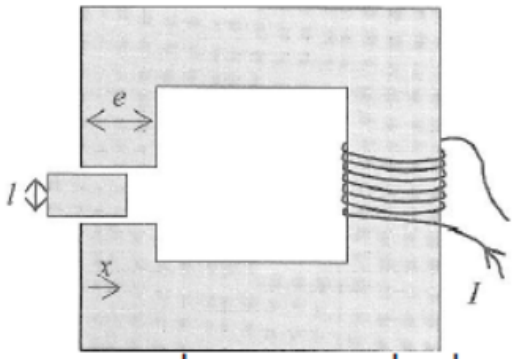
4. Exprimer l'intensité $F$ de la force de rappel en fonction de $e$.

5. Le ressort crée une force $F_r$ égale à 5 N pour e = 3 mm. La bobine étant constituée de 200 spires, calculer l'intensité du courant pour que la partie mobile commence à effectivement se déplacer.

6. Quel est l'intérêt d'avoir un ressort pour ce type de contacteur ?

### 1.2 Oscillateur magnétique•

Un milieu magnétique de perméabilité relative $\mu_r$ quasi-infinie de section carré constante de côté $e$ contient un entrefer de largeur $\ell + \delta$ avec $\delta << \ell$ dans lequel peut se glisser une pièce de milieu identique, de masse $m$, de même section carré et de largeur $\ell$. Une bobine contenant $N$ spires et parcourue par un courant $I$ enlace le milieu magnétique. On repère la pièce par le position $x(t)$. À l'instant $t = 0$, la pièce se trouve en $x(0) = e/4$ sans vitesse initiale.

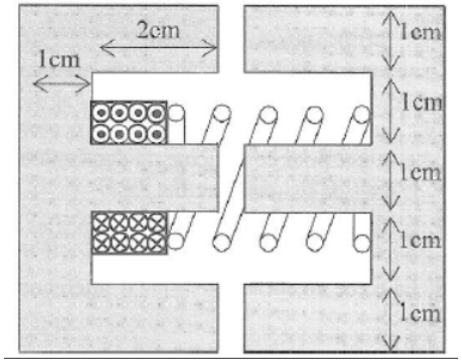



On supposera qu'il n'y a pas de frottement et on admettra que le champ magnétique est négligeable dans la partie de la pièce située hors de l'entrefer.

1. Déterminer l'expression de l'énergie magnétique du circuit et en déduire l'expression de la force s'exerçant sur le contacteur lorsque $0 < x < e$.
2. Faire de même lorsque $e < x < 2e$.
3. Justifier que la pièce aura un mouvement périodique.
4. Déterminer la période du mouvement.

### 1.3 Contacteur•

On considère le contacteur ci-dessous formé par deux noyaux identiques (permittivité $\mu_r = 1500$, de profil cubique et donc de profondeur 1 cm). La bobine est composée de $N = 100$ spires et parcourue par un courant $I$, la tension à ses bornes est notée $u$. La raideur du ressort est $k = 5$ N.m$^{-1}$. Lorqu'il n'y a pas de courant, l'entrefer mesure $e = 2$ mm.




1. Déterminer le courant $I$ pour fermer le contacteur.
2. Déterminer le courant $I$ pour maintenir le contacteur fermé.

## 2. Machines synchrones

### 2.1 Machine synchrone fonctionnant en alternateur et en moteur⋆

Soit une machine synchrone bipolaire diphasée à rotor bobiné. On considère une des phases (bobines) du stator et l'on note $\Psi$ et $\varphi$ (supposés indépendants de la phase choisie) respectivement le déphasage de la fcém $e(t)$ et de la tension $u(t)$ par rapport à l'intensité $i(t)$. Soit $R$ et $L$ la résistance et l'inductance de chacun des enroulements du stator avec $R = 0,9\Omega$.

1. La machine fonctionne en alternateur.
   - On fait un premier essai à vide à la vitesse de rotation $\omega$ : tension efficace à vide $U_V = 220$ V ; courant d'excitation à vide $I_{E,V} = 4,0$A ;
   - on fait un second essai en court-circuit à la vitesse de rotation $\omega$ : courant d'excitation $I_{E,CC} = 1,0$ A ; courant en ligne $I_{CC} = 3,5$ A.

   (a) Rappeler la modélisation électrique d'une phase d'un moteur.

   (b) Que signifie ici "essai à vide" et "essai en court-circuit" ? À quels courants correspondent les appellations "courant de ligne" et "courant d'excitation" ?

   (c) La f.c.é.m. induite dans une bobine du stator se met sous la forme $e(t) = E\sqrt{2}\sin(\omega t)$ avec $E = KI_E\omega$. Justifier qualitativement l'expression de $E$.

   (d) Avec l'essai à vide, déterminer le produit $K\omega$.

   (e) Avec l'essai en court-circuit, déterminer la réactance $L\omega$. Montrer que $R << L\omega$. On négligera $R$ dans la suite.

2. La machine fonctionne en moteur. En régime nominal, chaque phase fonctionne sous une tension efficace $U = 190$ V et de fréquence 50 Hz ; le stator absorbe une puissance $P = 1,0$ kW avec un facteur de puissance $\cos\varphi = 0,87$. On néglige les frottements mécaniques.

   (a) Calculer l'intensité efficace en ligne $I$.

   (b) En faisant un bilan de puissance, calculer le moment du couple électromagnétique appliqué à l'arbre du moteur.

   (c) Tracer le diagramme de Fresnel relatif au courant et à la tension dans le cas où $\varphi > 0$.

   (d) Déterminer la valeur efficace $E$ de la f.c.e.m.

   (e) Établir la relation $U\cos\varphi = E\cos\Psi$.

## 2.2 Traction d'un véhicule électrique par un moteur synchrone•

On étudie un moteur synchrone diphasé, bipolaire, dont on cherche à déterminer les principaux paramètres.

Le circuit rotorique est parcouru par le courant d'excitation continu d'intensité $I_e$ maintenu constant. Le circuit statorique est alimenté par un onduleur de courant commandé qui impose dans les deux phases des courants sinusoïdaux de pulsation $\omega$, déphasés de $\pi/2$, de valeurs efficaces identiques égales à $I$.

Un ensemble de sondes positionnées dans la machine permettent par la mesure du champ magnétique de déterminer la position angulaire du rotor. De même, deux capteurs de courant permettent de déterminer toutes les propriétés du courant dans chaque phase. Un calculateur inclus dans le dispositif d'autopilotage, non étudié, analyse ces données et génère la commande adéquate de l'onduleur de courant.

On supposera que les matériaux magnétiques constituants la machine sont idéaux.

1. **Paramètres électriques du moteur**
   (a) En régime permanent de rotation, quelle est la relation entre la vitesse $\Omega$ de rotation du rotor et $\omega$ ? Cette relation est-elle valable au démarrage ? Commenter.
   (b) On désigne par $L$ l'inductance d'une phase et on néglige la résistance des enroulements. En régime permanent de rotation, on note $\underline{U}$ la représentation complexe de la tension d'alimentation de la phase, $\underline{I}$ celle de l'intensité du courant et $\underline{E}$ celle de la force contre-électromotrice. Rappeler le schéma électrique d'une phase en fonctionnement moteur et en fonctionnement alternateur.
   (c) La valeur efficace de la force contre-électromotrice s'écrit sous la forme $E = \phi\omega$. Que représente la grandeur $\phi$ ? De quels paramètres dépend-elle ?
   (d) Afin de mesurer $\phi$, on réalise un essai avec les phases statoriques en circuit ouvert, le rotor de la machine synchrone étant entraîné par un moteur auxiliaire à la vitesse de $6,0.10^3$ tr.min$^{-1}$. On mesure la tension efficace aux bornes d'une phase égale à $1,2.10^2$ V. Calculer la valeur de $\phi$. En déduire la valeur de $E$ à cette vitesse.
   (e) Pour mesurer la valeur de l'inductance d'une phase, on réalise un essai en court-circuitant la phase, le rotor étant toujours entraîné par le moteur auxiliaire à $6,0.10^3$ tr.min$^{-1}$. La mesure de l'intensité efficace du courant de court-circuit donne la valeur $I_{cc} = 1,2.10^2$A. Calculer l'inductance $L$ d'une phase.
2. **Traction du véhicule**
   Le moteur tracte un véhicule électrique qui est une navette de masse voisine de 800 kg, qui doit être capable de monter une pente de 10% à la vitesse constante de 50 km.h$^{-1}$.
   (a) En supposant que la puissance perdue à cause des frottements de l'air et des pertes dans les transmissions mécaniques à cette vitesse est de l'ordre de 3 kW, estimer la puissance que doit développer le moteur afin de maintenir la vitesse du véhicule constante.
   (b) En régime permanent de rotation, on rappelle que l'angle d'autopilotage $\psi$ représente le déphasage de $\underline{E}$ par rapport à $\underline{I}$. On étudie un régime nominal de rotation du moteur à la vitesse $\Omega_N = 6,0.10^3$ tr.min$^{-1}$. Lors de ce régime, la commande de l'onduleur impose $\psi = \pi/3$ et le moteur doit développer une puissance mécanique nominale de $P_m = \Gamma_N\Omega_N = 15$ kW où $\Gamma_N$ désigne le couple électromagnétique nominal. Déterminer la valeur efficace de l'intensité du courant dans chaque phase.
   (c) Déterminer la valeur efficace de la tension d'alimentation des phases du stator.
   (d) À $6,0.10^3$ tr.min$^{-1}$, le couple utile délivré à la charge mécanique vaut $\Gamma_{ut} = 23$ N.m. Calculer le rendement du moteur.

## 2.3 Alternateur connecté à un réseau de distribution•

Chaque phase de l'induit d'un alternateur est connectée au réseau de distribution afin de fournir une certaine puissance électrique. On étudie une des phases qu'on modélise par une inductance propre $L$, une résistance $R$ et une force électromotrice induite par la rotation du rotor. L'alternateur étant connecté à un réseau de distribution de grande dimension et comportant d'autres éléments de production, la tension $u(t)$ aux bornes de la phase étudiée est fixée et servira de référence de phase : $u(t) = U\sqrt{2}\cos(\omega t)$. L'intensité circulant dans la phase, indéterminée à ce stade, est notée $i(t) = I\sqrt{2}\cos(\omega t - \varphi)$. La f.e.m. induite peut être réglée par un courant d'excitation continu $I_r$ circulant dans l'inducteur (circuit associé au rotor). Elle est notée $e(t) = E\sqrt{2}\cos(\omega t + \delta)$ avec $E = KI_r$, où $K$ est une constante et où $\delta$ est appelé l'angle de décalage interne.

1. Exprimer la puissance moyenne $P$ produite par une phase de l'alternateur en fonction de $U, I$ et $\varphi$. À quelle condition cette puissance est-elle positive ? À puissance fixée, pourquoi vaut-t-il mieux chercher à augmenter le facteur de puissance $\cos\varphi$ dans une problématique de transport de l'énergie ?
2. D'une façon générale, on note $\underline{X}(t) = X\sqrt{2}e^{j\alpha}$ l'amplitude complexe associée à la fonction sinusoïdale $x(t) = x\sqrt{2}\cos(\omega t + \alpha)$. Exprimer, en notation complexe, la loi des mailles associée à l'induit.

3. Dans la suite, on négligera la chute de tension à travers la résistance $R$. Sur un diagramme de Fresnel, représenter les images de $U, I, E$ et $jL\omega I$ dans le cas où $\delta \in [0, \pi/2]$.

4. La puissance $P$ produite par une phase de l'alternateur est égale à la puissance mécanique de la turbine entraînant le rotor, divisée par le nombre de phases. À P fixée, en négligeant les pertes, déterminer le courant d'excitation $I_r$ pour obtenir le facteur de puissance optimal $\cos\varphi = 1$. Que vaut alors $\delta$ ?

## 3. Machines à courant continu

### 3.1 Identification d'un moteur à courant continu⋆

On s'intéresse ici à un ensemble constitué d'un moteur à courant continu à excitation séparée et d'une charge mécanique tous deux montés sur un même arbre. On note $J$ le moment d'inertie du rotor.

1. On postule pour la charge la caractéristique couple-vitesse $C_r = -\alpha\Omega$ avec $\alpha$ une constante positive. Interpréter le signe de $C_r$. Exprimer la transmittance $T_m(p) = \Omega(p)/C(p)$ avec $\Omega(p)$ la vitesse angulaire et $C(p)$ le couple moteur.

2. On désire déterminer expérimentalement les paramètres $J$ et $\alpha$. Pour ce faire, on effectue deux essais :

   - Essai 1. Pour différentes valeurs de couple magnétique $C$ appliqué, on mesure, après établissement du régime permanent, la valeur $\omega_0$ de la vitesse angulaire. On obtient les résultats suivants :

| Couple $C$ (N.m) | 5 | 10 | 15 |
|---|---|---|---|
| Vitesse $\omega$ (rad.s$^{-1}$) | 50 | 100 | 150 |

   - Essai 2. Lorsque la charge est en rotation à vitesse angulaire $\omega_0$, on applique un couple magnétique $C$ nul à partir de l'instant $t = 0$ et on mesure le temps $T_0$ au bout duquel la vitesse ne vaut plus que 50 % de sa valeur initiale $\omega_0$. Pour $\omega_0 = 150$ rad.s$^{-1}$, on a mesuré $T_0 = 10,4$ s. Déterminer $\alpha$ et $J$. Dans l'essai 2, si l'on modifie la valeur initiale $\omega_0$, comment doit se trouver modifié $T_0$ si le modèle est correct ?

3. La loi $C_r = -\alpha\omega$ rend-elle compte de l'arrêt de la machine au bout d'un temps $T_1$ ? On a mesuré $T_1 = 42$ s. Proposer une correction à la loi liant $C_r$ à $\omega$ pour pallier ce problème. Calculer numériquement le ou les coefficients introduits à cet effet, en conservant les valeurs précédemment obtenues pour $J$ et $\omega$.

### 3.2 Moteur à excitation série⋆

Un moteur continu à excitation série (l'inducteur et l'induit sont en série) est alimenté par une source de tension continue $U = 220$ V. On note $I$ l'intensité dans l'induit. On néglige toutes les pertes.

1. On rappelle que la constante du moteur $\Phi_0 = KI_s$ où $I_s$ est le courant traversant le stator. Déterminer la dépendance du couple du moteur en fonction de l'intensité qu'il consomme, puis en fonction de la vitesse de rotation.

2. Que se passe-t-il si le moteur fonctionne à vide ?

3. Le couple utile s'écrit $\Gamma = a/\Omega^2$ avec $a$ une constante et $\Omega$ la vitesse de rotation. Sur la notice du moteur, on lit : 220 V ; 1200 tr/min / 6,8 A. En déduire la valeur numérique de la constante $a$.

4. Le moteur entraîne un compresseur de couple résistant constant 10 N.m. En déduire la vitesse de rotation de l'ensemble.

5. Le moteur entraîne un ventilateur dont le couple résistant est proportionnel au carré de la vitesse de rotation. (15 N.m à 1500 tr/min). En déduire la vitesse de rotation de l'ensemble.

### 3.3 Plaque signalétique d'un moteur à courant continu⋆

Sur la plaque signalétique d'un moteur à courant continu à excitation séparée, on peut lire :

| | | |
|---|---|---|
| 1,12 kW | 1200 tr/min | |
| induit | 220 V | 5,7 A |
| excitation | 220 V | 0,3 A |
| 57 kg | | |

1. Calculer le couple utile nominal et la résistance de l'induit.

2. Calculer le rendement nominal et la résistance de l'inducteur.