TD 25 – Induction électromagnétique

2ème partie

Ce qu'il faut savoir et savoir faire

→ Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
→ Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.
→ Utiliser la loi de modération de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
→ Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.
→ Différencier le flux propre des flux extérieurs.

J'apprends mon cours : *Questions de cours, 1, 2 3, 4.*

Questions de cours

Q1. Etudier les rails de Laplace en version moteur ou générateur.
Q2. Expliquer l'origine des courants de Foucault, et citer des exemples d'utilisation.
Q3. Donner la relation à la base de la conversion électromécanique.

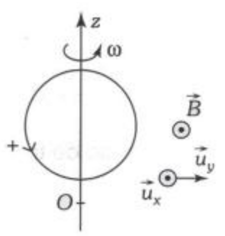
Exercices

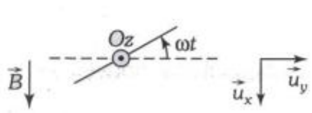
Exercice 1 : Spire en rotation dans un champ magnétique

★☆☆
Ref. 0196

- ✓ *Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire*
- ✓ *Conversion électromécanique*
- ✓ *Couple de Laplace*

Une spire circulaire de rayon a et de résistance interne R tourne autour de l'axe Oz à vitesse angulaire ω constante, entrainée par un couple moteur C_m. A l'instant $t = 0$, la spire est dans le plan yOz. Elle est de plus placée dans un champ magnétique uniforme et permanent, horizontal de norme B.





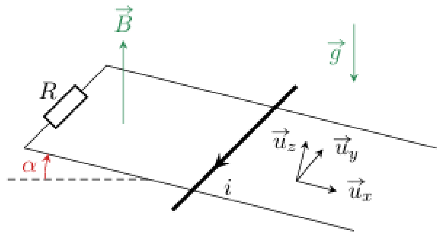
1) Décrire le fonctionnement du dispositif.
2) Exprimer la force électromotrice induite et en déduire l'intensité i la parcourant.
3) Quel est le couple de Laplace C_L exercé par le champ sur la spire ?
4) Que devient-il en régime stationnaire ?
5) Comparer la puissance dissipée par effet Joule et la puissance fournie par le moteur qui entraine la spire. Quel est le rendement de la transformation énergie mécanique en énergie électrique ?

Exercice 2 : Rails de Laplace inclinés ♥

★★☆
Ref. 0197

✓ *Circuit déformable dans un champ magnétique stationnaire*

Un barreau métallique de masse m glisse sous l'effet de son poids sur deux rails conducteurs, séparés d'une distance l et inclinés d'un angle α par rapport à l'horizontale. Les rails sont fermés sur une résistance R, et un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ dirigé selon la verticale ascendante, règne entre eux. Les frottements sont négligés.



On repère par $x(t)$ la position du barreau le long des rails.

1) Prévoir le sens (positif) du courant i qui circule dans le circuit.
2) Le barreau peut-il s'immobiliser ?
3) Etablir l'équation différentielle vérifiée par la vitesse v.
4) En déduire la position $x(t)$ du barreau à chaque instant.

Exercice 3 : Oscillations d'un cadre métallique

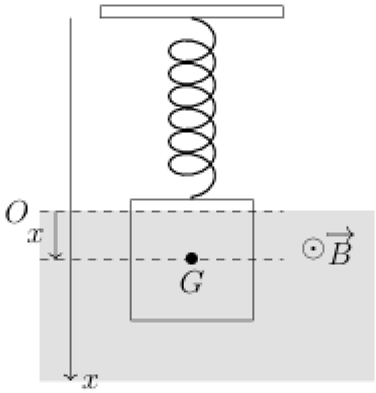
★★☆
Ref. 0198

✓ *Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire*

Un cadre carré de centre G, de masse m, de côté a et de résistance R, est suspendu par un ressort de longueur à vide ℓ_0 et de constante de raideur k, et dont l'autre extrémité est reliée au point fixe O. La moitié inférieure du cadre est plongée dans un champ magnétique $\vec{B} = B\,\overrightarrow{u_z}$. On tire le cadre (vers le bas) d'une distance $a/2$, et on le lâche à la date $t = 0$. Les effets d'auto-induction sont négligés. On néglige tous les frottements mécaniques.

On veut étudier les petits mouvements du cadre ; dans ces conditions, on suppose que la partie supérieure du cadre reste en dehors du champ.

L'origine O de l'axe (Ox) vertical descendant est prise à la position d'équilibre du cadre.



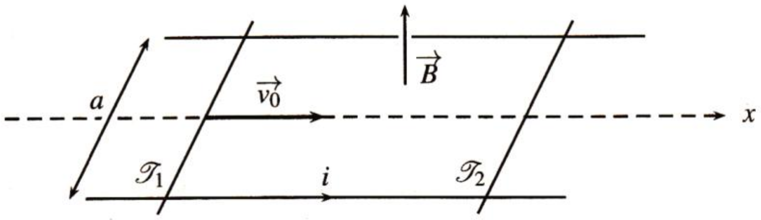
1) Déterminer l'équation d'évolution de $x(t)$.
2) Déterminer l'expression de la période des oscillations et le temps caractéristique d'amortissement.

Exercice 4 : Deux tiges sur rails dans un champ magnétique

★★☆
Ref. 0199

✓ *Circuit déformable dans un champ magnétique stationnaire*

Deux tiges T_1 et T_2 identiques (masse m, résistance $R/2$) sont mobiles sans frottement sur deux rails parallèles de résistance négligeable et situés dans un plan horizontal (voir figure). Un champ magnétique permanent uniforme $\vec{B} = B\,\overrightarrow{u_z}$ et vertical règne en tout point. A l'instant initial, on communique à la tige T_1 une vitesse initiale $\overrightarrow{v_0} = v_0\,\overrightarrow{u_x}$ tandis queT_2 est immobile. Les effets d'auto-induction sont négligés



1) Montrer qualitativement que T_2 va se mettre en mouvement et que T_1 va ralentir.
2) Montrer que l'une des tiges se comporte en générateur et l'autre en récepteur.
3) Ecrire l'équation électrique et les deux équations mécaniques de ce problème.
4) En déduire, pour chaque tige, l'expression de leur vitesse.
5) Tracer les graphes correspondants. Commenter la situation finale obtenue.
6) Exprimer puis tracer l'intensité du courant $i(t)$ qui circule dans les deux tiges. Tracer l'allure des variations de $i(t)$ et interpréter le résultat obtenu pour $t \to +\infty$.
7) Faire un bilan énergétique entre l'état initial et l'état final. Vérifier le résultat par calcul direct.

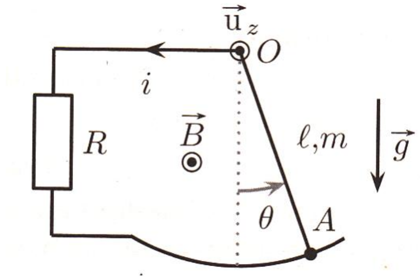
Exercice 5 : Pendule conducteur

★★☆
Ref. 0200

✓ *Circuit déformable dans un champ magnétique stationnaire*

Un pendule pesant est constitué d'une barre métallique homogène de longueur L et de masse m, pouvant pivoter sans frottement (liaison pivot idéale) par rapport à l'axe horizontal $(O, \overrightarrow{u_z})$. Son moment d'inertie par rapport à cet axe est J. Son extrémité inférieure est en contact sans frottement avec un arc de cercle métallique (point A).

Le circuit électrique plan ainsi constitué est refermé par des fils et possède une résistance R. Son inductance est négligée. L'ensemble baigne dans un champ magnétique extérieur uniforme $\vec{B} = B\,\vec{u_z}$. La position de la barre est repérée par l'angle θ par rapport à la verticale. On souhaite étudier les petits mouvements de la barre autour de la position $\theta = 0$.



1) Exprimer la f.é.m induite dans ce circuit en fonction de B, L et de la vitesse angulaire $\dot{\theta}$.
2) Déduire l'expression de l'intensité i induite dans ce circuit.
3) En exploitant le théorème du moment cinétique scalaire appliqué à la barre, établir une équation différentielle liant l'angle θ et l'intensité i
4) En déduire l'équation différentielle vérifiée par l'angle θ. Identifier la pulsation propre ω_0 et le facteur de qualité Q en fonction des données du problème.
5) Commenter et expliquer l'influence de la résistance R sur la nature du mouvement de la barre. Tous les paramètres autres que R étant fixés, faire apparaître une valeur critique R_c de R qui sépare les différents régimes.

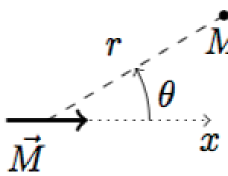
Exercice 6 : Principe d'un alternateur

★★★
Ref. 0201

- ✓ *Conversion électromécanique*
- ✓ *Action sur un moment magnétique*

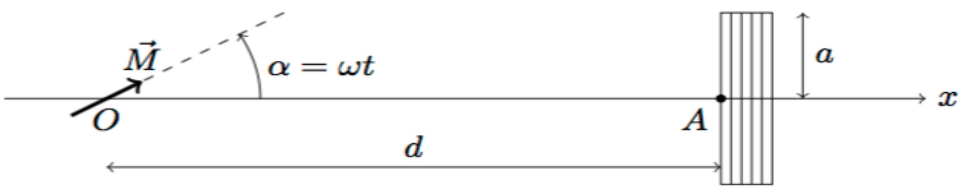
Au sein des centrales électriques, la rotation des turbines entraine des alternateurs dont le principe simplifié de fonctionnement est étudié ici.

On donne l'expression en coordonnées polaires, en un point M quelconque, du champ créé par un dipôle magnétique $\vec{m}$ situé en O :



$$\vec{B} = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \times (2\cos\theta\,\vec{e}_r + \sin\theta\,\vec{e}_\theta)$$

On considère un aimant permanent de dipôle magnétique $\vec{m}$ situé en O, animé d'un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire ω. Le dipôle fait à chaque instant l'angle $\alpha = \omega t$ avec l'axe des x. En un point A de l'axe (Ox) et tel que $OA = d$, est placée une bobine plate d'axe (Ox), de rayon a et comportant N spires. On négligera l'épaisseur de la bobine devant d. On supposera également que le rayon a est suffisamment faible pour pouvoir considérer que le champ créé par l'aimant est uniforme et en tout point égal à sa valeur en A.



La bobine a une inductance propre L et une résistance négligeable devant la résistance du circuit (non représentée) auquel elle est liée, résistance dite « utilisateur » R_u.

Sur le plan mécanique, on note Γ le couple exercé par l'axe de la turbine sur l'aimant. On négligera les frottements au niveau de l'axe de rotation du rotor, la liaison pivot correspondante est supposée idéale.

1) Exprimer le champ magnétique créé par l'aimant au niveau de la bobine en fonction des données de l'énoncé.
2) En déduire l'expression du flux magnétique créé par l'aimant à travers la bobine.
3) Établir l'équation différentielle vérifiée par l'intensité $i(t)$ dans le circuit utilisateur.
4) Résoudre cette équation en supposant le régime sinusoïdal établi et donner l'expression de $i(t)$ sous la forme :

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi)$$

où l'amplitude I_m et la phase à l'origine φ sont à exprimer en fonction des données de l'énoncé.

5) Exprimer alors la puissance moyenne P_{Joule} reçue par la résistance utilisateur (puissance dite *utile*).
6) Donner, en fonction de $i(t)$, l'expression du champ magnétique créé par la bobine en O sachant que $d >> a$.
7) Exprimer le couple $\Gamma_{Laplace}$ des actions de Laplace s'exerçant sur l'aimant. En déduire l'expression du couple Γ que doit fournir la turbine pour maintenir l'aimant en rotation à vitesse constante puis sa valeur moyenne en fonction de $\mu_0, N, M, a, d,\ I_m\ et\ \varphi$.
8) En déduire la puissance moyenne P_m ainsi consommée et la comparer à P_{Joule}.