

# Chapitre 19 – Induction électromagnétique

## Plan du cours

### I Lois de l'induction

I.1 Approche expérimentale

I.2 Flux magnétique

I.3 Lois de l'induction

### II Circuit fixe dans un champ magnétique variable

II.1 Auto-induction

II.2 Inductance mutuelle

II.3 Circuits électriques couplés par inductance mutuelle en RSF

### III Conversion de puissance électromécanique

III.1 Rails de Laplace générateur

III.2 Rails de Laplace moteur

III.3 Freinage par induction

III.4 Alternateur

## 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.
- Utiliser la loi 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.
- Utiliser la loi de modulation de Lenz pour un système soumis à un effet auto-inductif.
- Évaluer et citer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.
- Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.
- Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale ».
- Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.
- Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé régissant le comportement de deux circuits électriques à une maille couplés par mutuelle induction en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.
- Réaliser un bilan de puissance et d'énergie.
- Interpréter qualitativement les phénomènes observés dans un système de conversion de puissance.
- Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe.
- Effectuer un bilan énergétique.
- Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.
- Expliquer l'origine des courants de Foucault et en connaître des exemples d'utilisation.

## Questions de cours

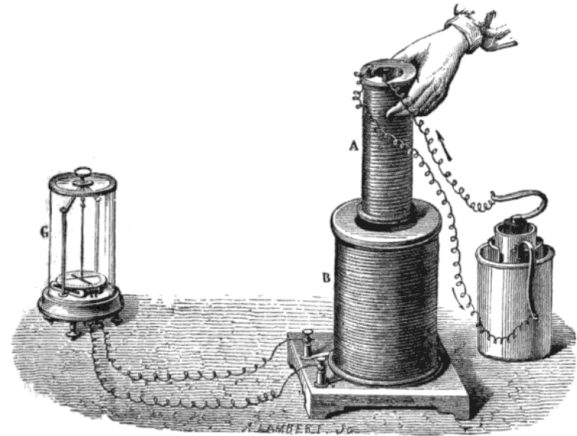
- Définir le flux magnétique, puis énoncer la loi de Faraday en s'appuyant sur deux schémas : l'un magnétique, l'autre électrique.
- Énoncer la loi de modération de Lenz et l'utiliser pour analyser qualitativement une situation décrite par l'interrogateur : aimant et spire (connaissant le mouvement relatif, déterminer le signe du courant induit), rails de Laplace (connaissant le sens du mouvement de la tige mobile, déterminer le signe du courant induit) ou bobine dans un circuit.
- Décrire qualitativement le comportement des rails de Laplace générateur, des rails de Laplace moteur ou d'une spire en rotation dans un champ magnétique uniforme.
- Établir les équations électrique et mécanique des rails de Laplace utilisés comme générateur ou comme moteur. En déduire un bilan de puissance.
- Établir les équations électrique et mécanique de l'alternateur utilisé comme générateur. En déduire un bilan de puissance.

## Documents

### Document 1 – Expérience de Faraday (1831)

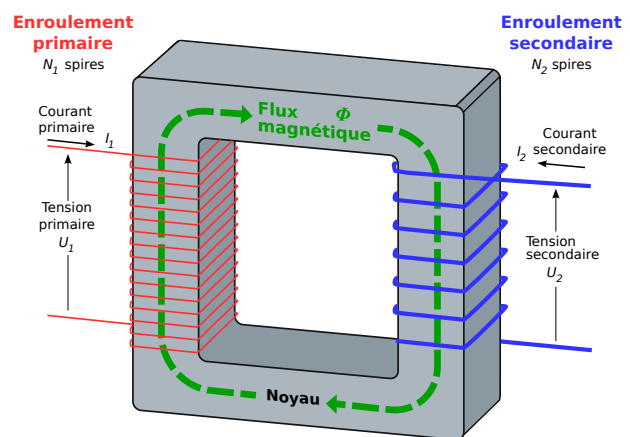
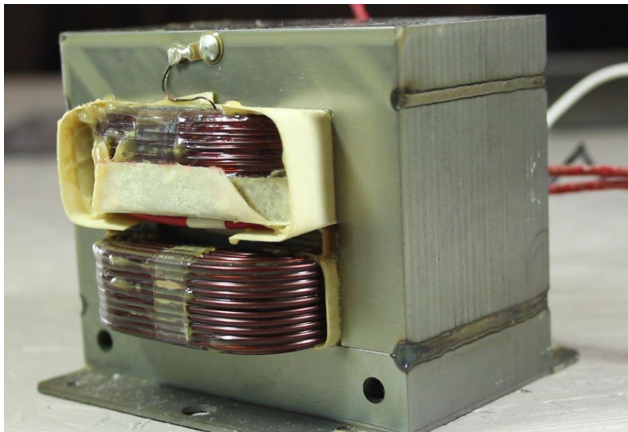
En 1831, Michael Faraday cherche à comprendre les phénomènes donnant naissance aux courants induits. À l'aide d'une bobine primaire (A) alimentée par une pile, il mesure le courant électrique produit dans une bobine secondaire (B) reliée à un galvanomètre (ancêtre de l'ampèremètre, où une aiguille aimantée est déviée quand un courant passe dans un fil à proximité).

L'aiguille du galvanomètre est momentanément déviée dans un sens lors de la fermeture du circuit et, à sa surprise, dans l'autre sens lors de l'ouverture du circuit.



Ces découvertes sont à la base de très nombreuses applications modernes. La loi de Faraday sera plus tard associée à trois autres équations par James Clerk Maxwell (notamment) pour aboutir à l'électromagnétisme moderne.

### Document 2 – Transformateur électrique



Le transformateur d'un four à micro-onde, modélisé par deux enroulements de fil conducteur autour d'un noyau en fer doux. Le fer doux agit comme un circuit magnétique qui permet de canaliser les lignes de champ.

Les transformateurs sont indispensables pour de nombreuses applications :

- pour limiter les pertes liées au transport de l'électricité, on utilise des très hautes tensions (400 kV), abaissées localement en hautes tensions (20 kV), finalement abaissées à la tension du secteur (230 V) ;
- la tension du secteur peut encore être abaissée pour les chargeurs, etc.

### Document 3 – Freinage par induction et courants de Foucault

Le freinage par induction est largement exploité dans le domaine des transports : il est utilisé sur les trains à grande vitesse et sur les poids lourds. Un disque conducteur est alors placé dans un champ magnétique stationnaire de géométrie adaptée à l'apparition d'effets inductifs. L'image ci-dessous montre le frein électromagnétique qui équipe le Shinkansen (TGV japonais).

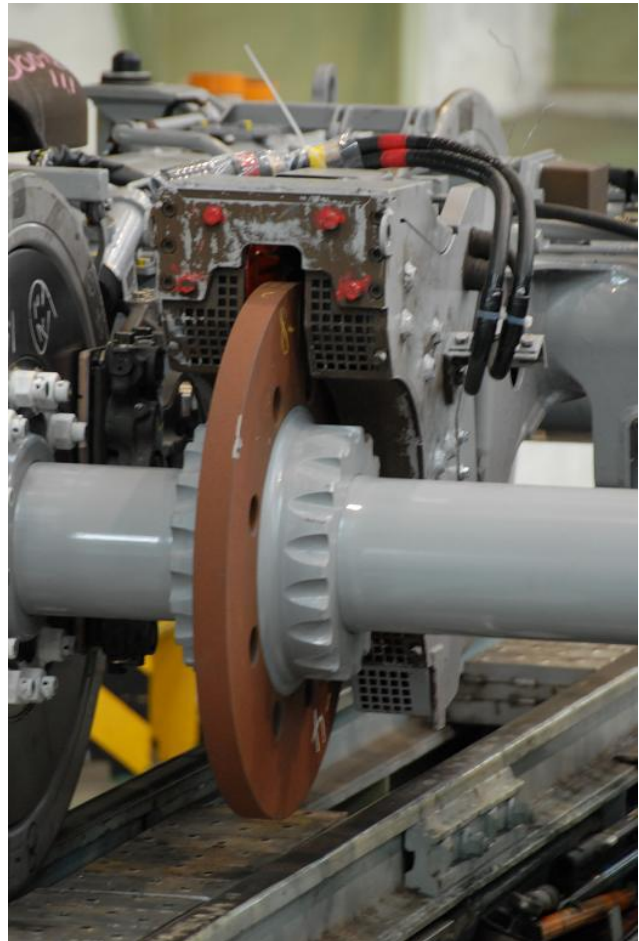
La modélisation des phénomènes inductifs dans un conducteur massif sort du cadre de première année, où l'on ne considère que des circuits filiformes. Les phénomènes mis en jeu restent toutefois les mêmes :

- la roue métallique est en mouvement dans un champ magnétique bien choisi : l'induction donne naissance à des courants dans tout le conducteur : ce sont les **courants de Foucault** (*eddy current* en anglais, où *eddy* = tourbillon) ;
- les courants de Foucault et le champ magnétique aboutissent à des actions de Laplace qui s'opposent au mouvement de la roue, d'après la loi de Lenz : la roue est freinée.

La puissance mécanique est alors dissipée par effet Joule dans le conducteur.

Une plaque à induction exploite aussi les courants de Foucault : un champ magnétique oscillant donne naissance à ces courants. La puissance dissipée par effet Joule permet alors de chauffer la casserole conductrice.

[https://youtu.be/JnWe\\_X20QhY](https://youtu.be/JnWe_X20QhY)



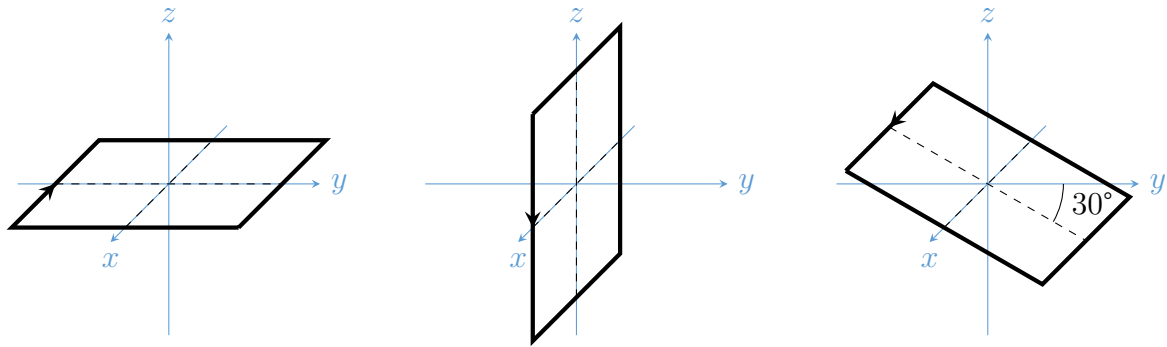
Quelques expériences mettant en évidence des effets inductifs : <https://youtu.be/txmKr69jGBk>, <https://youtu.be/sENgdSF8ppA?t=307> et [https://youtu.be/QwUq8xM\\_8bY](https://youtu.be/QwUq8xM_8bY).

## Applications

### Application 1 – Flux d'un champ magnétique

Le champ magnétique  $\vec{B} = B\vec{e}_z$  est uniforme et stationnaire, avec  $B = 1 \text{ T}$ .

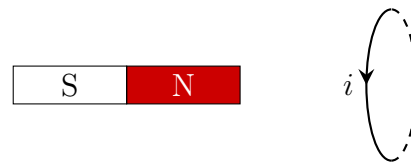
1. Exprimer, puis calculer le flux  $\Phi_B$  du champ magnétique à travers les spires carrées de côté  $a = 5 \text{ cm}$  dans les cas suivants.



2. Exprimer, puis calculer le flux  $\Phi_B$  du champ magnétique à travers une bobine formée de  $N = 1\,000$  spires circulaires de diamètre  $a$ , d'axe  $(Oz)$  et orientée par  $\vec{e}_z$ .

### Application 2 – Loi de Lenz

On considère le dispositif représenté ci-contre formé d'une spire conductrice et d'un aimant permanent. Le sens positif du courant est celui représenté sur la figure.



1. Indiquer le signe de l'intensité  $i$  du courant induit lorsqu'on approche l'aimant de la spire, sans modifier la direction de l'aimant. Justifier. Que se passe-t-il si l'on fait bouger la spire plutôt que l'aimant ?
2. On inverse les pôles de l'aimant : le pôle sud est maintenant le plus près de la spire. On veut  $i > 0$  : faut-il rapprocher ou éloigner l'aimant de la spire ? Justifier.
3. Représenter l'allure de l'évolution temporelle de l'intensité  $i(t)$  alors qu'on fait tourner l'aimant avec une vitesse angulaire constante, autour de l'axe vertical passant par le centre de l'aimant. À l'instant  $t = 0$ , l'aimant est orienté comme sur la figure ci-dessus. Que se passe-t-il si l'on fait tourner la spire, plutôt que l'aimant ? Commenter.

### Application 3 – Loi de Faraday

On considère une spire de centre  $O$ , d'axe  $(O, \vec{e}_z)$ , de surface  $S = 10 \text{ cm}^2$  et de résistance  $R = 0,5 \Omega$ , plongée dans un champ magnétique  $\vec{B}$  d'amplitude  $B_0 = 0,1 \text{ T}$ . On note  $\omega = 2\pi \times 50 \text{ Hz}$ ,  $v_0 = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\Omega_0 = 5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Dans chacun des cas décrits ci-dessous :

- faire un schéma ;
- exprimer la force électromotrice induite  $e(t)$  ;
- en déduire la valeur efficace  $I_0$  de l'intensité du courant induit dans la spire.

1. La spire est immobile, le champ magnétique est uniforme et vaut  $\vec{B}(t) = B_0 \cos(\omega t) \vec{e}_z$ .
2. La spire est immobile, le champ magnétique est uniforme et vaut  $\vec{B}(t) = B_0 \cos(\omega t) \vec{e}_y$ .
3. La spire est en translation rectiligne uniforme à la vitesse  $v_0 \vec{e}_z$  dans un champ magnétique uniforme et stationnaire  $B_0 \vec{e}_z$ .
4. La spire est en translation rectiligne uniforme à la vitesse  $v_0 \vec{e}_y$  dans un champ magnétique uniforme et stationnaire  $B_0 \vec{e}_z$ .
5. La spire est en rotation à la vitesse angulaire  $\Omega_0$  autour de son axe dans un champ magnétique uniforme et stationnaire  $B_0 \vec{e}_z$ .
6. La spire est en rotation à la vitesse angulaire  $\Omega_0$  autour de l'axe  $(O, \vec{e}_y)$  dans un champ magnétique uniforme et stationnaire  $B_0 \vec{e}_z$ .

#### Application 4 – Inductance propre d'une bobine

On considère un solénoïde de longueur  $\ell$ , formé de  $N$  spires de surface  $S$ , dont l'axe est parallèle au vecteur unitaire  $\vec{e}_z$ . On choisit d'orienter le sens conventionnel positif pour l'intensité  $i$  du courant dans les spires avec la règle de la main droite par rapport au vecteur  $\vec{e}_z$ .

On rappelle que la norme du champ magnétique créé dans un solénoïde infini est donnée par  $B_0 = \mu_0 n i$ , où  $n$  est le nombre de spires par unité de longueur et  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ .

1. Faire un schéma.
2. Exprimer l'inductance propre  $L$  du solénoïde en fonction de  $\mu_0$ ,  $N$ ,  $\ell$  et  $S$ .
3. Faire l'application numérique pour une bobine longue constituée de 1 000 spires, de rayon  $a = 3 \text{ cm}$  et de longueur  $\ell = 30 \text{ cm}$ .
4. Refaire l'application numérique avec les bobines utilisées en TP. Commenter la valeur obtenue.
5. Comment varie  $L$  quand on divise le nombre de spires de la bobine par deux ? Commenter.
6. Pourquoi est-il difficile de miniaturiser les bobines ?

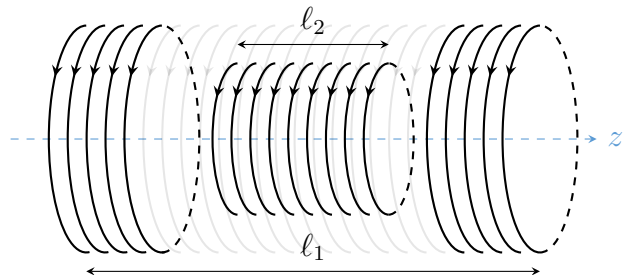
#### Application 5 – Retard à l'allumage

<https://youtu.be/isllsO6aqrc>

Interpréter cette expérience à l'aide de la loi de modération de Lenz.

#### Application 6 – Inductance mutuelle de deux bobines

On considère deux solénoïdes, formés de  $N_1$  (resp.  $N_2$ ) spires de section  $S_1$  (resp.  $S_2$ ) et de longueur  $\ell_1$  (resp.  $\ell_2$ ), avec  $\ell_2 < \ell_1$  et  $S_2 < S_1$ . La bobine 2 est placée au centre de la bobine 1, de telle sorte qu'elles ont le même axe  $(O, \vec{e}_z)$ . On choisit d'orienter les deux bobines avec la même convention pour les intensités  $i_1$  et  $i_2$ .

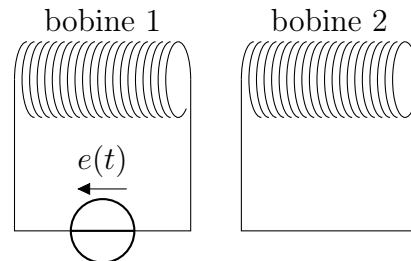


1. Lequel des flux mutuels  $\Phi_{1 \rightarrow 2}$  ou  $\Phi_{2 \rightarrow 1}$  peut-on facilement calculer ? Exprimer-le en fonction des données de l'énoncé et en déduire l'expression de l'inductance mutuelle  $M$ .
2. Exprimer alors le deuxième flux mutuel.

3. Commenter le signe de  $M$  si l'on change l'orientation d'une des deux bobines.
4. Commenter le cas où les deux bobines sont en influence totale, c'est-à-dire pour  $\ell_1 = \ell_2 = \ell$  et  $S_1 = S_2 = S$ .

### Application 7 – Circuits couplés par induction mutuelle en RSF

On considère les deux circuits représentés ci-contre. On note  $L_1$  et  $R_1$  (resp.  $L_2$  et  $R_2$ ) l'inductance propre et la résistance de la bobine du circuit 1 (resp. 2). Le circuit 1 possède un générateur qui délivre une tension sinusoïdale à la pulsation  $\omega$ . L'inductance mutuelle entre les deux circuits est notée  $M$ .



1. Représenter deux schémas équivalents à ce système pour rendre compte des effets inducifs, l'un en adoptant la convention générateur, l'autre en convention récepteur.
2. Établir les deux équations différentielles couplées vérifiées par  $i_1(t)$  et  $i_2(t)$ .
3. En déduire l'impédance complexe  $\underline{Z}$  telle que  $\underline{e} = \underline{Z}i_1$ . Commenter.
4. Faire un bilan énergétique. En déduire l'expression de l'énergie stockée sous forme magnétique.

### Application 8 – Transformateur

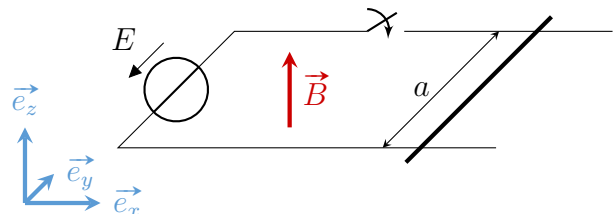
On considère le transformateur du document 2. On suppose que le noyau ferromagnétique canalise parfaitement les lignes de champ magnétique, de sorte que le flux dans une spire du primaire est le même que dans une spire du secondaire : les enroulements primaire et secondaire sont en influence totale.

1. Établir la relation entre  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $N_1$  et  $N_2$ .
2. Calculer le rapport  $N_2/N_1$  dans le cas d'un transformateur permettant de passer de la très haute tension à la haute tension. Quel enroulement comprend le plus de spires ?

### Application 9 – Rails de Laplace moteur

On considère le dispositif des rails de Laplace représenté ci-dessous, plongé dans un champ magnétique  $B\vec{e}_z$  uniforme et stationnaire. On néglige les phénomènes d'auto-induction.

La tige conductrice de masse  $m$  coulisse sans frottement dans la direction de  $\vec{e}_x$ . La résistance électrique du circuit est notée  $R$  et la tension  $E$  du générateur est constante. À l'instant  $t = 0$ , la tige est immobile et on ferme l'interrupteur.



1. Décrire qualitativement l'évolution du système.
2. Établir les équations électrique et mécanique vérifiées par la vitesse  $\dot{x}(t)$  de la barre et par l'intensité  $i(t)$  du courant pour  $t \geq 0$ .
3. En déduire les expressions de  $\dot{x}(t)$  et  $i(t)$ . Les représenter graphiquement.

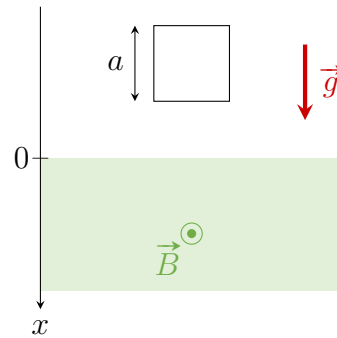


4. Justifier que cette évolution est compatible avec l'analyse qualitative.
5. Effectuer un bilan de puissance. Commenter.
6. Exprimer la force de Laplace subie par le barreau en fonction de  $B$ ,  $a$ ,  $R$  et  $\dot{x}$ . Commenter.

### Application 10 – Freinage par induction

Une spire carrée de côté  $a$  et de masse  $m$  est en chute libre dans le plan du schéma. Sa résistance électrique est notée  $R$ , son inductance propre est négligée. L'espace est divisé en deux régions :

- dans la région  $x < 0$ , le champ magnétique est nul ;
- dans la région  $x \geq 0$  règne un champ magnétique uniforme et stationnaire orthogonal au plan du schéma.

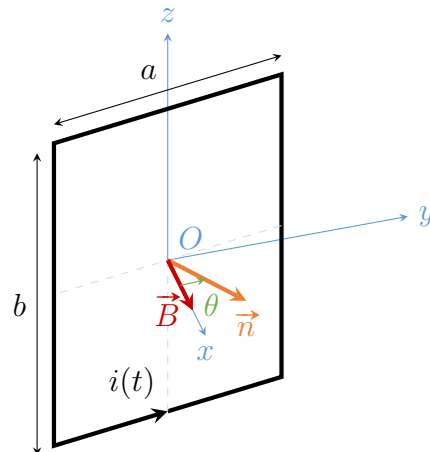


1. Établir les équations différentielles vérifiées par la vitesse  $v(t)$  du cadre quand :
  - 1.a. le cadre est entièrement dans la région où  $\vec{B} = \vec{0}$  ;
  - 1.b. le cadre est à cheval sur les régions où  $\vec{B} = \vec{0}$  et  $\vec{B} \neq \vec{0}$  ;
  - 1.c. le cadre est entièrement dans la région où  $\vec{B} \neq \vec{0}$ .
2. Dans quelle situation obtient-on un effet de freinage ? Est-il possible d'immobiliser la spire dans cette région ?

### Application 11 – Alternateur

Toutes les centrales électriques incluent une étape de conversion d'une énergie mécanique (vent, vapeur, eau sous pression, eau en écoulement) en énergie électrique. Cette étape nécessite un alternateur : le mouvement d'un rotor dans le champ magnétique d'un stator produit un courant électrique par induction.

Le rotor est modélisé par une spire conductrice de surface  $S = ab$ , de résistance  $R$  et de moment d'inertie  $J$ , plongée dans un champ magnétique uniforme et stationnaire  $\vec{B} = B\vec{e}_x$ . La spire est mise en rotation autour de l'axe  $\vec{e}_z$  par un couple  $\vec{\Gamma}_{\text{op}}$ .



On néglige les phénomènes d'auto-induction.

1. Décrire qualitativement l'évolution du système.
2. Établir les équations mécanique et électrique qui décrivent l'évolution du système.
3. En régime permanent, la vitesse angulaire est constante. En déduire les expressions des couples  $\vec{\Gamma}_{\text{op}}(t)$  et  $\vec{\Gamma}_{\text{Lap}}(t)$ . Commenter.
4. Faire un bilan d'énergie. En régime permanent, exprimer la puissance électrique reçue par la résistance  $R$ . Commenter.