

Fiche de cours Induction

Lois de Faraday et de Lenz, auto-induction et mutuelle, transformateur, rails de Laplace, alternateur

définitions · méthodes · démonstrations exigibles · pièges

1 FLUX MAGNÉTIQUE ET ORIENTATION

Définition. Soit un **contour fermé orienté** $\mathcal{C}$ et une surface Σ s'appuyant sur $\mathcal{C}$. Le choix d'un sens de parcours de $\mathcal{C}$ fixe, par la **règle de la main droite** , le sens du vecteur normal unitaire $\vec{n}$ à Σ . Le **flux magnétique** de $\vec{B}$ à travers Σ est

$$\Phi = \iint_{\Sigma} \vec{B} \cdot \vec{n} \, dS \quad \text{en webers (Wb = T} \cdot \text{m}^2 \text{)}.$$

Pour un champ **uniforme** et une surface **plane** d'aire S , il se réduit à

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{n} S = B S \cos \alpha \quad \alpha = (\vec{n}, \vec{B}).$$

Pour un bobinage de N spires identiques en série, le flux à travers le circuit est N fois celui d'une spire : $\Phi = N B S \cos \alpha$.

Notation. Φ est une grandeur **algébrique** : son signe dépend du choix d'orientation, qui est *arbitraire mais doit être fixé une fois pour toutes* et porté sur le schéma. Le même choix oriente l'intensité i dans le circuit et la f.é.m. induite.

✖ ATTENTION — Ce qu'il faut écrire avant tout calcul

« J'oriente le circuit dans le sens . . . , donc $\vec{n} = \dots$; l'intensité i est comptée positivement dans ce sens. » Sans cette phrase, aucun signe du chapitre n'a de sens.

Propriété — ordres de grandeur. Une spire de $S = 100 \text{ cm}^2$: $\Phi \approx 0,5 \text{ } \mu\text{Wb}$ dans le champ terrestre ($5 \times 10^{-5} \text{ T}$), 1 mWb dans un électroaimant de TP ($0,1 \text{ T}$). Une bobine de 1000 spires de 20 cm^2 dans $0,1 \text{ T}$: $\Phi \approx 0,2 \text{ Wb}$ — **c'est le nombre de spires qui fait les flux exploitables.**

2 LE PHÉNOMÈNE D'INDUCTION ET LA LOI DE LENZ

Définition. Il y a **induction électromagnétique** dès que le flux magnétique à travers un circuit *varie*. Deux causes, et deux seulement, sont au programme :

- **circuit fixe** dans un champ magnétique **dépendant du temps** (cas de Neumann) : B varie, la géométrie ne change pas ;
- **circuit mobile ou déformable** dans un champ magnétique **stationnaire** (cas de Lorentz) : B ne dépend pas du temps, c'est la géométrie qui change.

Si le circuit est fermé et conducteur, il apparaît un **courant induit** ; s'il est ouvert, seule la **force électromotrice** induite est présente.

Théorème — loi de modération de Lenz. Les effets de l'induction (**courant induit, force ou couple de Laplace induit, f.é.m. induite**) **s'opposent aux causes qui leur donnent naissance.**

C'est un énoncé **qualitatif** : il permet de *prévoir un sens* ou de *contrôler un signe*, jamais de calculer une valeur. Trois lectures utiles :

- le courant induit crée un champ propre qui tend à **maintenir le flux** à sa valeur antérieure (il s'oppose à sa *variation*, pas à son existence) ;
- les forces de Laplace qui en résultent tendent à **s'opposer au mouvement** relatif qui a créé l'induction : d'où le **freinage par induction** ;
- l'énergie apparue dans le circuit est nécessairement **prélevée** ailleurs (opérateur, source) : la loi de Lenz est une conséquence de la conservation de l'énergie.

★ EXEMPLE — aimant approché d'une spire

On approche le pôle nord d'un aimant d'une spire fermée : $|\Phi|$ augmente, le courant induit crée du côté de l'aimant un pôle nord lui aussi, la spire **repousse** l'aimant. Si l'on éloigne l'aimant, le courant change de sens et la spire l'**attire**. Dans les deux cas l'opérateur **fournit un travail** : c'est lui qui paie l'effet Joule.

3 LOI DE FARADAY ET SCHÉMA ÉLECTRIQUE ÉQUIVALENT

Théorème — loi de Faraday. Un circuit filiforme fermé, orienté, à travers lequel le flux magnétique vaut $\Phi(t)$, est le siège d'une **force électromotrice induite**

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \text{en volts,}$$

algébrisée dans le sens d'orientation du circuit. Le circuit se comporte alors comme s'il contenait une source idéale de tension de f.é.m. e , orientée en **convention générateur** dans le sens positif choisi (figure 1).

Méthode — les quatre étapes, toujours les mêmes. (i) orienter le circuit, en déduire $\vec{n}$ et le sens positif de i ; (ii) calculer $\Phi(t)$, algébriquement; (iii) dériver : $e = -d\Phi/dt$; (iv) écrire la loi des mailles sur le schéma équivalent. **Contrôler enfin le signe obtenu par la loi de Lenz** : un signe incompatible avec la modération signale une erreur.

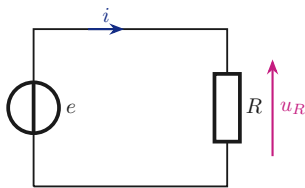


Figure 1 — Schéma équivalent : $e = Ri$

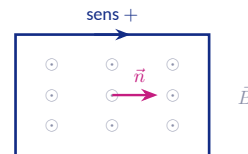


Figure 2 — Orientation : $\vec{n}$ sort de la page, $\vec{B}$ aussi, donc $\Phi > 0$

Remarque. Si le circuit est *ouvert*, $i = 0$ mais e existe : la tension lue entre les bornes vaut $\pm e$ — c'est le principe de toute mesure de f.é.m. induite à l'oscilloscope. Trois confusions à éliminer : un flux **constant mais non nul** ne crée *aucune* f.é.m.; la f.é.m. ne dépend pas de B mais de $d\Phi/dt$; **toute étude du champ électromoteur est hors programme.**

4 CIRCUIT FIXE DANS UN CHAMP VARIABLE : AUTO-INDUCTION

Définition. On distingue, pour un circuit (1), le **flux propre** Φ_p — créé par le courant i_1 du circuit lui-même — et les **flux extérieurs** Φ_{ext} — créés par les aimants et les autres circuits. Le flux total est leur somme.

Théorème — inductance propre. Le champ créé par un circuit étant proportionnel à son intensité, le flux propre lui est proportionnel :

$$\Phi_p = L i$$

avec $L > 0$ l'**inductance propre** (ou self-inductance), en **henrys** ($\text{H} = \text{Wb} \cdot \text{A}^{-1}$). L ne dépend que de la *géométrie* du circuit (et du matériau magnétique éventuel), jamais de i . Le signe de L est positif car Φ_p et i sont orientés par le *même* choix.

Propriété — f.é.m. d'auto-induction et tension aux bornes. $e_p = -L \frac{di}{dt}$, donc en **convention récepteur**

$$u_L = -e_p = L \frac{di}{dt}$$

On retrouve la relation constitutive de la bobine du chapitre 3 : **la bobine est l'auto-induction**, et c'est la loi de Lenz qui explique son comportement (u_L s'oppose à la variation de i).

Théorème — inductance d'une bobine longue. Pour un solénoïde de longueur ℓ , de section S , comportant N spires jointives ($\ell \gg \sqrt{S}$), le champ intérieur est uniforme et vaut $B = \mu_0 n i$ avec $n = N/\ell$ (*expression fournie*). Le flux propre à travers les N spires est $\Phi_p = N B S$, donc

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{\ell}$$

Ordre de grandeur : $N = 1000$, $\ell = 50 \text{ cm}$, $S = 20 \text{ cm}^2$ donnent $L = 5,0 \text{ mH}$. **Une bobine de travaux pratiques a une inductance de 1 à 100 mH**, et une résistance interne r de quelques ohms à quelques dizaines d'ohms, jamais négligeable *a priori*.

Méthode — mesurer L . (i) **Régime transitoire** : réponse du circuit (R, L) à un échelon, $\tau = L/(R + r)$ mesuré à 63 % ou par régression sur $\ln$. (ii) **RSF** : $|Z|^2 = r^2 + L^2 \omega^2$, pente de $|Z|^2$ en fonction de ω^2 . (iii) **Résonance** avec un condensateur connu : $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$.

Théorème — énergie magnétique. En multipliant $u_L = L di/dt$ par i :

$$u_L i = L i \frac{di}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) \quad \Rightarrow \quad \mathcal{E}_m = \frac{1}{2} L i^2$$

La puissance reçue par la bobine n'est ni dissipée ni rayonnée : elle est **stockée** sous forme magnétique, et intégralement restituée lorsque i décroît. Une bobine idéale a un bilan nul sur un cycle.

★ **EXEMPLE — bilan de puissance sur un schéma équivalent**

Circuit série {source E , résistance totale R , bobine L } : la loi des mailles $E = Ri + L \, di/dt$ multipliée par i donne

$$\underbrace{Ei}_{\text{fournie par la source}} = \underbrace{Ri^2}_{\text{dissipée (Joule)}} + \underbrace{\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right)}_{\text{stockée}}.$$

C'est la **méthode universelle** : écrire la loi des mailles, multiplier par i , identifier chaque terme.

5 DEUX CIRCUITS COUPLÉS : INDUCTANCE MUTUELLE

Définition. Deux circuits (1) et (2), orientés, étant donnés, le flux envoyé par (1) à travers (2) est proportionnel à i_1 , et réciproquement. On admet que le coefficient est le même dans les deux sens :

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = M i_1 \quad \text{et} \quad \Phi_{2 \rightarrow 1} = M i_2$$

M est l'**inductance mutuelle**, en henrys. Contrairement à L , M est **algébrique** : son signe dépend des deux orientations choisies (et du sens des enroulements).

Théorème — équations couplées. Avec les tensions en convention récepteur aux bornes de chaque enroulement, de résistances R_1 et R_2 :

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \quad u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

En **régime sinusoïdal forcé**, on passe aux amplitudes complexes en remplaçant d/dt par $j\omega$: le couplage se traduit par les deux termes $j\omega M i_2$ et $j\omega M i_1$.

Théorème — énergie magnétique de deux circuits couplés.

$$\mathcal{E}_m = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$$

et $u_1 i_1 + u_2 i_2 = R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2 + \frac{d\mathcal{E}_m}{dt}$: le bilan se referme, le terme de couplage appartenant à l'**énergie stockée**, non aux pertes.

Propriété — coefficient de couplage. L'énergie magnétique étant positive ou nulle pour tout couple (i_1, i_2) , le trinôme ci-dessus est de discriminant négatif ou nul, ce qui impose

$$|M| \leq \sqrt{L_1 L_2} \quad \text{et l'on pose} \quad k = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} \in [0; 1].$$

$k = 1$ définit l'**influence totale** : tout le flux créé par l'un traverse l'autre (pas de fuites).

Théorème — deux bobines de même axe en influence totale. Deux solénoïdes de même longueur ℓ et même section S , bobinés l'un sur l'autre, avec N_1 et N_2 spires. Le champ créé par (1) est $B_1 = \mu_0 \frac{N_1}{\ell} i_1$, uniforme et intégralement canalisé, donc $\Phi_{1 \rightarrow 2} = N_2 B_1 S$:

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 S}{\ell} = \sqrt{L_1 L_2}, \quad \text{et} \quad \frac{M}{L_1} = \frac{N_2}{N_1}, \quad \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \frac{N_2}{N_1}.$$

6 LE TRANSFORMATEUR

Propriété — rapport de transformation. Deux enroulements en influence totale, de résistances négligeables, le secondaire fermé sur une résistance R ($u_2 = -R i_2$ en convention récepteur au secondaire). En RSF, l'élimination de i_2 donne

$$i_2 = -\frac{j\omega M}{R + j\omega L_2} i_1, \quad \frac{u_2}{u_1} = \frac{M}{L_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \frac{N_2}{N_1} = m.$$

Le rapport des tensions vaut exactement $m = N_2/N_1$ dès que le couplage est total, quelle que soit la charge. Si de plus $L_2 \omega \gg R$ (transformateur idéal) :

$$\frac{i_2}{i_1} \approx -\frac{1}{m}, \quad u_1 i_1 + u_2 i_2 \approx 0, \quad Z_e = \frac{u_1}{i_1} \approx \frac{R}{m^2}.$$

Le transformateur idéal ne stocke ni ne dissipe d'énergie : il **transporte** la puissance en modifiant le couple (tension, courant), et **ramène** une charge R en une charge R/m^2 (adaptation d'impédance).

✖ **ATTENTION** — Le transformateur ne fonctionne qu'en régime variable

Tous les termes utiles sont en d/dt : en régime *continu*, $u_2 = 0$. Un transformateur alimenté en courant continu ne délivre rien — et son primaire, réduit à R_1 , grille. Applications : distribution 50 Hz, chargeur à induction, carte RFID à 13,56 MHz, soudage à l'arc.

7 CIRCUIT MOBILE DANS UN CHAMP STATIONNAIRE : LES RAILS DE LAPLACE

Notation. Deux rails parallèles horizontaux, distants de ℓ , de résistance négligeable, fermés sur une résistance R (et éventuellement une source E) ; une barre conductrice, de masse m , glisse sans frottement en restant perpendiculaire aux rails, à l'abscisse $x(t)$. Le champ $\vec{B} = B \vec{e}_z$ est uniforme, stationnaire, orthogonal au plan des rails. On oriente le circuit de sorte que $\vec{n} = \vec{e}_z$: $i > 0$ circule alors dans la barre selon $+\vec{e}_y$.

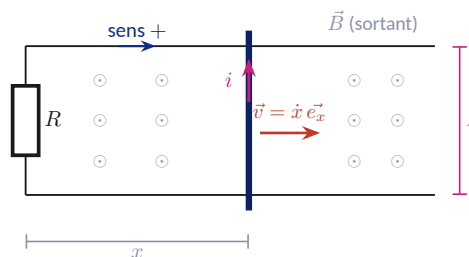


Figure 3 — Rails de Laplace : le circuit est orienté dans le sens trigonométrique, donc $\vec{n} = \vec{e}_z$ est sortant.

Théorème — les deux équations couplées. Avec ces conventions :

$$\Phi = B \ell x \implies e = -\frac{d\Phi}{dt} = -B \ell \dot{x} \quad \text{et} \quad \vec{F} = i (\ell \vec{e}_y) \wedge (B \vec{e}_z) = B \ell i \vec{e}_x$$

d'où le **système électromécanique** (bobine d'inductance L du circuit, force extérieure F_{op} sur la barre) :

$$L \frac{di}{dt} + R i = E - B \ell \dot{x} \quad m \ddot{x} = B \ell i + F_{\text{op}}$$

Le couplage est bilatéral : la vitesse intervient dans l'équation électrique par la f.é.m. induite, l'intensité dans l'équation mécanique par la force de Laplace. Oublier l'un des deux termes est l'erreur majeure du chapitre.

Théorème — conversion électromécanique parfaite. La puissance des forces de Laplace sur la barre et la puissance de la f.é.m. induite sont opposées :

$$\mathcal{P}_{\text{Laplace}} = \vec{F} \cdot \vec{v} = B \ell i \dot{x} \quad \text{et} \quad \mathcal{P}_{\text{f.é.m.}} = e i = -B \ell \dot{x} i, \quad \text{donc} \quad \mathcal{P}_{\text{Laplace}} + e i = 0$$

La conversion est parfaite : rien n'est perdu dans le couplage. Toutes les pertes sont ailleurs — effet Joule dans R , frottements dans la partie mécanique.

Méthode — bilan énergétique complet. Multiplier l'équation électrique par i , l'équation mécanique par $\dot{x}$, puis *additionner* : les deux termes de couplage se compensent et il reste

$$E i + F_{\text{op}} \dot{x} = R i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}^2 \right).$$

Puissances fournies = puissance dissipée + taux de stockage, le stockage étant magnétique et cinétique.

Propriété — les deux fonctionnements. **Générateur** ($E = 0$, un opérateur tire la barre) : $i = -B \ell \dot{x} / R$ (L négligée), la force de Laplace $-\frac{B^2 \ell^2}{R} \dot{x}$ s'oppose au mouvement (Lenz) et l'opérateur fournit $\frac{B^2 \ell^2 \dot{x}^2}{R}$, intégralement dissipé — c'est l'**alternateur linéaire**, c'est aussi le **freinage par induction**. **Moteur** ($E \neq 0$, pas d'opérateur) : la barre accélère jusqu'à la **vitesse limite** $\dot{x}_{\infty} = E / (B \ell)$, pour laquelle $e = -E$, donc $i = 0$ et la force s'annule (rendement 100 %, mais puissance utile nulle). Avec une force résistante $-F_r$: $i_{\infty} = F_r / (B \ell)$ et $\dot{x}_{\infty} = (E - R F_r / (B \ell)) / (B \ell)$.

Propriété — freinage par induction. Sans source ni opérateur, en négligeant L (c'est-à-dire pour $L/R \ll mR / (B \ell)^2$), l'équation mécanique devient

$$m \ddot{x} = -\frac{B^2 \ell^2}{R} \dot{x} \implies \dot{x}(t) = v_0 e^{-t/\tau_m}, \quad \tau_m = \frac{mR}{B^2 \ell^2}, \quad x_{\infty} - x_0 = v_0 \tau_m.$$

Le freinage est **exponentiel** : il ne s'arrête jamais tout à fait, mais la distance parcourue est finie, et l'énergie cinétique initiale est intégralement dissipée dans R .

8 L'ALTERNATEUR : CADRE RECTANGULAIRE EN ROTATION

Théorème — f.é.m. d'un cadre tournant. Un cadre rectangulaire plan de N spires, d'aire S , tourne à la vitesse angulaire *constante* ω autour d'un axe fixe contenu dans son plan et orthogonal au champ uniforme et stationnaire $\vec{B}$. L'angle $\alpha = (\vec{n}, \vec{B})$ vaut $\omega t + \alpha_0$, donc

$$\Phi = N B S \cos(\omega t + \alpha_0) \implies \boxed{e = N B S \omega \sin(\omega t + \alpha_0)}$$

C'est une f.é.m. **sinusoïdale** de pulsation ω et d'amplitude $E_m = N B S \omega$: **la rotation uniforme produit une tension alternative**. Valeur efficace $E_m/\sqrt{2}$; fréquence du réseau $f = 50$ Hz, soit $\omega = 314$ rad·s⁻¹.

Propriété — couple et bilan. Fermé sur une résistance totale R (en négligeant l'inductance), le cadre débite $i = e/R$ et subit un couple de Laplace Γ_L tel que $\Gamma_L \omega = -e i$ (conversion parfaite), soit

$$\Gamma_L = -\frac{e i}{\omega} = -\frac{(N B S)^2 \omega}{R} \sin^2(\omega t + \alpha_0) \leq 0 :$$

toujours **résistant**. L'opérateur doit fournir le couple opposé, de valeur moyenne $\frac{(N B S)^2 \omega}{2R}$, et la puissance moyenne convertie vaut $\frac{E_m^2}{2R}$. Sans charge ($R \rightarrow \infty$), aucun couple n'est nécessaire : **c'est la puissance électrique prélevée qui durcit le pédalage**.

9 COURANTS DE FOUCAULT

Définition. Dans un conducteur **massif** (et non filiforme) soumis à un flux variable, les courants induits ne sont canalisés par aucun fil : ils circulent en **boucles fermées** dans le volume du métal. Ce sont les **courants de Foucault** (eddy currents).

Propriété — deux conséquences, opposées en pratique. Ils **dissipent** de l'énergie par effet Joule et, par la loi de Lenz, créent des forces qui **s'opposent au mouvement** ou à la variation de flux. **Recherchés** : plaque à induction (20 à 30 kHz; le fond de la casserole est le conducteur chauffé), frein sur rail des trains et ralentisseur des poids lourds (aucune usure, mais couple nul à l'arrêt), amortissement des balances, détecteur de métaux. **Subis** : pertes « fer » des transformateurs et des machines tournantes, réduites en **feuilletant** le matériau (tôles isolées) ou par des ferrites — on augmente la résistance des trajets sans gêner le flux.

✗ ATTENTION — Vocabulaire

Un courant de Foucault n'est pas un courant induit dans un circuit filiforme : on ne lui applique *pas* la loi de Faraday sous forme $e = -d\Phi/dt$ avec un contour précis. En MPSI, leur étude est **qualitative**, sauf si l'énoncé fournit explicitement un modèle (spire équivalente, barre sur rails).

10 CAPACITÉ NUMÉRIQUE : RÉSOUDRE LE SYSTÈME ÉLECTROMÉCANIQUE

Méthode — schéma d'Euler explicite sur deux grandeurs couplées. On applique le schéma d'Euler simultanément aux deux inconnues i et $v = \dot{x}$:

$$i_{k+1} = i_k + h \frac{E - R i_k - B \ell v_k}{L}, \quad v_{k+1} = v_k + h \frac{B \ell i_k + F_{\text{op}}}{m}.$$

Le pas doit être petit devant les deux temps caractéristiques, $\tau_e = L/R$ et $\tau_m = mR/(B\ell)^2$.

```
1 import numpy as np
2 B, l, R, L, m, E = 0.50, 0.20, 0.50, 1.0e-3, 20e-3, 1.0
3 h = 1.0e-5 # tau_e = L/R = 2,0 ms ; tau_m = m*R/(B*l)**2 = 1,0 s
4 t = np.arange(0.0, 5.0, h) # 5 tau_m : le regime permanent est atteint
5 i = np.zeros(len(t)); v = np.zeros(len(t))
6 for k in range(len(t) - 1):
7     i[k + 1] = i[k] + h * (E - R * i[k] - B * l * v[k]) / L
8     v[k + 1] = v[k] + h * (B * l * i[k]) / m
9 print(v[-1], E / (B * l)) # vitesse limite E/(B*l) = 10 m/s
```

11 DÉMONSTRATIONS À SAVOIR REFAIRE

- **Flux d'un champ uniforme** à travers un cadre plan orienté; effet d'une rotation, d'une translation, de N spires.
- **Inductance d'une bobine longue** : $\Phi_p = N (\mu_0 N i / \ell) S$ donc $L = \mu_0 N^2 S / \ell$.
- **Énergie magnétique** $\frac{1}{2} L i^2$: multiplier $u_L = L di/dt$ par i et reconnaître une dérivée.

- **Inégalité** $|M| \leq \sqrt{L_1 L_2}$: positivité du trinôme $\frac{1}{2}L_1 i_1^2 + M i_1 i_2 + \frac{1}{2}L_2 i_2^2$.
- **Mutuelle de deux solénoïdes en influence totale** et rapport de transformation $M/L_1 = N_2/N_1$.
- **Les deux équations des rails de Laplace**, avec les conventions d'orientation annoncées.
- **Conversion parfaite** $\mathcal{P}_{\text{Laplace}} + ei = 0$ et bilan énergétique obtenu en additionnant les deux équations multipliées.
- **Vitesse limite** d'un moteur à rails ; **freinage exponentiel** de constante $\tau_m = mR/(B\ell)^2$.
- **f.é.m. d'un cadre en rotation uniforme** et couple résistant associé.

12 SAVOIR-FAIRE DU CHAPITRE

► SAVOIR-FAIRE

- Orienter un circuit, en déduire $\vec{n}$, calculer un flux algébrique, appliquer $e = -d\Phi/dt$, contrôler le signe par la loi de Lenz ; prévoir qualitativement le sens d'un courant induit, d'une force ou d'un couple.
- Distinguer flux propre et flux extérieur ; calculer et estimer L (bobine longue), mesurer L par un transitoire ou en RSF.
- Réaliser un bilan de puissance et d'énergie sur un schéma électrique équivalent, pour un circuit seul ou deux circuits couplés.
- Déterminer M pour deux bobines de même axe en influence totale ; établir le système d'équations en RSF ; exploiter le rapport de transformation et l'impédance ramenée.
- Écrire les deux équations couplées des rails de Laplace en précisant les conventions, les résoudre (régime transitoire et régime permanent), établir le bilan énergétique et calculer un rendement.
- Traiter un cadre rectangulaire en rotation uniforme : f.é.m., courant, couple, puissance moyenne.
- Expliquer l'origine des courants de Foucault, citer des applications, justifier le feuilletage.
- Mettre en œuvre un schéma d'Euler sur le système électromécanique et discuter le pas.

■ FORMULAIRE — Les relations à connaître par cœur

- $\Phi = B S \cos \alpha$ (champ uniforme, surface plane, N spires : $\times N$) ; $e = -\frac{d\Phi}{dt}$; $W_b = T \cdot m^2$.
- $\Phi_p = L i$; $u_L = L \frac{di}{dt}$; $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{\ell}$; $\mathcal{E}_m = \frac{1}{2} L i^2$; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.
- **Couplage** : $\Phi_{1 \rightarrow 2} = M i_1$; $|M| \leq \sqrt{L_1 L_2}$; $\mathcal{E}_m = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$; **influence totale** : $M = \sqrt{L_1 L_2}$ et $m = N_2/N_1$, $Z_e = R/m^2$.
- **Rails** : $e = -B\ell \dot{x}$; $F = B\ell i$; $\mathcal{P}_{\text{Laplace}} + ei = 0$; $\dot{x}_\infty = E/(B\ell)$; $\tau_m = mR/(B\ell)^2$.
- **Alternateur** : $e = NBS\omega \sin \omega t$; $E_m = NBS\omega$; $\langle \mathcal{P} \rangle = E_m^2/(2R)$; $\Gamma_L = -ei/\omega$.
- **Repères** : $B_{\text{terrestre}} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ T}$; aimant 0,1 à 1 T ; IRM 1 à 3 T ; bobine de TP 1 à 100 mH ; $e = B\ell v = 10 \text{ mV}$ pour 0,1 T, 10 cm, 1 m·s⁻¹.

✗ PIÈGES

- Calculer un flux sans avoir orienté le contour et la normale : tous les signes qui suivent sont arbitraires.
- Oublier le signe — de la loi de Faraday, ou ne pas vérifier la compatibilité du résultat avec la loi de Lenz.
- Croire qu'un flux constant non nul, ou un champ intense, crée une f.é.m. : seule $d\Phi/dt$ compte.
- Confondre flux propre (Li , créé par le circuit lui-même) et flux extérieur (Mi' ou flux d'un aimant).
- Écrire l'équation électrique en oubliant la f.é.m. induite de mouvement, ou l'équation mécanique en oubliant la force de Laplace : **le couplage est bilatéral**.
- Oublier la résistance interne de la bobine, ou l'inductance du circuit, quand l'énoncé ne dit pas de les négliger.
- Utiliser la loi de Lenz comme un calcul : elle est **qualitative**. Parler de champ électromoteur : **explicitement hors programme**.
- Appliquer $e = -d\Phi/dt$ à des courants de Foucault sans modèle fourni ; les confondre avec le courant induit d'un circuit filiforme.
- Croire qu'un transformateur fonctionne en continu, ou que le rapport N_2/N_1 s'applique aussi aux puissances (c'est la puissance qui est conservée, pas la tension).
- Confondre m (masse), m (rapport de transformation) et $\vec{m}$ (moment magnétique) : nommer ses grandeurs.