LYCÉE D'EXCELLENCE
MOHAMMED VI
LEM6 - CASABLANCA

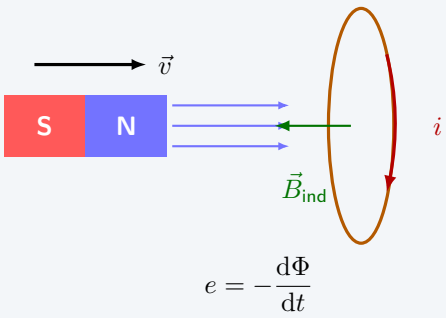
Classes préparatoires aux grandes écoles
MP — Physique-chimie
Année 2026-2027

FICHE RÉSUMÉ

EM3 ÉLECTROMAGNÉTISME

Induction électromagnétique

Flux magnétique — Loi de Faraday — Loi de Lenz — Inductances propre et mutuelle — Transformateur — Conversion électromécanique — Courants de Foucault — Haut-parleur



$$e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

> *Convertir le magnétisme en électricité.*
>
> — Michael Faraday, programme de recherche noté dans son carnet (1822), réalisé en 1831

physionova
physionova.academy

Pr. CHARIFI
professeurcharifi@gmail.com

Simulation associée sur **PhysioNova**
« Rails de Laplace »

EM3 — Fiche résumé

L'essentiel en trois phrases

Toute variation du flux magnétique à travers un circuit y fait apparaître une force électromotrice $e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$, dont les effets s'opposent à leur cause (loi de Lenz), que le flux varie parce que le champ change (circuit fixe : Neumann) ou parce que le circuit bouge (champ stationnaire : Lorentz). Un circuit est couplé à lui-même par son inductance propre L et à ses voisins par l'inductance mutuelle M : c'est le principe du transformateur. Pour un conducteur mobile, la puissance des forces de Laplace et celle de la f.é.m. induite sont opposées ($\mathcal{P}_L + ei = 0$) : c'est la base de toute conversion électromécanique.

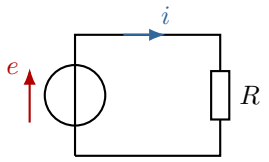
I Lois de l'induction

Définition — Flux et conventions R

On **oriente** le circuit ; la normale $\vec{n}$ s'en déduit par la règle de la main droite :

$$\Phi = \iint_S \vec{B}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}S \ \ (\mathrm{Wb}) \qquad e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

e et i sont comptés dans le sens d'orientation ; le circuit équivaut à un générateur e (convention générateur) en série avec R (et L). Bobine : $\Phi = N\Phi_1$.



$e = Ri$ (circuit sans source)

Lenz, Neumann, Lorentz R

- **Lenz** : les effets de l'induction s'opposent à leur cause ; c'est le sens du signe $-$.
- **Neumann** (circuit fixe, $\vec{B}$ variable) : $e = \oint \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{\ell}$, $\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$.
- **Lorentz** (circuit mobile, $\vec{B}$ stationnaire) : champ électromoteur $\vec{E}_m = \vec{v}_e \wedge \vec{B}$, $e = \oint(\vec{v}_e\wedge\vec{B})\cdot\mathrm{d}\vec{\ell}$. Changement de référentiel (limite classique) : $\vec{E}' = \vec{E} + \vec{v}_e\wedge\vec{B}$, $\vec{B}' = \vec{B}$.

II Auto-induction et induction mutuelle

Inductances R D

$$\Phi_p = Li \quad (L>0) \qquad \Phi_{1\to2} = Mi_1,\ \Phi_{2\to1} = Mi_2 \ \ (M_{12}=M_{21},\ \text{Neumann}) \qquad |M| \le \sqrt{L_1L_2}$$

Solénoïde long : $L = \dfrac{\mu_0 N^2 S}{\ell}$; deux bobines enroulées l'une sur l'autre (influence totale) : $M = \dfrac{\mu_0 N_1 N_2 S}{\ell} = \sqrt{L_1L_2}$. Flux total : $\Phi_1 = L_1 i_1 + M i_2$.

Énergie et circuits couplés R D

$$Ei = Ri^2 + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\tfrac{1}{2}Li^2\right) \qquad w_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \qquad \mathcal{E}_m = \tfrac{1}{2}L_1 i_1^2 + \tfrac{1}{2}L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$$

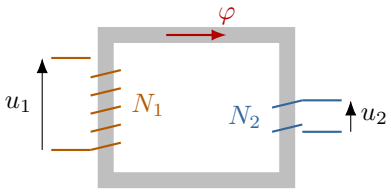
$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$, $u_2 = R_2 i_2 + L_2\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + M\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$; en sinusoïdal : $\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \to \mathrm{j}\omega$; $|M| \le \sqrt{L_1 L_2}$ découle de $\mathcal{E}_m \ge 0$ (discriminant).

Transformateur parfait R

Même flux φ par spire, conventions récepteur :

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} = m \qquad \frac{i_2}{i_1} = -\frac{1}{m} \qquad u_1 i_1 + u_2 i_2 = 0$$

Charge R_u vue du primaire : R_u/m^2. Ne fonctionne qu'en régime variable. Transport à haute tension : pertes $\propto 1/U^2$.



III Conversion électromécanique

Couplage parfait R D

$$\mathcal{P}_L + e\,i = 0$$

Générateur : $\mathcal{P}_L < 0$, $ei > 0$ (l'opérateur travaille contre les forces de Laplace). Moteur : $\mathcal{P}_L > 0$, $ei < 0$ (force contre-électromotrice).

★ À retenir

Dispositif	Équations	À retenir
Rails (barre m, ℓ, circuit R)	$e = -B\ell v = Ri$; $m\dot{v} = i\ell B = -\frac{B^2\ell^2}{R}v$	$v = v_0 \mathrm{e}^{-t/\tau}$, $\tau = \frac{mR}{B^2\ell^2}$; $\frac{1}{2}mv_0^2$ dissipée
Alternateur (N, S, ω)	$\Phi = NBS\cos\omega t$, $e = NBS\omega\sin\omega t$	couple résistant moyen $\frac{(NBS)^2\omega}{2R}$
Courants de Foucault	$\vec{j} = \gamma\vec{E}$, E par Faraday sur un cercle	$\langle\mathcal{P}\rangle = \frac{\pi\gamma h B_0^2\omega^2 b^4}{16}$ (disque) : freinage, chauffage, feuilletage
Haut-parleur (B radial)	$m\dot{v} = -kz - \alpha v - B\ell i$; $u = Ri + L\dot{i} - B\ell v$	$\langle ui\rangle = R\langle i^2\rangle + \alpha\langle v^2\rangle$; Z_m : R', L', C' en parallèle
Moteur à courant continu	$\Gamma = \Phi_0 i$, f.c.é.m. $\Phi_0\Omega$; $U = Ri + \Phi_0\Omega$	courant de démarrage U/R

Ordres de grandeur

Inductances : µH (fil, bobine HF) à quelques mH (bobine sans noyau), jusqu'au henry avec noyau de fer. Alternateur : $50\,\mathrm{Hz} \leftrightarrow 3000\,\mathrm{tr\cdot min^{-1}}$ (une paire de pôles). Transformateurs : rendement 95 à $99\,\%$; lignes à $400\,\mathrm{kV}$. Plaque à induction : 20 à $50\,\mathrm{kHz}$. Recharge sans fil : $\sim 100\,\mathrm{kHz}$, couplage $k \sim 0,1$.

IV Méthodes et pièges

☞ Méthode — Problème d'induction M

1. Orienter le circuit (fixe $\vec{n}$, signes de Φ, e, i).
2. Flux $\Phi(t)$ (sans oublier N, le flux propre Li et le flux mutuel), puis $e = -\dot{\Phi}$ ou $e = \oint (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \mathrm{d}\vec{\ell}$.
3. Schéma électrique équivalent $\Rightarrow$ équation électrique ; forces de Laplace $\Rightarrow$ équation mécanique.
4. Découpler, résoudre ; bilan de puissance ($\times i$ et $\times v$ ou $\times \omega$) en vérifiant $\mathcal{P}_L + ei = 0$; contrôler les signes par Lenz.

✗ Attention, erreurs fréquentes

- Confondre e (convention générateur) et la tension $u = L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ aux bornes d'une bobine (convention récepteur).
- Croire que le courant induit s'oppose au *champ* : il s'oppose à la *variation* du flux.
- Oublier N (flux) et N^2 (inductance) ; oublier le signe algébrique de M.
- Appliquer la loi de Faraday à un conducteur massif avec contacts glissants (roue de Barlow) : utiliser le champ électromoteur.
- Un freinage par induction ne peut pas arrêter un mobile en un temps fini (force proportionnelle à v).

Savoir-faire : je coche quand je sais

- ☐ J'oriente un circuit, je calcule le flux et la f.é.m. ; je prévois le sens du courant par la loi de Lenz.
- ☐ Je distingue les situations de Neumann et de Lorentz ; j'utilise le champ électromoteur.
- ☐ Je sais calculer L d'un solénoïde long et M de deux bobines en influence totale ; je connais les ordres de grandeur.
- ☐ J'écris les équations de deux circuits couplés (y compris en complexes) et leur bilan d'énergie.
- ☐ J'explique le transformateur parfait et l'intérêt du transport à haute tension.
- ☐ J'établis les équations électrique et mécanique des rails de Laplace et de la spire en rotation, avec le bilan $\mathcal{P}_L + ei = 0$.
- ☐ J'explique l'origine des courants de Foucault et le fonctionnement du haut-parleur électrodynamique.