LYCÉE D'EXCELLENCE
MOHAMMED VI
LEM6 - CASABLANCA

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

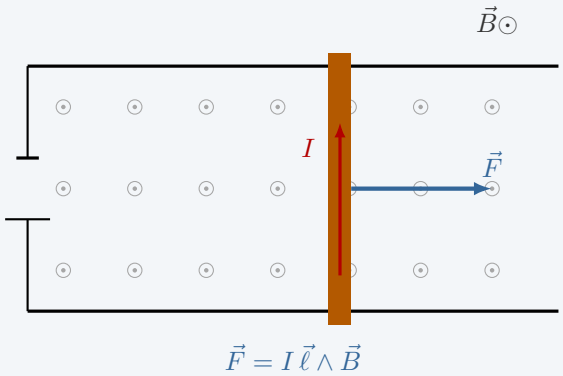
FICHE RÉSUMÉ

EM2

ÉLECTROMAGNÉTISME

Forces de Laplace

Force de Lorentz — Densité de force de Laplace — Rails de Laplace — Couple sur une spire, moment magnétique — Aimant dans un champ uniforme — Champ tournant et moteur synchrone



> *La recherche expérimentale par laquelle Ampère a établi les lois de l'action mécanique entre courants électriques est l'une des plus brillantes réussites de la science. L'ensemble, théorie et expérience, semble avoir jailli, adulte et tout armé, du cerveau du « Newton de l'électricité ».*
>
> — James Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, vol. II (1873)

physionova
physionova.academy

Pr. CHARIFI
professeurcharifi@gmail.com

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

EM2 — Fiche résumé

L'essentiel en trois phrases

Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique **extérieur** subit la force de Laplace, résultante à l'échelle mésoscopique des forces de Lorentz sur les porteurs : $\mathrm{d}\vec{F} = I\,\mathrm{d}\vec{\ell}\wedge\vec{B}$. Dans un champ uniforme, la résultante sur un circuit fermé est nulle et il ne reste qu'un couple $\vec{m}\wedge\vec{B}$, qui aligne le moment magnétique sur le champ, exactement comme pour un aimant. Un champ tournant entraîne un aimant à sa propre vitesse : c'est le moteur synchrone.

I Force de Laplace

De Lorentz à Laplace R

- Lorentz : $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v}\wedge\vec{B})$; la force magnétique ne travaille pas.
- Densité volumique (affirmée) : $\vec{f_v} = \vec{j}\wedge\vec{B}$; transmise au réseau par le champ de Hall.
- Hypothèses de travail : conducteur filiforme, champ extérieur stationnaire (ou ARQS), $\vec{j}\,\mathrm{d}\tau = I\,\mathrm{d}\vec{\ell}$.

$$\mathrm{d}\vec{F} = I\,\mathrm{d}\vec{\ell}\wedge\vec{B}_{\text{ext}} \qquad \vec{F} = \oint_{\mathcal{C}} I\,\mathrm{d}\vec{\ell}\wedge\vec{B}_{\text{ext}} \qquad \vec{\Gamma}_O = \oint_{\mathcal{C}} \overrightarrow{OP}\wedge\mathrm{d}\vec{F} \qquad \vec{\Gamma}_A = \vec{\Gamma}_O + \overrightarrow{AO}\wedge\vec{F}$$

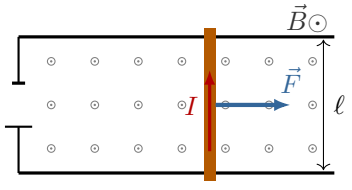
Champ **uniforme** : $\vec{F} = \vec{0}$ sur un circuit fermé ; $\vec{F} = I\overrightarrow{AC}\wedge\vec{B}$ sur une portion de A à C. Le champ propre n'exerce pas de résultante.

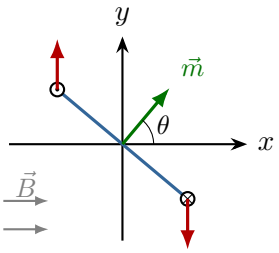
Puissance et travail R

$$\mathcal{P}_L = \vec{F}\cdot\vec{v} \ \text{(translation)} \qquad \mathcal{P}_L = \Gamma_\Delta\,\omega \ \text{(rotation autour de } \Delta)$$

Complément (théorème de Maxwell) : à I constant dans un champ stationnaire, $\delta W = I\,\mathrm{d}\Phi_c$ (flux coupé), $W = I(\Phi_f - \Phi_i)$. Au chapitre EM3 : $\mathcal{P}_L + ei = 0$.

II Rails de Laplace et spire en rotation





★ À retenir

Dispositif	Action de Laplace	Puissance
Rails (barre $\ell \perp \vec{B}$, vitesse v)	$F = I\ell B$, perpendiculaire à la barre, dans le plan des rails	$\mathcal{P}_L = I\ell B v$
Spire rectangulaire ($S = ab$, axe $\Delta \perp \vec{B}$)	résultante nulle ; $\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}$, $\Gamma_\Delta = -mB\sin\theta$	$\mathcal{P}_L = \Gamma_\Delta \dot{\theta}$
Bobine de N spires	$\vec{m} = NIS\vec{n}$ ($\vec{n}$: main droite)	
Cadre en champ radial	$\Gamma = NIabB$, indépendant de la position	

Spire, démonstration D : côtés $\perp \Delta$: forces parallèles à Δ, moment nul ; côtés $\parallel \Delta$: $\pm IaB$, couple de bras de levier $b\sin\theta$. Mouvement : $J\ddot{\theta} = -mB\sin\theta$ (pendule), $E_p = -mB\cos\theta$.

III Aimant dans un champ extérieur

Dipôle magnétique rigide R D

Un aimant est modélisé par un moment $\vec{m}$ (du sud vers le nord). Dans $\vec{B}$ **uniforme** :

$$\vec{F} = \vec{0} \qquad \vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B} \qquad E_p = -\vec{m}\cdot\vec{B} = -mB\cos\theta$$

Équilibre **stable** pour $\theta = 0$ ($\vec{m}$ et $\vec{B}$ de même sens, E_p minimale), **instable** pour $\theta = \pi$. Petites oscillations : $\omega_0 = \sqrt{mB/J}$. Champ non uniforme : $\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, E_p = \overrightarrow{\text{grad}}\,(\vec{m}\cdot\vec{B})$ (attiré vers les champs intenses si aligné).

IV Champ tournant et moteur synchrone

Champ tournant et couple R D

Deux bobines orthogonales, courants $I\cos\omega t$ et $I\sin\omega t$ (quadrature) : $\vec{B} = B_0(\cos\omega t\,\vec{u}_x + \sin\omega t\,\vec{u}_y)$, norme constante, rotation à ω ; triphasé (3 bobines à 120°, déphasage $2\pi/3$) : norme $\frac{3}{2}B_0$.
Aimant tournant à Ω : $\Gamma = mB_0\sin\big((\omega-\Omega)t + \alpha\big)$, de moyenne nulle sauf si $\Omega = \omega$:

$$\Omega = \omega \qquad \Gamma = mB_0\sin\alpha \qquad \mathcal{P} = mB_0\,\omega\sin\alpha \qquad (\alpha : \text{ retard de } \vec{m} \text{ sur } \vec{B})$$

Moteur pour $0 < \alpha < \pi$, stable pour $\alpha < \pi/2$, décrochage si $\Gamma_r > mB_0$; ne démarre pas seul ; générateur (alternateur) pour $\alpha < 0$.

Ordres de grandeur

Force sur 1 m de fil, 10 A, 0,1 T : 1 N. Deux fils à 1 m parcourus par 1 A : $2\times10^{-7}\,\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$. Moments magnétiques : aiguille de boussole $0{,}1\,\text{A}\cdot\text{m}^2$, aimant néodyme $1\,\text{A}\cdot\text{m}^2$, électron $9{,}3\times10^{-24}\,\text{A}\cdot\text{m}^2$, Terre $8\times10^{22}\,\text{A}\cdot\text{m}^2$. Moteur synchrone à 50 Hz (une paire de pôles) : $3000\,\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$. Pression magnétique $B^2/2\mu_0$: 4×10^7 Pa pour 10 T.

V Méthodes et pièges

☞ Méthode — Étudier les actions de Laplace M

1. Identifier le champ extérieur ; orienter le courant.
2. $\mathrm{d}\vec{F} = I\,\mathrm{d}\vec{\ell}\wedge\vec{B}$ dans une base directe (trois doigts de la main droite : pouce I, index $\vec{B}$, majeur $\vec{F}$).
3. Résultante (nulle si circuit fermé en champ uniforme) puis moment ; pour une spire, utiliser directement $\vec{m}\wedge\vec{B}$.
4. Mécanique : PFD (translation) ou TMC (rotation) ; puissance $\vec{F}\cdot\vec{v}$ ou $\Gamma\omega$; équilibres via $E_p = -\vec{m}\cdot\vec{B}$.

✗ Attention, erreurs fréquentes

- Utiliser le champ total (y compris le champ propre) au lieu du champ extérieur.
- Dire qu'une boussole est attirée vers le nord : en champ uniforme, il n'y a qu'un couple.
- Confondre l'angle θ entre $\vec{n}$ et $\vec{B}$ et l'angle entre le plan de la spire et $\vec{B}$.
- Oublier le facteur N dans le moment d'une bobine.
- Croire qu'un moteur synchrone peut tourner à une vitesse différente de celle du champ.

Savoir-faire : je coche quand je sais

- ☐ Je distingue champ extérieur et champ propre ; je passe de $\vec{j}\wedge\vec{B}$ à $I\,\mathrm{d}\vec{\ell}\wedge\vec{B}$.
- ☐ Je sais calculer la résultante et le moment des forces de Laplace sur un circuit simple.
- ☐ Je sais établir la force et la puissance sur la barre des rails de Laplace.
- ☐ Je sais établir le couple $\vec{m}\wedge\vec{B}$ sur une spire rectangulaire en rotation et sa puissance.
- ☐ Je sais discuter l'équilibre et la stabilité d'un aimant dans un champ uniforme ; je sais exploiter les petites oscillations.
- ☐ Je sais créer un champ tournant et expliquer le fonctionnement et les limites du moteur synchrone.