LYCÉE D'EXCELLENCE
MOHAMMED VI
LEM6 - CASABLANCA

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

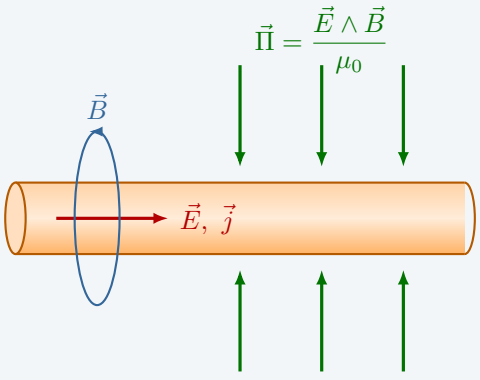
FICHE RÉSUMÉ

EM5

ÉLECTROMAGNÉTISME

Énergie du champ électromagnétique

Force et puissance volumiques — Loi d'Ohm locale et effet Joule — Densité d'énergie électromagnétique — Vecteur de Poynting — Identité de Poynting — Transport de l'énergie



la puissance Joule entre par la surface latérale

Depuis Maxwell, la réalité physique est pensée comme représentée par des champs continus, régis par des équations aux dérivées partielles. Ce changement dans la conception de la réalité est le plus profond et le plus fécond que la physique ait connu depuis Newton.

— Albert Einstein, « L'influence de Maxwell sur l'évolution de la conception de la réalité physique » (1931)

physionova
physionova.academy

Pr. CHARIFI
professeurcharifi@gmail.com

Simulation associée sur **PhysioNova**
« Condensateur en charge et vecteur de Poynting »

EM5 — Fiche résumé

L'essentiel en trois phrases

Le champ électromagnétique échange de l'énergie avec la matière par la puissance volumique $\vec{j}\cdot\vec{E}$ (la force magnétique ne travaille pas), qui se réduit à l'effet Joule σE^2 dans un conducteur ohmique. Il stocke l'énergie avec la densité $u_{em}=\frac{\varepsilon_0 E^2}{2}+\frac{B^2}{2\mu_0}$ et la transporte avec la densité de courant d'énergie $\vec{\Pi}=\frac{\vec{E}\wedge\vec{B}}{\mu_0}$ (vecteur de Poynting). L'identité de Poynting $\frac{\partial u_{em}}{\partial t}+\operatorname{div}\vec{\Pi}=-\vec{j}\cdot\vec{E}$ est le bilan local d'énergie : l'énergie électrique voyage dans le champ, autour des fils, et entre dans les composants par leur surface.

I Action du champ sur la matière

Force et puissance volumiques R D

$$\vec{f_v}=\rho\vec{E}+\vec{j}\wedge\vec{B}\qquad\qquad p=\vec{j}\cdot\vec{E}$$

Démonstration : sommer $q_k(\vec{E}+\vec{v}_k\wedge\vec{B})$ sur les $n_k\mathrm{d}\tau$ porteurs de chaque type ; $(\vec{v}_k\wedge\vec{B})\cdot\vec{v}_k=0$. Pour un fil, $\vec{j}\,\mathrm{d}\tau=I\mathrm{d}\vec{\ell}$ redonne la force de Laplace. $p>0$: le champ cède de l'énergie (récepteur) ; $p<0$: générateur.

Définition — Conducteur ohmique R

Loi d'Ohm locale (phénoménologique) : $\vec{j}=\sigma\vec{E}$; effet Joule $p_J=\sigma E^2=\frac{j^2}{\sigma}\geq 0$; conducteur cylindrique : $R=\frac{L}{\sigma S}$, $\mathcal{P}_J=RI^2$. Modèle de Drude (non exigible) : $\sigma=\frac{ne^2\tau}{m}$.

II Densité d'énergie et vecteur de Poynting

Grandeurs énergétiques du champ R

$$u_{em}=\frac{\varepsilon_0 E^2}{2}+\frac{B^2}{2\mu_0}\ (\mathrm{J\cdot m^{-3}})\qquad\qquad \vec{\Pi}=\frac{\vec{E}\wedge\vec{B}}{\mu_0}\ (\mathrm{W\cdot m^{-2}})$$

Puissance traversant une surface orientée : $\mathcal{P}=\iint\vec{\Pi}\cdot\mathrm{d}\vec{S}$. Vérifications : condensateur plan $\frac{\varepsilon_0}{2}\frac{U^2}{e^2}Se=\frac{1}{2}CU^2$; solénoïde $\frac{B^2}{2\mu_0}S\ell=\frac{1}{2}Li^2$.

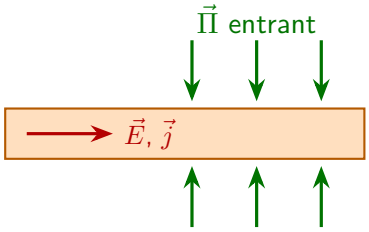
Identité de Poynting R D

$$\frac{\partial u_{em}}{\partial t}+\operatorname{div}\vec{\Pi}=-\vec{j}\cdot\vec{E}\qquad\Longleftrightarrow\qquad\frac{\mathrm{d}U_{em}}{\mathrm{d}t}=-\oiint_{\Sigma}\vec{\Pi}\cdot\mathrm{d}\vec{S}-\iiint_{V}\vec{j}\cdot\vec{E}\,\mathrm{d}\tau$$

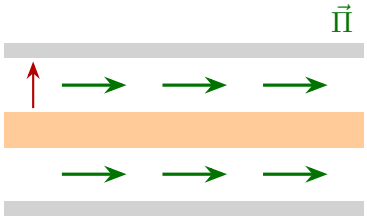
Démonstration : $\frac{\vec{E}}{\mu_0}\cdot$(MA) et $\frac{\vec{B}}{\mu_0}\cdot$(MF), puis $\operatorname{div}(\vec{E}\wedge\vec{B})=\vec{B}\cdot\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{E}-\vec{E}\cdot\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{B}$. Variation de l'énergie

stockée = − puissance sortante − puissance cédée à la matière.

Système	Champs	$\vec{\Pi}$ sur la surface	Bilan
Fil résistif (a, ℓ, I)	$E = \frac{I}{\sigma\pi a^2}\vec{u}_z$, $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}\vec{u}_\theta$	$-\frac{I^2}{2\pi^2\sigma a^3}\vec{u}_r$ (entrant)	flux entrant $= RI^2$
Condensateur qui se charge	$E = \frac{U}{e}\vec{u}_z$, $B = \frac{\mu_0\varepsilon_0 r\dot{U}}{2e}\vec{u}_\theta$	$-\frac{\varepsilon_0 aU\dot{U}}{2e^2}\vec{u}_r$	$= \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}CU^2\right)$
Solénoïde, i **croissant**	$B = \mu_0 n i\vec{u}_z$, $E = -\frac{\mu_0 nr}{2}\dot{i}\vec{u}_\theta$	$-\frac{\mu_0 n^2 a}{2}i\dot{i}\vec{u}_r$	$= \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{B^2}{2\mu_0}\pi a^2 h\right)$
Câble coaxial idéal	$E = \frac{U}{r\ln(R_2/R_1)}\vec{u}_r$, $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\vec{u}_\theta$	$\frac{UI}{2\pi r^2\ln(R_2/R_1)}\vec{u}_z$	UI dans l'isolant
Onde plane (vide)	$B = \frac{E}{c}$, $(\vec{u}, \vec{E}, \vec{B})$ direct	$c\,u_{em}\,\vec{u}$	énergie à la vitesse c



fil résistif : Joule



câble coaxial : l'énergie suit l'isolant

Régime sinusoïdal R

$\langle ab\rangle = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(\underline{a}\,\underline{b}^*)$; $\left\langle\vec{\Pi}\right\rangle = \dfrac{1}{2\mu_0}\mathrm{Re}\left(\underline{\vec{E}}\wedge\underline{\vec{B}}^*\right)$; onde plane : $\langle\Pi\rangle = \frac{\varepsilon_0 cE_0^2}{2}$.

Ordres de grandeur

- Conductivités ($\mathrm{S\cdot m^{-1}}$) : cuivre 6×10^7, aluminium $3{,}8\times10^7$, eau de mer ≈ 4, verre $\approx 10^{-12}$.
- Flux : Soleil $1{,}36\,\mathrm{kW\cdot m^{-2}}$ hors atmosphère ($\approx 1\,\mathrm{kW\cdot m^{-2}}$ au sol, $E_0 \approx 0{,}9\,\mathrm{kV\cdot m^{-1}}$) ; pointeur laser $1\,\mathrm{mW}$ sur $1\,\mathrm{mm^2}$: $1\,\mathrm{kW\cdot m^{-2}}$; laser de découpe $10^{10}\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}$; téléphone à $10\,\mathrm{cm}$: quelques $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$.
- Densités d'énergie : $E = 3\,\mathrm{MV\cdot m^{-1}}$ (claquage de l'air) : $40\,\mathrm{J\cdot m^{-3}}$; $B = 1\,\mathrm{T}$: $4\times10^5\,\mathrm{J\cdot m^{-3}}$.
- Pression de radiation sur un miroir : $\frac{2\langle\Pi\rangle}{c} \approx 9\times10^{-6}\,\mathrm{Pa}$ pour le Soleil.

III Méthodes et pièges

☞ Méthode — Faire un bilan de Poynting M

1. Calculer $\vec{E}$ et $\vec{B}$ (symétries, Gauss, Ampère, Faraday) sur la surface du volume choisi.
2. Cylindre : $\vec{E}$ axial et $\vec{B}$ orthoradial $\Rightarrow \vec{\Pi}$ radial, seule la surface latérale compte.
3. Comparer le flux **entrant** à $\dfrac{\mathrm{d}U_{em}}{\mathrm{d}t} + \iiint \vec{j}\cdot\vec{E}\,\mathrm{d}\tau$.
4. Contrôler : unités ($\mathrm{W\cdot m^{-2}}$), sens physique de l'écoulement.

✗ Attention, erreurs fréquentes

- Ne pas calculer u_{em} ou $\vec{\Pi}$ avec des champs complexes : grandeurs quadratiques.
- Le flux **sortant** de $\vec{\Pi}$ est une perte pour le volume.
- La force magnétique ne travaille pas : seul $\vec{E}$ intervient dans p.
- L'énergie ne circule pas « dans les fils » mais dans le champ qui les entoure.
- Seul le flux de $\vec{\Pi}$ à travers une surface fermée a un sens indiscutable.
- Dans un condensateur à fuites, $\vec{B} = \vec{0}$ et $\vec{\Pi} = \vec{0}$: l'énergie est dissipée sur place.

Savoir-faire : je coche quand je sais

- ☐ J'établis $\vec{f_v} = \rho\vec{E} + \vec{j} \wedge \vec{B}$ et $p = \vec{j} \cdot \vec{E}$.
- ☐ J'utilise la loi d'Ohm locale, je calcule une résistance et une puissance Joule.
- ☐ Je retrouve $\frac{1}{2}CU^2$ et $\frac{1}{2}Li^2$ à partir de u_{em}.
- ☐ Je démontre l'identité de Poynting et j'interprète chaque terme.
- ☐ Je mène le bilan d'un fil résistif, d'un condensateur ou d'une bobine, et je calcule la puissance guidée par un câble coaxial.
- ☐ Je connais des ordres de grandeur de flux d'énergie (Soleil, laser).