LYCÉE D'EXCELLENCE
MOHAMMED VI
LEM6 - CASABLANCA

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

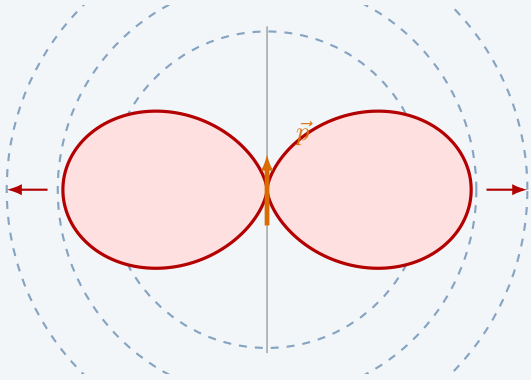
FICHE RÉSUMÉ

W3

PHYSIQUE DES ONDES

Rayonnement dipolaire

Dipôle oscillant — Trois échelles $a \ll \lambda \ll r$ — Champ rayonné — Puissance et indicatrice — Diffusion Rayleigh — Couleur et polarisation du ciel



« *La lumière est un phénomène électrique : la lumière en soi, toute lumière, celle du Soleil, celle d'une bougie, celle d'un ver luisant.*

— Heinrich Hertz, conférence *Sur les relations entre la lumière et l'électricité*, Heidelberg (1889)

physionova
physionova.academy

Pr. CHARIFI
professeurcharifi@gmail.com

Simulation associée sur **PhysioNova**
« Rayonnement dipolaire »

W3 — Fiche résumé

L'essentiel en trois phrases

Des charges **accélérées** rayonnent : vu de loin, un système neutre dont les charges oscillent est un **dipôle oscillant** $\vec{p} = p_0 \cos(\omega t)\vec{u}_z$, étudié pour $a \ll \lambda \ll r$. Son champ (admis) est une **onde sphérique** localement plane, d'amplitude en $1/r$, nulle sur l'axe du dipôle, polarisée rectilignement ; la puissance rayonnée, $\frac{\mu_0 p_0^2 \omega^4}{12\pi c}$, croît comme ω^4. Une molécule éclairée devient un dipôle induit qui **diffuse** la lumière : dans le domaine de Rayleigh ($\omega \ll \omega_0$), le bleu est bien plus diffusé que le rouge, d'où le ciel bleu, le Soleil couchant rouge et la polarisation du ciel.

I Modèle du dipôle oscillant

Définition — Dipôle oscillant R

$\vec{p} = \sum q_i \overrightarrow{OP_i} = Q\,\overrightarrow{G_-G_+}$ pour un système neutre. Modèle de Hertz : $-q$ fixe en O, $+q$ en $z = a\cos\omega t$: $\vec{p} = p_0 \cos(\omega t)\vec{u}_z$, $p_0 = qa$. Antenne courte de longueur ℓ parcourue par $i(t)$: $\dot{p} = \ell\, i$, $p_0 = \frac{\ell I_0}{\omega}$.

★ À retenir

Approximation	Condition	Sens physique
dipolaire	$a \ll r$	source vue comme ponctuelle
non relativiste	$a \ll \lambda$	$v \sim a\omega \ll c$: pas de retard entre les points de la source
zone de rayonnement	$\lambda \ll r$	on garde les termes en $1/r$, qui emportent l'énergie

Zone proche $r \ll \lambda$: champ du dipôle statique, en $1/r^3$, sans transport d'énergie moyen.

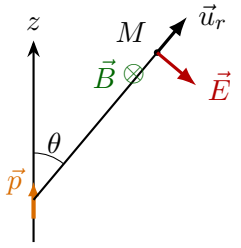
II Champ rayonné

Étapes : linéarité de Maxwell ; potentiels **retardés** $(t - r/c)$, $\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi r}\dot{\vec{p}}(t - \frac{r}{c})$; approximations $a \ll r$, $a \ll \lambda$; $\vec{B} = \overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{A}$ en ne gardant que le terme en $\ddot{p}/(rc)$ (rapport $kr \gg 1$ avec le terme en $\dot{p}/r^2$).

Expressions admises (non exigibles)

$$\vec{E} = \frac{\mu_0 \sin\theta}{4\pi r}\,\ddot{p}\left(t - \frac{r}{c}\right)\vec{u}_\theta$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \sin\theta}{4\pi r c}\,\ddot{p}\left(t - \frac{r}{c}\right)\vec{u}_\varphi = \frac{\vec{u}_r \wedge \vec{E}}{c}$$



Structure R

- onde **sphérique** sortante (célérité c) ; **structure locale d'onde plane** : $(\vec{u}_r, \vec{E}, \vec{B})$ direct, $E = cB$;
- amplitude en $\frac{1}{r}$ (dilution géométrique, pas d'absorption) ; facteur $\sin\theta$: **nul sur l'axe**, maximal dans le plan équatorial ;

▶ polarisation **rectiligne**, $\vec{E}$ dans le plan méridien ; champ $\propto \ddot{p}$: seules les charges accélérées rayonnent.

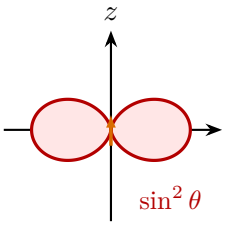
III Puissance rayonnée

Poynting et puissance R D

$$\langle \vec{\Pi} \rangle = \frac{\mu_0 p_0^2 \omega^4}{32\pi^2 c} \frac{\sin^2\theta}{r^2} \vec{u}_r$$

$$\langle \mathcal{P} \rangle = \frac{\mu_0 p_0^2 \omega^4}{12\pi c} \qquad \mathcal{P}(t) = \frac{\mu_0 \ddot{p}^2}{6\pi c}$$

avec $\oiint \sin^2\theta \, \mathrm{d}\Omega = 2\pi \int_0^\pi \sin^3\theta \, \mathrm{d}\theta = \frac{8\pi}{3}$. Indépendante de r (conservation de l'énergie) ; en ω^4.



Indicatrice de rayonnement

▶ **Larmor** : charge q d'accélération a (non relativiste) : $\mathcal{P} = \frac{\mu_0 q^2 a^2}{6\pi c}$.

▶ **Résistance de rayonnement** d'une antenne courte : $\langle \mathcal{P} \rangle = \frac{1}{2} R_{\text{ray}} I_0^2$, $R_{\text{ray}} = \frac{2\pi}{3} \mu_0 c \left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^2 \approx 790\,\Omega \left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^2$: une antenne efficace a une taille comparable à λ.

IV Diffusion par une molécule

Électron élastiquement lié R D

$m\ddot{\vec{r}} = -m\omega_0^2 \vec{r} - \frac{m}{\tau}\dot{\vec{r}} - e\vec{E}(O,t)$ (force magnétique négligée car $v \ll c$; champ uniforme sur la molécule car taille $\ll \lambda$) :

$$\underline{\vec{p}} = \frac{e^2/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + \mathrm{i}\omega/\tau} \underline{\vec{E}} \qquad \sigma_d = \frac{\langle \mathcal{P}_d \rangle}{\langle \Pi_i \rangle} = \frac{8\pi}{3} r_e^2 \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2/\tau^2}$$

$r_e = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 m c^2} = 2{,}82 \times 10^{-15}\,\mathrm{m}$; $\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_e^2 = 6{,}65 \times 10^{-29}\,\mathrm{m}^2$.

Régime	Condition	σ_d	Exemples
Rayleigh	$\omega \ll \omega_0$	$\sigma_T \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4 \propto \lambda^{-4}$	lumière visible sur l'air ($\lambda_0 \approx 100\,\mathrm{nm}$)
Résonance	$\omega \approx \omega_0$	$\approx \sigma_T (\omega_0 \tau)^2$, largeur $\frac{1}{\tau}$	raies d'absorption
Thomson	$\omega \gg \omega_0$	σ_T	rayons X sur les électrons

Conséquences. Ciel bleu : $\left(\frac{700}{450}\right)^4 \approx 6$; Soleil couchant rouge (bleu ôté par diffusion sur une grande épaisseur d'air) ; lumière diffusée à $90°$ polarisée rectilignement (un dipôle ne rayonne pas selon son axe) ; nuages blancs (gouttes $> \lambda$, diffusion de Mie, hors programme).

Ordres de grandeur

Antenne de $10\,\mathrm{cm}$, $1\,\mathrm{A}$, $100\,\mathrm{MHz}$: $\langle\mathcal{P}\rangle \approx 0{,}4\,\mathrm{W}$, $E \approx 6\,\mathrm{mV\cdot m^{-1}}$ à $1\,\mathrm{km}$. Atome dans le visible : $\langle\mathcal{P}\rangle \sim 10^{-12}\,\mathrm{W}$, durée d'émission de 10^{-8} à $10^{-7}\,\mathrm{s}$. Longueur d'atténuation de la lumière verte dans l'air au sol : quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres.

V Méthodes et pièges

☞ Méthode — Exploiter des champs fournis M

1. Vérifier $a \ll \lambda \ll r$ et l'homogénéité ($\frac{\mu_0 \ddot{p}}{4\pi r}$ en $\mathrm{V\cdot m^{-1}}$).
2. Lire : dépendance en $t - r/c$, structure $\vec{B} = \vec{u}_r \wedge \vec{E}/c$, facteur angulaire, polarisation.
3. $\langle\vec{\Pi}\rangle = \frac{\langle E^2\rangle}{\mu_0 c}\vec{u}_r$, puis intégrer sur une sphère ($\mathrm{d}S = r^2 \sin\theta\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}\varphi$).
4. Diffusion : dipôle induit en régime sinusoïdal (complexes), puis $\langle\mathcal{P}\rangle \propto \omega^4 |\underline{p}|^2$.

✗ Attention, erreurs fréquentes

- Un dipôle ne rayonne **pas** dans la direction de son axe.
- Ne pas utiliser les champs de rayonnement pour $r \lesssim \lambda$.
- ω^4 et non ω^2 (à p_0 fixé) ; mais à courant d'antenne I_0 fixé, $\langle\mathcal{P}\rangle \propto \omega^2$.
- La décroissance en $1/r$ n'est pas une absorption : $\langle\mathcal{P}\rangle$ ne dépend pas de r.
- Dans le domaine de Rayleigh, p_0 ne dépend pas de ω ; ce n'est pas le cas près de la résonance.

Savoir-faire : je coche quand je sais

- ☐ Je justifie le modèle du dipôle oscillant et je cite des exemples (antenne, atome, molécule).
- ☐ Je formule et je commente les trois approximations $a \ll \lambda \ll r$.
- ☐ Je connais les étapes du calcul et j'analyse la structure du champ rayonné fourni.
- ☐ Je calcule $\langle\vec{\Pi}\rangle$ et la puissance totale ; je trace l'indicatrice.
- ☐ J'établis le dipôle induit d'une molécule et la puissance diffusée ; j'identifie les régimes de Rayleigh, de résonance et de Thomson.
- ☐ J'explique la couleur du ciel, du Soleil couchant et la polarisation de la lumière diffusée.