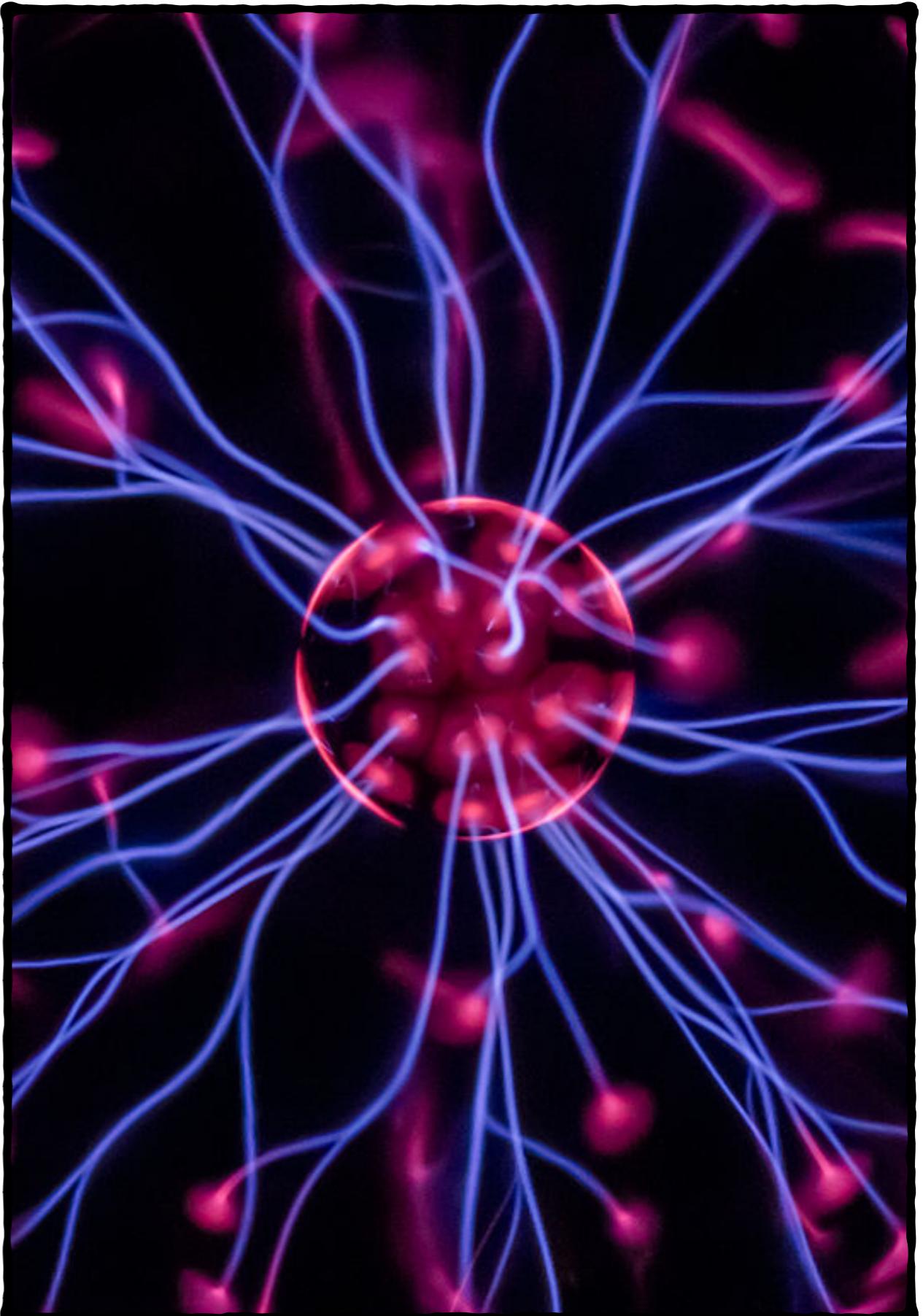


PT PHYSIQUE

OPTI I

Modèle scalaire de la lumière



courtesy of : © User:Colin / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\text{p}}{p} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{\text{p}} \frac{\text{Cu}^{\text{na}}}{\text{p}} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{\text{p}} \frac{\text{Cu}^{\text{na}}}{\text{p}} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{\text{p}} \text{rot } E =$$

$$\text{div} \vec{j} = 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\text{g}}} \right) = 0 \quad 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \\ \Delta_{\text{vap}} = \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ} \\ - (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

OBJECTIFS DU CHAPITRE

- À la fin de ce chapitre, vous devez être capable de :
 - Encadrer les valeurs de longueur d'onde et de fréquence du spectre électromagnétique visible ;
 - Expliquer qualitativement le mécanisme de production d'un *train d'onde* et lui associer *temps de cohérence*, *largeur spectrale* et *longueur de cohérence* ;
 - Exprimer une *vibration lumineuse* comme une OPPS scalaire de fréquence donnée ;
 - Relier les concepts de l'*optique géométrique* et de l'*optique ondulatoire* à travers le *théorème de Malus* et la notion de *chemin optique*.

$$\tilde{h}_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}}_{\mathcal{E}^{\text{na}}} \pm \text{Zn}^{\text{na}} \text{rot} E =$$

$$\tilde{H}(\mathbf{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k^{\text{na}}}{\sum_j K_j^{\text{na}}} \exp \frac{\mathbf{f}}{\partial \lambda}$$

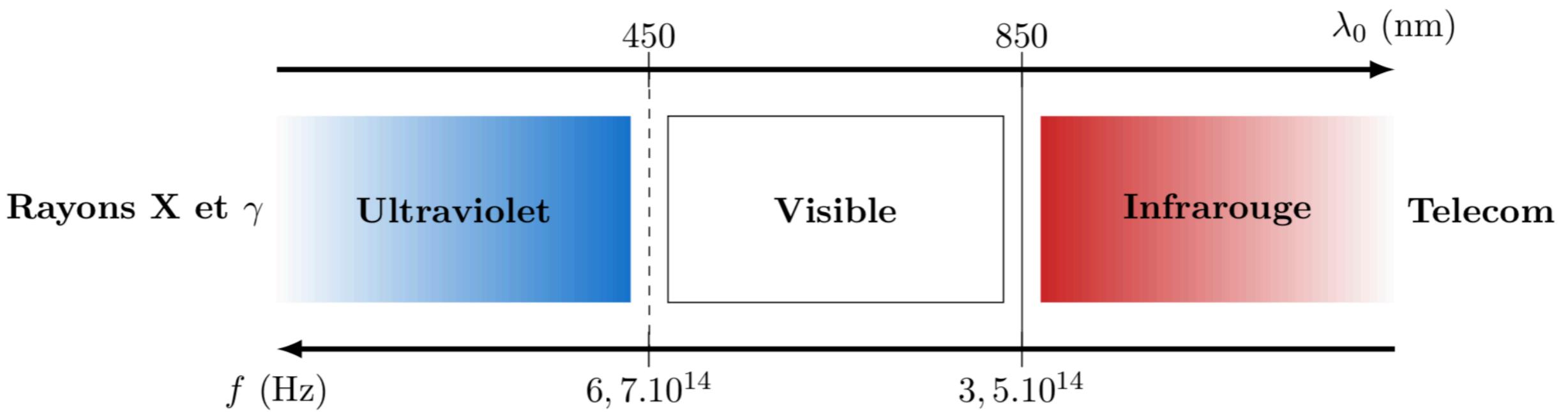
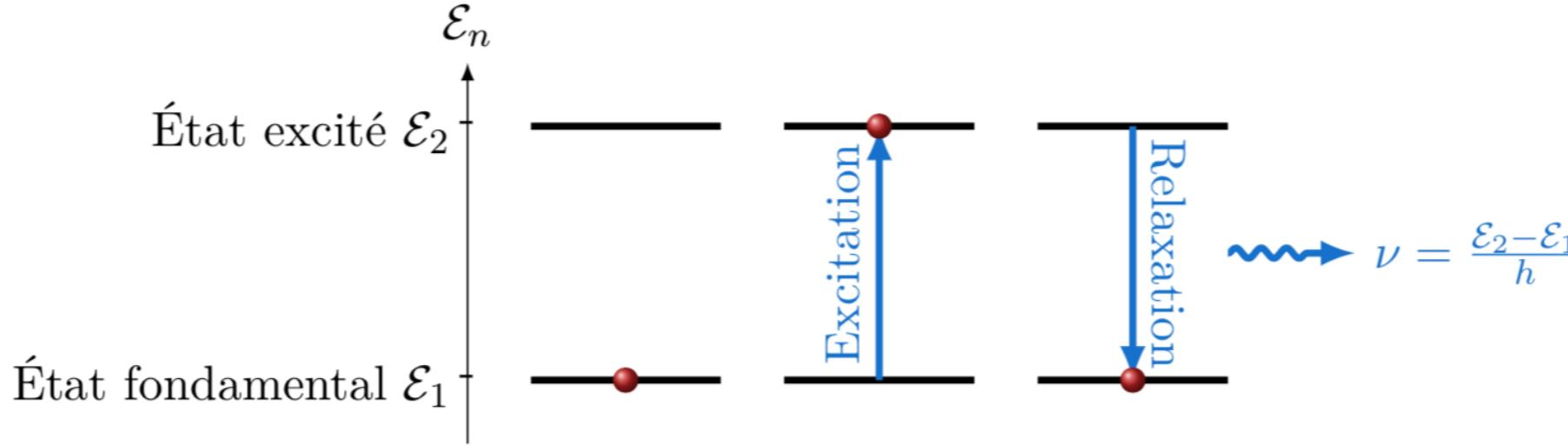
$$\operatorname{div} \vec{j} = 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} S} =$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0^{\text{vap}}} \right) = 0 \quad \Delta_{\text{vap}} S = \frac{T_{\text{vap}}}{T_{\text{vap}}}$$

$$\Delta_{\text{vap}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \Delta_{\text{vap}} \vec{H} = \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

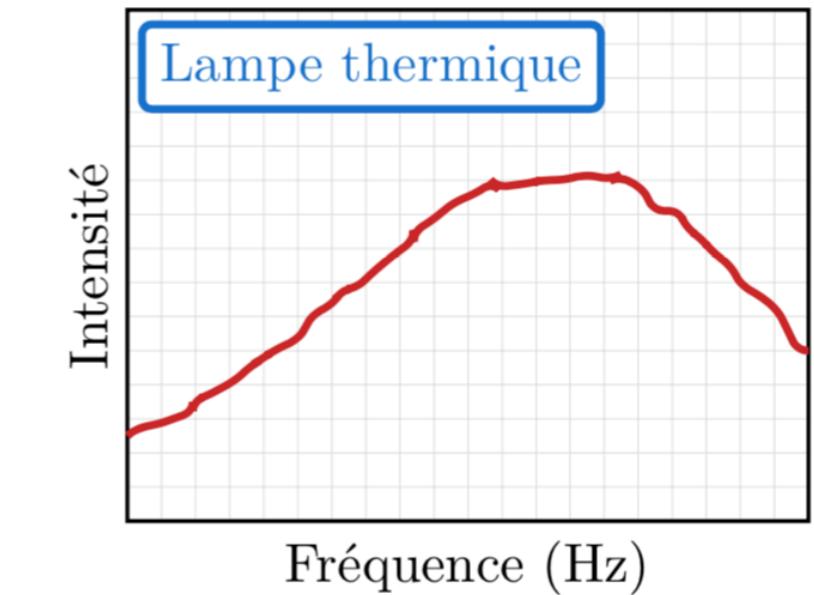
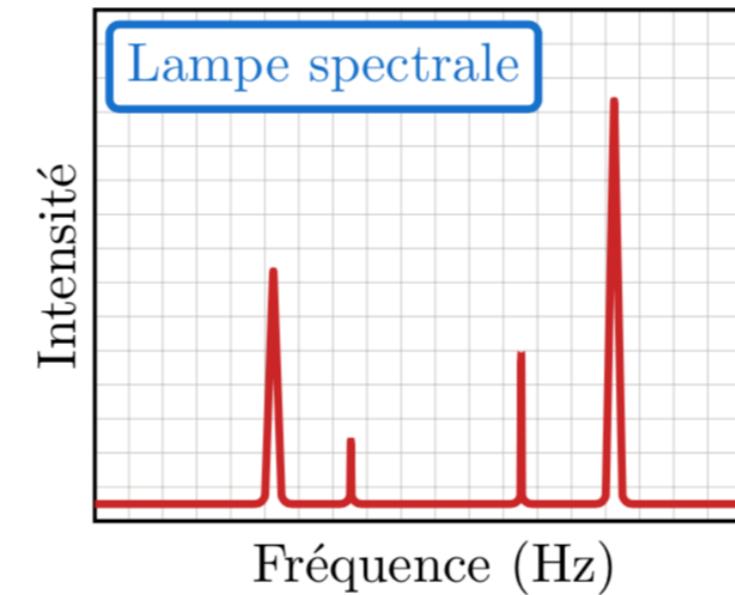
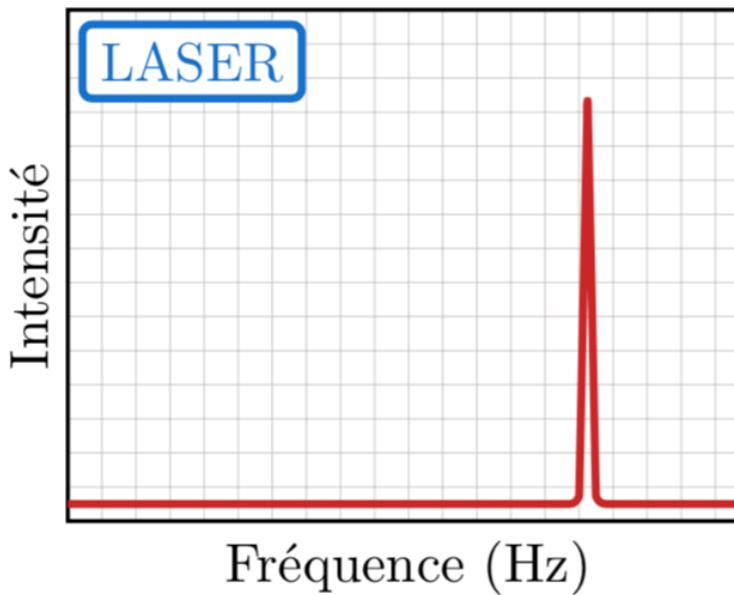
LUMIÈRE & ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE



$$\begin{aligned}
h_e^{\text{na}} &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\text{rot}}{p} \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}} \text{Zn}^{\text{na}} \text{rot} E = \\
H(j\omega) &= d \frac{\sum_k b_k^{\text{na}}}{\sum_j K_j^{\text{na}}} \frac{z_k^{\text{na}}}{\text{rot} E} \exp \frac{if}{\partial \lambda}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{div} \vec{j} &= 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}}^{\text{na}}} \\
\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} &+ \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\text{na}}} \right) = 0 \quad 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \\
\Delta_{\text{vap}}^{\text{na}} &= \varphi_0^{\text{na}} (E_{\oplus}^{\text{na}} - \mu_{\text{vap}}^{\text{na}}) \text{H}_2(\text{g}) \\
\vec{j} &= \gamma \vec{E} \quad \Delta_{\text{vap}}^{\text{na}} = \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\text{na}} \\
\Delta_{\text{vap}}^{\text{na}} &= \frac{\partial \Delta_{\text{vap}}^{\text{na}}}{\partial \xi} \left| \frac{\partial \xi}{P, T} \right| \frac{\partial P}{\partial \xi} \left| \frac{\partial \xi}{P, T} \right| \frac{\partial T}{\partial \xi} \left| \frac{\partial \xi}{P, T} \right| \\
&= (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}
\end{aligned}$$

SOURCES USUELLES DE LUMIÈRE VISIBLE



$$h|_e^{\circ} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{zr}^{\text{zr}} \text{zr}} \text{Zr}^{\text{fz}(\text{s})^{\text{fz}}} \text{G}^{\text{fz}}_0 \pm \text{Zn}^{\text{zr}^{\text{zr}}} \text{rot} E : \\ p \in \mathbb{H}(\text{j}\omega) = d^{\sum_k b_k \text{zr}^{\text{zr}} \text{zr}}_{\sum_j \text{fz}^{\text{fz}} \text{fz} \text{fz}} \exp \frac{\text{fz}}{\partial t}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 \\ \frac{1}{2\pi} \int_Q \vec{E} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\vec{E} \wedge \vec{B} \right) &= 0 \\ \lambda_0 \frac{1}{j = \gamma \vec{E}} &= \varphi_0 \Big|_{(S\vec{M}_r)^{\circ}} \end{aligned}$$

EXERCICE D'APPLICATION I

On peut établir théoriquement que les raies du spectre de l'atome d'hydrogène vérifient la relation

$$\nu_{nm} = c R_y \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

où ν_{nm} est la fréquence du photon correspondant à la transition d'un niveau énergétique \mathcal{E}_m vers le niveau \mathcal{E}_n où $m > n$ et $R_y = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$. On s'intéresse dans ce qui suit à la série de BALMER, dont certaines longueurs d'onde sont émises dans le visible, et correspondent à une désexcitation vers le niveau $n = 2$. On donne ci-dessous les valeurs mesurées de longueurs d'onde du spectre visible d'une lampe à hydrogène.

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
Longueur d'onde (nm)	410,2	434,0	486,1	656,3

1. En déduire la valeur de l'indice m des niveaux énergétiques correspondant aux transitions énergétiques de la série de BALMER.
 2. En déduire la valeur des ces niveaux énergétiques impliqués en J puis en eV.

$$h|_e^{\circ} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{Na}^{\pm} \mp \text{Zn}^{\pm} \text{C}^{\pm} \text{O}^{\pm} \text{H}^{\pm}}_{p \in \mathbb{Z}} \text{rot } E =$$

NOTION DE TRAIN D'ONDE

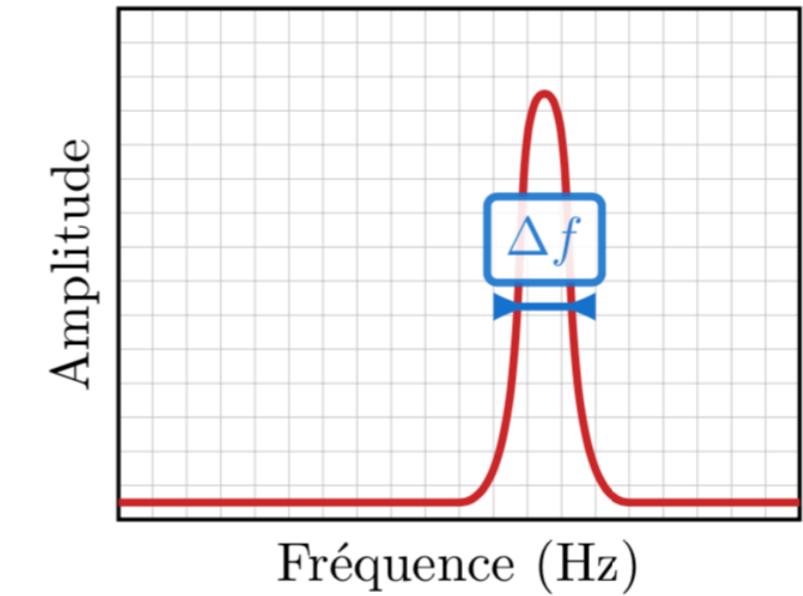
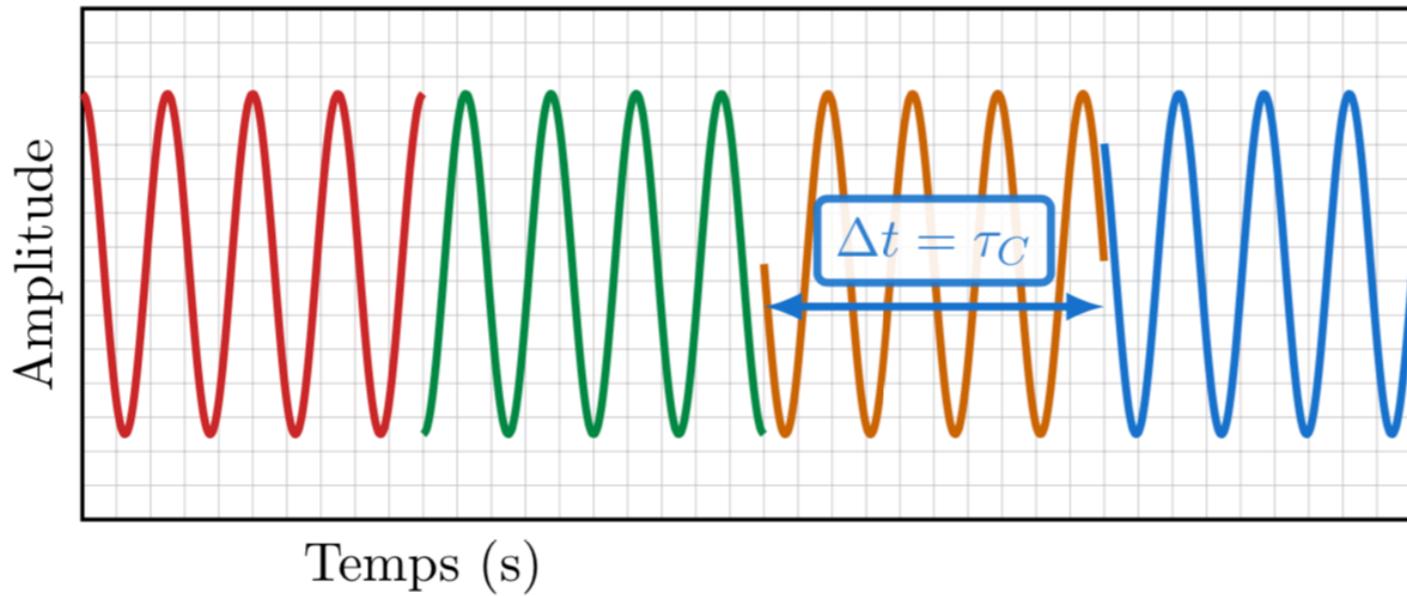
Train d'onde

On appelle train d'onde (paquet d'onde), l'enveloppe contenant un nombre arbitraire de formes d'ondes.

La durée d'un train d'onde est appelée temps de cohérence, noté τ_c

L'extension spatiale L_c de ce train d'onde est appelée longueur de cohérence. Dans le vide :

$$L_c = c\tau_c$$



NOTION DE TEMPS DE COHÉRENCE

Temps de cohérence et largeur spectrale

Les propriétés mathématiques associées aux transformées de FOURIER permettent d'établir la relation que l'on admettra :

$$\tau_c \cdot \Delta f \simeq 1$$

avec τ_c le temps de cohérence de la source, et Δf la largeur spectrale de la source

Source	Temps de cohérence τ_c	Longueur de cohérence L_c
LASER	$\simeq 1 \times 10^{-8}$ s	$\simeq 3$ m
Lampe spectrale	$\simeq 1 \times 10^{-10}$ s	$\simeq 3$ cm
Lampe thermique	$\simeq 3 \times 10^{-15}$ s	$\simeq 0,9$ μ m

$$h|_e^{\circ} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{Na}^{\pm} \mp \text{Zn}^{\pm} \text{Cl}^{\pm}}_{p \in \mathbb{Z}} \text{Et}_0^{\circ} \pm \text{Zn}^{\pm} \text{rot } E = \\ H(j\omega) = d \sum_k \frac{b_k^{\pm} \text{Et}_0^{\circ}}{\sum_j \frac{\Delta E}{j}} \exp \left(\frac{i \omega}{\tau} \right)$$

$$\begin{aligned}
& \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}} H_{\text{ALI}}}{\varepsilon_0} = \frac{d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} H^{\text{3d}}}}{\Delta_{\text{vap}} H^{\text{3d}} \frac{\partial \mathcal{Q}_{\text{g}}}{\partial \mathcal{Q}_{\text{g}}}} \\
& \text{div } \vec{j} = 0 \\
& \frac{1}{2\pi} \int_{\vec{j} = \gamma \vec{E}} \vec{j} \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0^{\text{co}} (E_{\oplus}^{\text{co}} - E_{\ominus}^{\text{co}})} \right) = 0 \\
& \frac{\lambda_0}{\vec{j} = \gamma \vec{E}} = \varphi_0^{\text{co}} (E_{\oplus}^{\text{co}} - E_{\ominus}^{\text{co}}) \\
& \Delta_{\text{r}} G = \frac{1}{\delta} \frac{\partial \vec{G}}{\partial \vec{\xi}} \vec{B} \frac{\partial G^{\text{RTL}}}{\partial \mu_0^{\text{co}}} \vec{\omega} \vec{\mathcal{P}}_{\text{r}} H^{\text{co}} \mu_0 \bar{\varepsilon} \frac{\vec{P}}{\delta} \\
& - (|\eta_{\text{Ox}}(i)| + |\eta_{\text{R}}^{\text{co}}(i)|) \vec{E} V_i \vec{r} \vec{r}^* \left[\frac{1}{2} v^2 + g z + \right. \\
& \left. \frac{1}{2} \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} H^{\text{3d}}} \frac{\partial \mathcal{Q}_{\text{g}}}{\partial \mathcal{Q}_{\text{g}}} \right]
\end{aligned}$$

EXERCICE D'APPLICATION 2

Soit un train d'onde de fréquence principale f_0 , associée à la longueur d'onde principale λ_0 . Ce train d'onde présente un écart statistique à la longueur d'onde principale $\Delta\lambda \ll \lambda_0$, ainsi qu'un écart statistique à la fréquence principale $\Delta f \ll f_0$.

1. Établir le lien entre c , λ_0 et f_0 .
 2. Établir le lien entre c , $\lambda_0 + \Delta\lambda$ et $f_0 + \Delta f$.
 3. En déduire le lien entre $\Delta\lambda$, Δf , λ_0 et c .

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}}_{\text{Zn}} \pm \text{Zn}^{\text{na}} \text{rot } E =$$

$$\begin{aligned} \text{div } \vec{j} &= 0 & \oint \vec{S} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} &= 0 & \text{div } \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\text{vap}}} \right) &= 0 \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_{\text{vap}} &= \frac{1}{\sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}} \end{aligned}$$

ONDE LUMINEUSE SCALAIRE

Onde plane

On appelle onde plane toute onde telle que son amplitude soit uniforme dans un plan perpendiculaire à son axe de propagation. Une onde plane, émise à l'origine O , et se propageant selon l'axe Oz s'écrit :

$$\begin{cases} s(M, t) = s_0(z) \cos(\omega t \pm kz + \varphi_0) \\ \underline{s}(M, t) = \underline{s}_0(z) \exp(j(\omega t \pm kz)) \end{cases}$$

Onde sphérique

On appelle onde sphérique toute onde telle que son amplitude soit uniforme sur une sphère centrée en son point d'émission O . Afin de conserver son énergie, l'amplitude d'une onde sphérique est $s_0(M) = s_0(r) = \frac{s_0}{r}$, où $r = \|\overrightarrow{OM}\|$ et l'onde se propageant selon l'axe radial s'écrit :

$$\begin{cases} s(M, t) = \frac{s_0}{r} \cos(\omega t \pm kr + \varphi_0) \\ \underline{s}(M, t) = \frac{\underline{s}_0}{r} \exp(j(\omega t \pm kr)) \end{cases}$$

TEMPS D'INTÉGRATION DES CAPTEURS

Éclairement

Pour garder un propos unique et cohérent, on appelle intensité lumineuse, ou éclairement, la grandeur

$$I(M) \propto \left\langle E^2(M, t) \right\rangle_T \propto \left\langle s^2(M, t) \right\rangle_T$$

Le calcul de l'éclairement gagne généralement à être fait en notations complexes, et on a :

$$I(M) \propto \frac{1}{2} \left\langle \underline{\vec{E}} \cdot \underline{\vec{E}}^*(M, t) \right\rangle_T \propto \frac{1}{2} \langle \underline{s} \times \underline{s}^*(M, t) \rangle_T$$

Capteur	Œil	CCD (CMOS)	Photodiode
Temps d'intégration (s)	$\sim 1 \times 10^{-1}$	$\sim 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-10}$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{J} &= 0 \\ \partial \vec{E} \wedge \vec{B} + \operatorname{div} (\vec{E} \wedge \vec{B}) &= 0 \\ \frac{\lambda_0}{j = \gamma \vec{E}} (\vec{S} \vec{M})^{\circ} &= \varphi_0^{\circ} \Big|_{E_{\oplus}^{\circ} / E_{\ominus}^{\circ}} = \varphi_0^{\circ} \Big|_{E_{\oplus}^{\circ}} = \varphi_0^{\circ} \Big|_{E_{\ominus}^{\circ}} \\ - (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) E_{\vec{V}} \vec{v} &= \frac{Q_{\text{int}} H_{\text{ALI}}}{\varepsilon_0} = \frac{d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} s}}{\Delta_{\text{vap}} H^3 \text{exp}(\text{g})} \end{aligned}$$

CHEMIN OPTIQUE & PHASE

Chemin optique

On appelle chemin optique la distance parcourue par un rayon lumineux pondérée par l'indice de réfraction du milieu traversé.

$$\mathcal{L}_{AB} = (AB) = \int_A^B n(M).dl \quad (18.2)$$

Phase d'une onde lumineuse

On appelle phase d'une onde lumineuse la grandeur exprimée en [rad] et définie par

$$\Phi(M, t) = \omega t - \vec{k} \cdot \overrightarrow{OM} - \varphi_0$$

où ω est la pulsation de l'onde, t l'instant considéré, $\vec{k} = k \vec{u} = \frac{\omega}{v} \vec{u}$ le vecteur d'onde et φ_0 la phase à l'origine.

$$\tilde{h|_e} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{var}} \nabla^{\text{var}} \tilde{\mathbf{H}}_{(s)}^{\text{var}} \tilde{\mathbf{C}}_{\theta}^{\text{var}} \pm \tilde{\mathbf{Z}}_{\theta}^{\text{var}} \tilde{\mathbf{k}}_{\theta}^{\text{var}} \text{ rot } \tilde{\mathbf{E}} =$$

$$\text{div} \vec{j} = 0 \quad \oint \vec{S} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^S} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^S} \right) = 0 \quad 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \\ \Delta_{\text{r}} H^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ} \\ - (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} \\$$

CHEMIN OPTIQUE & PHASE

Phase et chemin optique

La phase $\Phi(M, t)$ d'une onde électromagnétique et le chemin optique (SM), parcouru par cette onde entre la source S et le point M , sont relié par la relation

$$\Phi(M, t) = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0}(SM) - \varphi_0$$

où ω est la pulsation de l'onde, t l'instant considéré, λ_0 la longueur d'onde dans le vide et φ_0 la phase à l'origine.

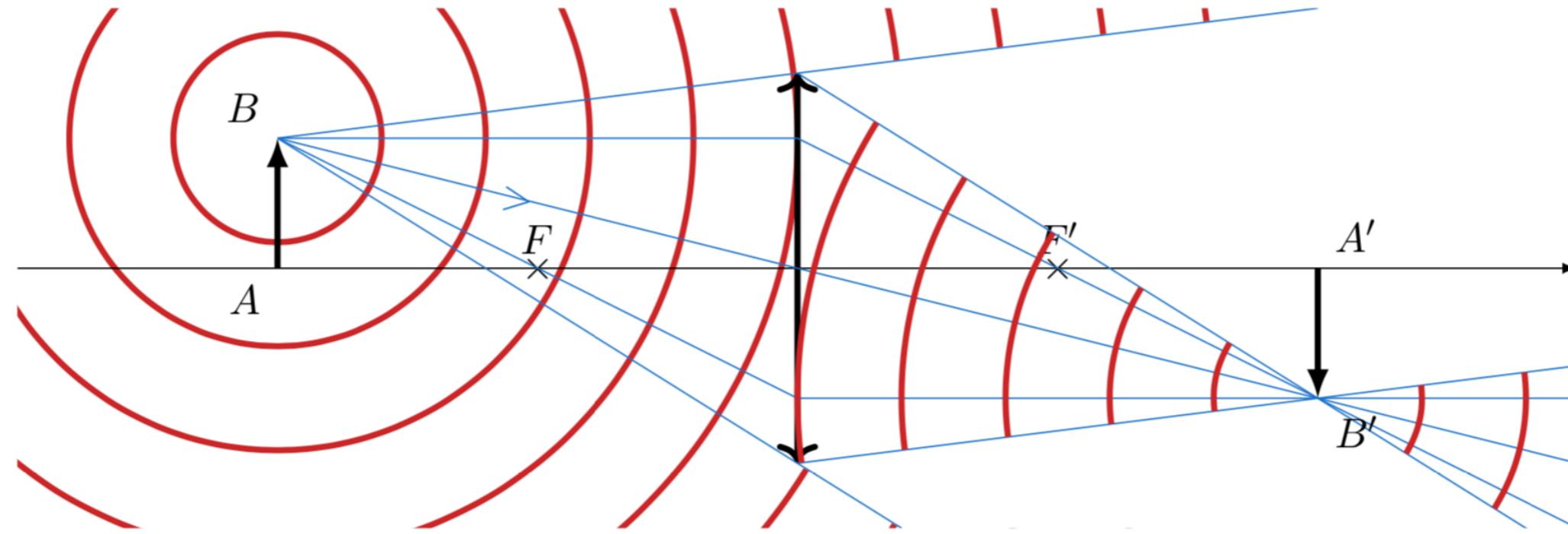
$$h|_e^{\circ} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{xt}} \text{Zn}^{\text{xt}} \text{Gd}^{\text{xt}} \text{Er}^{\text{xt}} \text{Gd}^{\text{xt}} \text{Zn}^{\text{xt}} \text{rot } E = \\ H(j\omega) = d \sum_{\substack{\sum k \\ \sum j}} \frac{b_k \rightarrow \omega}{\Delta E} \exp \left(\frac{i}{\hbar} \frac{\partial}{\partial \omega} \right)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{J} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \pi^{\mathcal{G}}_0(SM)^{\mathcal{G}^*} - \varphi_0^{\pi^{\mathcal{G}}_0(SM)^{\mathcal{G}^*}} &= \frac{\lambda_0}{j = \gamma \vec{E}} \Delta_r G = \frac{\overline{\partial}^{\mathcal{G}^*} \overline{\partial}^{\mathcal{G}^*} G^{\mu_0 \gamma \omega}}{\partial \xi^{\mu_0 \gamma \omega} \partial \bar{\xi}^{\mu_0 \gamma \omega}} H^{\mu_0 \bar{\varepsilon}} \overline{\partial}^{\mathcal{G}^*} \overline{\partial}^{\mathcal{G}^*} \\ - (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) E V_i &= \frac{1}{2} v^2 + g z + \end{aligned}$$

THÉORÈME DE MALUS

Théorème de Malus

Après un nombre quelconque de réflexions et de réfractions, les rayons lumineux restent perpendiculaires aux surfaces d'onde.

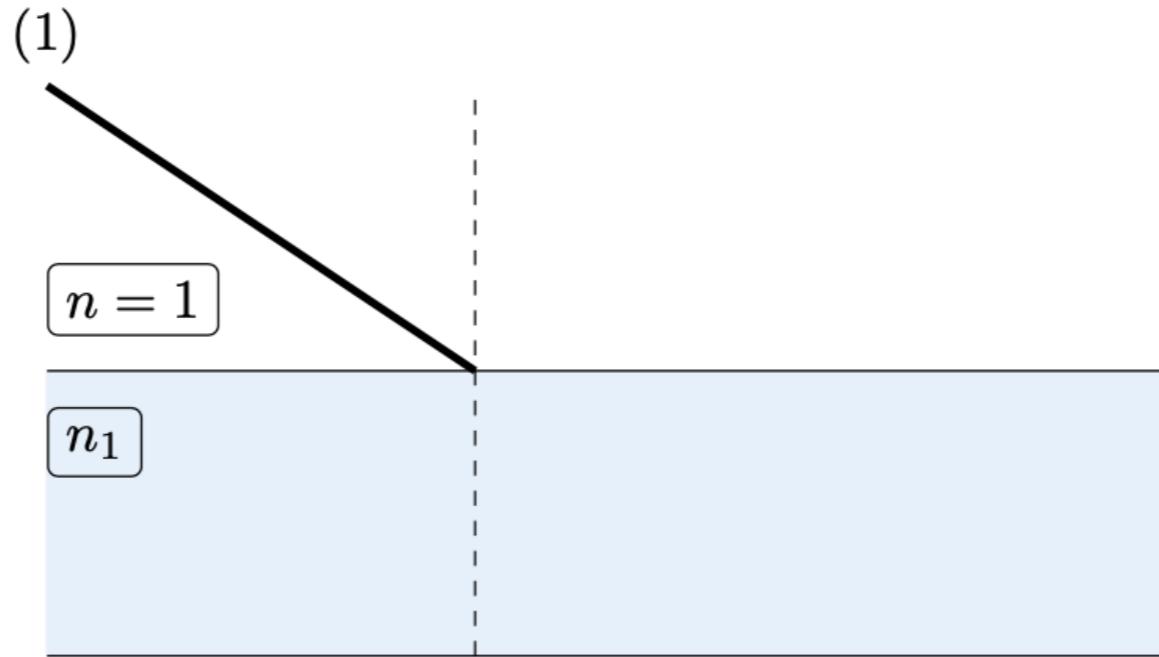


Rayons lumineux, surfaces d'onde et formation des images par une lentille convergente

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}} \text{Cn}^{\text{na}} \pm \text{Zn}^{\text{na}} \text{rot} E =$$

$$\tilde{H}(\text{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k^{\text{na}}}{\sum_j K_j^{\text{na}}} \exp \frac{\text{j}\omega t}{\mu_0}$$

Une onde plane se propage dans le vide en direction d'un dioptre sur lequel elle est partiellement réfléchie et transmise selon les lois de DESCARTES. Le milieu d'indice $n_1 \neq n$ a une épaisseur e , et lorsque l'onde transmise atteint le second dioptre, elle est également partiellement réfléchie et transmise.



1. On s'intéresse à une onde incidente notée 1, tracer le chemin optique suivi par l'onde, notée 2 et issue de 1, ne subissant qu'une réflexion et par celle, notée 3 et issue de 1, subissant une transmission, une réflexion et une transmission.
2. En appliquant le théorème de MALUS, tracer les surfaces d'onde des ondes 2 et 3.

Une lentille convergente de distance focale f' , dont l'axe optique est aligné sur le vecteur d'onde commun des ondes 2 et 3 permet de les faire converger en un point et d'observer l'onde résultante.

3. Compléter le schéma en y ajoutant la lentille ainsi que le point d'observation de l'onde résultante.
4. Quelle est la différence de phase entre les ondes 2 et 3 en ce point ?