Cours 03

Optique géométrique

- Instruments d'optique
  Loupe – Microscope – Lunette afocale

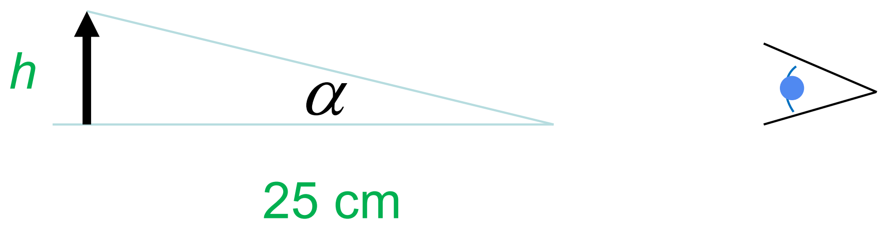
Optique physique

- Réfraction avec Eqs. de Maxwell
  - Energie transmise par incidence normale
  - Relations de Fresnel
  - Angle de Brewster

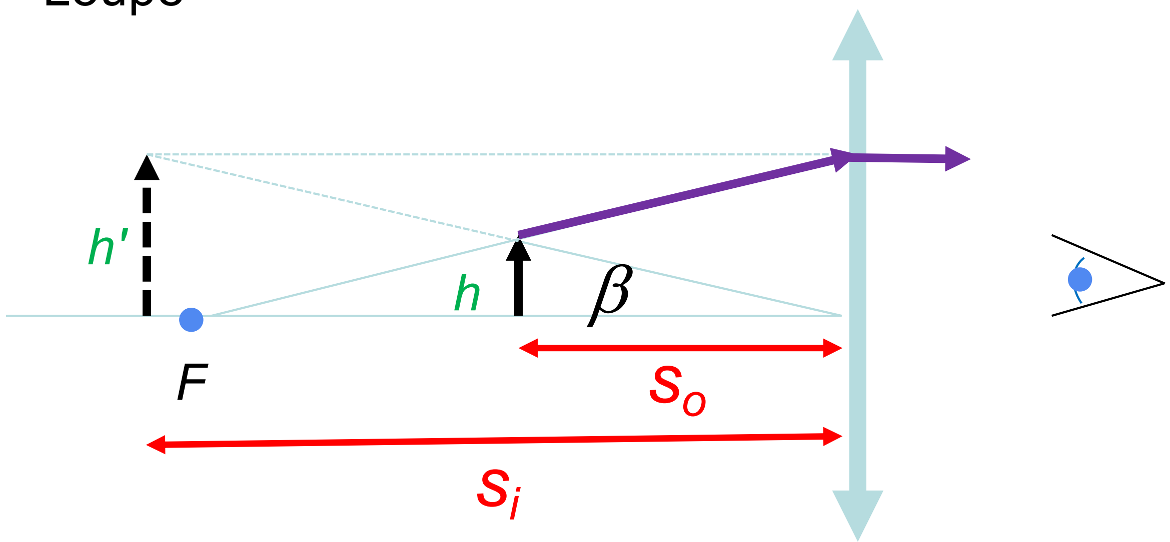
- Interférence
  - Expérience de Young
  - Réseau de *N* fentes

La loupe

Oeil nu



Loupe

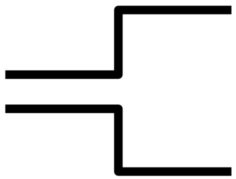


Grossissement $$G = \frac{\tan\beta}{\tan\alpha} = \frac{h / s_o}{h / (25\text{ cm})} = \frac{25\text{ cm}}{s_o}$$

La loupe (cont)

$$G = \frac{25\text{ cm}}{s_o}$$

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$



avec effort : $s_i = -25\text{ cm}$

$$\frac{1}{s_o} = \frac{1}{f} + \frac{1}{25\text{ cm}}$$

sans effort : $s_i = -\infty$

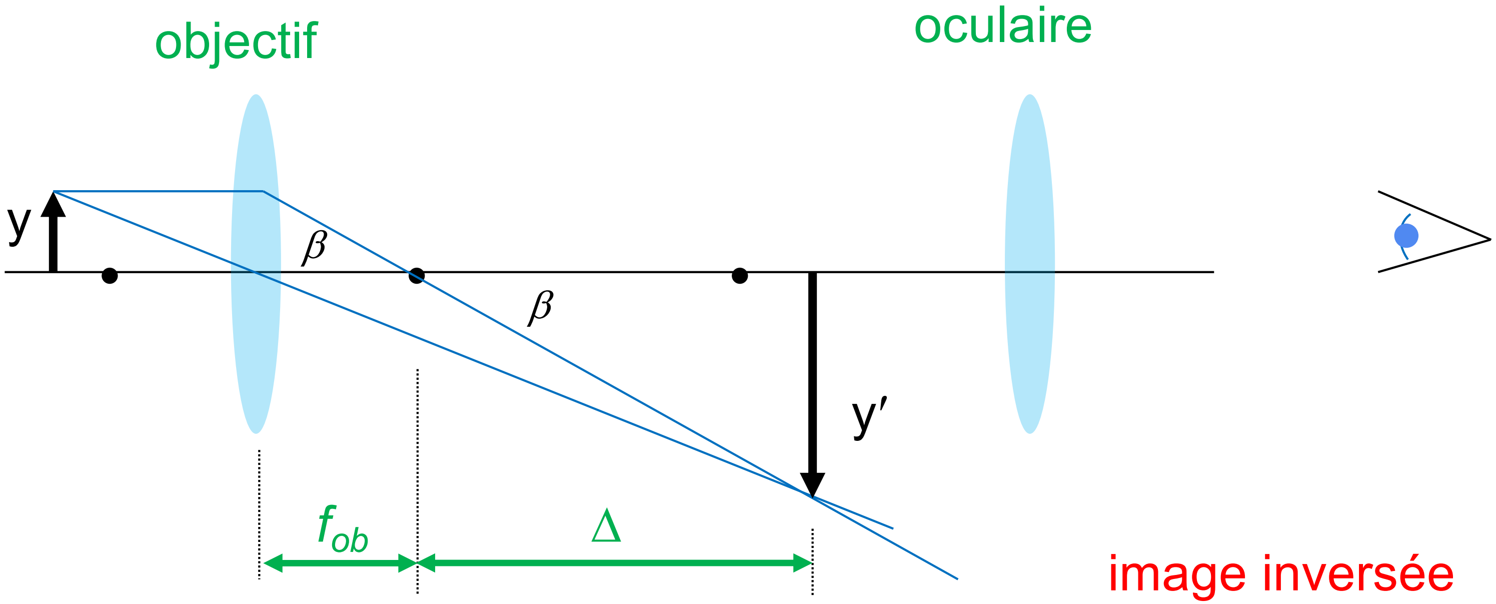
$$\frac{1}{s_o} = \frac{1}{f}$$

Grossissement
$$\begin{cases} G = \dfrac{25\text{ cm}}{f} + 1 & \text{(avec effort)} \\[2ex] G = \dfrac{25\text{ cm}}{f} & \text{(sans effort)} \end{cases}$$

limité par aberration : plus petit *f* admis $\cong$ 3 cm

Grossissement typique : 8x

La microscope optique



Deux lentilles convergentes

1ère lentille : image réelle, agrandie, inversée

$$G_{ob} = \frac{y'}{y} = \frac{\Delta \tan\beta}{f_{ob}\tan\beta} = \frac{\Delta}{f_{ob}}$$

2ème lentille : même principe que la loupe

$$G_{oc} = \frac{25\text{ cm}}{f_{oc}}$$

$$G = G_{ob} \cdot G_{oc}$$

$$G = \frac{\Delta}{f_{ob}} \cdot \frac{25\text{ cm}}{f_{oc}}$$

La lunette afocale de Galilée

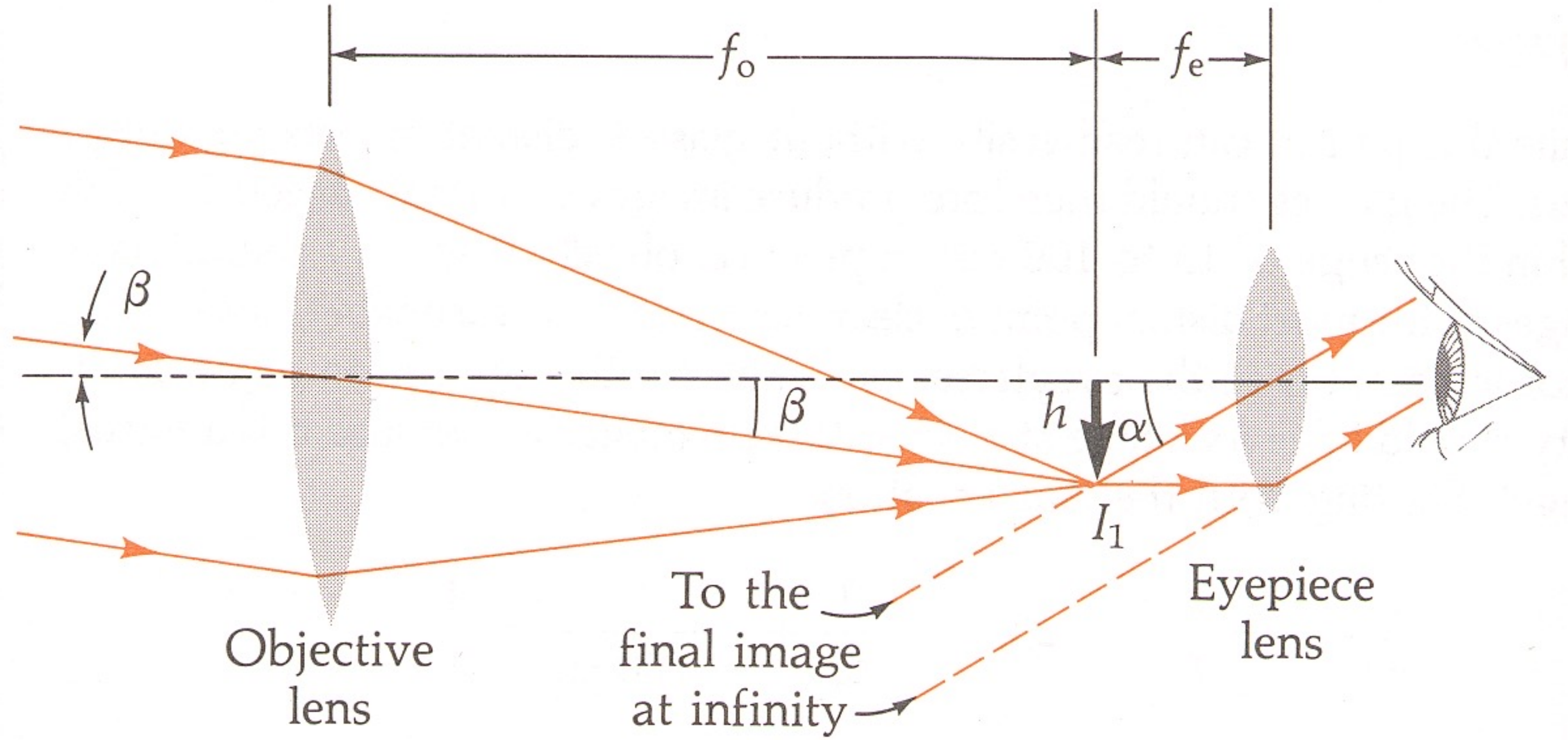


image inversée

Grossissement: $$\frac{\tan\alpha}{\tan\beta} = \frac{h/f_e}{h/f_o} = \frac{f_o}{f_e}$$

Cours 03

Optique géométrique

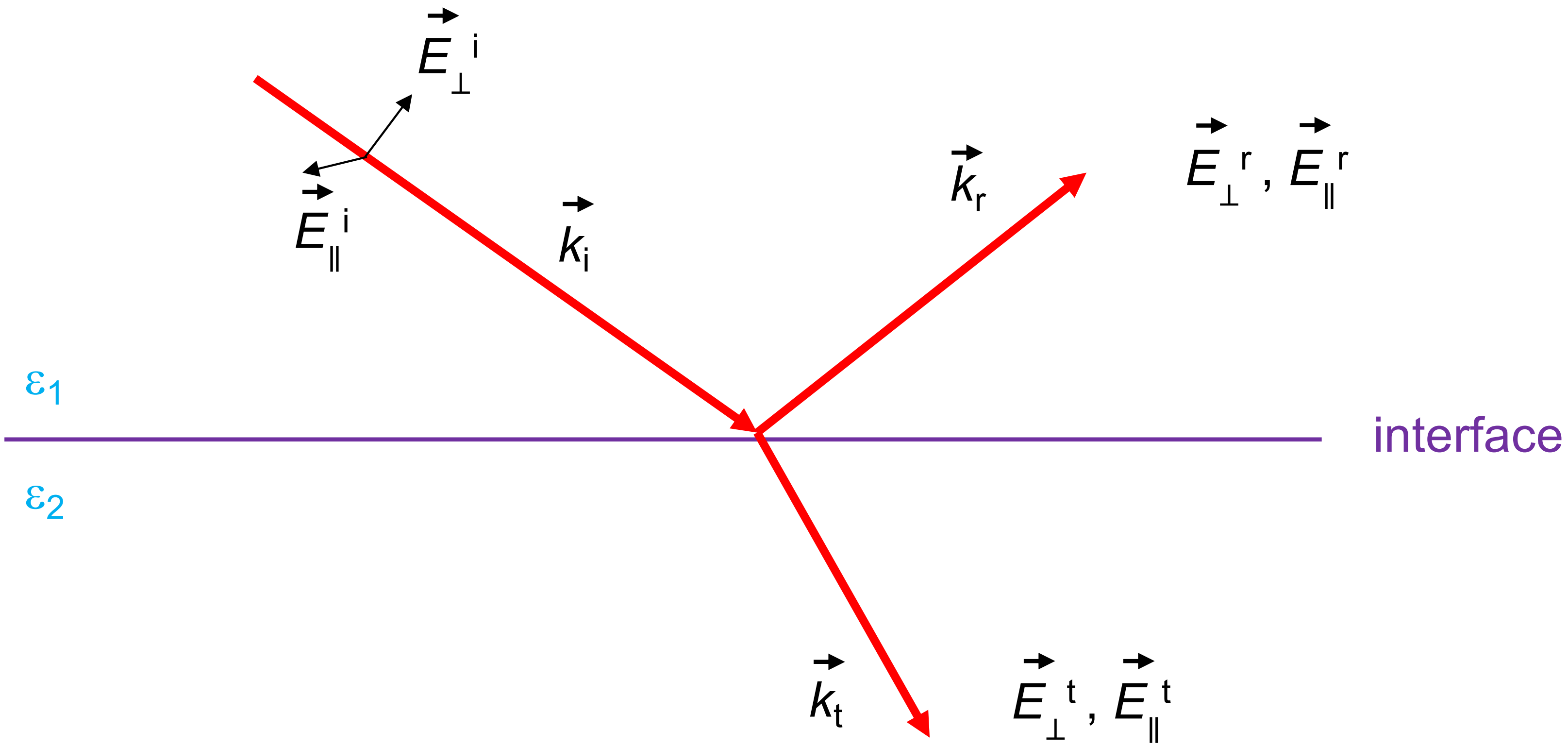
- Instruments d'optique
  Loupe – Microscope – Lunette afocale

Optique physique

- Réfraction avec Eqs. de Maxwell
  - Energie transmise par incidence normale
  - Relations de Fresnel
  - Angle de Brewster

- Interférence
  - Expérience de Young
  - Réseau de N fentes

Réfraction: cas général



$E_\parallel$ composante du champ électrique // à l'interface

$E_\perp$ composante du champ électrique $\perp$ à $E_{/\!/}$

Réfraction: cas général (cont)

Ce problème se résoud en posant les équations de Maxwell dans les deux matériaux. Elles nous donnent une équation d'onde pour le champ électrique de l'onde incidente, réfléchie et transmise :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = u^2 \; \nabla^2 E \qquad \text{où} \qquad u = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0\mu_r\mu_0}}$$

Les amplitudes de ces ondes de champ électrique sont trouvées en posant les conditions aux bords à l'interface :

1. Conditions de continuité de $E_{/\!/}$ et $D_{\perp}$.
2. Conservation de l'énergie.

Réflexion, cas particulier: incidence normale

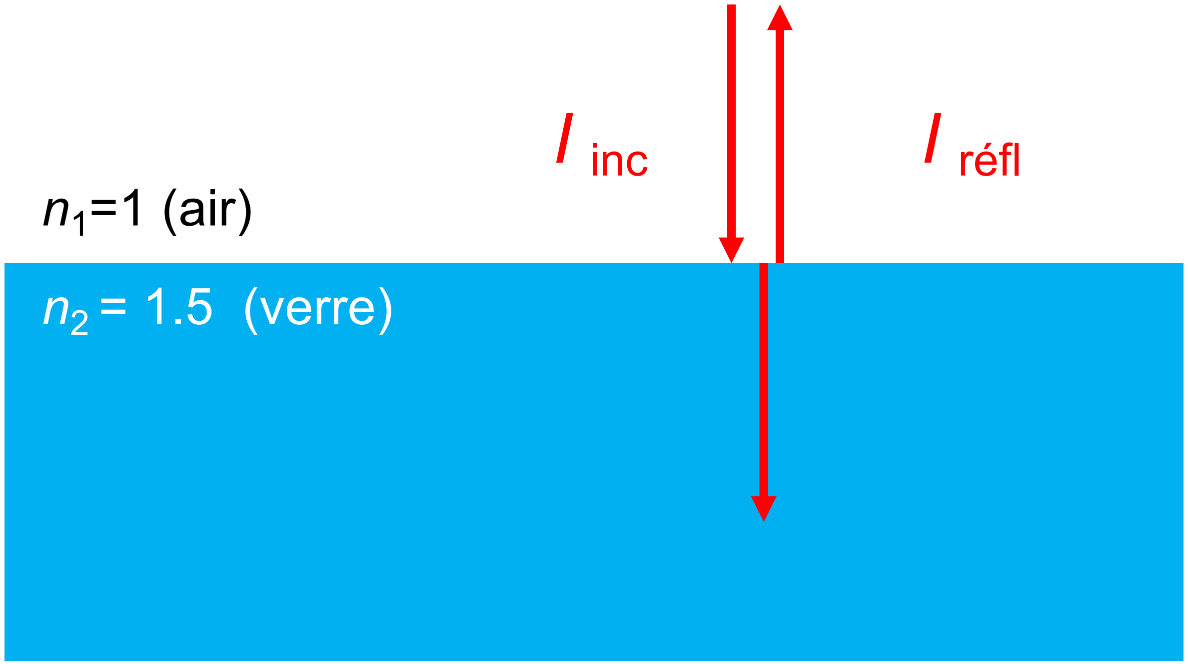
Onde transversale sur une corde

Conservation de l'intensité	Amplitude	Formule I	Phase
$I = \frac{1}{2} Z \, \xi_0^2 \, \omega^2$ où $Z = \rho \, u$ (impédance)	ξ	$\frac{I_{\text{réfl}}}{I_{\text{inc}}} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2$	$\Delta\phi = \pi$ si $Z_2 > Z_1$ $\Delta\phi = 0$ si $Z_2 < Z_1$

Onde électromagnétique à incidence normale

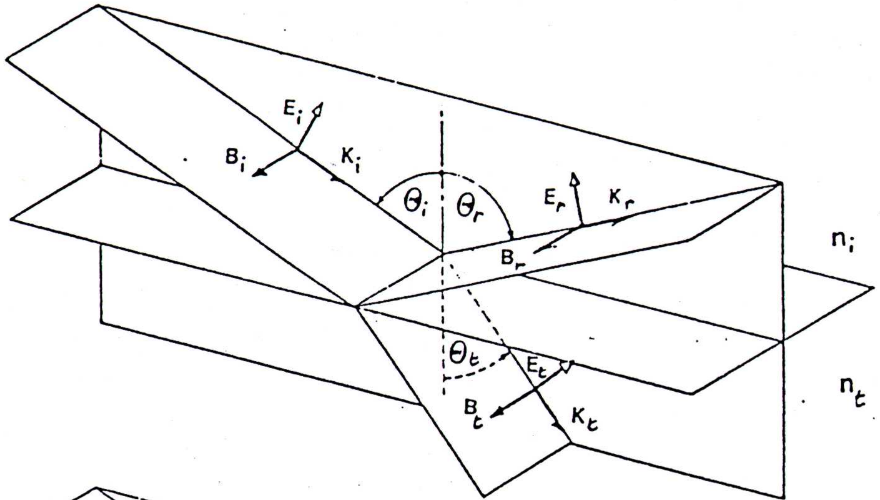
Conservation de l'intensité	Amplitude	Formule I	Phase
$I = u_{\text{ém}} \cdot u = \frac{1}{2} \varepsilon \, \varepsilon_0 \, E_0^2 \cdot c / n$ $= \frac{1}{2} n \, E_0^2 \, \varepsilon_0 \, c$ $\varepsilon = n^2$	E	$\frac{I_{\text{réfl}}}{I_{\text{inc}}} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$	$\Delta\phi = \pi$ si $n_2 > n_1$ $\Delta\phi = 0$ si $n_2 < n_1$

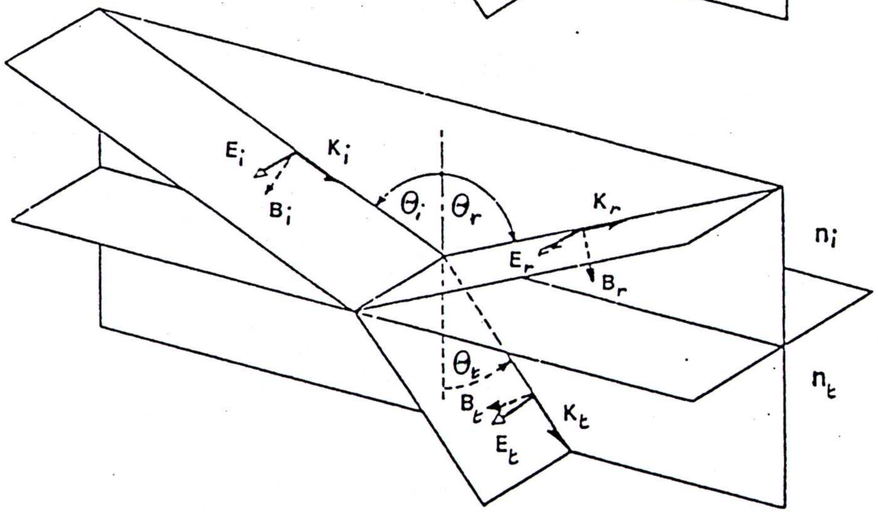
Réflexion, cas particulier: exemple



$$\frac{I_{\text{réfl}}}{I_{\text{inc}}} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 = 4\%$$

Cas général: réflexion et réfraction
Relations de Fresnel





$$\left(\frac{E_{or}}{E_{oi}}\right)_{\perp} = -\frac{n_1 \cos\theta_t - n_2 \cos\theta_i}{n_1 \cos\theta_t + n_2 \cos\theta_i}$$

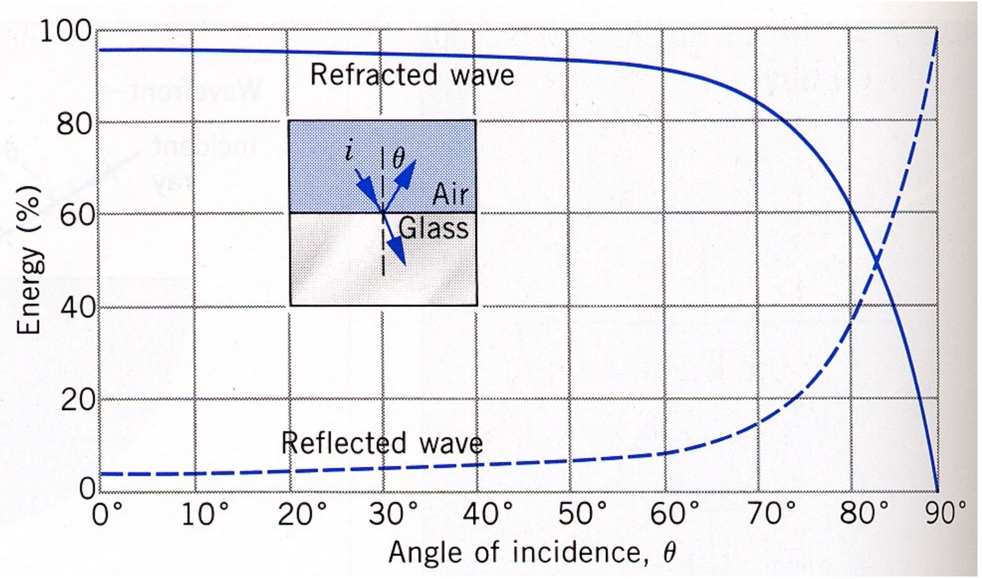
$$\left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}}\right)_{\perp} = \frac{2\, n_1 \cos\theta_i}{n_1 \cos\theta_t + n_2 \cos\theta_i}$$

$$\left(\frac{E_{or}}{E_{oi}}\right)_{/\!/} = \frac{n_1 \cos\theta_i - n_2 \cos\theta_t}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_t}$$

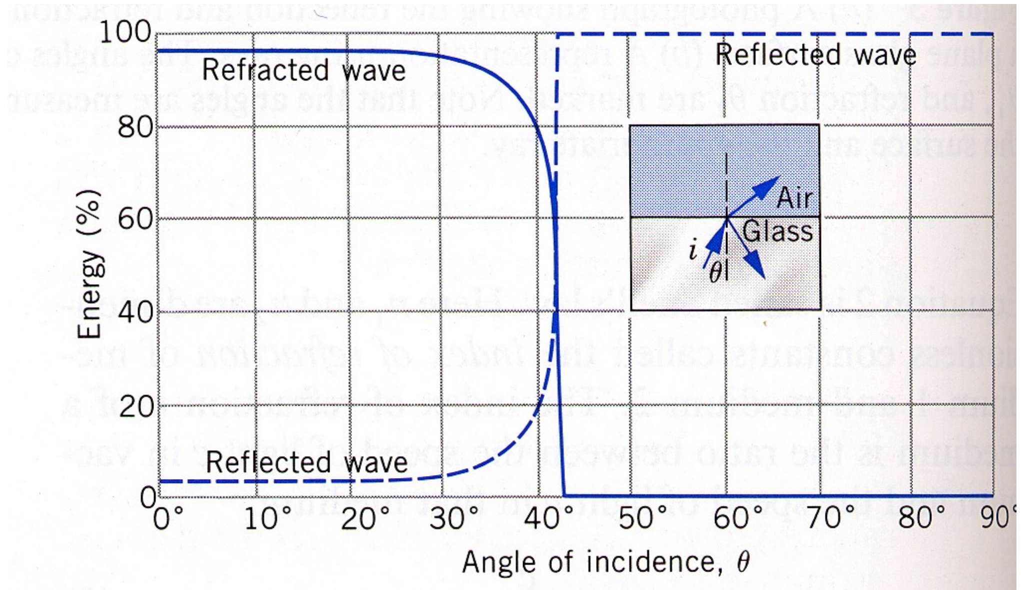
$$\left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}}\right)_{/\!/} = \frac{2\, n_1 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_t}$$

Intensité réfléchie et transmise

$n_1 < n_2$



$n_1 > n_2$



L'intensité réfléchie augmente avec l'angle d'incidence.

On retrouve le cas d'incidence normale pour $\theta_i = 0$.

Angle de Brewster

Après la réflexion, la composante du champ électrique non-parallèle à l'interface peut s'annuler. La relation de Fresnel donne :

$$\left(\frac{E_{or}}{E_{oi}}\right)_{\perp} = -\frac{n_1 \cos\theta_t - n_2 \cos\theta_i}{n_1 \cos\theta_t + n_2 \cos\theta_i}$$

d'où la condition d'annullement : $n_1 \cos\theta_t - n_2 \cos\theta_i = 0$

d'autre part la relation de Snell-Descartes donne : $n_1 \sin\theta_i - n_2 \sin\theta_t = 0$

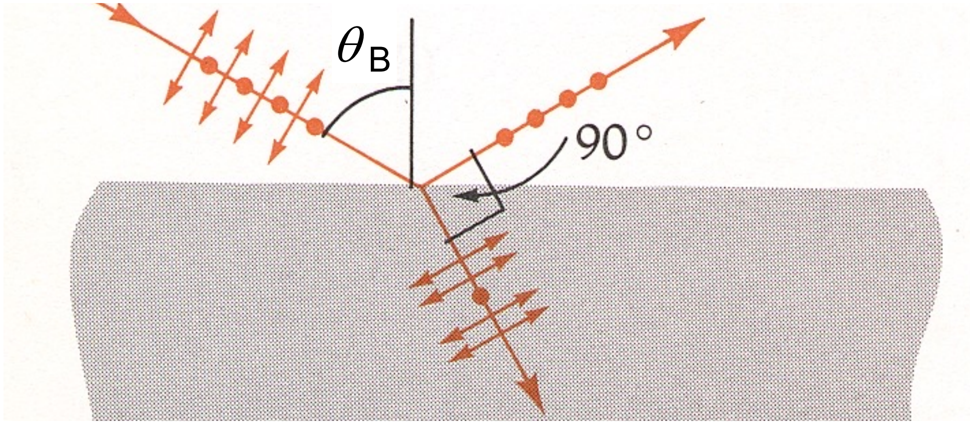
Ces deux équations sont satisfaites pour $\theta_t = \pi / 2 - \theta_i$

On a alors $\sin\theta_t = \cos\theta_i$ et l'équation de Snell-Descartes devient :

$$n_1 \sin\theta_i - n_2 \cos\theta_i = 0 \quad \Rightarrow \quad \tan\theta_i = \frac{n_2}{n_1}$$

Angle de Brewster (cont)

$$\tan\theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$



Exemple pour le verre:

$n_2 / n_1 = 1.5 \;\Rightarrow\; \theta_B = 56°$

$$\theta_t = \pi / 2 - \theta_i$$

- Une onde incidente à l'angle de Brewster donne, après réfléxion, une onde avec une polarisation // à la surface.
- Un polariseur avec un axe vertical élimine une grande partie de la lumière réfléchie, par exemple sur la neige.

Cours 03

Optique géométrique

- Instruments d'optique
  Loupe – Microscope – Lunette afocale

Optique physique

- Réfraction avec Eqs. de Maxwell
  - Energie transmise par incidence normale
  - Relations de Fresnel
  - Angle de Brewster

- Interférence
  - Expérience de Young
  - Réseau de *N* fentes

Interférence

Propriété ondulatoire

Cohérence

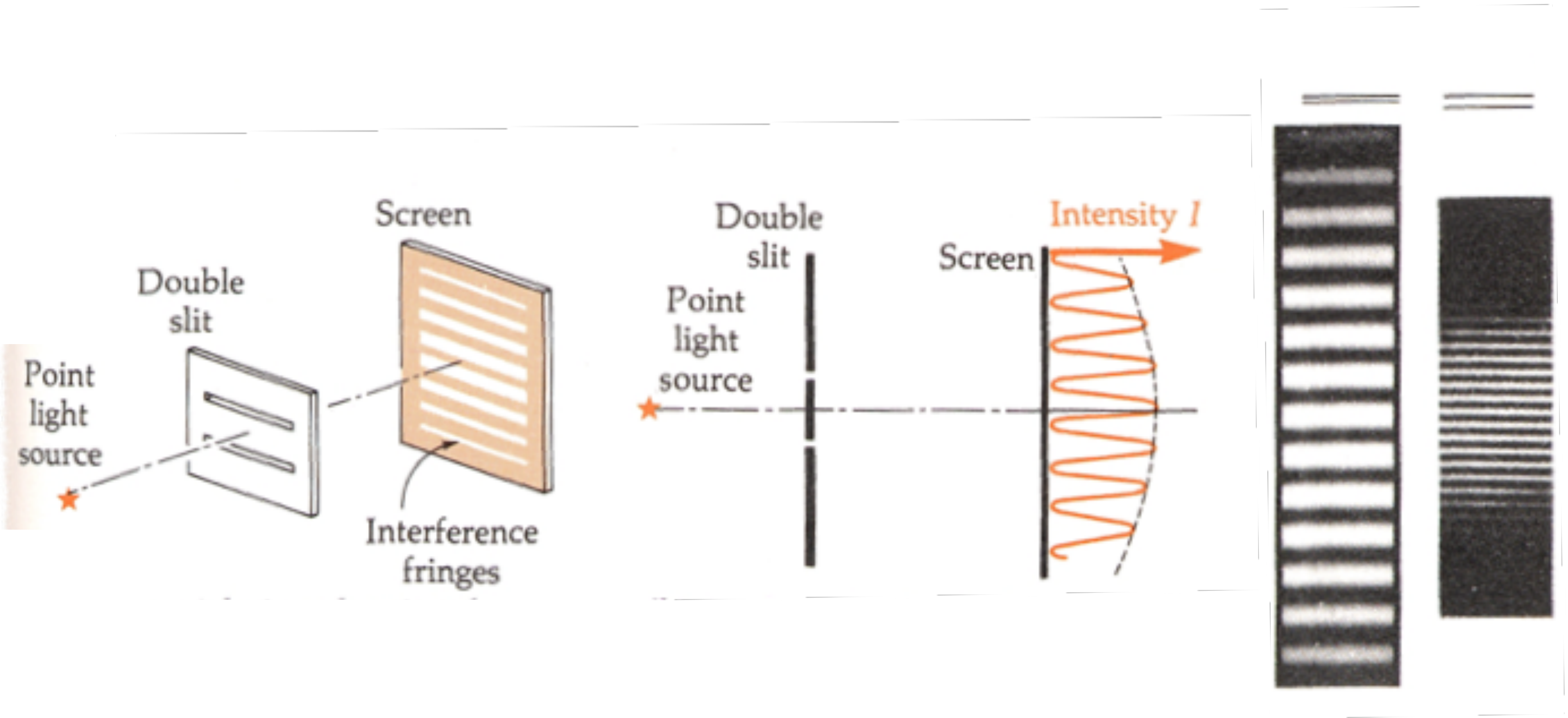
Deux sources sont cohérentes si elles ont la même *longueur d'onde* (lumière monochromatique) et si leur *différence de phase se maintient constante* dans le temps.

Principe de superposition

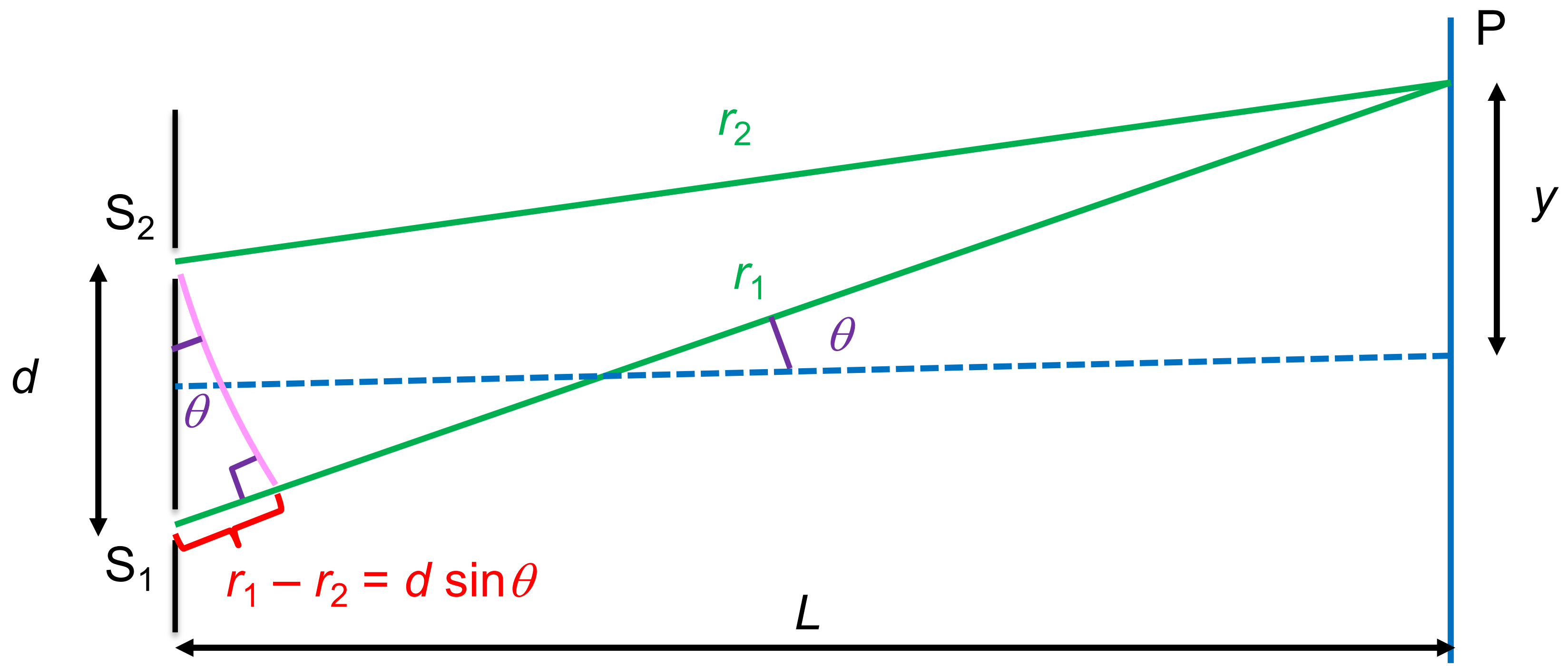
Critères pour interférence

1. Cohérence
2. Les champs électriques qui interfèrent doivent être dans la *même direction*.

Expérience de Young (1802-1803)



Expérience de Young



Au point P :

$$E_1(r_1, \theta, t) = E_0 \sin[kr_1 - \omega t + \phi_1(t)]$$

$$E_2(r_2, \theta, t) = E_0 \sin[kr_2 - \omega t + \phi_2(t)]$$

- Les champs E_1 et E_2 sont alignés dans la même direction
- Les phases $\phi_1(t)$ et $\phi_2(t)$ fluctuent individuellement

Expérience de Young

Avec une seule fente ouverte, l'intensité est donnée par

$$I_0(r_1) = \epsilon_0 c \langle E_1^2 \rangle = \tfrac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2$$

$$I_0(r_2) = I_0(r_1) = \tfrac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2$$

$$\langle \sin^2 \omega t \rangle = \tfrac{1}{2}$$

Intensité des deux ondes en superposition au point P :

$$\begin{aligned} I(\mathrm{P}) &= \epsilon_0 c \langle (E_1 + E_2)^2 \rangle \\ &= \epsilon_0 c \langle E_1^2 \rangle + \epsilon_0 c \langle E_1^2 \rangle + 2\epsilon_0 c \langle E_1 \cdot E_2 \rangle \\ &= \quad I_0 \quad + \quad I_0 \quad + \quad \ldots \end{aligned}$$

$$\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$$

Il reste à évaluer :

$$\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = E_0^2 \langle \sin(kr_1 - \omega t + \phi_1) \sin(kr_2 - \omega t + \phi_2) \rangle$$

$$\sin\alpha \sin\beta = \tfrac{1}{2}[\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

Expérience de Young

1. Cas cohérent

$$\Delta\phi(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t) = \text{constant} \qquad \phi_1(t) + \phi_2(t) = \text{fluctue}$$

$$\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = \tfrac{1}{2} E_0^2 \{ \langle \cos[k(r_1 - r_2) + \phi_1 - \phi_2] \rangle - \underbrace{\langle \cos[k(r_1 + r_2) + 2\omega t + \phi_1 + \phi_2] \rangle}_{\langle \cos(\ldots) \rangle = 0} \}$$

Dans le cas particulier $\Delta\phi = 0$:

$$\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = \tfrac{1}{2} E_0^2 \langle \cos[k(r_1 - r_2)] \rangle$$

$$I(\mathrm{P}) = 2I_0 + \epsilon_0 c E_0^2 \cos[k(r_1 - r_2)] = 2I_0\{1 + \cos[k(r_1 - r_2)]\}$$

$$= 4I_0 \cos^2[k(r_1 - r_2)/2]$$

$$\cos\theta + 1 = 2\cos^2(\theta/2)$$

2. Cas non-cohérent

$$\phi_1(t) - \phi_2(t) = \text{fluctue} \qquad \phi_1(t) + \phi_2(t) = \text{fluctue}$$

$$\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = 0$$

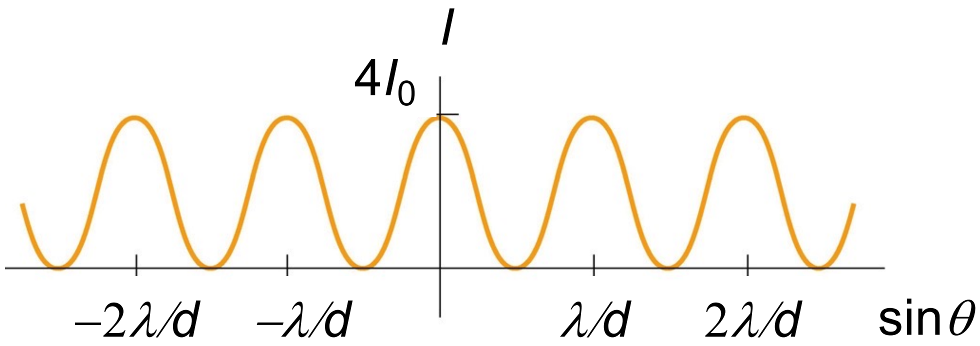
$$I(\mathrm{P}) = 2I_0$$

Expérience de Young

Intensité dans le cas cohérent

$$I(\mathrm{P}) = 4I_0 \cos^2[k(r_1 - r_2)/2]$$

$k = 2\pi/\lambda$ $\qquad$ $r_1 - r_2 = d \sin\theta$



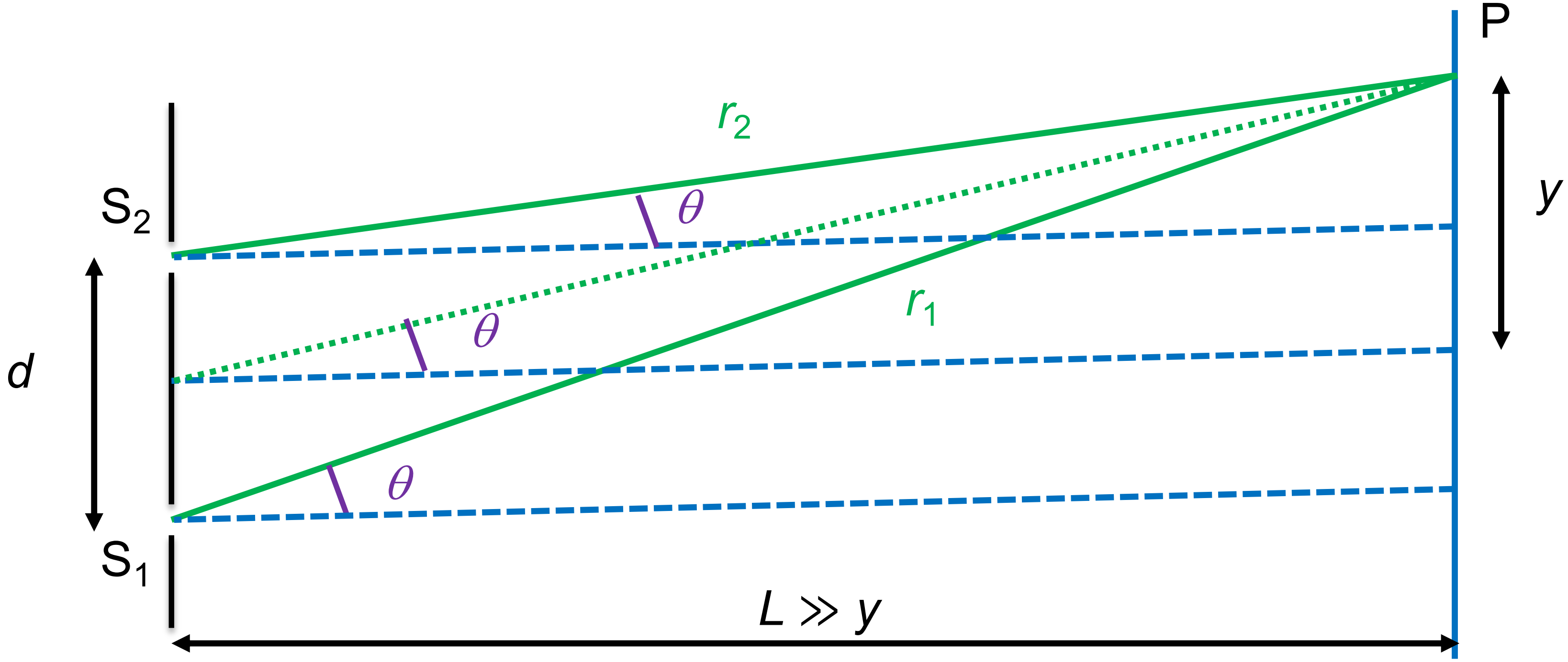
$$I(\mathrm{P}) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}\right)$$

frange d'ordre n

Maxima $\qquad \dfrac{\pi d \sin\theta}{\lambda} = n\pi \qquad \Rightarrow \qquad d \sin\theta = n\lambda$

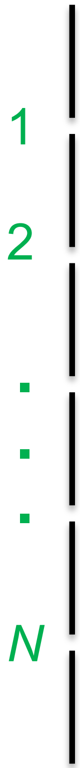
Minima $\qquad \dfrac{\pi d \sin\theta}{\lambda} = (n + \frac{1}{2})\pi \qquad \Rightarrow \qquad d \sin\theta = (n + \frac{1}{2})\lambda$

Expérience de Young



- Pour les petits angles ($L \gg y$) : $\sin\theta \cong \tan\theta \cong \dfrac{y}{L}$
- La condition des maxima devient alors : $\dfrac{dy}{L} = n\lambda$ Donc, $d \downarrow \; \Rightarrow y \uparrow$
- Possibilité de mesurer λ par cette experience !

Réseau de *N* fentes



2 fentes

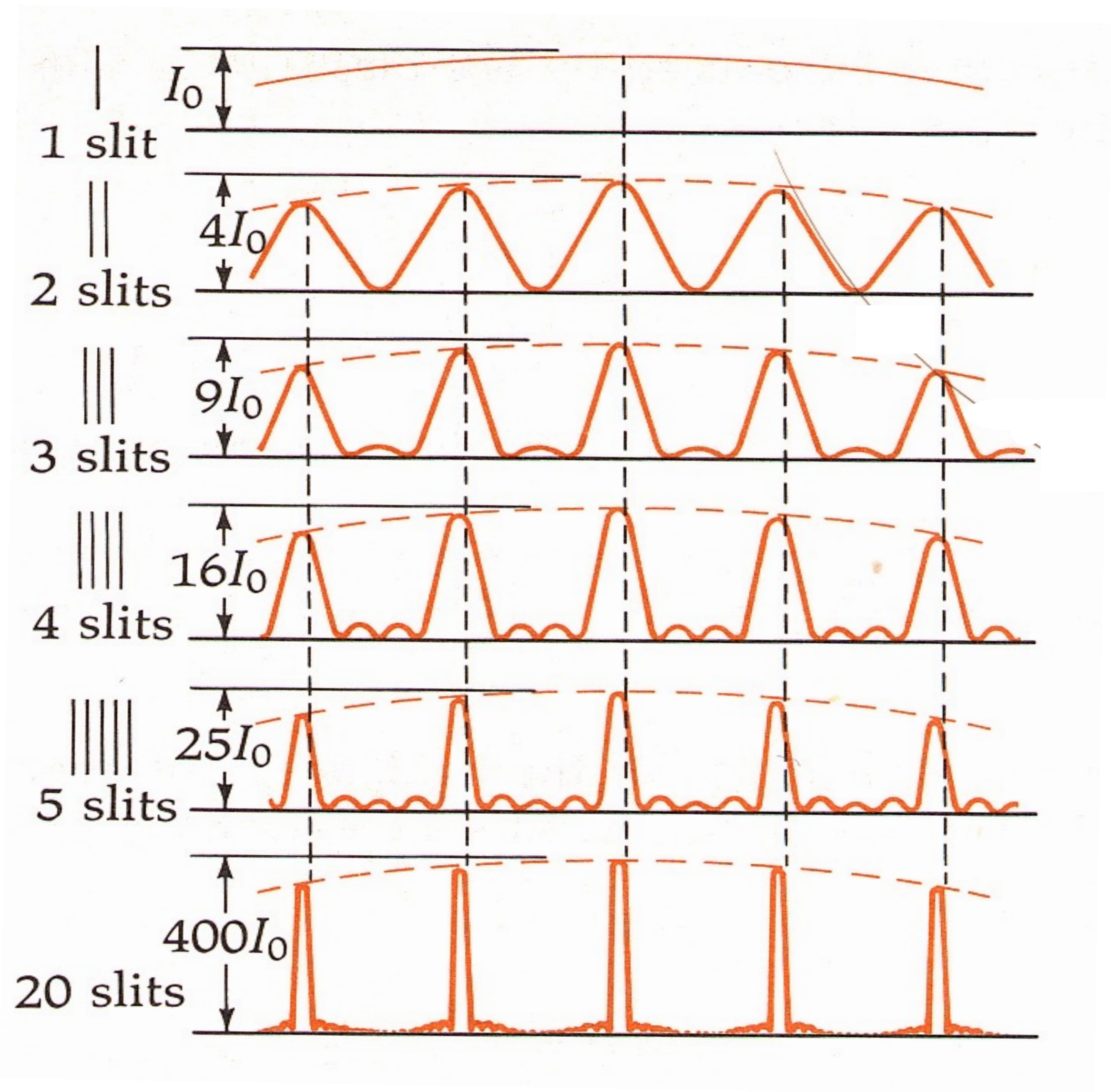
$$I(\mathrm{P}) = 4I_0 \cos^2(\Delta/2)$$

N fentes

$$I(\mathrm{P}) = I_0 \frac{\sin^2(N\Delta/2)}{\sin^2(\Delta/2)}$$

où $\Delta = 2\pi d \sin\theta / \lambda$

Réseau de *N* fentes : propriétés



Propriétés

1. Franges principales dans les mêmes positions que pour 2 franges.

2. L'intensité des franges principales augmente comme N^2.

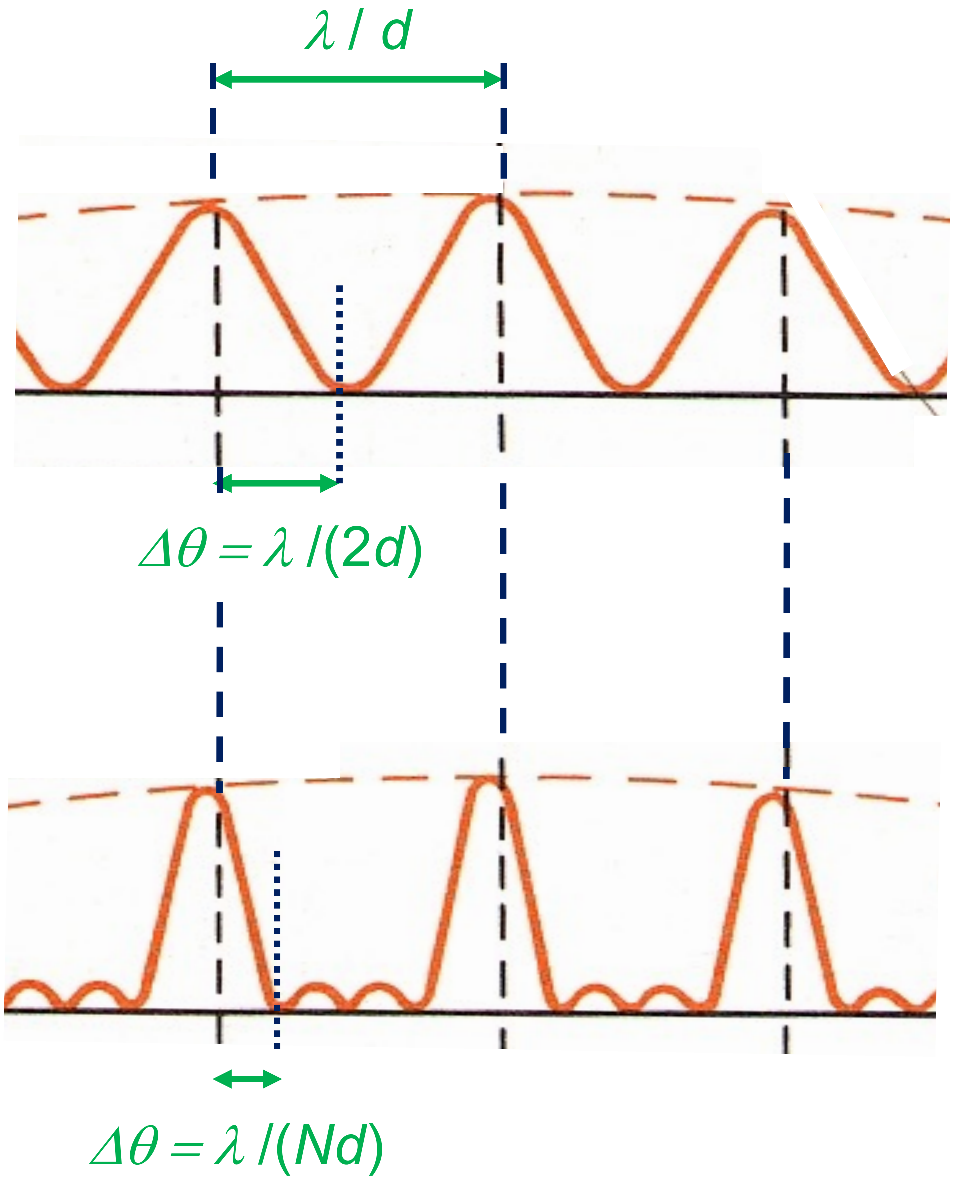
3. Les franges principales deviennent plus étroites lorsque N augmente.

4. Apparition de $N - 2$ franges secondaires entre les franges principales

Réseau de *N* fentes : largeur des franges

2 fentes

N fentes



Cours 03

Optique géométrique

- Instruments d'optique
  Loupe – Microscope – Lunette afocale

Optique physique

- Réfraction avec Eqs. de Maxwell
  - Energie transmise par incidence normale
  - Relations de Fresnel
  - Angle de Brewster

- Interférence
  - Expérience de Young
  - Réseau de *N* fentes