

Prerequis: - Optique géométrique

↳ à revoir ④ précis

măca Ceraului 2 flori sur ead)

- ↳ optique (ball de savon, verre, **CD**)

- ↳ acoustique

- ↳ dimension de l'amplitude

↳ $\hat{c}$ Resonance frequency

1- Séparation de deux ordres macrochromatiques

1- Superposition de deux ondes monochromatiques

2 ondes lumineuses progressives, de source S_1 et S_2 , monochromatiques, polarisées rectilignement, représentées par les champs électrique vectoriel.

avec $\varphi_1(H) = \varphi_0 + \frac{c_{12}}{c_{11}} \varphi_2(H)$ retard de phase

La phase initiale aléatoire



→ Champ électrique résultant $\vec{E}(M, t) = \vec{E}_1(M, t) + \vec{E}_2(M, t)$

→ Eclaircissement: valeur moyenne du carré de l'amplitude densité volumique de courant $\vec{J}$ calculée / durée d'intégration du capteur (temps de mesure)

$$\boxed{\varepsilon(H) = \langle \|\pi\| \rangle_{\text{od}} = K \langle \|E(H)^2\| \rangle_{\text{od}}} \quad [W.m^{-2}] \sim \text{Puissance surfacique}$$

→ Fréquences ondes lumineuses ($\sim 10^{14}$ Hz) trop importante pour que nos capteurs rendent compte de la variation de $\vec{E}$ $\Rightarrow$ moyennage

en effet, période temporelle limitée $\sim 10^{-14}$ s

Or $\text{ADG} \text{ Oed} : 1/24 \text{ s}$

сеп: 10^{-2} м

photodiode: $10^{-6} \Omega$

$$\Rightarrow E(M, t) = \underbrace{K \langle \|\vec{E}_1(M, t)\|^2 \rangle}_{E_1(M, t)} + \underbrace{K \langle \|\vec{E}_2(M, t)\|^2 \rangle}_{E_2(M, t)} + \underbrace{K \langle 2\vec{E}_1(M, t) \cdot \vec{E}_2(M, t) \rangle}_{E_{12}(M, t)} \quad (2)$$

$\text{coss} \text{ comb} = \frac{1}{2} (\text{coss} + \text{comb})$

Terme d'interférence

$$\begin{aligned} E_{12}(M, t) &= K \langle 2\vec{E}_1 \cos(\omega_1 t - \varphi_1) \cdot \vec{E}_2 \cos(\omega_2 t - \varphi_2) \rangle_{\text{cd}} \\ &= K \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos(\omega_1 t - \varphi_1 + \omega_2 t - \varphi_2) \rangle_{\text{cd}} + K \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos(\omega_1 t - \varphi_1 - \omega_2 t + \varphi_2) \rangle_{\text{cd}} \end{aligned}$$

(*)

$\cos(\omega_1 t - \varphi_1) \cos(\omega_2 t - \varphi_2) \xrightarrow{\text{moyenne en temps}} \cos(\omega_1 t - \varphi_1) \cos(\omega_2 t - \varphi_2)$ Terme nombre de fois est pair.

2. Conditions d'interférences.

Interférences visibles si $E_{12} \neq 0 \Rightarrow$ ondes cohérentes.

Or si $\left. \begin{aligned} &2 \text{ ondes dans un } \perp \Rightarrow \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = 0 \\ &\text{si } \omega_1 \neq \omega_2 \quad (*) \propto \langle \cos(\omega t - \varphi) \rangle_{\text{cd}} = 0 \end{aligned} \right\} E_{12} = 0 \Rightarrow \text{ondes incohérentes.}$
 $\Rightarrow E = E_1 + E_2$ (addition éclairément)

Si $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ (ondes synchrones) $\Rightarrow E_{12} = K \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \rangle = K \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos \Delta\varphi \rangle$

avec $\Delta\varphi = \frac{\omega}{c} [(S_2 M) - (S_1 M)] + \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} S(M) + \Delta\varphi_0$

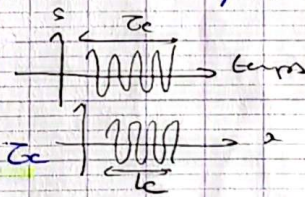
$\Delta\varphi_0$ varie de manière aléatoire

Modèle du train d'onde: atome dans état excité peut émettre spontanément un photon, l'état excité a une durée de vie τ_e $\approx$ durée de l'émission.

Chaque émission $\Rightarrow$ train d'onde de durée limitée τ_e

• longueur λ $\lambda_e = c \tau_e$

$\Rightarrow$ photon émis par atome = train d'onde fini.



$\Rightarrow$ Source $\Rightarrow$ émission de $\neq$ trains d'onde avec des déphasages aléatoires les uns par rapport aux autres

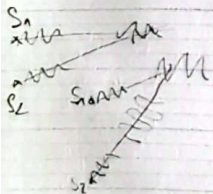
$\Rightarrow \Delta\varphi$ varie aléatoirement au cours du temps $\Rightarrow \langle \cos \rangle = 0 \Rightarrow E_{12} = 0$

$\Downarrow$ Pour avoir interférences il faut avoir les m trains d'ondes pour avoir $\Delta\varphi = \text{const}$

$\Rightarrow$ trains d'ondes issus de m source primaire $\oplus$ $S < \lambda_e$

$\Rightarrow$ dispositifs interférentiels "dérivent" source primaire S en 2 sources secondaires, mutuellement cohérentes, qui délivrent m séquences train d'ondes

(• division du front d'onde • division d'amplitude.)



Bien pour avoir interférences:

entre 2 ondes lumineuses:

$\rightarrow \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \neq 0$

$\rightarrow$ synchrones ($\omega_1 = \omega_2$)

$\rightarrow$ m source (mutuellement cohérentes).

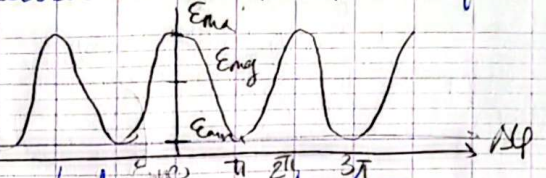
$\Rightarrow E_{12} = K \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos \Delta\varphi \rangle$ avec $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} S(M)$

3. Phénomène d'interférences

(3)

Formule de Fresnel (éclairage par interférences lumineuses 2 ondes monochromatiques de même polarisation)

$$E(M) = E_1(M) + E_2(M) + 2 \sqrt{E_1 E_2} \cos \Delta\phi$$



Suivant signe $\cos \Delta\phi \rightarrow E(M) > E_1(M) + E_2(M) \sim$ interférences constructives

$$E_{\max} \text{ pour } \cos(\Delta\phi) = 1 \Rightarrow \Delta\phi = k 2\pi \quad k \in \mathbb{N}$$

$\Rightarrow$ franges claires (p entier)

$\rightarrow E(M) < E_1(M) + E_2(M) \sim$ interférences destructives

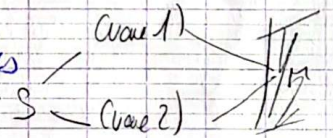
$$E_{\min} \text{ pour } \cos(\Delta\phi) = -1 \Rightarrow \Delta\phi = (k + \frac{1}{2}) 2\pi$$

$\Rightarrow$ franges sombres (p demi entier)

$\Rightarrow$ Ordre d'interférence $p = \frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{s}{\lambda}$

Si source incohérente $\Rightarrow E(M) = 2 E_0 (1 + \cos \Delta\phi)$

* Champ d'interférence: zones de l'espace éclairées par les 2 ondes cohérentes
 $\Rightarrow$ interférences potentiellement observables.



* Contraste

$$C = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}$$

$C \in [0, 1]$

$\hookrightarrow$ éclaircissement uniforme

diff de luminosité bien marquée

$\Rightarrow E(M) = E_{\max} (1 + C \cos \Delta\phi)$

II. Dispositif interférentiel par division du front d'onde: les fentes/trous d'Young

1. Présentation du dispositif et observations.

Source ponctuelle S avec le laser $\rightarrow$ éclaire les fentes Young "à grande distance"
+ écran loin au delà des fentes.

$\hookrightarrow$ créations des 2 vagues / sources secondaires mutuellement cohérentes.

Observations: - franges verticales

- non localisées (peuvent grandir tout écran): observables en tout point du champ d'interférence

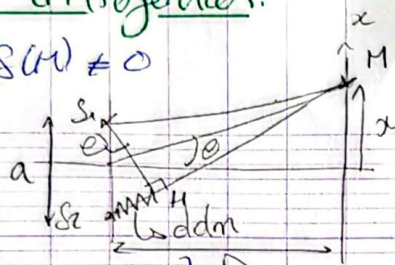
- si on change "a" ou "D" distance entre fentes change

- invariance par translation suivant y et z

2. Figure d'interférences.

Interférences $\Rightarrow S(M) \neq 0$

Calcul de d_{dm}



Or $\delta = a \sin \theta \approx a \theta$

et $\theta \approx \tan \theta = \frac{x}{D}$

$\delta = \frac{ax}{D}$

$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{ax}{D}$ et $p = \frac{ax}{D\lambda}$

$\Rightarrow I(M) = 2I_0 \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{ax}{D} \right) \right)$ $\rightarrow$ dépend que de x $\rightarrow$ franges rectilignes alternativement sombres et brillantes

Interfrange = période spatiale de l'éclairement = i

Or frange claire $\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{ax_p}{D} = p 2\pi \quad p \in \mathbb{N} \Rightarrow x_p = p \frac{\lambda D}{a}$

$\Rightarrow i$ = distance entre 2 franges claires $= x_{p+1} - x_p = \frac{\lambda D}{a} = i$

$\Rightarrow I(M) = 2I_0 \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{i} \right) \right)$

Expe: on trace $i = f(\lambda) \Rightarrow$ coeff directeur = $\frac{1}{a} < \frac{1}{a}$ si autre connu.

Δ facteur sur incertitude $\rightarrow$ plutôt 1?

Ici source ponctuelle monochromatique, que se passe-t-il si:
 $\rightarrow$ on élargit spatialement la source $\rightarrow$ pas ponctuelle!
 $\rightarrow$ pas monochromatique!

III. Notion de cohérence

1. Élargissement spatial de la source: cohérence spatiale.

a) 2 sources ponctuelles incohérentes.

Avec QI + fente fine $\Rightarrow$ source ponctuelle S

expe: on déplace la fente fine $\Rightarrow$ interférences bougent.

Si on considère 2 sources ponctuelles S en O et S' en b $\Rightarrow$ incohérentes

$\Rightarrow \Sigma$ éclaircissements $\Rightarrow$ brouillage (sinu).

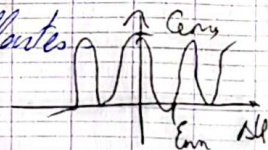
$\hookrightarrow$ revoir graph $\sin$ $\Rightarrow$ mettre m échelle

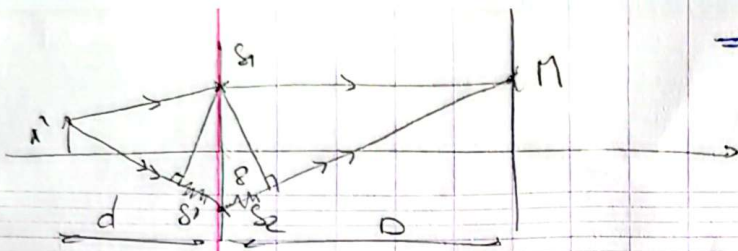
b) Source étendue = décompose source en un ensemble de sources élémentaires ponctuelles mutuellement incohérentes $\Rightarrow \Sigma$ éclaircissements.

b = largeur de la source $\ll D$.
 $\ll d$.

$\delta = (S_2M) - (S_1M) = S_2M - S_1M$
 $\xrightarrow{\text{nav} = 1}$

Even lam $\Rightarrow y \ll D, x \ll D \Rightarrow \theta$ petit
 $\Rightarrow \sin \theta \approx \theta \approx \tan \theta$





⇒ On introduit une 2^{ème} donnée supplémentaire ⑤

$$S' = \frac{ax'}{d} \quad (\text{m'ème démo})$$

$$\Rightarrow S_{\text{tot}} = S + S' = \frac{ax}{D} + \frac{ax'}{d}$$

Contribution élémentaire à l'éclairement de la source élémentaire en x

$$dE(M) = A \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} S_{\text{tot}}\right) \right) dx' \quad \text{avec } A = \text{const}$$

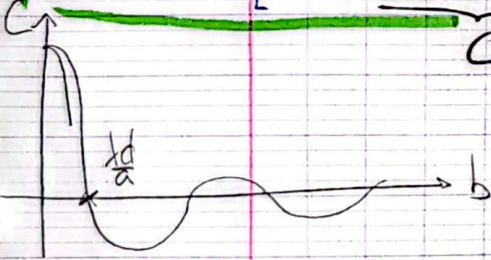
Mutuellement incohérentes $\Rightarrow E(M) = \int_{-b/2}^{b/2} dE(M)$

$$\begin{aligned} \Rightarrow E(M) &= A \left[b + \frac{\lambda d}{2\pi a} \left(\sin\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \left(\frac{x}{D} + \frac{b}{2d}\right)\right) - \sin\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \left(\frac{x}{D} - \frac{b}{2d}\right)\right) \right) \right] \\ &= Ab \left[1 + \frac{\lambda d}{2\pi ab} \sin\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \frac{b}{2}\right) \cos\left(\frac{2\pi a}{\lambda} x\right) \right] \end{aligned}$$

$\sin(a+b) - \sin(a-b) = 2\sin a \cos b$

$E_0 = Ab$

$$E(M) = E_0 \left[1 + \underbrace{\text{sinc}\left(\frac{\pi ab}{\lambda d}\right)}_{C = |\text{sinc}|} \cos\left(\frac{2\pi a}{\lambda} x\right) \right]$$



⇒ brouillage global sur écran.

- C $\propto$ $\frac{b}{\lambda d}$, C indep de x (indep de S, m'entah point du champ)
- $\text{qd } b = \frac{\lambda d}{a} \Rightarrow C = 0 \Rightarrow$ brouillage
- ⇒ longueur de cohérence spatiale = 0 petite valeur de S qui annule le contraste $\Rightarrow \boxed{l_c = \frac{\lambda d}{a}}$
- puis inversion du contraste

⇒ Bon contraste si $b \ll l_c$
 $\Rightarrow b \ll \frac{\lambda d}{a} \Rightarrow \frac{ab}{\lambda d} \ll 1$

$a \ll l_c = \frac{\lambda}{\theta}$ avec θ angle sous lequel est vue la source depuis l'écran.

$\frac{d}{a} \approx \theta \Rightarrow l_c = \frac{\lambda}{\theta}$
 Expe $\rightarrow$ faire le fit sur les points n'importe par trouver b

2. Élargissement spectral de la source : cohérence temporelle

a) Doublet de Lyman d'or

$2\lambda \neq \Rightarrow 2\omega \neq \Rightarrow$ interférences entre les 2 ondes de $\lambda \neq \Rightarrow$ asynchrone

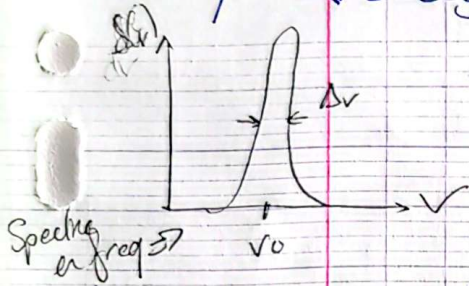
$\Rightarrow \Sigma$ éclaircissement $\Rightarrow$ contraste pas uniforme

↳ coïncidence (frange dense + dense)

↳ anti-coïncidence (frange dense + sombre) $\Rightarrow$ brouillage

D Source de faible largeur spectrale → distribution spectrale des points. ⑥

On a vu que $\delta \leq l_c = c \tau_c$ → durée finie du train d'onde = temps de cohérence temporelle

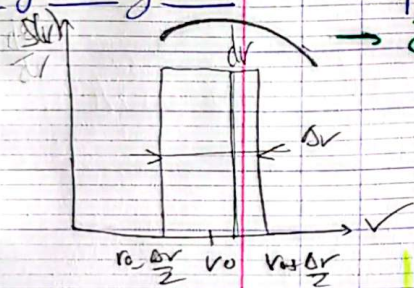


→ densité spectrale de la source centrée autour freq ν_0 avec largeur spectrale $\Delta \nu$ ($\Delta \nu$ est petite, source monochromatique)

Or $\tau_c \Delta \nu \approx 1 \Rightarrow \tau_c = \frac{1}{\Delta \nu}$

et $\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \Delta \nu = \frac{c \Delta \lambda}{\lambda_0^2} \Rightarrow l_c = c \tau_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda}$ (pour $\lambda \sim \text{cm} - \text{m}$)

Profil rectangulaire



→ spectre continu dans intervalle autour $\nu_0 \Rightarrow \infty$ de $\lambda \Rightarrow$ incohérentes $\Rightarrow \Sigma E$

→ $\hat{c}$ fenêtre liée à épaisseur source cohérente spectrale

→ On se ramène à une onde ^{monochromatique} ν_0

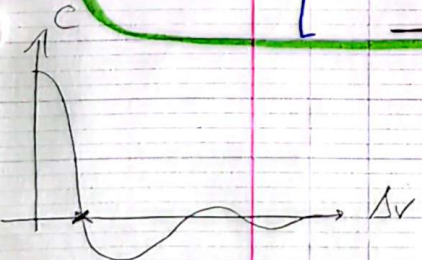
→ Contribution élémentaire à élargissement de $\Delta \nu$

$dE(\nu) = B \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \delta \right) \right) d\nu$ $\lambda = \frac{c}{\nu}$
 $= B \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi \nu \delta}{c} \right) \right) d\nu$

mutuellement incohérentes $\Rightarrow E(\nu) = \int_{\nu_0 - \Delta \nu/2}^{\nu_0 + \Delta \nu/2} dE(\nu)$

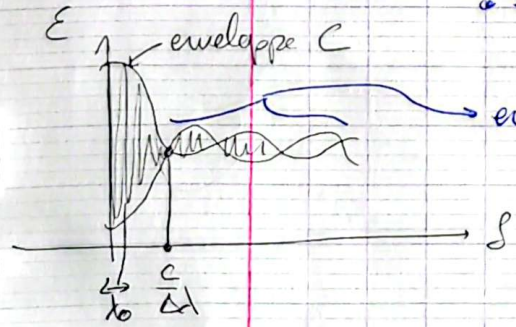
$\Rightarrow E(\nu) = B \left[\nu_0 + \frac{\Delta \nu}{2} - \nu_0 + \frac{\Delta \nu}{2} + \frac{cD}{2\pi a x} \left(\sin \left(\frac{2\pi}{c} \left(\frac{\Delta \nu}{2} + \nu_0 \right) \frac{a x}{D} \right) - \sin \left(\frac{2\pi}{c} \left(\frac{\Delta \nu}{2} - \nu_0 \right) \frac{a x}{D} \right) \right) \right]$
 $= B \Delta \nu \left[1 + \frac{cD}{2\pi a x} \cdot 2 \sin \left(\frac{2\pi}{c} \frac{a x}{D} \frac{\Delta \nu}{2} \right) \cos \left(\frac{2\pi}{c} \frac{a x}{D} \nu_0 \right) \right]$
 $= E_0 \left[1 + \text{sinc} \left(\frac{\pi a x}{cD} \Delta \nu \right) \cos \left(\frac{2\pi}{c} \frac{a x}{D} \nu_0 \right) \right]$

$E(\nu) = E_0 \left[1 + \text{sinc} \left(\frac{\pi \delta}{c} \Delta \nu \right) \cos \left(\frac{2\pi \delta}{c} \nu_0 \right) \right]$



$C = 0 \Rightarrow \frac{\pi \delta}{c} \Delta \nu = \pi \Rightarrow \delta = \frac{c}{\Delta \nu} = \frac{c \cdot \lambda_0^2}{c \Delta \lambda} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda} = l_c$

• bon contraste si $\delta \leq l_c$



→ en réalité pas d'interférences ici, c'est lié au profil rectangulaire

c) Lumière blanche

7

Composée de $\lambda \in [400; 760] \text{ nm} \Rightarrow \lambda_m = 575 \text{ nm}$
 $\Delta \lambda = 360 \text{ nm}$

Si on considère que c'est une raie rectangulaire très large $\Rightarrow \text{le } \frac{c}{\Delta \lambda} = 99 \text{ pm}$

$E = \sum dE \Rightarrow$ système de franges d'interférences avec $i(\lambda)$
 $\Rightarrow i(\lambda) \ll i(\text{monochrome})$

$\Rightarrow$ Tentes de Newton

- centre = recouvrement exact car $\delta = 0 \Rightarrow$ lumière blanche de la source
- on s'éloigne $\Rightarrow$ irrisation car $\delta(\lambda)$ et $i(\lambda)$.

Conclusion

→ Critères stricts pour observer interférences optiques

- $\perp$ polarisation
- synchrones
- mutuellement cohérentes $\rightarrow$ nécessité de m source primaire

du au fait que période temporelle
 ondes lumineuse trop rapide pour être
 capturer $\Rightarrow$ moyennage

→ Effet cohérence spatiale / temporelle sur contraste.

→ Ici dispositif division de front d'onde $\Rightarrow$ prob cohérence spatiale

$\hookrightarrow$ amplitude pour s'en approcher mais interférences localisées.

→ Utile pour mesures de précision (longueur, épaisseur, n , densité, etc...)

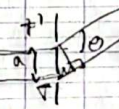
cohérence temporelle pas forcément $\rightarrow$ problème α mesure de très haute précision
 astronomie

→ Ici 2 ordres

3 N ordres

→ réseau

→ Fabry-Pérot

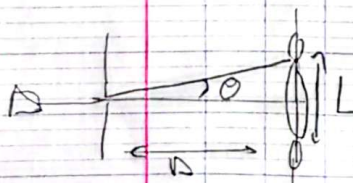


$$\delta = FH = a \sin \theta$$

$$\hookrightarrow a \sin \theta_p = p \lambda \quad p \in \mathbb{Z}$$

nb de traits $n = \frac{1}{a}$

Diffraction



$$\tan \theta \approx \theta = \frac{L/2}{D}$$

$$\text{or } \theta = \frac{\lambda}{a}$$

$$\boxed{\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}}$$