

Ch O2. Interférences à deux ondes par division du front d'onde : TROUS D'YOUNG et COHERENCE

Poly à trous

Site d'animations : <http://anim.institutoptique.fr/Young/>

<https://physique-pcsi.prepa-balzac.fr/applications-pedagogiques-interactives/interferences-lumineuses/>

I. Dispositif des trous d'Young

1) Diffraction par une petite ouverture

Figure de diffraction par une ouverture circulaire :

C'est une tâche d'Airy

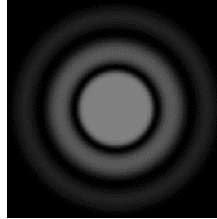
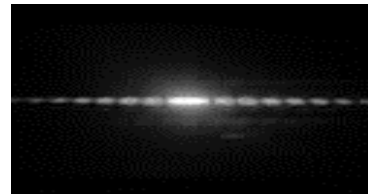


Figure de diffraction par une fente éclairée par un faisceau laser :



Angle de diffraction :

Angle maximal de diffraction $\sin(\theta) \sim$

Si la lumière rencontre un obstacle de dimension d de l'ordre de sa longueur d'onde, elle est diffractée dans toutes les directions.

Si $d \gg \lambda$, θ est négligeable donc l'onde suit les lois de l'optique géométrique qui prévoit une propagation rectiligne.

Approximation de l'optique géométrique :

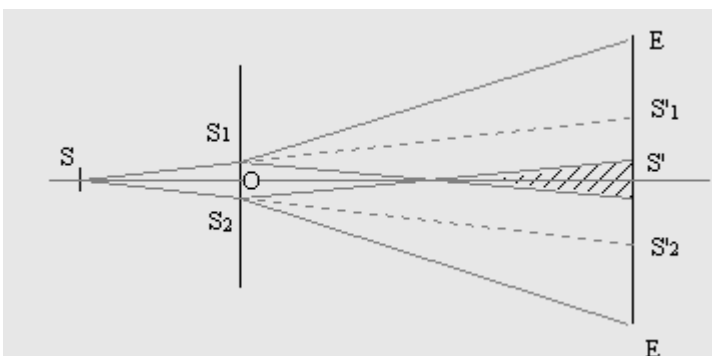
Approximation de l'optique géométrique : On peut négliger la diffraction donc appliquer les lois de l'optique géométrique lorsque

CE MPSI : Définir le modèle de l'optique géométrique. Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique.

Utiliser la relation $\sin\theta \approx \lambda/d$ entre l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique de l'ouverture.

2) Dispositif des trous d'Young sans lentille

Dispositif expérimental :



S source ponctuelle monochromatique

Diaphragme percé de deux trous d'Young S_1 et S_2 de petite dimension

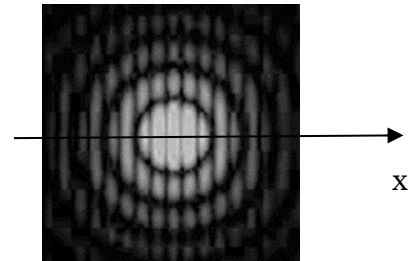
a = distance entre les trous d'Young

D = distance entre les trous d'Young et l'écran

D'après les lois de l'optique géométrique, on ne devrait observer sur l'écran que

mais

Figure d'observée (éclairage par un faisceau laser et $D \gg a$):

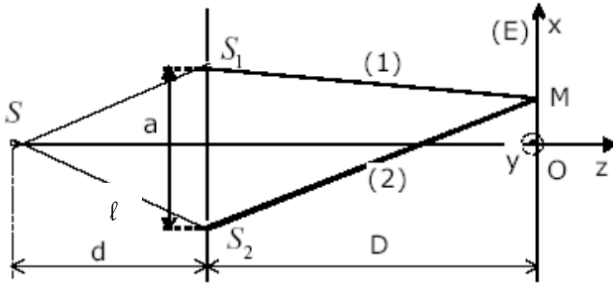


Champ d'interférence et absence de localisation des franges :

On observe des interférences dans la zone commune aux deux faisceaux appelé champ d'interférences (zone hachurée). L'écran peut être placé partout dans ce champ, on dit que **les franges ne sont pas localisées**.

Par définition les interférences sont dites non localisées lorsque le champ d'interférences est un volume.

Calcul de la différence de marche (par un DL) :



Hypothèses : Dans l'air d'indice 1

$D \gg a$, observation à grande distance (« à l'infini »)

$x \ll D$ et $y \ll D$ le point d'observation M est proche de l'axe de symétrie (de la médiatrice de $[S_1S_2]$)

Ici $SS_1 = SS_2$ (mais on saura faire le calcul sans cette hypothèse)

Les 2 ondes sont de même intensité (isotropie de la diffraction)

$$\delta_M = (SS_2M) - (SS_1M) = S_2M - S_1M = \dots$$

$$\delta_M \approx$$

Intensité lumineuse :

$$I(M) =$$

Description de la figure d'interférences (définition de l'interfrange...)

Les franges d'interférences correspondent à $I(M) = \text{cte}$ ou $\delta_M = \text{cte}$ donc $x = \text{cte}$, ce sont

Définition de l'interfrange (lorsqu'elle existe) : c'est

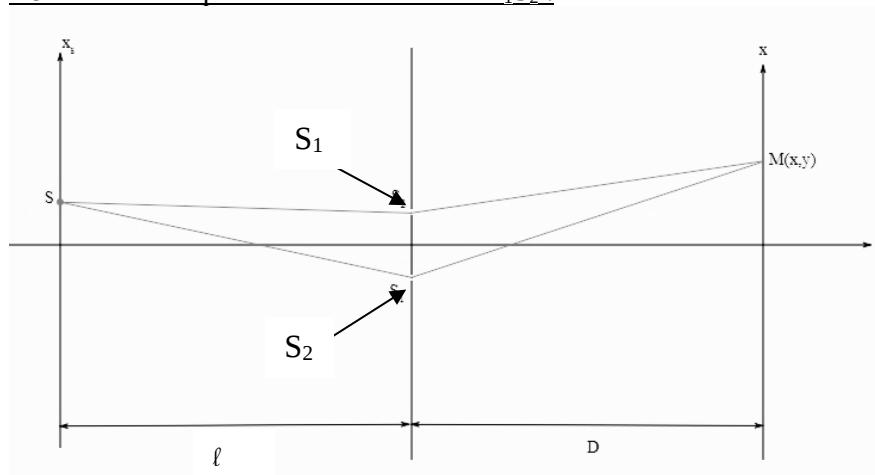
(C'est aussi la distance entre deux franges brillantes consécutives ou deux franges sombres consécutives)

Pour calculer l'interfrange, écrire $\Delta(\Delta\varphi_M) = 2\pi$ ou $\Delta p = 1$

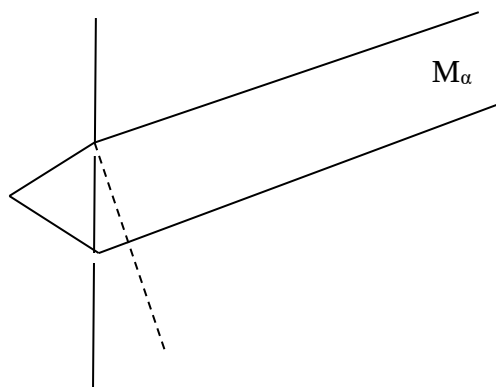
Ici $\Delta(\Delta\varphi_M) = 2\pi$ donne $\Delta x =$

D'où l'interfrange $i =$

Rem : si S n'est pas sur la médiatrice de S_1S_2 :



Rem : Calcul plus rapide de la différence de marche à l'infini avec plan d'onde :



$$\delta_M =$$

Supposons $(SS_1) = (SS_2)$

Soit Σ_M le plan d'onde de l'onde plane diffractée vers M_a passant par S_1 et soit H son intersection avec le rayon (2).

Par définition de Σ_M et par retour inverse de la lumière, (on dit aussi « par le théorème de Malus ») :

Donc $\delta_M =$

$$\delta_M \approx$$

CE : Définir, exprimer et utiliser l'interfrange et l'ordre d'interférences.

Justifier que les franges ne sont pas localisées.

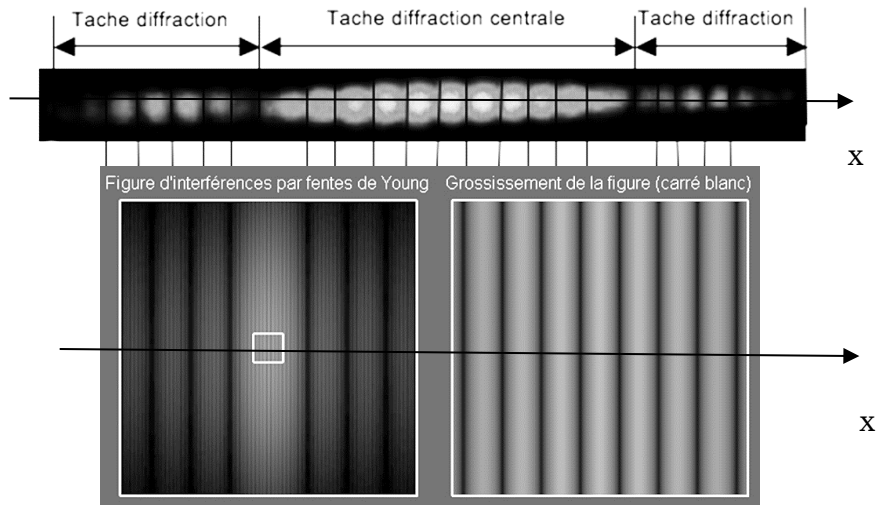
Interpréter la forme des franges observées.

Cas des fentes d'Young

Les trous S , S_1 et S_2 peuvent être remplacés par des fentes (de très faible largeur selon Ox) parallèles à Oy ; en effet, les atomes (de positions y différentes) de la source placée derrière la fente (S) émettent des trains d'ondes incohérents entre eux. On peut donc sommer sur l'écran les éclairissements dus à chacun de ces atomes.

L'éclairement ne dépendant pas de la variable y , les intensités lumineuses vont se renforcer, sans se brouiller : le phénomène sera plus lumineux.

Fentes d'Young éclairées par un faisceau laser :



Fentes d'Young éclairées par une fente source parallèle aux fentes d'Young :

3) Dispositif avec lentilles

Schéma et rôle des lentilles :

On place la source dans le plan focal objet d'une lentille convergente $\mathcal{L}_1$ et l'écran dans le plan focal image d'une lentille $\mathcal{L}_2$.

Le diaphragme $\mathcal{D}$ est placé n'importe où entre $\mathcal{L}_1$ et $\mathcal{L}_2$.

La source S donne entre $\mathcal{L}_1$ et $\mathcal{D}$ une onde plane.

Les trous d'Young S_1 et S_2 diffractent dans toutes les directions. A chaque direction correspond un point M de l'écran.

En un point M de l'écran arrivent deux rayons (1) passant par S_1 et (2) passant par S_2 qui avaient la même direction entre $\mathcal{D}$ et $\mathcal{L}_2$. Ils appartiennent donc à la même onde plane.

Calcul de la différence de marche :

Soit Σ_S le plan d'onde de l'onde plane incidente passant par S_2 et soit H_1 son intersection avec le rayon (1).

Soit Σ_M le plan d'onde de l'onde plane diffractée vers M passant par S_1 et soit H_2 son intersection avec le rayon (2).

Par définition de Σ_S , on dit aussi « par le théorème de Malus » :

Par définition de Σ_M et par retour inverse de la lumière :

Rem : $(SS_1) \neq (SH_2)$ à cause de

$$\delta_M = \dots$$

$$\delta_M \approx$$

Allure des franges sur l'écran :

Cas des fentes d'Young – Effet d'une translation des fentes ou de la source.

Une translation des trous d'Young (en bloc) et de la source suivant (Oy) ne modifie pas la figure donc on peut remplacer les trous d'Young par des fentes d'Young et la source ponctuelle par une fente source, la figure sera la même mais plus lumineuse.

Une translation des fentes d'Young dans toute direction

Une translation de la fente source suivant $+\vec{u}_x$ de x_0 ,

Site d'animations : <http://anim.institutoptique.fr/Young/>

4) Généralisation à d'autres dispositifs

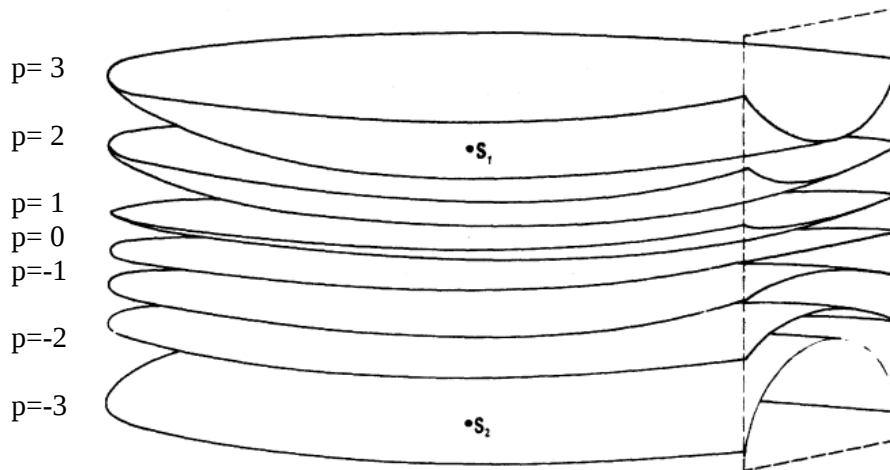
Interférence de 2 ondes sphériques :

Supposons qu'on ait formé par un dispositif optique deux images S_1 et S_2 d'une même source ponctuelle S avec $(SS_1)=(SS_2)$.

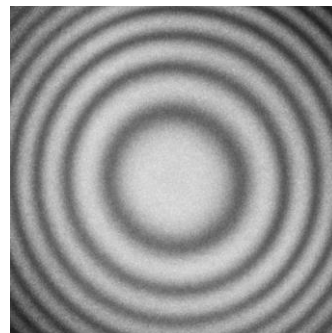
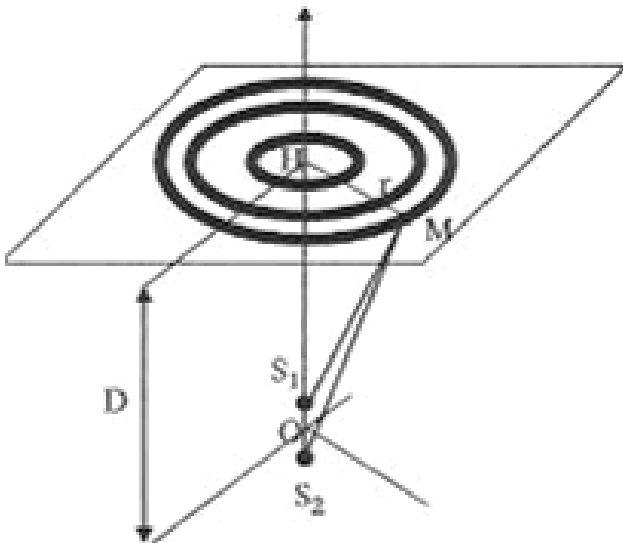
Alors $\delta_M = S_2M - S_1M$ donc les franges d'interférence ont pour équation $S_2M - S_1M = \text{cte}$, ce sont

Sur un écran elles peuvent avoir des formes différentes suivant l'emplacement de l'écran. Voir l'animation :

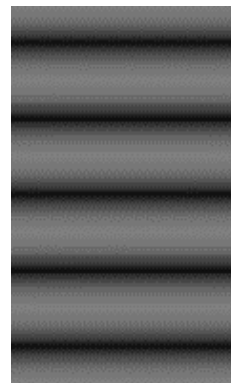
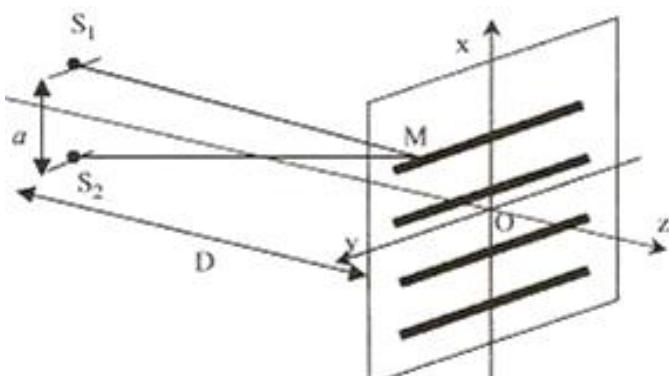
<https://physique-pcsi.prepa-balzac.fr/applications-pedagogiques-interactives/interferences-lumineuses/>



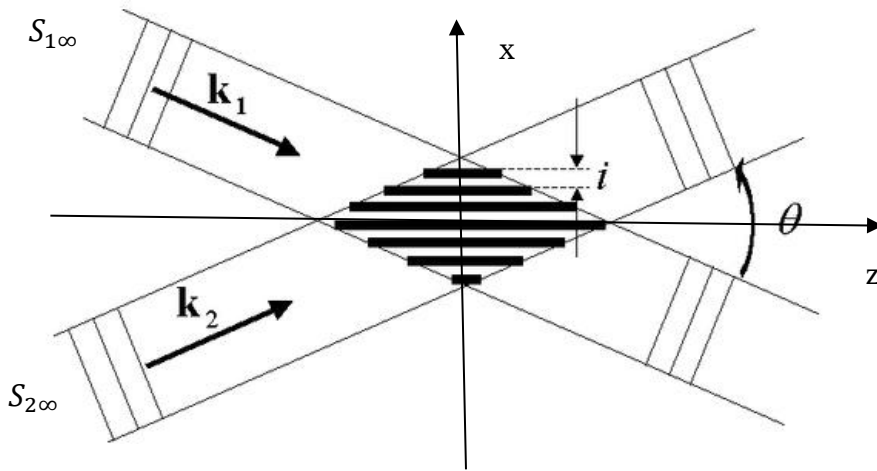
Allure des franges dans un plan perpendiculaire à l'axe des sources :



Allure des franges dans un plan éloigné parallèle aux sources :



Interférence de deux ondes planes cohérentes :



Les sources secondaires (cohérentes) ponctuelles S_1 et S_2 sont à l'infini donc on fait interférer deux ondes planes de vecteurs d'onde $\vec{k}_1$ et $\vec{k}_2$

Choisissons un repère $(Oxyz)$ tel que (Oz) soit la médiatrice du segment (S_1S_2) et O une origine des phases dans le champ d'interférences (hachuré sur la figure).

Expression des ondes planes et du déphasage :

Calcul de l'intensité par la formule de Fresnel (On suppose les deux ondes planes de même intensité) :

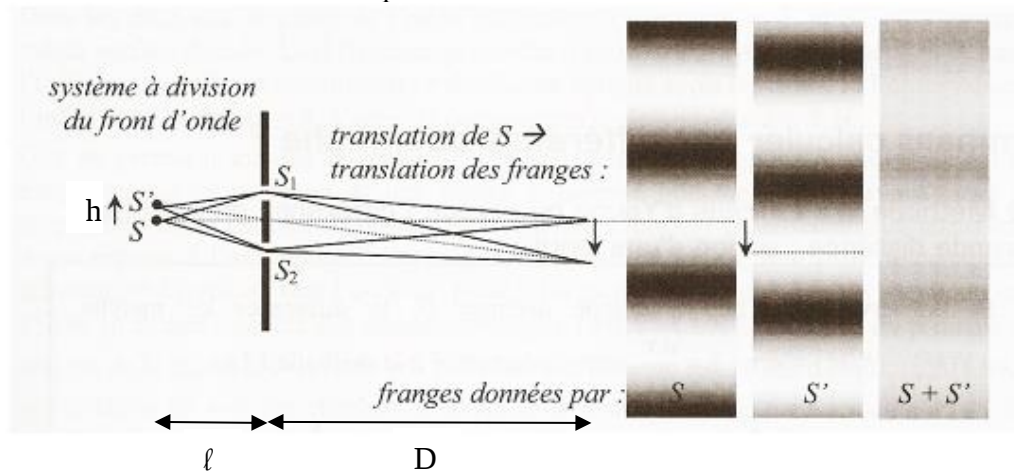
Description de la figure d'interférences :

Interfrange $i =$

II. Source étendue spatialement – Introduction à la cohérence spatiale

1) Cas de deux points source (par exemple une étoile double)

Le dispositif des trous d'Young étudié au I.2 (trous de largeur d , distants de a , distance source diaphragme ℓ , distance source-écran D) est éclairé par deux points sources S et S' incohérents (par exemple une étoile double). Les deux points sources sont incohérents donc les intensités s'ajoutent. On observe sur l'écran la superposition des figures d'interférence dues aux deux points sources.



La superposition des deux figures d'interférences est responsable d'une diminution du contraste et peut conduire à un brouillage des interférences.

Il y a brouillage si les franges claires d'une figure correspondent aux franges sombres de l'autre :

Positions des franges brillantes dues à S : $p_S =$

Positions des franges sombres dues à S' : $p_{S'} =$

Pour que les franges brillantes de S correspondent aux franges sombres de S' , il faut qu'il existe un entier m tel que :

$$|\Delta p(M)| = |p_S(M) - p_{S'}(M)| =$$

On en déduit le **critère de brouillage des franges en M** : $|\Delta p(M)| =$

C'est la méthode conseillée par le programme officiel. Elle donne ici :

Autre méthode par le calcul de contraste :

Intensité due à S :

Intensité due à S' :

Intensité totale :

Contraste :

Il y a brouillage pour $C=0$ donc si :

On retrouve le critère de brouillage $|\Delta p| = |p_S - p_{S'}| =$

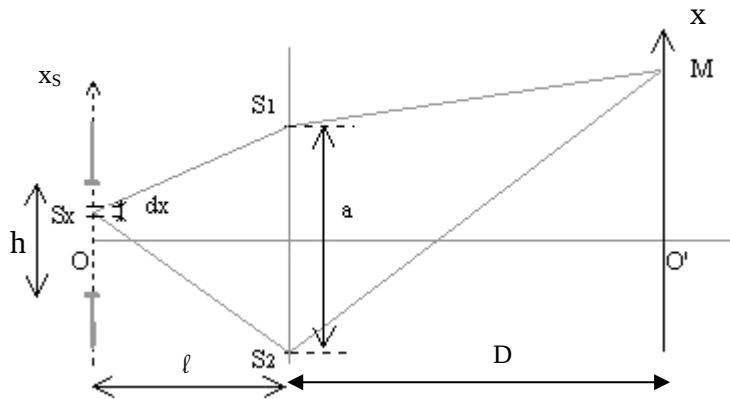
Application à l'observation d'une étoile double :

En visant l'étoile double Capella de la constellation du Clocher, des astronomes ont obtenu une annulation du contraste pour une distance minimale entre les diaphragmes diffractant de $a=1,16\text{m}$ dans le visible $\lambda=635\text{nm}$. En déduire la distance angulaire α sous laquelle on voit cette étoile double depuis la Terre.

2) Cas d'une source étendue

Le dispositif de trous d'Young étudié au I.2 (trous de largeur d , distants de a , distance source diaphragme ℓ , distance source-écran D) est éclairé par une source étendue spatialement (une fente source de largeur h).

Schéma



On décompose la source étendue en sources quasi-ponctuelles monochromatiques $S(x_s, y_s, -\ell)$ de surface $dx_s dy_s$. Les différents points de la source sont incohérents donc leurs intensités s'ajoutent. On observe sur l'écran la superposition des figures d'interférence dues aux différents points de la source. Ces différentes figures ont le même interfrange mais sont continûment décalés les uns des autres. Les franges claires de chaque système ne coïncident pas et la figure est vite brouillée. Le contraste diminue au fur et à mesure que la largeur de la fente augmente.

Pour quelle largeur de la fente y-a-t-il brouillage ?

Le programme demande appliquer le **critère semi-quantitatif de brouillage des interférences** :

$$|\Delta p| \geq$$

Interprétation : On considère qu'il y a brouillage à partir du cas où les franges dues au bord de la fente sont décalées d'un demi-interfrange par rapport aux franges dues au centre de la fente

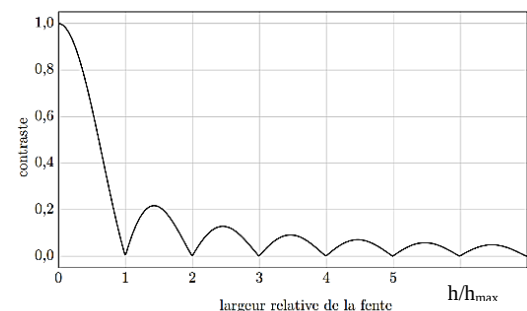
Application : Ici $\delta(S, M) =$

donc $p =$

D'où le critère de brouillage :

$h >$

AN : $\ell = 50\text{cm}$, $a = 1\text{mm}$, $\lambda = 500\text{nm}$,
alors il y a brouillage si $h > h_{\max} =$



Pour les dispositifs à division du front d'onde, l'utilisation d'une source étendue brouille la figure d'interférences. On verra par contre qu'on pourra utiliser une source étendue pour les dispositifs à division d'amplitude.

<https://physique-pcsi.prepa-balzac.fr/applications-pedagogiques-interactives/interferences-lumineuses/>

CE : Variations de l'ordre d'interférences p avec la position d'un point source ; perte de contraste par élargissement angulaire de la source. Utiliser un critère de brouillage des franges portant sur l'ordre d'interférence.

III. Source à spectre étendu – Introduction à la cohérence temporelle

Plutôt observé avec un Michelson (voir Ch O3)

1) Source à deux raies monochromatiques (Doublet d'une lampe spectrale)

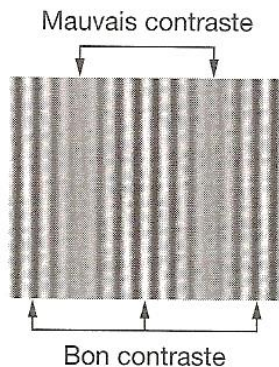
Un dispositif d'interférences à deux ondes est éclairé par une source ponctuelle émettant deux longueurs d'onde très proches λ_1 et λ_2 donc telles que $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \ll \lambda_{1,2}$ (par exemple le doublet jaune d'une lampe à vapeurs de sodium).

Deux ondes de longueurs d'onde différentes sont incohérentes donc les intensités s'ajoutent. On observe sur l'écran la superposition des figures d'interférence dues aux deux longueurs d'onde.

Mais l'interfrange de chaque figure dépend de la longueur d'onde.

On observe des zones de bon contraste lorsque les franges brillantes dues aux deux longueurs d'onde coïncident presque.

On observe des zones de brouillage lorsque les franges brillantes de λ_1 se superposent aux franges sombres de λ_2 . On parle aussi de zones d'anticoïncidence.



Critère de brouillage : **brouillage si**

Calcul de l'intensité :

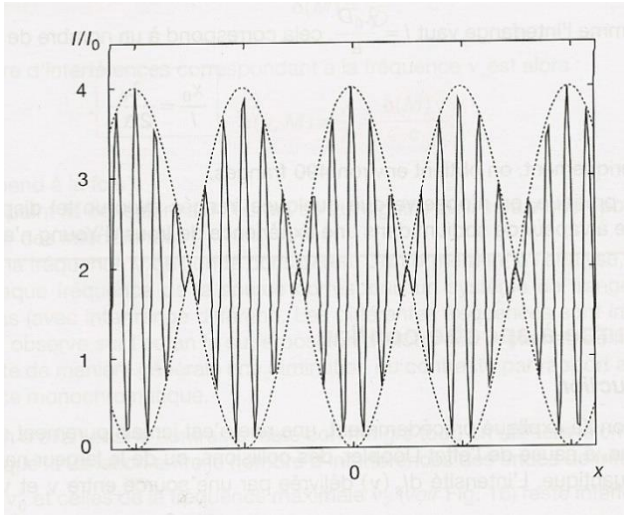
$$I_{\lambda_1}(M) = I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \delta_M \right) \right]$$

$$I_{\lambda_2}(M) = I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \delta_M \right) \right] \quad \text{les deux sources sont supposées d'égale intensité}$$

$$\text{Posons } \lambda_m = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}, \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1, \dots$$

Intensité totale $I(M) =$

Tracé de l'intensité :



Ce sont des battements

Enveloppes :

Contraste local:

Maximum local $I_{\max}(M) =$

Minimum local $I_{\min}(M) =$

Contraste local $C(M) =$

On retrouve le critère de brouillage :

2) Source à spectre continu

CE : Variations de l'ordre d'interférence avec la longueur d'onde. Perte de contraste par élargissement spectral de la source. Utiliser un critère de brouillage des franges portant sur l'ordre d'interférence.

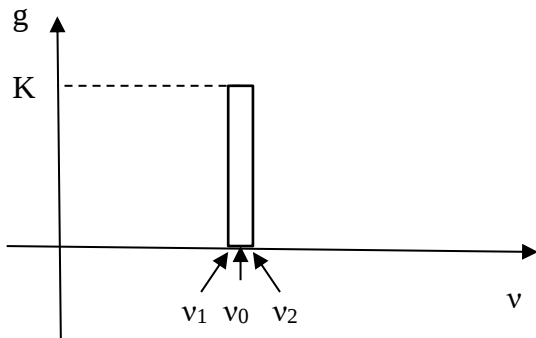
a) Source quasi-monochromatique

Profil spectral de la source :

Une raie spectrale (ou un laser) n'est jamais parfaitement monochromatique.

L'intensité émise par la source entre les fréquences ν et $\nu + d\nu$ s'écrit $dI = g(\nu)d\nu$ où $g(\nu)$ est la densité spectrale de la source.

Cas d'une source quasi-monochromatique de profil spectral rectangulaire :



Fréquence moyenne

$$\nu_0 = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2},$$

Largeur spectrale

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 \ll \nu_0$$

Superposition des figures d'interférence :

Cette source éclaire un dispositif d'interférences à deux ondes. On décompose la source de spectre continu en sources monochromatiques de fréquence ν et de largeur spectrale $d\nu$. On observe la superposition des figures d'interférence créées par chaque fréquence. Mais ces systèmes d'interférence ont des interfranges différents. Au centre en $\delta_M = 0$, toutes les franges brillantes se superposent et le contraste est bon. Quand on s'éloigne du centre les franges brillantes ne coïncident plus et le contraste diminue.

Critère semi-quantitatif de brouillage des interférences :

$|\Delta p|$

Or $p(v, M) =$

Critère de brouillage

Lien avec la notion de cohérence temporelle :

On rappelle la condition nécessaire d'interférence liée au recouvrement des trains d'onde $\delta_M <$
et la relation entre la largeur spectrale de la source et son temps de cohérence τ_c :

Cette condition s'écrit donc $\delta_M <$

C'est

Calcul de l'intensité totale et du contraste : (ce n'est pas la méthode privilégiée par le programme officiel)

b) Lumière blanche (*voir figures dans l'annexe en couleur et les animations*)

On observe la superposition des figures d'interférence dues à chaque longueur d'onde.
Toutes les longueurs d'onde donnent une frange brillante en $\delta_M = 0$ donc on observe une frange brillante blanche au centre de la figure.
L'interfrange dépend de la longueur d'onde donc les franges brillantes suivantes dues aux différentes longueurs d'onde ne se superposent pas. On observe donc