

Dans ce chapitre, à partir d'un interféromètre à division de front d'onde, celui des trous d'Young qui, historiquement, a permis de prouver que la lumière est une onde et de mesurer pour la première fois une longueur d'onde, nous ferons le lien avec les notions de cohérence qui sous tendent son bon fonctionnement.

Les interférences observées avec ce type d'interféromètre sont non localisées.

Si les dispositifs à division de front d'onde sont liés à l'histoire des sciences, et de ce fait permettent une approche des notions physiques liées aux interférences, comme la cohérence spatiale des sources, le dispositif de Young garde un intérêt pratique puisqu'il permet la mesure de l'angle sous lequel nous voyons les étoiles depuis la Terre, en utilisant la disparition du phénomène d'interférences par perte de cohérence spatiale.

Table des matières

I - Présentation expérimentale et premier montage modèle	2
1)L'expérience de Young en pratique	2
2)Premier montage optique théorique	2
3)Ordre d'interférences et éclairement	3
4)Lien modèle expérience	4
II - Vers des situations plus réalistes	5
1)Fentes d'Young	5
2)Source lumineuse étendue	6
a)Influence du déplacement de la source S	6
b)Source constituée de deux points lumineux incohérents	7
3)Source lumineuse non monochromatique	8
4)Montage de Fraunhofer	9
5)Application : ajout d'une lame à faces parallèles sur un des trajets	9

Division du front d'onde ou division d'amplitude ?

Il en existe 2 types :

~> **Interféromètre à division du front d'onde**

Dans un interféromètre à division de front d'onde, l'onde issue d'une source primaire S, caractérisée par une amplitude A_0 , est divisée spatialement en deux ondes de quasi même amplitude en S_1 et S_2 . Ces deux ondes suivent ensuite deux chemins différents pour interférer dans l'espace.

La division de front d'onde, ou division spatiale, peut être obtenue grâce à la diffraction (interféromètre de Young) ou grâce à des dispositifs optiques qui créent généralement deux images stigmatiques S_1 et S_2 de la source primaire S (miroirs de Fresnel, biprisme de Fresnel, miroir de Lloyd ? qui ne sont pas au programme). Dans la région où les ondes interfèrent, celles-ci semblent provenir des deux images S_1 et S_2 de S données par l'interféromètre.

~> **Interféromètre à division d'amplitude**

Dans un interféromètre à division d'amplitude, l'onde issue d'une source primaire S, caractérisée par son amplitude A_0 , est divisée en amplitude à l'aide d'une lame semi-transparente (ou semi-réfléchissante).

L'onde réfléchie (réflexion), d'amplitude $A_{0,r} = rA_0$, et l'onde transmise (réfraction), d'amplitude $A_{0,t} = tA_0$, suivent ensuite deux chemins différents, souvent canalisés par des miroirs, pour interférer dans une région de l'espace.

L'exemple le plus classique d'interféromètre utilisant la division d'amplitude est l'interféromètre de Michelson. Il en existe d'autres : interféromètre de Fabry-Perrot, de Mach et Zender, de Fizeau, de Sagnac, de Jamin, sans oublier les filtres interférentiels, et les bulles de savon...

Rappelons que l'interféromètre doit imposer $\delta(M) < \ell_c$ pour que les interférences soient observables.

I - Présentation expérimentale et premier montage modèle

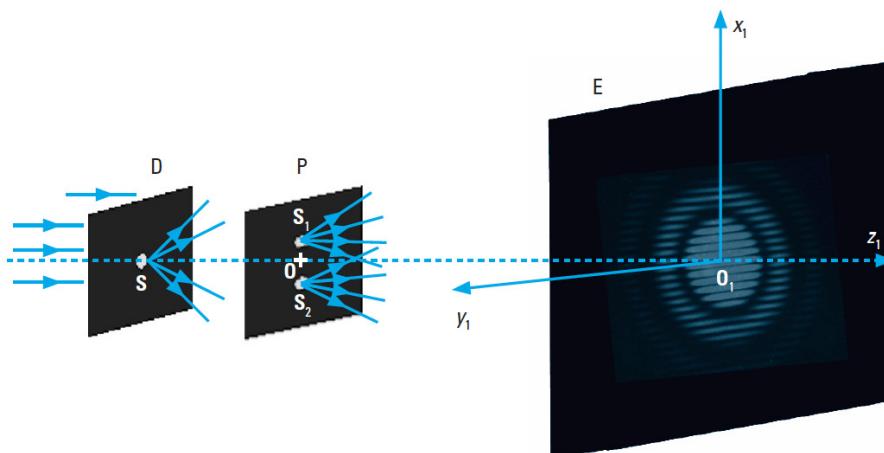
1) L'expérience de Young en pratique

Thomas Young¹ a découvert les interférences lumineuses dans une expérience que l'on peut présenter de la manière suivante :

- Montage expérimental

Une lumière parallèle et monochromatique éclaire un premier écran D percé d'un trou d'épingle S. Issue de S, la lumière éclaire un second écran P percé de deux trous d'épingle S_1 et S_2 très proches l'un de l'autre tels que $SS_1 \approx SS_2$.

Un troisième écran E, supposé être ici un écran translucide, permet d'observer par transmission (pour les besoins du dessin) le phénomène recueilli à sa surface.



- Observations et interprétation

Nous observons sur l'écran E, au voisinage du point d'intersection O_1 de l'axe du système et de cet écran, un phénomène lumineux. Ce phénomène lumineux se compose :

- de zones circulaires alternativement sombres et claires dues à la diffraction ;
- de bandes sombres ou claires dues aux interférences qui barrent, ici horizontalement, les zones circulaires précédentes.

Ceci a permis à T. Young d'énoncer le principe suivant en 1802 :

"Lorsque deux vibrations de provenances différentes coïncident exactement ou ont des directions très proches, leur effet conjugué est une combinaison propre à chacune d'elles".

Nous commentons ce résultat de la manière suivante :

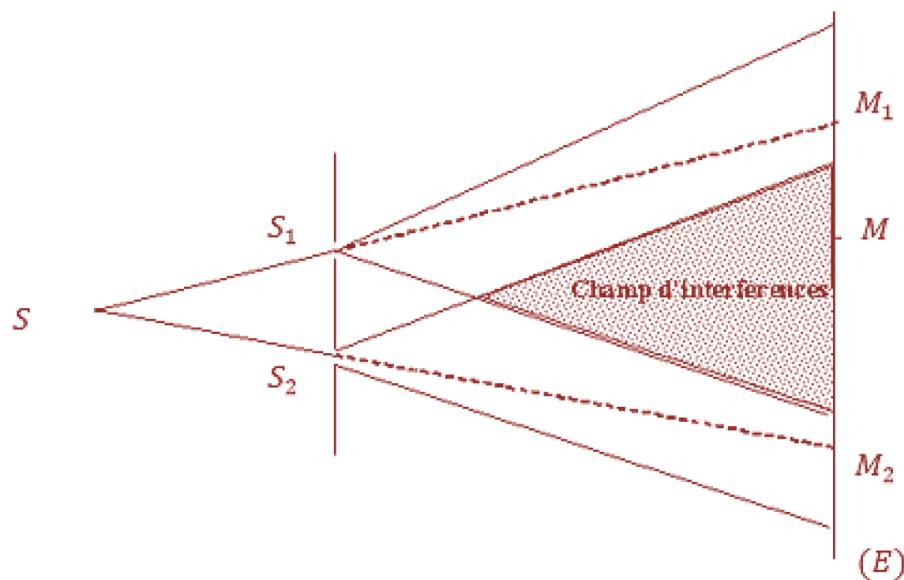
- les deux ondes issues de S_1 et S_2 interfèrent ;
- la figure observée formée de bandes rectilignes est une figure d'interférences ;
- la zone de l'espace où les ondes se superposent est le champ d'interférences.

L'expérience menée par Young en 1801 a été déterminante. D'une part, elle confirmait la validité du modèle ondulatoire de la lumière, d'autre part, elle permettait des mesures de longueur d'onde : Young déterminera ainsi les longueurs d'onde limite du spectre visible, 400 nm pour le bleu et 800 nm pour le rouge. Enfin, ces observations incitaient à une recherche théorique sur les sujets de la diffraction et des interférences.

2) Premier montage optique théorique

Un écran opaque percé de deux trous identiques S_1 et S_2 de faible rayon R et espacés d'une distance a , constitue un dispositif de **trous d'Young**. Ce dispositif est éclairé sous incidence faible c'est-à-dire par une source S située à une distance $d \gg a$. L'observation se fait sur un écran lui aussi éloigné du plan des trous d'Young d'une distance $D \gg a$.

1. Thomas Young (1773-1829), connu pour ses qualités multiples, médecin, botaniste, linguiste... possédait de solides notions de physique, notamment en acoustique. La connaissance de ce domaine, éminemment ondulatoire, joint au travail de ses devanciers, notamment Huygens, un pilier de la théorie ondulatoire, ainsi que la remise en question respectueuse des idées émises un siècle plus tôt par Newton, très mécaniste dans son analyse, permirent à T. Young de découvrir les interférences lumineuses.



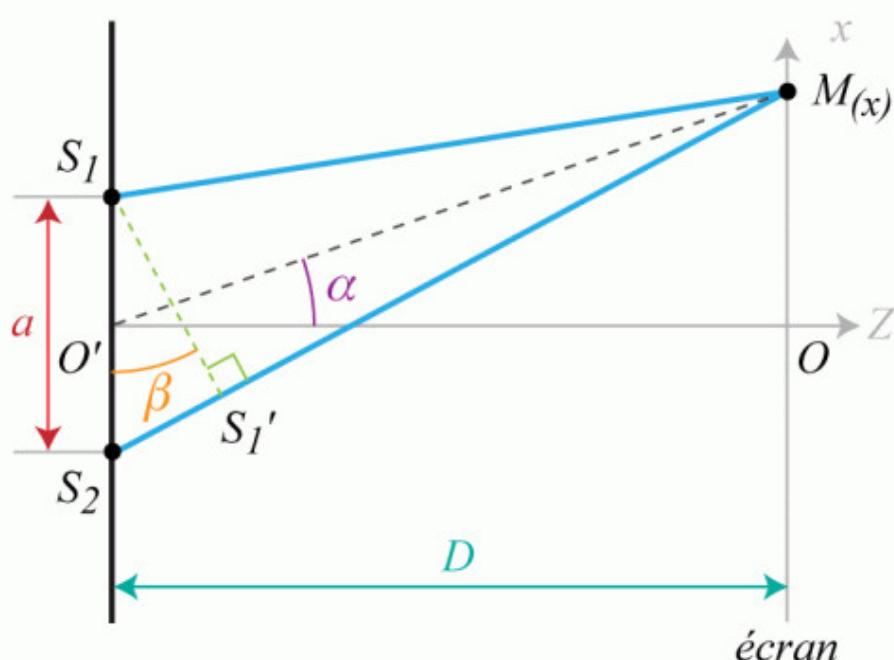
Les deux rayons issus de S passant par S_1 et S_2 sont diffractés par ces ouvertures de petite dimension. Les rayons lumineux incidents se transforment donc en faisceaux de demi-ouverture angulaire $\theta \approx \frac{\lambda_0}{R}$. Grâce à ce phénomène, les deux faisceaux en sortie des trous se superposent dans un volume de l'espace. cette zone de superposition des deux ondes est appelée **champ d'interférences**, c'est dans cette zone que sont observées les interférences entre les deux ondes.

A RETENIR

Non localisation des interférences

Dans un interféromètre de Young, c'est le phénomène de diffraction par les trous qui permet la superposition des ondes. La zone de superposition est un volume de l'espace appelé **champ d'interférences**. Les interférences sont observables dans l'ensemble de ce volume, elles sont dites **non localisées**.

3) Ordre d'interférences et éclairement



Les deux ondes qui se superposent en M sont portées par les rayons lumineux issus des trous d'Young qui se croisent en M (voir ci-dessus). Ces deux ondes sont supposées cohérentes et de même éclairement \mathcal{E}_0 car elles sont issues de la même source ponctuelle monochromatique de longueur d'onde λ_0 . L'éclairement en M est alors donné par la formule de Fresnel :

$$\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_0 \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \delta(M) \right) \right)$$

où $\delta(M)$ est la différence de marche entre les deux rayons, qui s'exprime : $\delta(M) = n_{air}(\text{SS}_2\text{M} - \text{SS}_1\text{M})$, en supposant l'air comme un matériau LHI d'indice optique n_{air} .

Le tracé des surfaces d'ondes permet de simplifier cette expression : $\delta(M) = n_{air}(\text{S}_2\text{M} - \text{S}_1\text{M})$.

La détermination de $\delta(M)$ est effectuée dans l'*approximation paraxiale*, dans le but de simplifier les calculs.

Définition : Approximation paraxiale

Celle-ci consiste à ne considérer que les rayons paraxiaux, c'est-à-dire $x \ll a$ ($y \ll a$), $a \ll D$ (rayons proches de l'axe optique, et peu inclinés)

Conclusion :

$$\delta(M) = n_{air} \frac{ax}{D}$$

d'où :

$$p(M) = n_{air} \frac{ax}{\lambda_0 D}$$

et

$$\mathcal{E}(M) = 2\mathcal{E}_0 \left(1 + \cos \left(n_{air} \frac{2\pi ax}{\lambda_0 D} \right) \right)$$

4) Lien modèle expérience

Rappel : l'observation expérimentale montre une succession de **franges rectilignes** brillantes et sombres de direction perpendiculaire à la direction des trous. Les franges brillantes et sombres correspondent respectivement à des maxima et des minima d'éclairement, c'est-à-dire à des interférences constructives et destructives.

- **Interférences constructives :**

l'ordre d'interférences est alors un entier relatif : $p(M) = m$. A m donné, les abscisses $x_{c,m}$ où il y a interférence constructive vérifient :

$$\frac{ax_{c,m}}{\lambda_0 D} = m \Rightarrow x_{c,m} = m \frac{\lambda_0 D}{a}$$

L'ensemble des points où il y a interférence constructive correspond donc à des franges rectilignes d'abscisse $x_{c,m}$ constant sur l'écran. La direction des franges brillantes est donc orthogonale à Ox , c'est-à-dire orthogonale à la direction des trous. Deux franges brillantes sont séparées sur l'écran d'une distance $i = x_{c,m+1} - x_{c,m} = \frac{\lambda_0 D}{a}$.

Définition : Interfrange i

On appelle interfrange i la distance entre deux franges brillantes (ou sombres) successives.

• **Interférences destructives :**

l'ordre d'interférences est alors un demi-entier relatif : $p(M) = m + \frac{1}{2}$. A m donné, les abscisses $x_{d,m}$ où il y a interférence destructive vérifient :

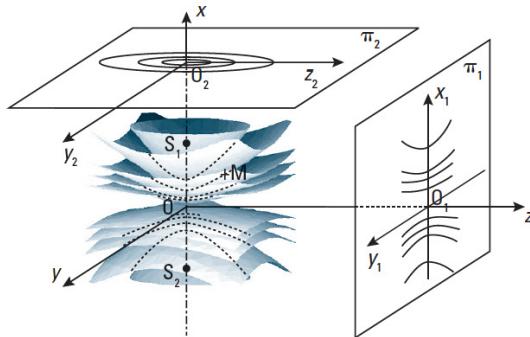
$$\frac{ax_{d,m}}{\lambda_0 D} = m + \frac{1}{2} \Rightarrow x_{d,m} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda_0 D}{a} = x_{c,m} + \frac{i}{2}$$

L'ensemble des points où il y a interférence destructive correspond donc à des franges rectilignes d'abscisse $x_{c,m}$ constant sur l'écran. La direction des franges sombres est donc orthogonale à Ox , c'est-à-dire orthogonale à la direction des trous. Deux franges sombres sont séparées sur l'écran d'une distance $i = x_{d,m+1} - x_{d,m} = \frac{\lambda_0 D}{a}$ (interfrange).

De plus, le réseau de franges sombres est décalé du réseau de franges brillantes d'un demi-interfrange $\frac{\lambda_0 D}{2a}$. Ces franges alternent bien sur l'axe Ox .

POUR ALLER PLUS LOIN (HP)

La différence de marche s'exprime $\delta = S_2 M - S_1 M$, et l'on cherche, en toute généralité, la forme des franges dans l'espace, soit le lieu géométrique des points M tel que $\mathcal{E} = \text{cste}$ (surfaces d'égal éclairement), ce qui nous amène à $S_2 M - S_1 M = \text{cste}$. Mathématiquement, cela correspond à un faisceau *hyperboloides* de révolution, de foyer S_1 et S_2 et d'axe de révolution $S_1 S_2$.



Deux cas simples sont à envisager :

- l'écran π_1 est parallèle à la droite qui porte les sources : les franges sont des hyperboles ;
- l'écran π_2 est perpendiculaire à la droite qui porte les sources : les franges sont des cercles.

Young n'a pas observé de franges d'interférences circulaires ^a. Les franges rectilignes qu'il observe se trouvent sur un écran π_1 parallèle à la droite des sources. Sur π_1 les hyperboles se réduisent à des droites si l'on ne s'écarte pas trop de l'a.o., ce que confirment les calculs ci-dessus.

Le phénomène d'interférences est donc limité dans l'espace. La perte de cohérence des ondes en est la cause. Ainsi, si l'on s'éloigne de l'a.o. :

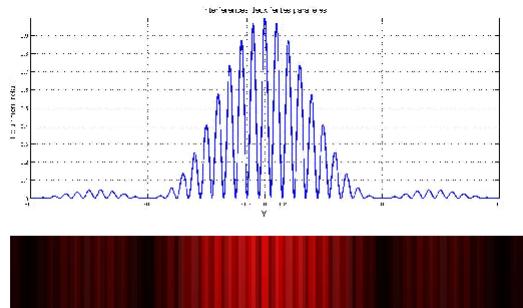
- l'approximation scalaire n'est plus vérifiée ; la cohérence est partielle ;
- le phénomène de diffraction atténue rapidement l'intensité des deux ondes émises par les sources secondaires S_1 et S_2 dès que $\theta = \frac{1,22\lambda_0}{R}$ (angle sous lequel on voit le premier anneau noir) ;
- la différence de marche géométrique devient supérieure à la longueur de cohérence des ondes émises par la source.

^a. le cas sera abordé dans le chapitre suivant sur l'interféromètre de Michelson

II - Vers des situations plus réalistes

1) Fentes d'Young

Observations expérimentales d'un dispositif de fentes d'Young :



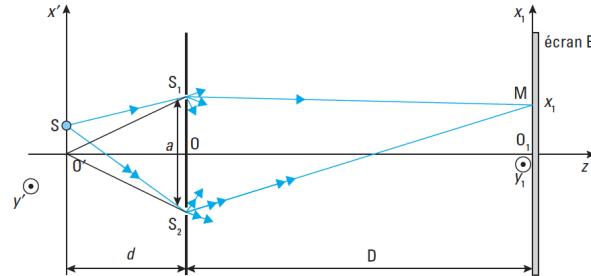
A RETENIR

On utilise couramment un dispositif de **fentes d'Young** composé de deux fentes parallèles de direction orthogonale à l'axe Ox à la place des trous d'Young. Ce dispositif permet d'obtenir une meilleure luminosité au niveau de l'écran sans modifier la différence de marche et donc la figure d'interférences. Seul le profil de diffraction modulant la figure d'interférences est impacté.

2) Source lumineuse étendue

a) Influence du déplacement de la source S

La source S, précédemment sur l'a.o., est maintenant placée à l'abscisse x' le long de l'axe $O'x'$ qui est parallèle à S_1S_2 . Nous notons d la distance OO' et nous supposons le milieu homogène et isotrope, d'indice n_{air} .



Cherchons quelles sont les conséquences sur le phénomène d'interférences. On supposera $a \ll D$ et $|x'| \ll d$

Expression de la nouvelle différence de marche

Celle-ci est dorénavant $\delta(M) = n_{air}(\overrightarrow{SS_2} - \overrightarrow{SS_1} + \overrightarrow{S_2M} - \overrightarrow{S_1M})$. Rien ne change pour le dernier bout par rapport au cas de la partie précédente : $n_{air}(\overrightarrow{S_2M} - \overrightarrow{S_1M}) = n_{air} \frac{\overrightarrow{ax}}{D}$.

En utilisant le principe de retour inverse de la lumière, la situation dans le triangle SS_1S_2 est identique à ce qui se produit dans le triangle MS_1S_2 , on peut tout de suite en déduire :

$$n_{air}(\overrightarrow{SS_2} - \overrightarrow{SS_1}) = n_{air} \frac{\overrightarrow{ax'}}{d}, \text{ ainsi on en déduit } \delta(M) \text{ et}$$

$$p(M) = n_{air} \left(\frac{\overrightarrow{ax'}}{\lambda_0 d} + \frac{\overrightarrow{ax}}{\lambda_0 D} \right)$$

$p(M)$ a varié de $\Delta p(M) = n_{air} \frac{\overrightarrow{ax'}}{\lambda_0 d}$. Ici, comme $x' > 0$, $\Delta p(M) > 0$, le système de franges "descend" pendant la translation de la source. On peut le vérifier aisément en cherchant la nouvelle position de la frange centrale lorsque la source est déplacée ($p(M) = 0$) :

Un argument physique permet de comprendre ce résultat : lors du déplacement de la source S, nous diminuons le chemin (SS_1) et nous augmentons le chemin (SS_2). Pour que l'état vibratoire (l'ordre) reste le même, il est nécessaire que le point M se déplace, en augmentant (S_1M) et en diminuant (S_2M) : le système de franges "descend".

b) Source constituée de deux points lumineux incohérents

La source est constituée d'un point lumineux en S' (d'abscisse x') et d'un point S au centre. Les deux sources primaires ponctuelles S et S' monochromatiques sont incohérentes entre elles, comme dans le cas de deux points d'une source classique. Chacune des sources crée en M son propre système de franges. Ces deux systèmes de franges se superposent. L'onde issue de S' a en M un ordre d'interférence

$$p'(M) = n_{air} \left(\frac{ax'}{\lambda_0 d} + \frac{ax}{\lambda_0 D} \right)$$

comme on l'a vu au paragraphe précédent

Dans la partie I, l'ordre d'interférences de l'onde issue de S placée en $x' = 0$, en M , est

$$p(M) = n_{air} \frac{ax}{\lambda_0 D}$$

N'ayant pas le même ordre en M , les interférences qui s'y superposent ont des états lumineux (éclairements, intensité) différents mais des interfranges égaux.

Lorsque la source S' s'éloigne de S , on a vu que le système de franges dû à S se décale progressivement vers le bas. Il arrive un moment où les minima dus à S' se superposent avec les maxima de S . L'intensité lumineuse devient constante dans tout le champ d'interférences. Les franges disparaissent (elles se **brouillent**). Cette distribution spatiale de la source a fait disparaître les interférences pour la première fois. Entre l'état de coïncidence des franges, quand S et S' sont confondues, et l'état d'anticoïncidence des franges, S' étant alors écarté de S , la variation de l'ordre d'interférences est $\Delta p = \frac{1}{2}$.

On peut donc énoncer le critère semi-quantitatif d'observation des interférences :

tant que la différence Δp entre l'ordre en M dû au centre de la source primaire et celui dû à l'un de ses bords reste inférieure ou égale à $\frac{1}{2}$, on observe les interférences avec un contraste acceptable.

Cependant, si la source S' était descendue (les franges étant alors montantes), on aurait trouvé la valeur $\Delta p = -\frac{1}{2}$

Critère de brouillage des interférences : $|\Delta p| = \frac{1}{2}$

Application :

avec les hypothèses du cours, calculer la valeur de la position maximale que peut occuper une source ponctuelle S' en dehors de l'axe pour que les interférences des sources S et S' , incohérentes soient visibles.

Données : $d = 30 \text{ cm}$, $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$ et $a = 1 \text{ mm}$. Commenter le résultat.

Expression du contraste des franges :

Il faut exprimer l'éclairement : $\mathcal{E}(M) = \mathcal{E}_S(M) + \mathcal{E}_{S'}(M)$ (sources incohérentes)

$$C = \left| \cos \left(\frac{\pi a x'}{\lambda_0 d} \right) \right|$$

— A RETENIR —

L'utilisation de deux sources ponctuelles monochromatiques positionnées perpendiculairement aux trous d'Young **augmente la luminosité** sur l'écran **sans modifier la figure d'interférences**.

3) Source lumineuse non monochromatique

Cas d'une source composée de deux raies monochromatiques

Cette situation est analogue à deux sources incohérentes situées à la même position. On notera λ_1 et λ_2 les deux longueurs d'onde émises par la source, et $\Delta\lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$ la largeur spectrale. Puisque les deux sources sont incohérentes entre elles, les éclairements associés aux deux raies s'additionnent :

$$\mathcal{E}(M) = \mathcal{E}_{\lambda_1}(M) + \mathcal{E}_{\lambda_2}(M)$$

avec chaque éclairement donné par l'expression classique : $\mathcal{E}_{\lambda_i}(M) = 2\mathcal{E}_0 \left(1 + \cos \left(n_{air} \frac{2\pi a x}{\lambda_i D} \right) \right)$.

$$\mathcal{E}(M) = 4\mathcal{E}_0 \left(1 + \cos \left(\frac{\pi a x \Delta\lambda}{\lambda_m^2 D} \right) \cos \left(\frac{2\pi a x}{\lambda_m D} \right) \right)$$

On reconnaît dans l'expression le terme d'interférences (classique) mais ici ce terme d'interférences est multiplié par $\cos\left(\frac{\pi ax\Delta\lambda}{\lambda_m^2 D}\right)$ qui correspond au contraste, et qui impose une modulation de ce contraste en fonction de x (et de $\Delta\lambda$).

— CRITÈRE DE BROUILLAGE DES FRANGES SUR L'ORDRE D'INTERFÉRENCE —

$$p_1(M) = \frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{ax}{\lambda_1 D}; p_2(M) = p_2(\nu_1 + \frac{\Delta\nu}{2}); \Delta p = \frac{ax}{2D} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1^2}$$

On utilise le même critère semi-quantitatif que pour la cohérence spatiale : si $|\Delta p| \geq \frac{1}{2}$ il y a brouillage des franges, on ne verra plus d'interférences.

On relie alors (en ordres de grandeur) la longueur de cohérence, la largeur spectrale et la longueur d'onde par :

$$\ell_c = \frac{\lambda_m^2}{\Delta\lambda}$$

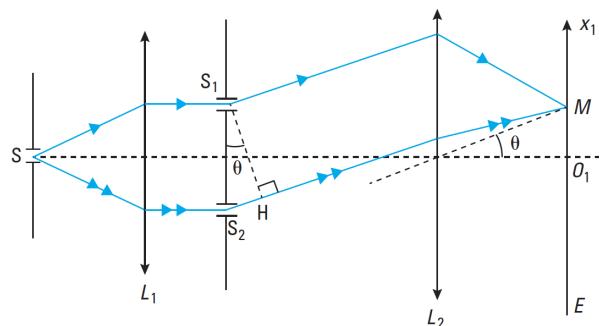
4) Montage de Fraunhofer

Le montage simple de Young souffre de deux désavantages que l'on peut corriger :

- les ondes qui se superposent sur l'écran trouvent leur origine dans la diffraction. Or, comme on l'a vu, l'intensité diffractée décroît rapidement depuis la direction de l'optique géométrique. On n'a donc pas égalité des intensités des faisceaux qui interfèrent et donc le contraste n'est pas maximum ;
- sur l'écran, les centres géométriques des zones de diffraction ne se superposent pas.

Le montage de Fraunhofer consiste à éclairer les fentes en lumière parallèle (lentille convergente L_1 avec source ponctuelle à son foyer objet), par exemple à l'incidence nulle sur les trous, et à former l'image du phénomène de diffraction sur un écran placé dans le plan focal d'une seconde lentille L_2 convergente.

Le montage est le suivant :



On peut montrer que l'éclairement est identique, avec

$$\delta(M) = \frac{ax}{f_2^2}$$

5) Application : ajout d'une lame à faces parallèles sur un des trajets