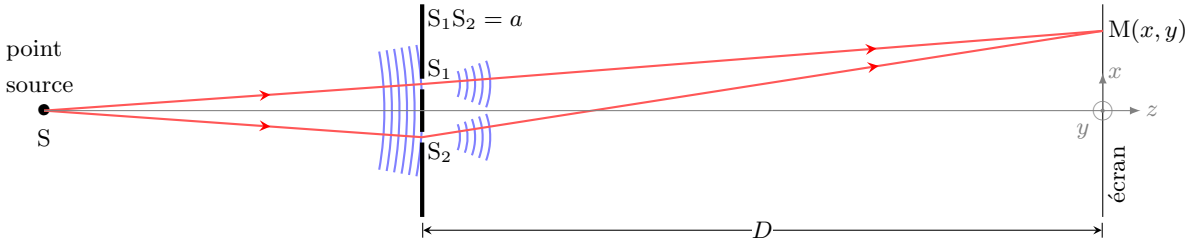
Trous d'Young

Un exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde

Pour obtenir des interférences, il faut avoir deux sources mutuellement cohérentes. Pour cela nous allons former deux sources secondaires à partir d'une unique source primaire. Dans le dispositif suivant, on fait interférer deux rayons lumineux distincts issus de la source primaire. Ces deux rayons suivent des trajets différents à partir de la source primaire, on divise le front d'onde de la source.

I Description du dispositif

Thomas Young réalisa en 1801 une expérience maintenant célèbre puisqu'elle permit de mettre en évidence le caractère ondulatoire de la lumière. Le dispositif consiste à éclairer à l'aide d'une source ponctuelle monochromatique S, un écran percé de deux trous identiques S_1 et S_2 relativement proches et équidistants de S. Ces deux trous diffractent la lumière et se comportent comme deux sources ponctuelles secondaires vibrant en phase et produisant sur un écran placé à la distance D des franges d'interférences.



S : source primaire, elle éclaire un diaphragme opaque percé de deux trous S_1 et S_2 distants de a.
S est une source ponctuelle monochromatique située à une grande distance de O.
S_1 et S_2 sont équidistants de S.

On observe la figure d'interférence sur un écran placé à la distance D du diaphragme, avec $D \gg a$, on parle d'observation à grande distance.

Les rayons lumineux qui arrivent au point M sont issus de deux rayons distincts qui émergent de la source : c'est un dispositif à division du front d'onde.

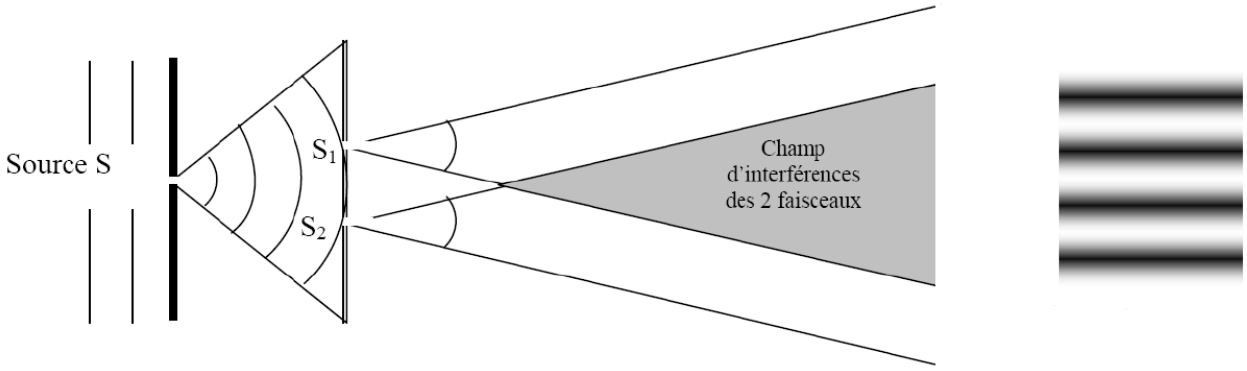
Les sources secondaires S_1 et S_2 sont éclairées par la même surface d'onde, elles vont émettre la même séquence de trains d'onde. Les trous (ou fentes) sont de même dimension et éclairées de la même façon par la source S. On a donc deux sources secondaires cohérentes de même éclairement.

II Champ d'interférence

II.1 Champ d'interférence

On appelle **champ d'interférence** la zone de l'espace éclairée par le deux ondes cohérentes = zone où on peut observer les interférences.

Les interférences produites son observables en tout point du champ d'interférences, elle sont dites **non localisées**.



II.2 Différence de marche et ordre d'interférence

L'éclairement sur l'écran est fonction du déphasage $\Delta_{12}\varphi(M)$ entre les deux ondes issues de S :

$$\Delta_{12}\varphi(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0}\delta(M)$$

avec $\delta(M) = (SM)_{\text{voie2}} - (SM)_{\text{voie1}}$.

Méthode :

- ✍ Dessiner les deux trajets empruntés par la lumière pour aller de la source S en un point M de l'écran,
- ✍ Dans le repère cartésien défini sur le schéma, donner les coordonnées des points S_1, S_2 et M,
- ✍ Exprimer $\delta(M)$, en remarquant que $a, x, y \ll D$,
- ✍ En déduire l'expression du déphasage et de l'ordre d'interférence $p(M)$,
- ✍ En déduire l'expression de l'éclairement en tout point M de l'écran.

Dans un milieu non dispersif d'indice n :

Différence de marche : $\boxed{\delta(M) = n\frac{ax}{D}}$

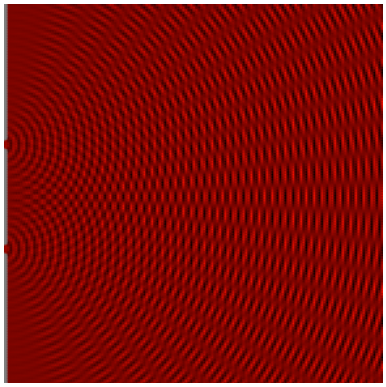
Déphasage : $\boxed{\Delta\varphi(M) = n\frac{2\pi}{\lambda_0}\frac{ax}{D}}$

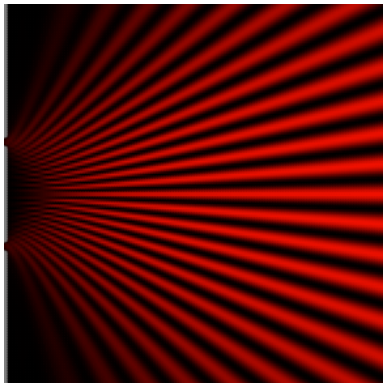
Ordre d'interférence : $\boxed{p(M) = n\frac{ax}{D\lambda_0}}$

II.3 Franges d'interférence

Intensité vibratoire résultante

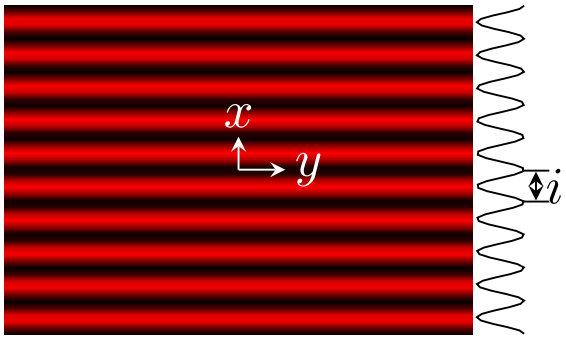
$$I(M) = 2I_0\left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{nax}{D}\right)\right]$$





À gauche : état ondulatoire à un instant donné. On distingue nettement les zones d'amplitude nulle qui donnent lieu à des franges sombres. À droite : répartition de l'intensité. Les lieux d'égale intensité sont des branches d'hyperbole de foyer S_1 et S_2.

Comme on le voit sur la figure ci-contre, l'intensité est modulée spatialement suivant x, ce qui fait apparaître des franges rectilignes horizontales. Les franges brillantes sont telles que $x_p = pi$ avec p l'ordre d'interférence et $i = \dfrac{D\lambda_0}{na}$ interfrange.



Simulation numérique de l'expérience des fentes d'Young en lumière monochromatique, réalisée par l'école Supoptique, permettant de modifier tous les paramètres relatifs à la largeur de la source et des fentes : `http://anim.institutoptique.fr/Young/`

III Montage de Fraunhofer

III.1 Description du montage

Conditions de Fraunhofer : Il s'agit d'une configuration où les trous d'Young sont éclairés avec une source à l'infini et où l'on observe la figure d'interférence à l'infini.

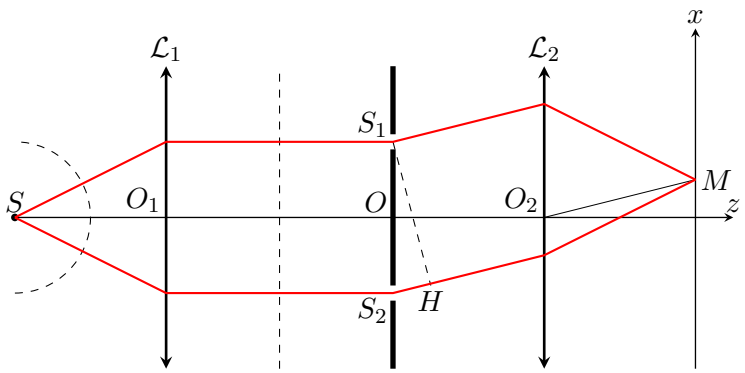
En pratique :

S = source ponctuelle placée au foyer objet d'une lentille mince convergente $\mathcal{L}_1$.

E = écran est placé dans le plan focal image d'une lentille mince convergente $\mathcal{L}_2$.

Schéma :

Le montage des trous d'Young dans le montage de Fraunhofer est représenté ci-dessous. On notera f' la distance focale image des lentilles $\mathcal{L}_1$ et $\mathcal{L}_2$.



III.2 Différence de marche

Représentons les rayons passant respectivement par le trou S_1 et par le trou S_2 se coupant en un point M d'abscisse x sur l'écran. Ces deux rayons sont parallèles avant la traversée de la lentille et se propagent selon $\overrightarrow{u} = \dfrac{\overrightarrow{O_2M}}{\|\overrightarrow{O_2M}\|} \simeq \overrightarrow{e_z} + \dfrac{x}{f'}\overrightarrow{e_x}$.

Notons H le projeté orthogonal de S_1 sur le rayon issu de S_2. L distance S_2H est ainsi

$$S_2H = \overrightarrow{u} \cdot \overrightarrow{S_2S_1} = \frac{ax}{f'}$$

La lentille $\mathcal{L}_2$ transforme une onde sphérique issue de M en ondes planes se propageant dans la direction de MO_2, c'est-à-dire selon $-\overrightarrow{u}$. Il en résulte que les chemins optiques $[MS_1]$ et $[MH]$ sont égaux.

On peut ainsi évaluer la différence de chemin optique

$$\delta = [SS_2M] - [SS_1M] = [S_2H] = \frac{nax}{f'}$$

où n désigne l'indice dans lequel plonge le dispositif expérimental.

La différence de phase entre les ondes qui interfèrent en M est donc

$$\varphi(M) = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi nax}{\lambda f'}$$

et l'ordre d'interférences est

$$p(M) = \frac{\delta(M)}{\lambda} = \frac{nax}{\lambda f'}$$

L'intensité en M se déduit de la formule de Fresnel par

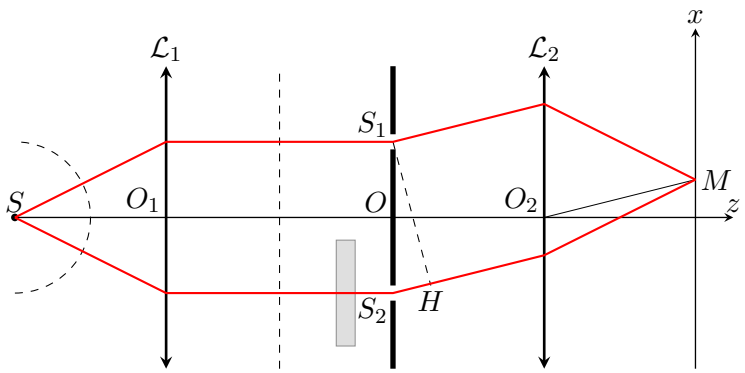
$$I(M) = 2I_0\,(1 + \cos\varphi) = 2I_0\left(1 + \cos\frac{2\pi nax}{\lambda f'}\right)$$

Les franges d'interférences sont donc des franges rectilignes $x = \text{Cte}$. L'interfrange Δx est déterminée par

$$\frac{2\pi na\Delta x}{\lambda f'} = 2\pi \text{ soit } \Delta x = \frac{\lambda f'}{na}$$

III.3 Interposition d'une lame

On reprend le dispositif précédent, et on intercale sur la voie 2 une lame à faces parallèles d'indice n_L et d'épaisseur e.



— le chemin optique sur la voie 1 reste inchangé ;
— le chemin optique sur la voie 2 est modifié ; la géométrie des rayons ne change pas, mais la présence de la lame remplace un chemin optique ne par un chemin optique $n_L e$, ce qui provoque une variation de chemin optique $(n_L - n)e$;
— la nouvelle différence de marche devient

$$\delta' = \delta + (n_L - n)e = \frac{nax}{f'} + (n_L - n)e = \frac{na(x - x_0)}{f'}$$

avec

$$x_0 = -\frac{(n_L - n)ef'}{na}$$

La nouvelle expression de l'intensité lumineuse devient

$$I(M) = 2I_0\left(1 + \cos\frac{2\pi\delta'}{\lambda}\right) = 2I_0\left(1 + \cos\frac{2\pi na(x - x_0)}{\lambda f'}\right)$$

L'introduction de la lame se traduit ainsi par une translation de la figure d'interférences de

$$x_0 = -\frac{(n_L - n)ef'}{na}$$

IV Cas d'une source étendue

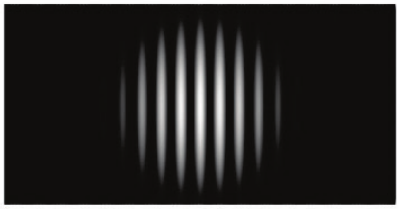
IV.1 Déplacement de la source

- Déplacement perpendiculairement à (S_1S_2) :
La différence de marche n'est pas modifiée.

  Pour obtenir une figure d'interférences plus lumineuse, on utilise une fente source et des fentes d'Young distantes de a.

  Remarque : la figure d'interférence est modulée par la figure de diffraction :

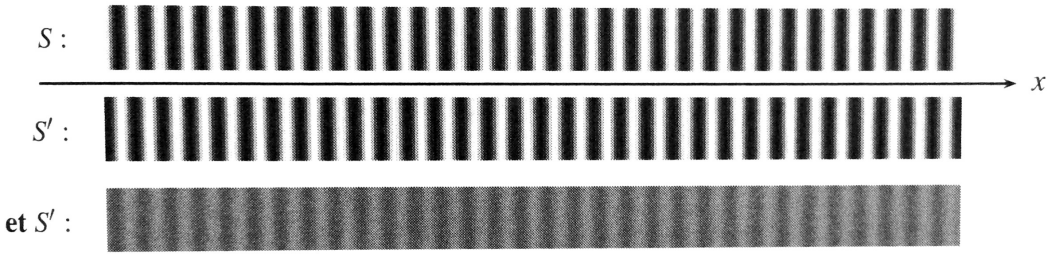
Avec deux fentes d'Young



Avec deux trous d'Young

- Déplacement parallèlement à (S_1S_2) :
La différence de marche est modifiée. La frange centrale brillante est décalée de $x_0 = -x_S\dfrac{D}{D_S}$.

IV.2 Superposition de sources décalées dans la direction (S_1S_2)

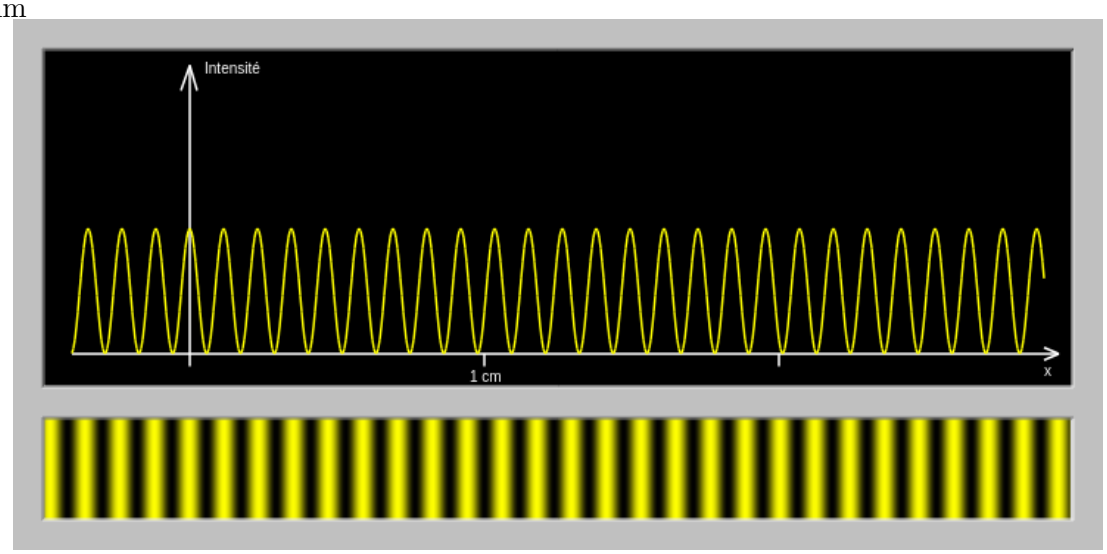


IV.3 Source étendue

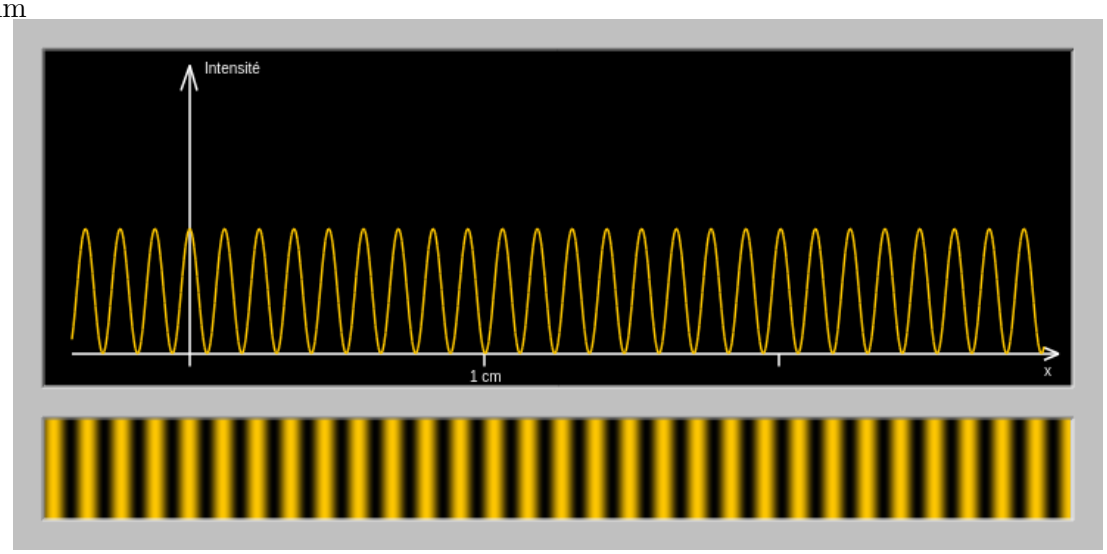
V Influence de la largeur spectrale

V.1 Superposition de 2 longueurs d'onde

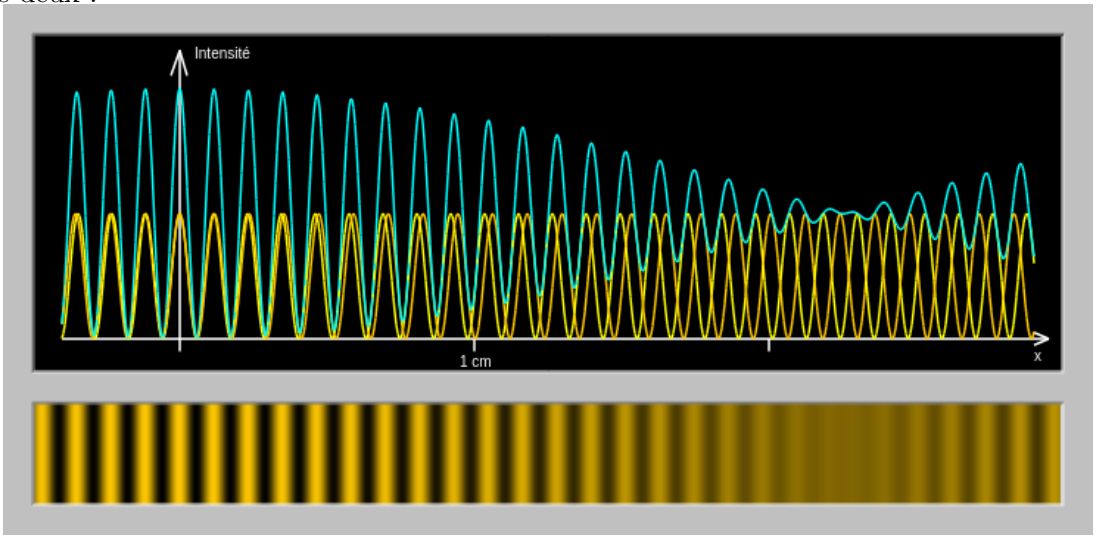
$\lambda = 575$ nm



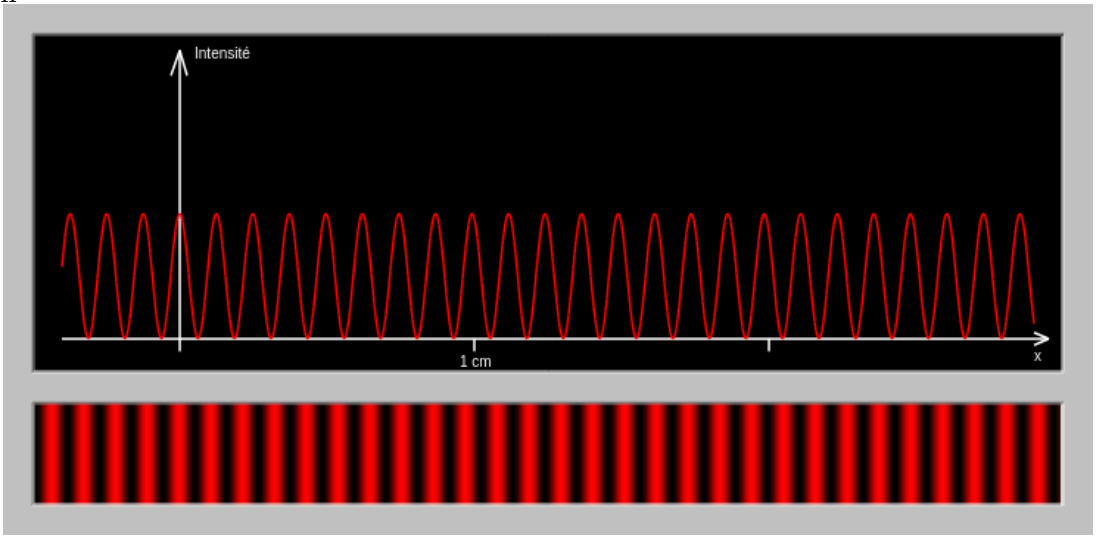
$\lambda = 590$ nm



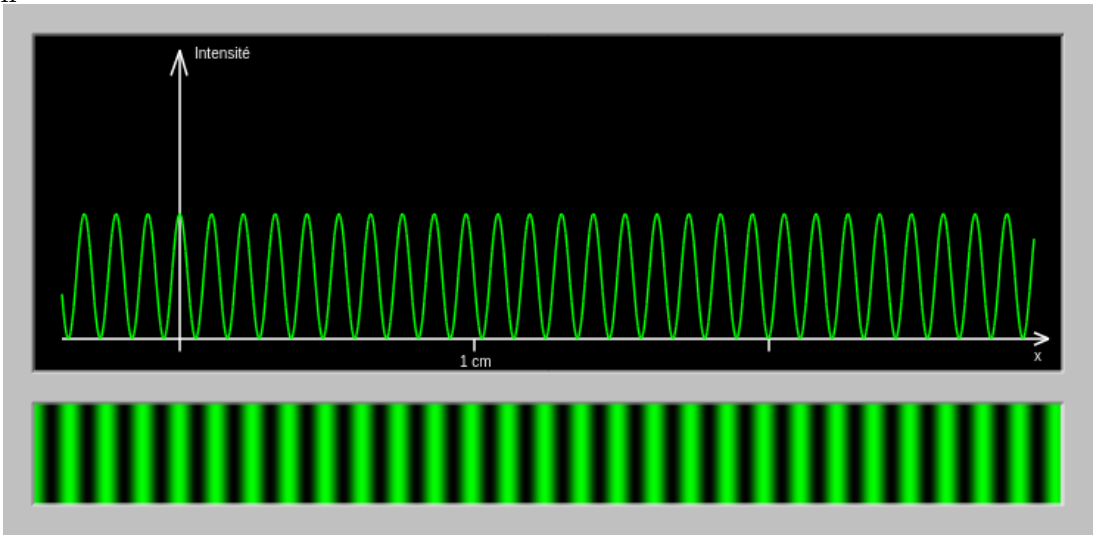
Somme des deux :



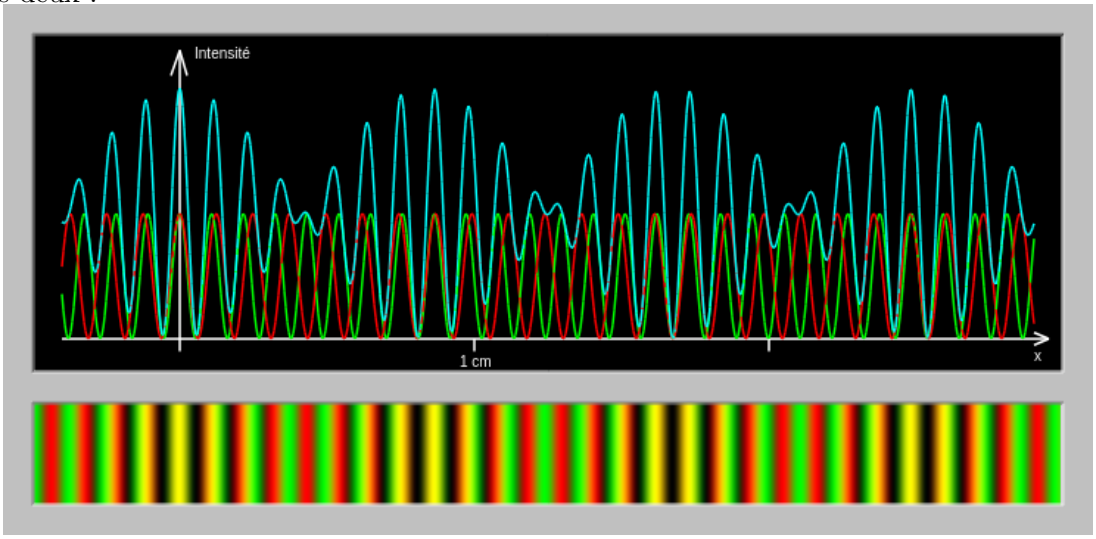
$\lambda = 540$ nm



$\lambda = 620$ nm

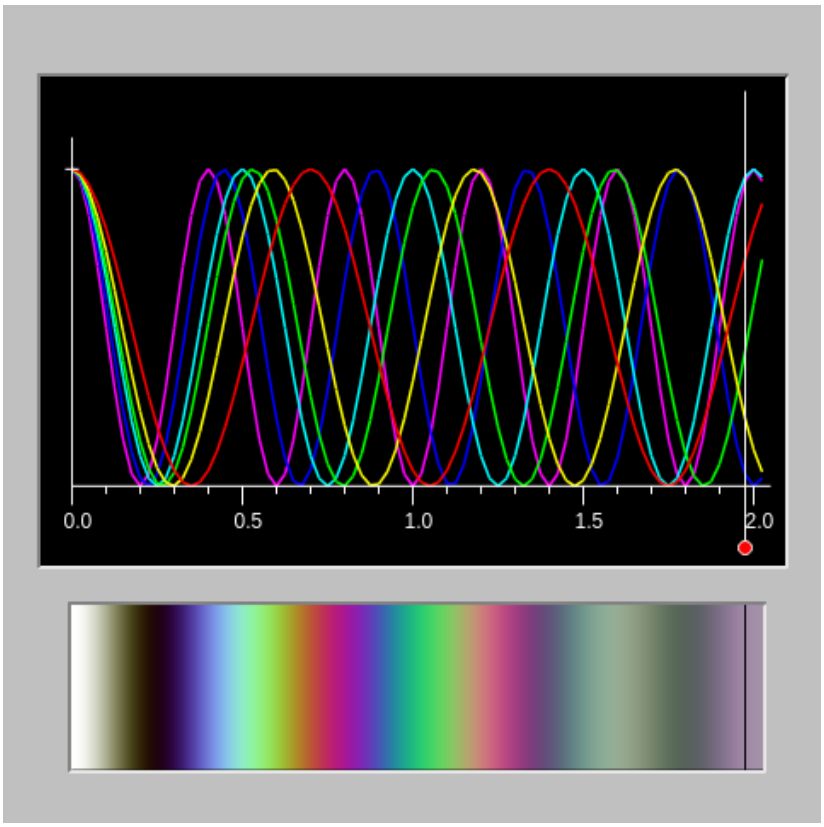


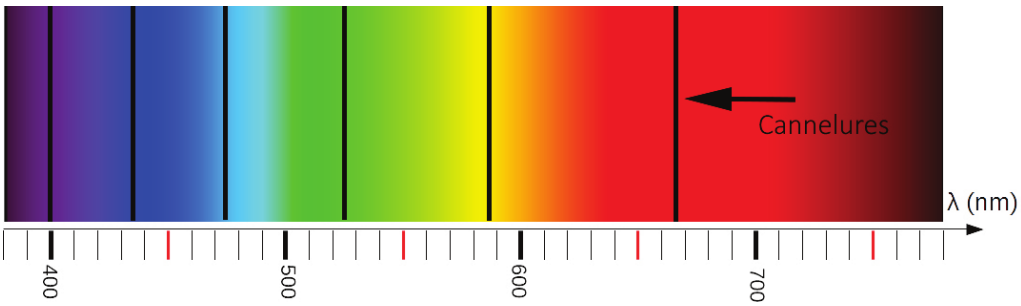
Somme des deux :



V.2 Source de faible largeur spectrale

VI Interférences en lumière blanche





VII N trous d'Young

Simulation numérique de l'éclairement produit par un réseau en transmission, réalisée par l'académie de Caen, permettant de modifier de nombreux paramètres expérimentaux, et notamment d'étudier l'influence des caractéristiques du réseau : `https://physique-chimie.discip.ac-caen.fr/spip.php?article445`