Chapitre III Optique Physique

Le dernier terme dans l'expression de l'éclairement est la seule vraie variable en fonction de la position du point M; lieu d'observation. C'est ce qu'on appellera le terme d'interférences. $2\sqrt{\xi_1\xi_2}\left\langle\cos(\varphi_1(\vec{r},t)-\varphi_2(\vec{r},t))\right\rangle\vec{e}_1.\vec{e}_2$

Si ce terme s'annule il n'a plus possibilité d'interférences.

Il faudra donc étudier les conditions réalisant les interférences entre les deux ondes électromagnétiques superposées en point M.

1ere condition: **Polarisation**

Le produit $\vec{e}_1.\vec{e}_2$ doit être non nul pour garantir l'existence du terme d'interférences. Ce produit scalaire n'est différent de zéro que si les deux polarisations sont non-orthogonales.

Pour assurer les interférences les deux champs $\mathbf{E_1}$ et $\mathbf{E_2}$ ne doivent pas avoir des polarisations orthogonales.

2eme condition: **Déphasage**

L'argument du **cosinus** du terme d'interférences s'écrit comme:

$$\varphi_1(\vec{r},t)-\varphi_2(\vec{r},t)=(\omega_1-\omega_2)t+k_2\overline{S_2M}-k_1\overline{S_1M}+\varphi_{10}(t)-\varphi_{20}(t)$$

Chapitre III Optique Physique

C'est le terme de déphasage; différence entre les phases des deux ondes en interaction en point M. Il est constitué de 3 expressions:

La 1ere expression $(\omega_1-\omega_2)t$ fluctue d'une manière très rapide avec le temps. La valeur moyenne du <cos> sera donc nul si ce terme ne disparait pas préalablement.

Il faut donc pour annuler ce premier terme égaliser les deux pulsations c-à-d utiliser deux ondes monochromatiques avec $\omega_1=\omega_2=\omega$.

La 2eme expression $k_2\overline{S_2M}-k_1\overline{S_1M}=k(\overline{S_2M}-\overline{S_1M})=\frac{2\pi}{\lambda}\delta$

puisque $k=2\pi/\lambda=\omega/V=n\omega/c=k_1=k_2$ sachant qu'on pose au préalable $\omega_1=\omega_2=\omega$.

δ est appelé différence de marche entre les deux ondes en M et traduit la différence entre leurs chemins optiques respectives depuis la source S.

Pour assurer les interférences les deux ondes $\mathbf{E_1}$ et $\mathbf{E_2}$ doivent être de même pulsations (même module du vecteur d'onde).

La 3eme expression $\varphi_{10}(t)-\varphi_{20}(t)$ compare les phases initiales des ondes.

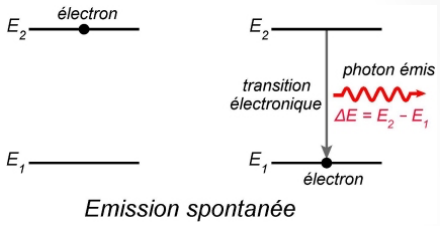
Chapitre III Optique Physique

Origine du terme de phase initiale $\varphi_{10}(t) - \varphi_{20}(t)$

Emission des photons par un atome

L'énergie de ce photon est liée à la pulsation de l'ondelette émise par ce photon par:

$\Delta E = \varepsilon = \hbar\omega$ et l'impulsion du photon est nommée train d'onde de phase, d'amplitude et de pulsation spécifique.

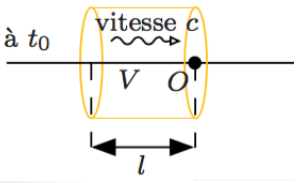


Emission spontanée

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (*h* est la constante de *Planck*)

Plus de détails dans le module de Physique Moderne

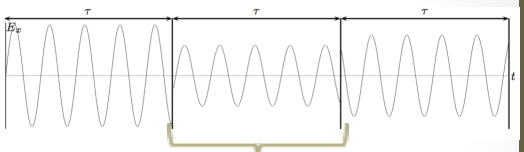
Chaque source lumineuse est caractérise par la longueur des trains d'onde émise par les atomes constituantes.



source	l (m)	τ (s)	$\Delta\nu$ (Hz)
lumière blanche	10^{-6}	$3\,10^{-15}$	$3\,10^{14}$
lampe spectrale	$3\,10^{-3}$ à 0,3	10^{-11} à 10^{-9}	10^{9} à 10^{11}
laser stabilisé	300	10^{-6}	10^{6}
laser (record)	$3\,10^{7}$	10^{-1}	10

Chapitre III Optique Physique

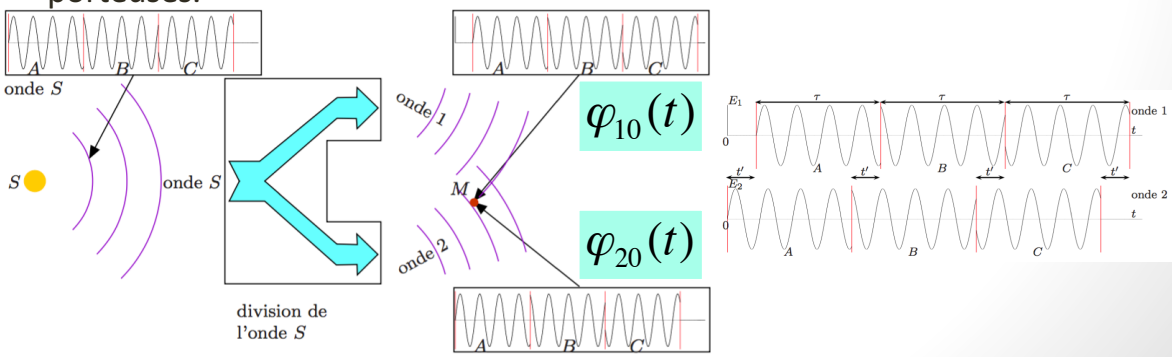
Cohérence des ondes



La longueur temporelle τ_c des trains d'onde est dite temps de cohérence et la longueur spatiale correspondante est appelé longueur de cohérence $\ell_c = c\tau_c$.

Rappelons que ces trains d'onde ont normalement des pulsations, des amplitudes et des phases aléatoires.

En point M, où les deux ondes interférent, vraisemblablement c'est les trains d'onde qui doivent se corréler pour permettre la superposition des ondes porteuses.

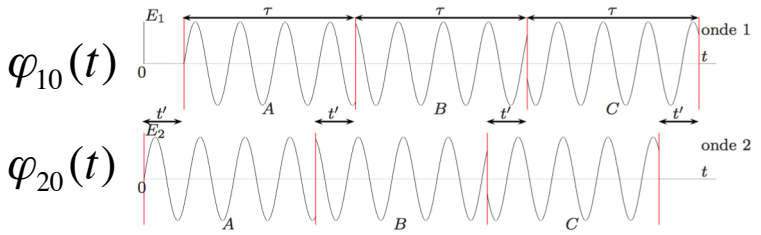


Chapitre III Optique Physique

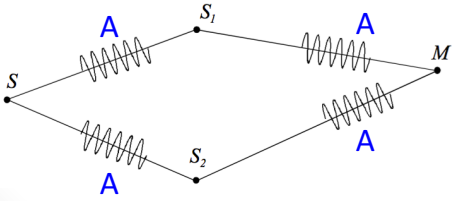
Conditions sur la cohérence

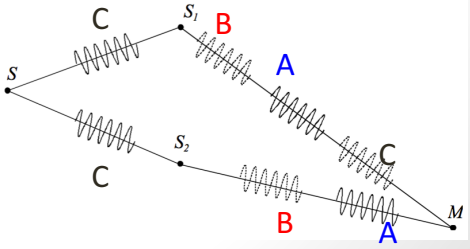
Afin de garantir la cohérence dite temporelle il faudra que la phase des trains d'onde reste constante c-à-d utiliser une même source primaire pour générer les sources secondaires en interaction en M.

Il faudra aussi s'assurer que la différence entre les chemins optique des deux ondes δ soit inférieure à la longueur de cohérence ℓ_c de la source unique.



$$t' = \frac{\delta}{c} \leq \tau_c$$





Chapitre III Optique Physique

Conditions nécessaires pour l'obtention des interférences

- Des champs électromagnétiques issues de la même source primaire (même polarisation, même pulsation et même phase à l'origine)
- Des différences de marche $\boxed{\delta \langle \ell_c}$

Dans ces conditions, les deux sources sont dites cohérentes.

On peut également parlé de cohérence spatiale de la source si celle-ci est ponctuelle (ou fine dans au moins une seule dimension).

C'est pour cela que dans la plupart des situations à traiter on utilisera les adjectifs: **source cohérente, synchrone, ponctuelle, monochromatique**.

En revenant sur l'expression de l'éclairement, on aura:

$$\xi(\vec{r},t) = \xi_1(\vec{r},t) + \xi_2(\vec{r},t) + 2\sqrt{\xi_1\xi_2}\,\langle \cos(\varphi_1(\vec{r},t) - \varphi_2(\vec{r},t))\rangle$$

$$= \xi_1(\vec{r},t) + \xi_2(\vec{r},t) + 2\sqrt{\xi_1\xi_2}\,\cos(\tfrac{2\pi}{\lambda}\delta)$$

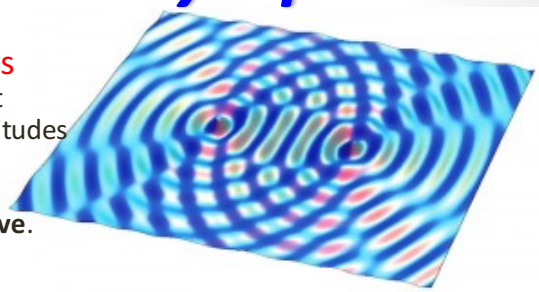
avec un déphasage à l'origine nul $\Delta\varphi_0 = \varphi_{10}(t) - \varphi_{20}(t) = 0$ et la ddm $\delta = n(\overline{SS_2M} - \overline{SS_1M})$

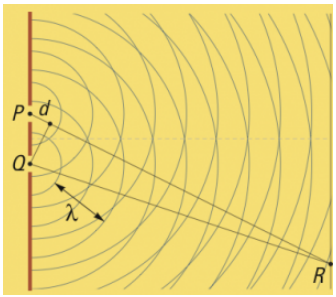
On pose $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$ le déphasage en point d'observation par rapport au point source.

Chapitre III Optique Physique

Analogie avec les interférences surfaciques

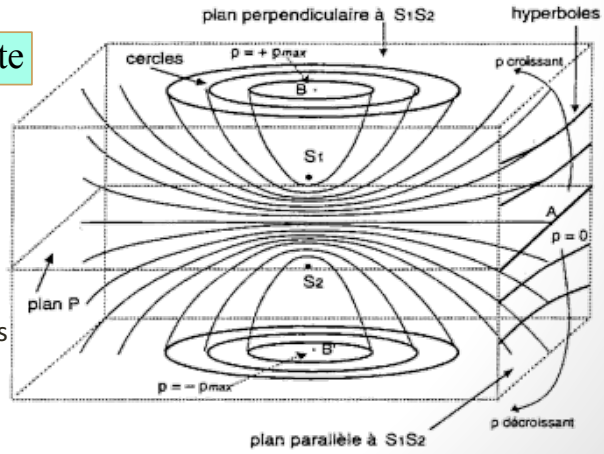
L'expérience de deux pierres lancées simultanément montre que les ondes se superposent. Si leurs amplitudes en un point sont de même signe, on dit qu'elles interfèrent de façon **constructive** et, si elles sont de signes opposés, que cette interférence est **destructive**.





Ces minima et maxima sont liés aux valeurs extrêmes permises pour la différence de marche entre les deux sources.

$$\delta(\lambda) = \text{constante}$$



Dans le cas des interférences des sources lumineuses, les lignes des maxima et des minimas tracent des hyperboloïdes (3D). Ces hyperboloïdes sont des surfaces isophases $\Delta\varphi = \text{constante}$ de révolution de foyers les sources S_1 et S_2.

Chapitre III Optique Physique

Ordre d'interférences

C'est la quantité *p* définie comme le rapport: $p = \dfrac{\delta}{\lambda}$

En écrivant l'éclairement en fonction de *p* :

$$\xi(p) = \xi_1(M) + \xi_2(M) + 2\sqrt{\xi_1\xi_2}\cos(2\pi p)$$

Si ***p est un entier***, le cosinus est maximal et l'éclairement aussi:

$$\xi(M) = \xi_{\max} = \xi_1 + \xi_2 + 2\sqrt{\xi_1\xi_2}$$

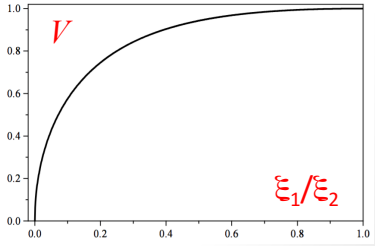
Si ***p est un demi-entier***, le cosinus est minimal et l'éclairement est:

$$\xi(M) = \xi_{\min} = \xi_1 + \xi_2 - 2\sqrt{\xi_1\xi_2}$$

La fonction Visibilité ou Contraste permet de quantifier la qualité des interférences.

$$V = \frac{\xi_{\max} - \xi_{\min}}{\xi_{\max} + \xi_{\min}} = \frac{2\sqrt{\xi_1\xi_2}}{\xi_1 + \xi_2}$$

En traçant la visibilité en fonction du rapport ξ_1/ξ_2 on aura un maximum d'observation (V=1) pour $\xi_1=\xi_2=\xi_0$.



Chapitre III Optique Physique

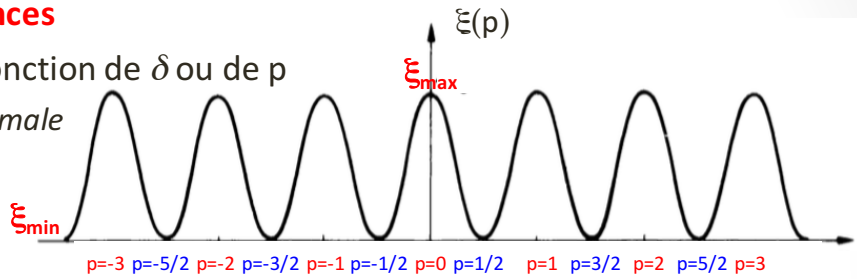
Figure d'interférences

L'éclairement en fonction de δ ou de p

Cas de visibilité maximale

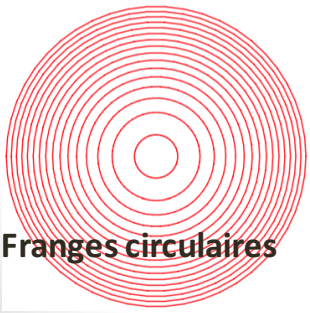
V=1 et $\xi_1=\xi_2=\xi_0$

$\xi_{min}=0$ et $\xi_{max}=4\xi_0$

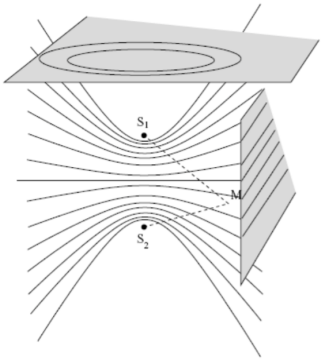


La figure observée sur un écran dépend de l'emplacement de ce dernier par rapport aux sources S_1 et S_2 qui interférent.

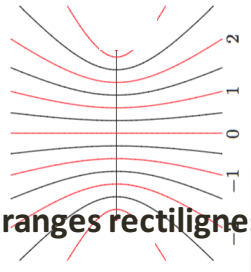
Cas Ecran $\perp$ S_1S_2



Franges circulaires



Cas Ecran // S_1S_2



Franges rectilignes

Chapitre III Optique Physique

Types d'interférences

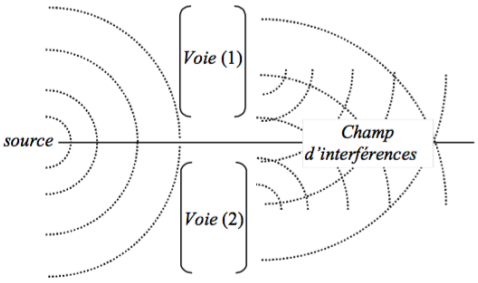
Deux configurations sont possibles pour réaliser des interférences:

1. Soit par **Division de front d'onde**
2. Soit par **Division d'amplitude**

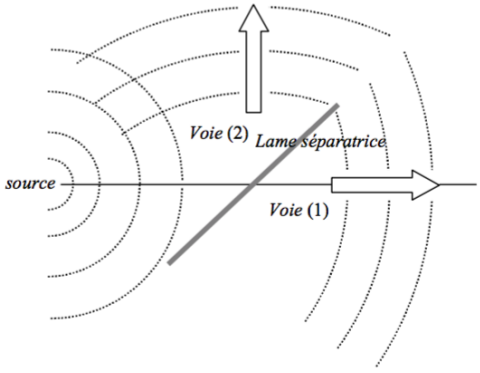
$$E = E_0 \exp j\phi(r,t)$$

$\phi(r,t) \rightarrow \phi_1(r,t)$ et $\phi_2(r,t)$

$E_0 \rightarrow E_{01}$ et E_{02}



1. Division géométrique

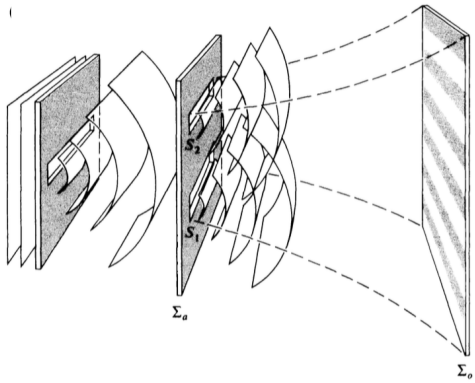


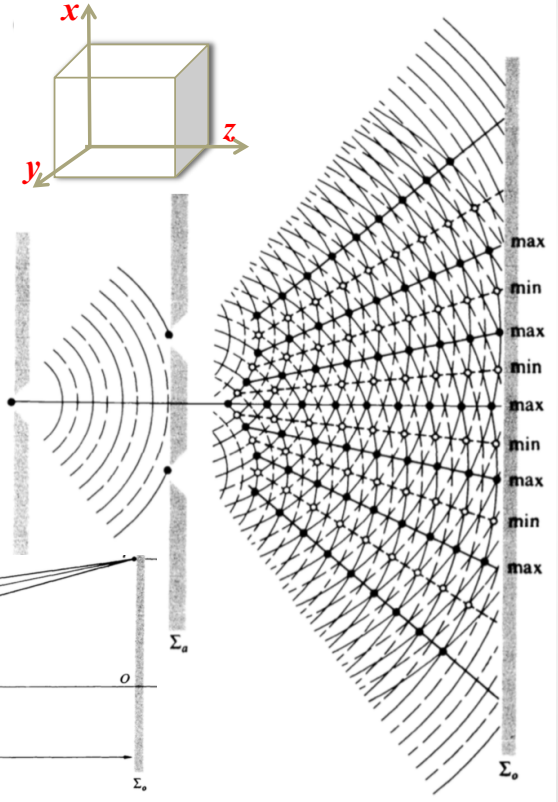
2. Division énergétique

Chapitre III Optique Physique

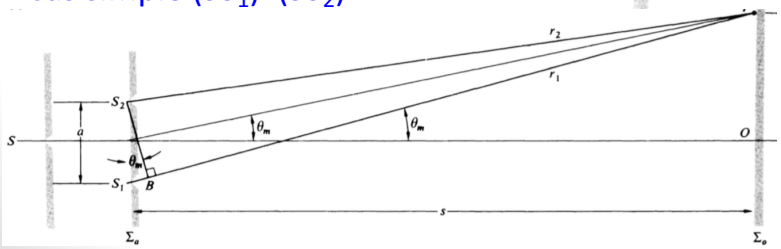
1ere Expérience: Interférences de Young

Fente S➔ Fentes S_1 et S_2, Ecran //





Cas simple $(SS_1)=(SS_2)$



Chapitre III Optique Physique

1ere Expérience: Interférences de Young

Evaluation de la ddm δ: (Cas de visibilité maximale V=1; $\xi_1=\xi_2=\xi_0$ et $\xi_{min}=0$ et $\xi_{max}=4\xi_0$)

L'éclairement est en fonction de δ $\quad \xi(\delta) = 2\xi_0\left[1+\cos(2\pi\frac{\delta}{\lambda})\right]$

avec δ dans le vide: $\quad \delta = (SS_2M)-(SS_1M) = n(\overline{S_2M}-\overline{S_1M}) = \overline{S_2M}-\overline{S_1M}$

Pour connaître les mesures algébriques des distances entre S_1/S_2 et M, il faudra soit connaître l'angle θ (de la figure) ou les positions des différents points.

Soient les coordonnées dans le repère $Oxyz$ (avec O le milieu du segment S_1S_2):

$$S_1:\begin{pmatrix} a/2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};\quad S_2:\begin{pmatrix} -a/2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};\quad M:\begin{pmatrix} x \\ y \\ D \end{pmatrix}$$

En choisissant de travailler dans le cadre de **l'approximation de Gauss** où les dimensions a, x et y sont négligeables devant la distance D entre l'écran et les sources (donc pouvoir utiliser le développement limité $(1+\varepsilon)^n \approx 1+n\varepsilon$; si $\varepsilon \ll 1$), on aura:

$$\overline{S_1M} = D - \frac{ax}{2D} + \frac{x^2+y^2}{2D} + \frac{a^2}{8D} \qquad \overline{S_2M} = D + \frac{ax}{2D} + \frac{x^2+y^2}{2D} + \frac{a^2}{8D}$$

Chapitre III Optique Physique

1ere Expérience: Interférences de Young

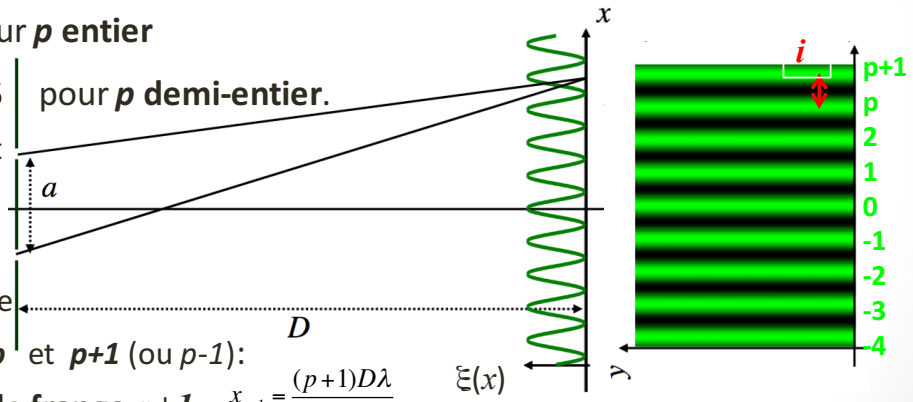
La différence de marche est finalement $\delta = \frac{ax}{D}$ et l'ordre d'interférence $p = \frac{ax}{D\lambda}$

On constate qu'ils dépendent d'une seule variable x, **les franges seront donc rectilignes, alternativement**

claires pour ***p* entier**

et **sombres** pour ***p* demi-entier.**

L'**interfrange** est la distance séparant deux franges de même type, d'ordres ***p*** et ***p+1*** (ou *p-1*):



La position de la **frange *p+1***: $x_{p+1} = \frac{(p+1)D\lambda}{a}$

La position de la **frange *p***: $x_p = \frac{pD\lambda}{a}$

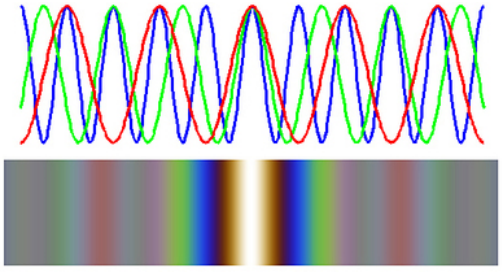
L'interfrange i: $i = x_{p+1} - x_p = \frac{D\lambda}{a}$

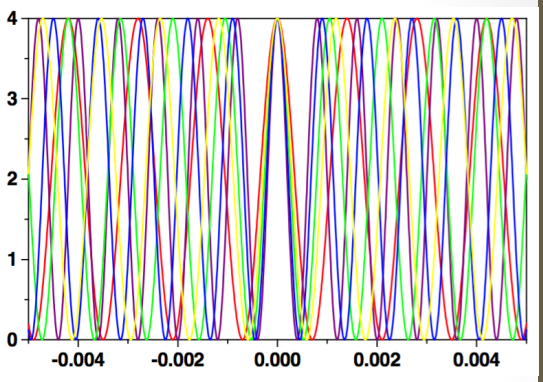
Elle dépend des distances D et a et de la longueur d'onde λ de la source utilisée.
Elle est constante donc les franges équidistants.

Chapitre III Optique Physique

1ere Expérience: Interférences de Young

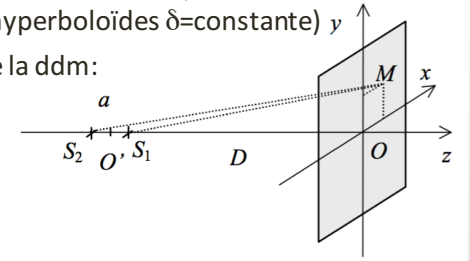
Cas d'une source polychromatique: Le spectre des franges est cannelé pour une lumière blanche puisque il y aura disparation d'une partie de la figure après superposition des systèmes de franges correspondants à chaque longueur d'onde.



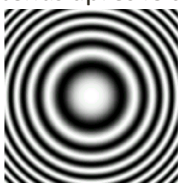


Pour un écran perpendiculaire aux sources S_1S_2

Les franges observées seront circulaires (intersection du plan de l'écran avec les hyperboloïdes δ=constante)



Les rayons r des franges sont obtenus après le calcul de la ddm:

$$\delta = a\left(1 - \frac{r^2}{2D^2}\right)$$

avec $r = \sqrt{x^2 + y^2}$