

ATS

EM5 OPTIQUE ONDULATOIRE

Programme ATS

11. Optique ondulatoire	
Interférences	<p>Expliquer le modèle scalaire de l'onde lumineuse. Définir l'intensité lumineuse. Décrire le phénomène d'interférence à deux ondes monochromatiques dans le cas du dispositif des trous d'Young. Définir la différence de phase, la différence de marche, l'ordre d'interférence et l'intensité lumineuse en un point du champ d'interférence de deux ondes monochromatiques cohérentes. Mettre en œuvre le dispositif expérimental des trous d'Young ou des fentes d'Young.</p>

I) DUALITE ONDE-CORPUSCULE POUR LA LUMIERE

I)1) Historique

A) De l'Antiquité au XVII^{ème} siècle : l'optique géométrique

Antiquité : La notion de *rayon lumineux* était connue, ainsi que la *loi de la réflexion* et l'idée d'un *minimum de chemin* suivi par la lumière (Héron d'Alexandrie), mais pas celle de la réfraction.

1609 : 1^{ère} *lunette astronomique* due à **Galilée** (1564, 1642).

1611 : Publication de la « dioptrique » de **Képler** (1571, 1630), où il expose le principe d'une *lunette à 2 lentilles convergentes*. A la même époque, construction des 1^{er} *microscopes*.

1657 : **Fermat** (1601, 1665) retrouve les *lois de la réfraction* à l'aide du principe de moindre temps.

1673 : Publication de la « dioptrique » de **Descartes** (1596, 1650), dans laquelle il fait connaître les lois de la réfraction établies par Snell (1591, 1626). Il pose le problème du *stigmatisme* et donne une théorie de l'arc-en-ciel (sans pouvoir expliquer l'origine des colorations).

B) XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles : modèle ondulatoire

1690 : Publication du « traité de lumière » de Christian **Huygens** (1629, 1695), où se trouve la 1^{ère} évocation d'une *théorie ondulatoire*, cependant bientôt éclipsée par les travaux de Newton.

1672 : Construction du 1^{er} télescope à réflexion par **Newton** (1642, 1727). Publication de 2 traités basés sur une conception **corpusculaire** (1672 pour la Théorie des couleurs (*décomposition de la lumière par un prisme*), 1704 pour l'Optique).

1802 : 1^{ères} mesures des longueurs d'onde par le médecin anglais Thomas **Young** (1773, 1829). A la même époque, **Malus**, **Fresnel** et Arago étudient la lumière polarisée. **Fresnel** donne une théorie des phénomènes d'interférence et de diffraction, basée sur une théorie ondulatoire de la lumière.

1870 : **Maxwell** inclut l'optique dans l'électromagnétisme : la lumière est une onde ! C'est l'apogée de la physique classique.

C) XX^{ème} siècle : le photon et la révolution quantique

1880 : 1^{ères} expériences de **Michelson** et **Morley** destinées à mettre en évidence le rôle du changement de référentiel sur la propagation des ondes électromagnétiques.

1901 : Max **Planck** (1858, 1947) découvre la loi de rayonnement du corps noir et introduit la constante de Planck h .

1905 : **Einstein** (1879, 1955) montre que l'effet photoélectrique ne peut s'interpréter qu'en introduisant un corpuscule, le photon, auquel il associe une énergie cinétique et une quantité de mouvement. Ces travaux reviennent donc sur la nature corpusculaire mais ne peuvent pas faire oublier les expériences qui ne peuvent être correctement interprétées alors qu'avec une hypothèse ondulatoire (interférences, diffraction notamment). Le **photon** serait à la fois *une onde et un corpuscule*.

1924 : **Louis De Broglie** propose une unification des 2 concepts ondes-corpuscules en admettant une *nature duale de la lumière* (l'intensité de l'onde mesure la probabilité de présence des photons).

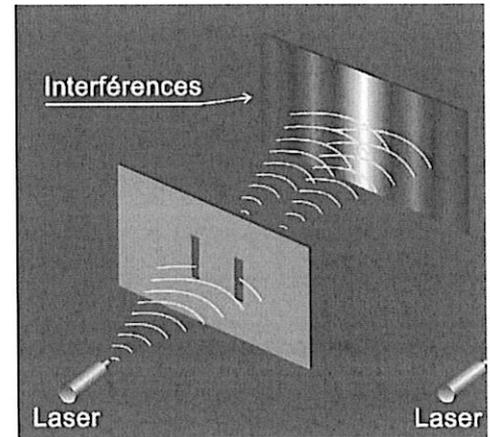
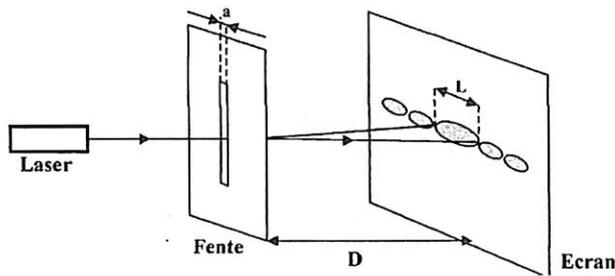
1960 : 1^{ers} lasers.

1)2) Modèle ondulatoire de la lumière

Deux phénomènes permettent de mettre en évidence le caractère ondulatoire de la lumière :

Phénomène de **diffraction** :

Phénomène d'**interférences** :



La lumière est une onde électromagnétique dont la **vitesse de propagation** (ou **célérité**) vaut :

- $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vide,
- $v = \frac{c}{n}$ dans un milieu transparent défini par son **indice optique** $n \geq 1$.

$$n = \frac{c}{v}$$

Remarque : $v_{\text{milieu}} \leq c_{\text{vide}}$

Ordres de grandeur : $n_{\text{eau}} = 1,33$; $n_{\text{verre}} \approx 1,5$

Milieu Transparent Homogène Isotrope (MHTI) :

- Transparent : non absorbant,
- Homogène : les propriétés du milieu sont les mêmes en tout point de l'espace,
- Isotrope : les propriétés du milieu sont les mêmes dans toutes les directions.

L'indice n d'un milieu MHTI est **uniforme** : il a la même valeur en tout point de l'espace.

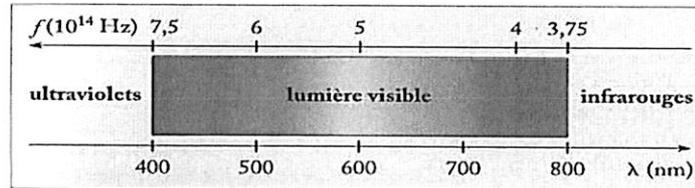
Attention : l'indice n d'un milieu peut dépendre de la fréquence f (et de la longueur d'onde λ) de l'onde lumineuse. On dit que le milieu est **dispersif**.

Exemple : eau dispersive => arc en ciel

Longueur d'onde et fréquence

Une onde lumineuse harmonique est aussi appelée onde **monochromatique**.

Lumière visible :



Ondes lumineuses visibles : on reconnaît les couleurs de l'arc-en-ciel (rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo, violet).

La longueur d'onde dans le vide des ondes monochromatiques visibles est comprise entre 400 nm (Ultraviolets) et 800 nm (Infrarouges).

COULEUR	Fréquence ν (Hz)	Longueur d'onde dans le vide λ_0 (m)	Longueur d'onde dans milieu d'indice n λ (m)
Rouge	$4 \cdot 10^{14}$	$750 \cdot 10^{-9}$	
Violet	$7,5 \cdot 10^{14}$	$400 \cdot 10^{-9}$	
Quelconque	$\nu = \frac{c}{\lambda_0}$	$\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$	$\lambda = \frac{\nu}{\nu} = \frac{\lambda_0}{n}$

Remarque : la couleur perçue est associée à la fréquence du rayonnement (indépendante du milieu de propagation) et non à la longueur d'onde (qui dépend de l'indice n du milieu de propagation).

1)3) Modèle corpusculaire de la lumière

(hors-programme)

Expérience : Effet photo-électrique <https://www.youtube.com/watch?v=z-3XaXCvjZw>

La lumière est constituée de particules appelées **photons**.

Caractéristiques d'un photon :

- Il a une masse nulle,
- Il se déplace à la vitesse de la lumière, dans la direction de propagation de l'onde,
- Il transporte une énergie :

$$E = h \cdot \nu \quad (\text{Relation de Planck-Einstein})$$

ν : fréquence de l'onde (Hz)

h : constante de Planck, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

E : énergie d'un photon (J)

I)4) Dualité onde-corpuscule de la lumière (hors-programme)

<https://toutestquantique.fr/dualite/>

La lumière a une double nature : on parle de dualité onde-corpuscule.

Les photons ont un comportement de type **particule** dans leur détection, mais la probabilité de les détecter en un point (c'est-à-dire leur propagation) est régie par des **lois ondulatoires**.

II) SOURCES LUMINEUSES (culture G)

Source (ou objet) primaire de lumière : qui émet spontanément de la lumière.

Exemples : Soleil, flamme, lampe

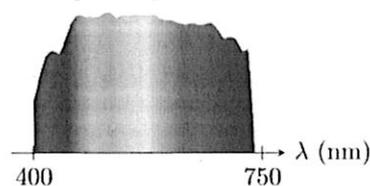
Source (ou objet) secondaire de lumière : qui diffuse de la lumière provenant d'une source primaire.

Exemples : Lune, feuille de papier

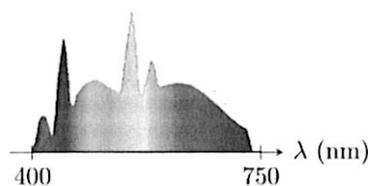
II)1) Sources de lumière polychromatiques

Une source de **lumière polychromatique** est caractérisée par son spectre.

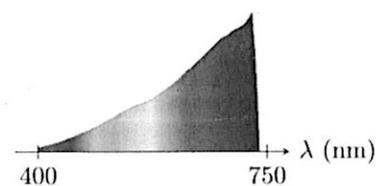
Exemples :



(a) Soleil vu sur Terre



(b) Lampe à économie d'énergie



(c) Lampe à incandescence

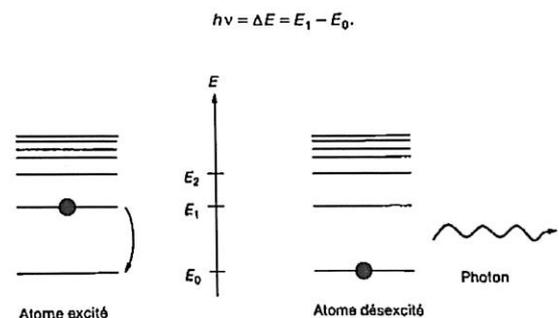
Remarque : Une source de lumière blanche possède un spectre continu, qui contient toutes les longueurs d'onde visible.

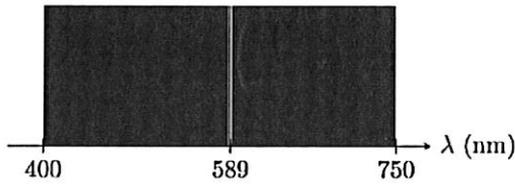
II)2) Lampes spectrales

Exemples : tubes néons, lampes à vapeur de sodium.

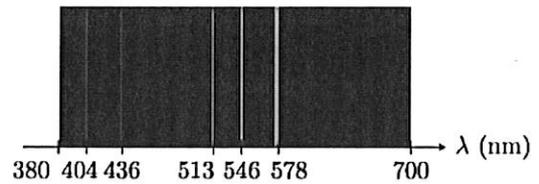
Flux d'électrons dans vapeur atomique

- Excitation des électrons
 - Désexcitation des électrons
- ⇒ Emission de photons





(a) Lampe à vapeur de sodium



(b) Lampe à vapeur de mercure

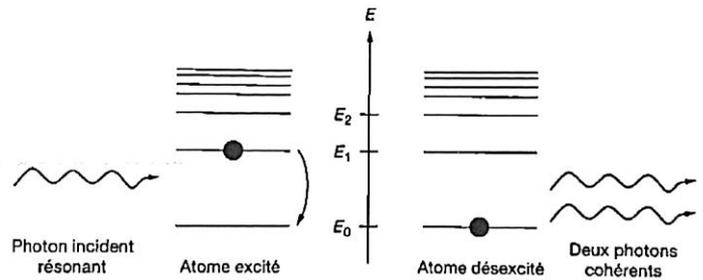
Une lampe spectrale possède un spectre composé de **raies spectrales** caractéristiques des atomes qu'elle contient.

II)3) LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Photon incident résonant de fréquence ν
telle que :

$$E_1 - E_0 = h \cdot \nu$$

- ⇒ Photon émis **cohérent** avec le photon incident (même fréquence, même direction de propagation, en phase),
- ⇒ Lumière **monochromatique**.



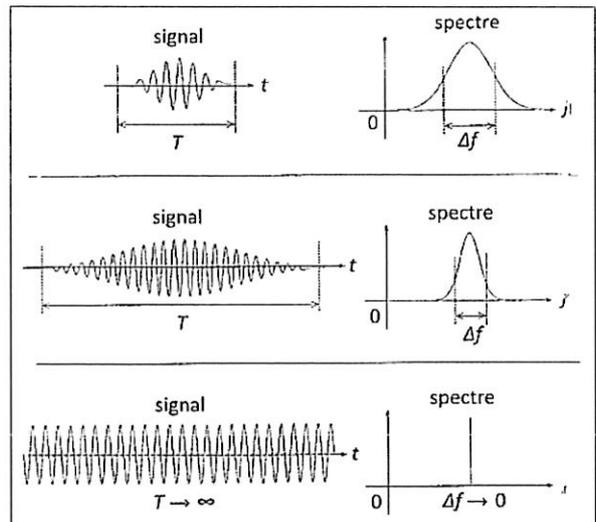
II)4) Modèle de la source ponctuelle monochromatique

Modèle de la **source ponctuelle** :

Source infiniment petite (assimilable à un point) qui émet de la lumière de façon équi-répartie dans toutes les directions : émission isotrope.

Modèle de la **source monochromatique** :

Emission d'une onde harmonique pendant un temps infiniment long.



III) INTERFERENCES ENTRE DEUX ONDES LUMINEUSES DE MEME FREQUENCE

III)1) Modèle scalaire de l'onde lumineuse

Modèle ondulatoire de la lumière : onde électromagnétique se propageant

- dans un sens et une direction donnés (donnés par le vecteur d'onde \vec{k})
- avec une vitesse de propagation $v = \frac{c}{n}$

Caractéristiques d'une onde électromagnétique :

$$\vec{E}(M, t) = \vec{E}(r, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_0) \quad \text{avec } E_0 = cte$$

$$\vec{B}(M, t) = \vec{B}(r, t) = \vec{B}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_0')$$

\vec{E} et \vec{B} sont des grandeurs vectorielles.

Puissance moyenne rayonnée = Flux moyen du vecteur de Poynting :

$$\langle P_{ray} \rangle = \left\langle \iint_S \vec{R} \cdot \vec{dS} \right\rangle = \frac{\epsilon_0 c S}{2} E_0^2 = \frac{S}{2\mu_0 c} E_0^2$$

La puissance rayonnée est proportionnelle au carré du champ électrique.

Caractéristique d'une onde lumineuse :

Amplitude lumineuse : $a(M, t) = a(r, t) = a_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_a)$

a est une **grandeur scalaire**

Intensité lumineuse ou éclaircissement : $I(M, t) = \langle a^2(M, t) \rangle$

Electromagnétisme	Optique ondulatoire
Champ électrique \vec{E}	Amplitude lumineuse a
$\langle P_{ray} \rangle = \left\langle \iint_S \vec{R} \cdot \vec{dS} \right\rangle$	$I(M, t) = \langle a^2(M, t) \rangle$

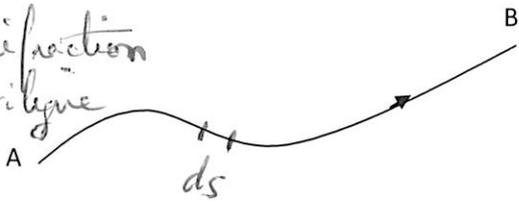
III)2) Chemin optique, différence de marche, différence de phase

Soit un rayon lumineux se propageant dans l'espace, dont l'indice optique n est variable (en fonction de l'espace).

L'onde lumineuse « se propage » le long du rayon lumineux.

Chemin optique (AB) entre A et B :

$$(AB) = \int_A^B n \cdot ds$$

n : indice de réfraction
 s : abscisse curviligne le long du rayon


(AB) est homogène à une distance.

Si le milieu est homogène, $n = \text{constante}$.

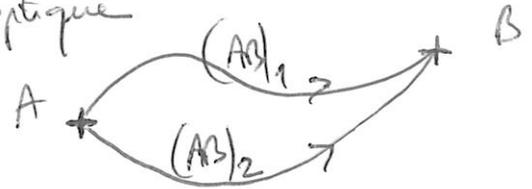
• Le chemin optique s'écrit $(AB) = n \cdot AB = \frac{c}{v} \cdot AB$

$(AB) = c \cdot t_{AB}$
 \downarrow vitesse de la lumière dans le vide
 \rightarrow durée mise par la lumière pour aller de A à B ...

Lorsque 2 trajets optiques de la lumière sont possibles entre A et B, alors 2 chemins optiques $(AB)_1$ et $(AB)_2$ sont possibles.

Différence de marche $\delta =$ différence de chemin optique

$$\delta = (AB)_2 - (AB)_1$$

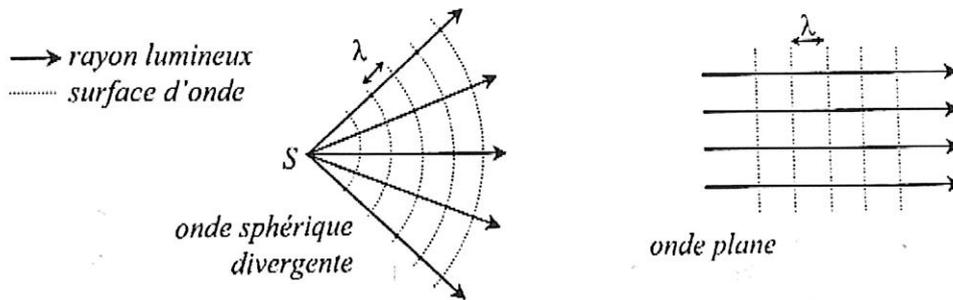


Différence de phase $\Delta\varphi$ associée :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$$

Différence de marche δ	δ	λ	$p\lambda$
Différence de phase $\Delta\varphi$	$\frac{2\pi}{\lambda} \delta$	2π	$2\pi p$
Ordre d'interférence	p	1	p

III)3) Surface d'onde



S source ponctuelle.

Surface d'onde : ensemble des points M tels que les chemins optiques parcourus entre S et M sont identiques.

Les rayons lumineux sont perpendiculaires aux surfaces d'onde, quel que soit le nombre de réflexions et réfractions subies (Théorème de Malus).

III)3) Superposition de 2 ondes monochromatiques de même fréquence

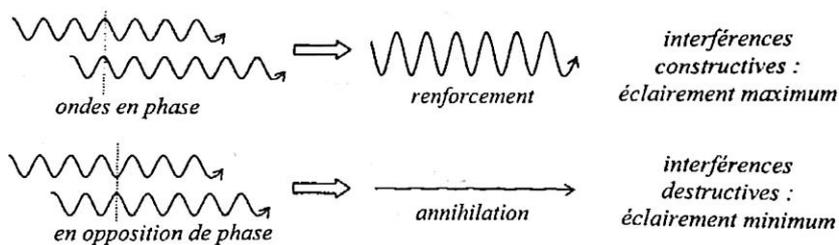
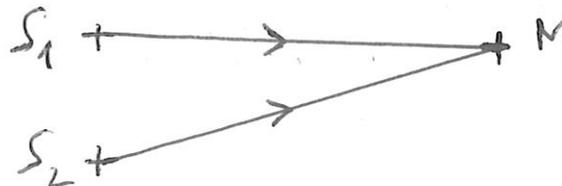


Schéma :



Intensité résultante en M :

$$\boxed{I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi)}$$

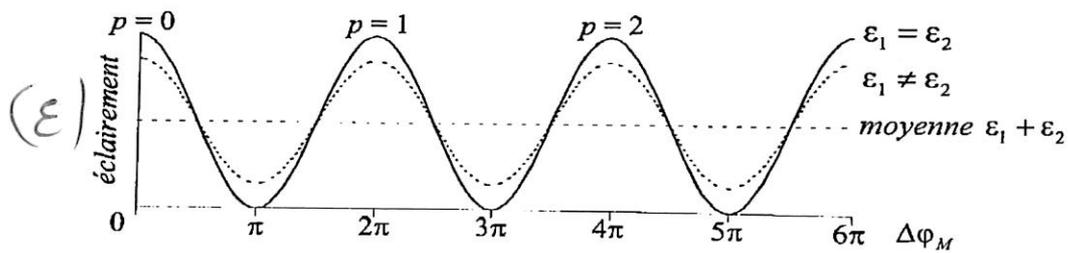
Formule de Fresnel
(fournie)

avec : I_1 = intensité en M si S_1 seule

I_2 = intensité en M si S_2 seule

$\Delta\varphi$ = différence de phase.

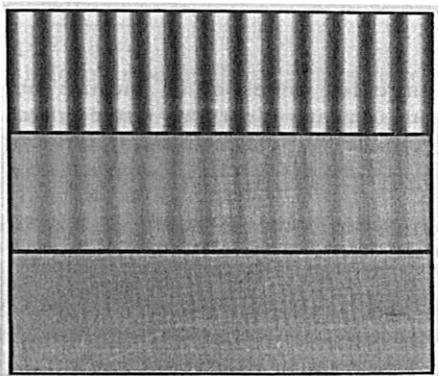
$2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi)$ = Terme d'interférence



Contraste : $I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (\cos \Delta\varphi = +1)$
 $I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (\cos \Delta\varphi = -1)$

si $I_1 = I_2$ $I_{\max} = 4I$ | Coherente maximal
 $I_{\min} = 0$

Contraste = $\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$



Contraste maximal

$I_1 = I_2$

Contraste faible

$I_1 \neq I_2$

Pas d'interférence.

On observe des **franges d'interférences**.

Le long d'une frange d'interférence, l'ordre d'interférence $p = \frac{\delta}{\lambda}$ est constant.

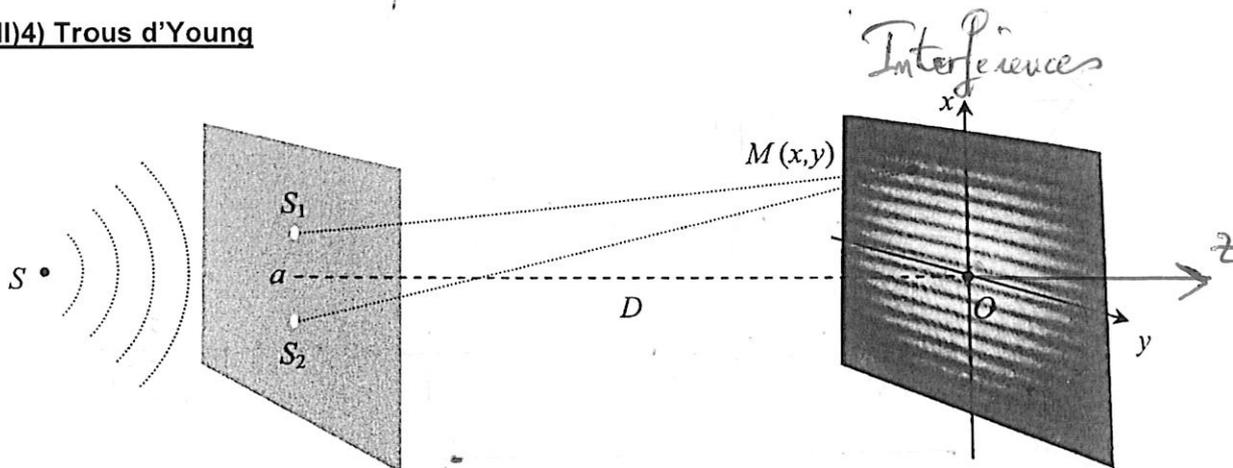
Franges brillantes : Éclairement maximal
 p entier

Franges sombres : Éclairement minimal
 p "demi-entier"

Une frange est une ligne « équiphase ».

Interfrange = distance entre 2 franges successives de même nature.

III)4) Trous d'Young



S = Source primaire ponctuelle monochromatique.

S_1 et S_2 , trous « petits » (par rapport à la longueur d'onde) = Sources secondaires ponctuelles monochromatiques **cohérentes** (même fréquence, en phase).

Apparition de **franges**.

> Détermination de la **différence de marche** et de l'**interfrange** :

$$\begin{array}{ccc}
 S_1 & \left| \begin{array}{c} \frac{a}{2} \\ 0 \\ -D \end{array} \right. & S_2 & \left| \begin{array}{c} -\frac{a}{2} \\ 0 \\ -D \end{array} \right. & M & \left| \begin{array}{c} x \\ y \\ 0 \end{array} \right.
 \end{array}$$

M situe à une distance D du plan (S_1/S_2)

* Différence de marche

$$\delta = (S_2M) - (S_1M) = n(S_2M - S_1M)$$

Avec: $S_1M = \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2}$

$$S_2M = \sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2}$$

D'où: En factorisant par D^2

$$S_1M = \sqrt{D^2 \left(\frac{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2}{D^2} + \frac{y^2}{D^2} + \frac{D^2}{D^2} \right)}$$

$$= D \sqrt{\frac{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2}{D^2} + \frac{y^2}{D^2} + 1}$$

$$\approx D \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{D^2} + \frac{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2}{D^2} \right) \right)$$

$$\begin{array}{l}
 \text{si } \left| \begin{array}{l} D \gg x, \\ D \gg y, \end{array} \right. \\
 \text{DL d'ordre 1}
 \end{array}$$

DL d'ordre 1

$$\sqrt{1+X} \approx 1 + \frac{1}{2}X$$

avec

$$X = \frac{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2}{D^2} + \frac{y^2}{D^2}$$

De même :

$$S_2M = D \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{D^2} + \frac{(x+\frac{a}{2})^2}{D^2} \right) \right)$$

D'où :

$$\begin{aligned} & S_2M - S_1M \\ &= \frac{D}{2D^2} \left((x+\frac{a}{2})^2 - (x-\frac{a}{2})^2 \right) \\ &= \frac{D}{2D^2} \left(x^2 + \frac{a^2}{4} + ax - x^2 - \frac{a^2}{4} + ax \right) = \frac{ax}{D} \end{aligned}$$

D'où :

$$\delta = n(S_2M - S_1M) = \frac{nax}{D}$$

Fringes

les fringes sont obtenues pour $\delta = \text{cte}$, c'est à dire $x = \text{cte}$, si milieu homogène ($n = \text{cte}$).

⇒ Fringes rectilignes et \perp à l'axe des fringes

Interfranges

2 fringes consécutives sont liées à une différence $\delta = \lambda$

$$\frac{nax_{p+1}}{D} - \frac{nax_p}{D} = \lambda$$

$$(x_{p+1} - x_p) = \frac{\lambda D}{na} = i \text{ (interfrange)}$$

$$i = \frac{\lambda D}{na}$$

interfrange = distance entre 2 fringes lumineuses.

n : indice de réfraction du milieu

a : distance entre les 2 trous

D : distance trous / écran

λ : longueur d'onde.