

# MODELE ONDULATOIRE DE LA LUMIERE

## I. Rappels

### 1.1 Sources de lumière

Tout système qui produit effectivement de la lumière ou qui diffusent (répandre dans toutes les directions) la lumière qui les frappe (corps éclairés)

Exemples : Le soleil (énergie nucléaire), une flamme (énergie chimique), le filament d'une lampe à incandescence(énergie électrique)

### 1.2 Milieux de propagation de la lumière

Les milieux de propagation de la lumière sont appelés **milieux transparents**(le vide, l'air, le verre, l'eau, ...) : se laissent traverser par la lumière

Les milieux non propagateurs sont appelés **milieux opaques** : ne se laissent pas traverser par la lumière

Les milieux translucides : se laissent traverser par la plus grande partie de l'énergie lumineuse incidente, mais la vision à travers eux est floue(verre dépoli, quartz naturel, eau trouble,...)

## 2. Propagation rectiligne de la lumière

La lumière se propage en ligne droite dans le vide comme dans un milieu transparent homogène

### 2.1 Rayon lumineux

Un rayon lumineux est la normale à l'onde lumineuse, il caractérise la direction de propagation.

### 2.2 Faisceaux lumineux

Un faisceau lumineux est un ensemble de rayons lumineux

### 2.3 Lumière **monochromatique**- Lumière **polychromatique**

- Une lumière est dite **monochromatique** lorsqu'elle est composée d'**une seule radiation de longueur d'onde déterminée** (donc d'une seule couleur).  
Ex : Lumière d'un laser.
- Une lumière est dite **polychromatique** si elle est composée de **plusieurs radiations de longueurs d'ondes différentes** (donc de plusieurs couleurs).  
Ex : Lumière blanche.

## 3. Célérité de la lumière

La célérité  $c$  d'un signal se propageant dans un milieu unidirectionnel donné est égale au rapport de la mesure de la distance  $d$  de deux points quelconques du milieu propageur à la mesure du décalage horaire  $\theta$  entre les variations de propriétés de ces deux points  $c = \frac{d}{\theta}$

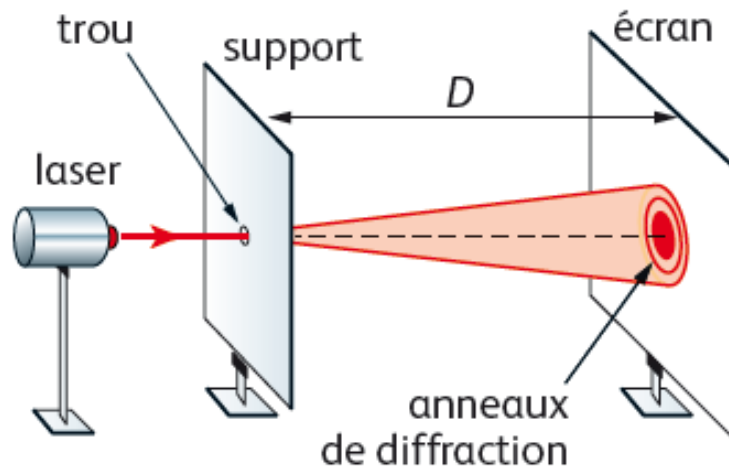
Dans le vide et pratiquement dans l'air, **toutes les radiations lumineuses se propagent avec la même célérité  $c = 3.00 \cdot 10^8$  m/s, quelque soit leur fréquence.**

## II. LA DIFFRACTION DE LA LUMIERE

En plaçant un obstacle (ou ouverture) sur le trajet d'un faisceau lumineux, on obtient une figure de diffraction dont l'aspect **dépend** de la forme de l'obstacle (ou ouverture).

### 1. Diffraction de la lumière par un trou

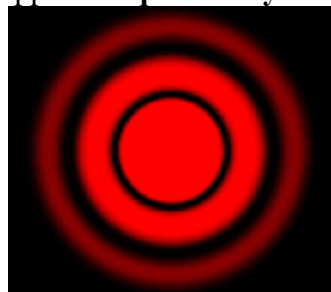
Interposons un trou sur le trajet d'un laser de couleur rouge.



### Observations

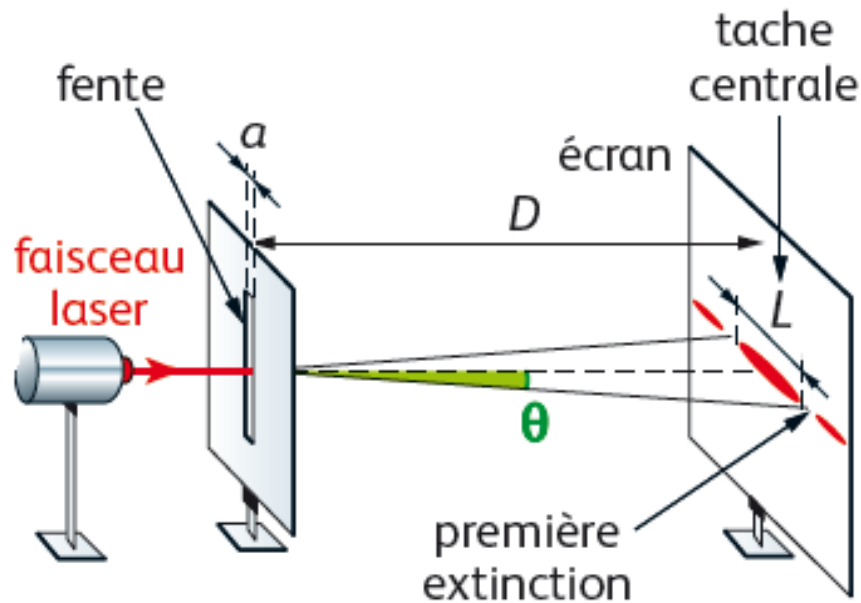
la tache lumineuse centrale est circulaire, plus large que le faisceau émis, et entourée de quelques anneaux moins lumineux

La figure de diffraction consiste en des anneaux concentriques autour d'un **disque central** particulièrement lumineux qui est appelé **disque d'Airy** ou **tache d'Airy**



### 2. Diffraction de la lumière par une fente

Interposons une fente sur le trajet d'un laser de couleur rouge.



L'importance du phénomène de diffraction se mesure à l'aide de l'**écart angulaire** (souvent noté  $\theta$ ).

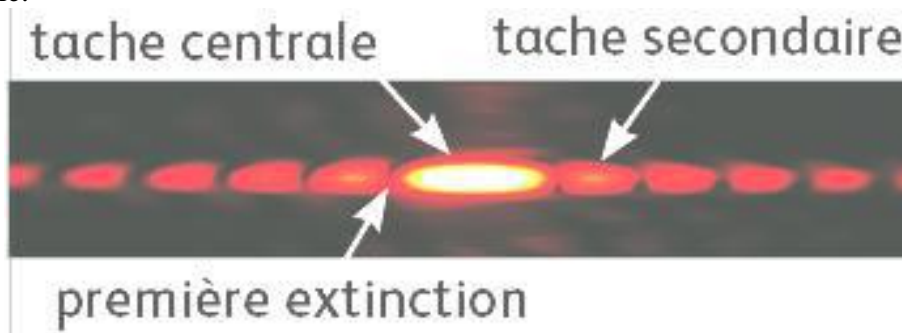
L'écart angulaire  $\theta$  **augmente** lorsque la longueur d'onde  $\lambda$  **augmente** et lorsque la dimension de l'ouverture (ou de l'obstacle) **diminue**.

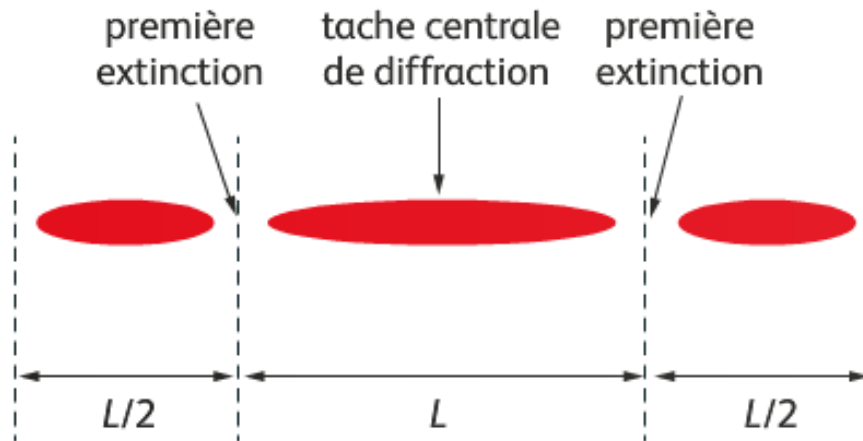
Dans le cas d'une onde lumineuse monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  et d'une fente fine de largeur  $a$  (ou un fil de diamètre  $a$ ), l'écart angulaire  $\theta$  s'exprime de la façon suivante :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

### Observation

On observe une tâche centrale très lumineuse puis une alternance de tâches sombres et lumineuses qui s'atténuent de plus en plus au fur et à mesure qu'elles sont éloignées de la tâche centrale.





Dans le cas de la diffraction de la **lumière blanche** par une fente, la figure de diffraction fait apparaître :

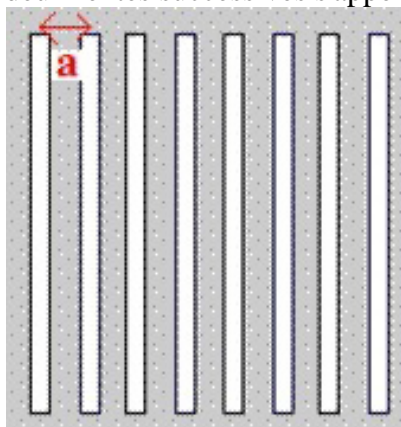
- une tache centrale **blanche**
- des taches latérales **irisées (colorées)**



Cela est dû au fait que pour chaque longueur d'onde, la figure de diffraction n'a pas la même taille. Ainsi la **superposition** de ces figures produit des **irisations** de part et d'autre de la tache centrale.

### 3. Diffraction de la lumière par un réseau

Un réseau par transmission est constitué par un très grand nombre de fentes parallèles et équidistantes. Il est souvent fabriqué à partir d'une lame de verre sur laquelle on a tracé un très grand nombre de traits parallèles et équidistants (de l'ordre de la centaine de traits par millimètre !). La distance  $a$  entre le milieu de deux fentes successives s'appelle le pas du réseau.

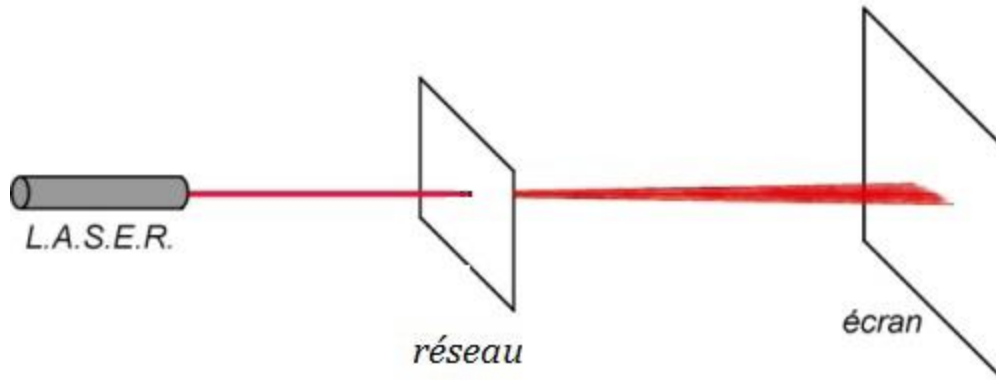


Les réseaux plans sont également caractérisés par le nombre  $n$  de traits par unité de longueur.

On a donc :  $n = \frac{1}{a}$

- $a$  : pas du réseau (en unité de longueur) ;
- $n$  : nombre de traits par unités de longueur.

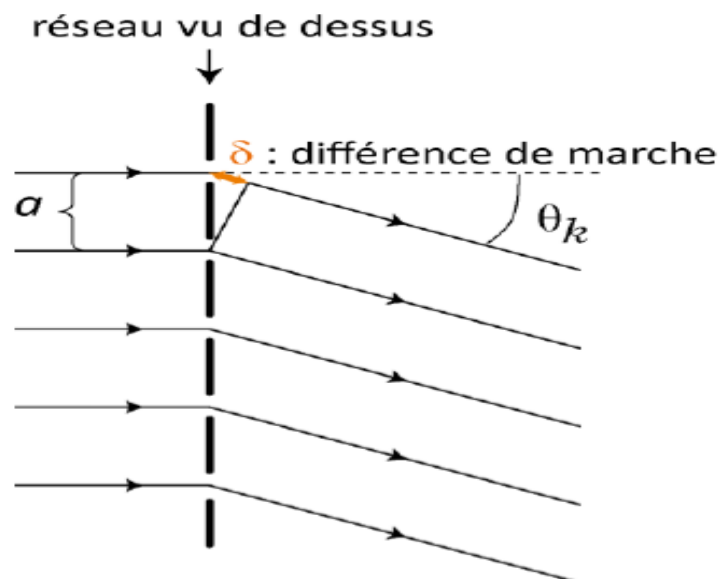
### Réseau éclairé par une lumière monochromatique



### LUMIÈRE MONOCHROMATIQUE

L'action d'un réseau sur un faisceau de lumière incident résulte de la combinaison des phénomènes de diffraction et d'interférences :

- chaque trait du réseau diffracte la lumière et se comporte donc une source de lumière secondaire en émettant des ondes lumineuses dans toutes les directions de l'espace ;
- toutes les ondes lumineuses se superposent et **interfèrent entre elles** (on parle d'interférences à ondes multiples ou à  $n$  ondes).



Dans une direction donnée, l'onde émise par chaque fente a une différence de marche  $\delta$  avec celle émise par la fente suivante.

L'interférence entre toutes les ondes est constructive lorsque  $\delta$  est un multiple entier de la longueur d'onde :  $\delta = k\lambda$ .

Comme il existe plusieurs valeurs de  $k$  satisfaisant cette condition, il existe plusieurs directions  $\theta_k$  dans lesquelles l'interférence est constructive : sur un écran, on observe donc plusieurs figures d'interférences, correspondant aux valeurs  $k=1, k=2$ , etc.

#### Exemples :

Figure obtenue si la source est une **fente éclairée** en lumière monochromatique :

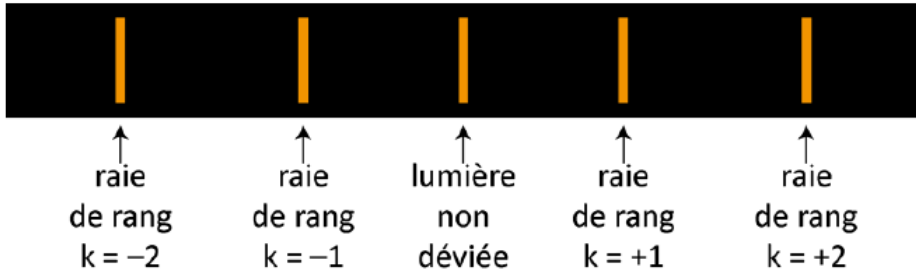
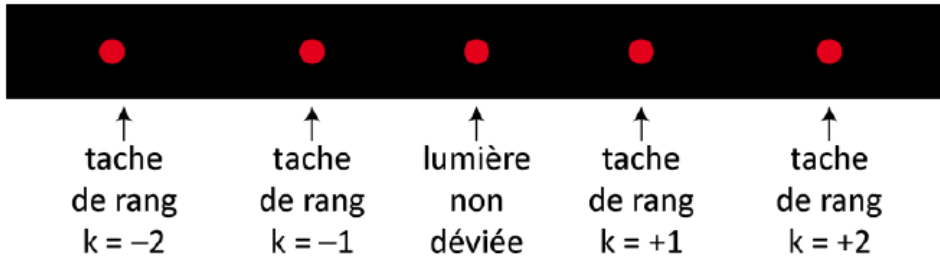
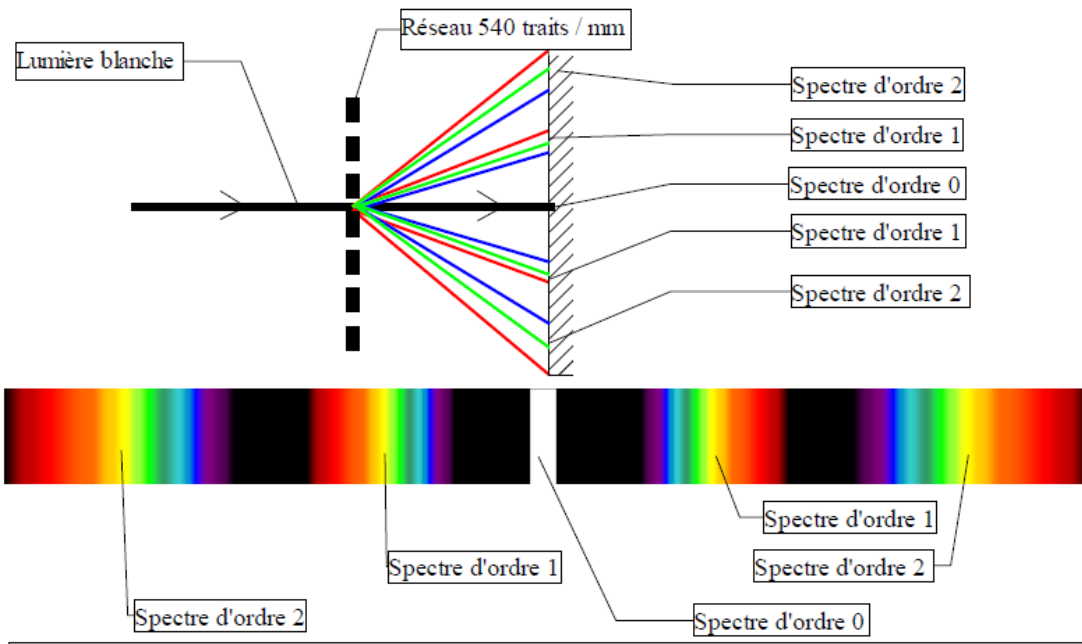


Figure obtenue si la source est un laser :



Plus le réseau est serré, plus les tâches sont distantes les unes des autres.

### Lumière polychromatique (BLANCHE)



Lorsque la lumière blanche traverse le réseau, elle est décomposée par le réseau car toutes les couleurs ne sont pas diffractées de la même manière.

Le rouge, qui a une longueur d'onde plus grande est davantage diffracté donc dévié que le vert et que le bleu qui ont une longueur d'onde plus petite.

On obtient plusieurs spectres :

→ Le spectre d'ordre zéro qui n'est pas dévié et pas décomposé, qui forme donc une bande blanche au centre de l'écran

→ Deux spectres d'ordre un formant deux spectres symétriques par rapport au spectre d'ordre zéro et où le bleu est le plus près de l'axe et le rouge est le plus loin

→ Deux spectres d'ordre deux formant deux spectres symétriques par rapport au spectre d'ordre zéro, plus éloignés de l'axe que le spectre d'ordre 1, plus étalé et moins brillant, où encore une fois, le bleu est le moins dévié de l'axe et le rouge est le plus dévié de l'axe.

#### 4. Conclusion

Le phénomène de diffraction est le changement de direction de propagation d'une onde lorsqu'elle rencontre un obstacle.

Ce phénomène est d'autant plus marqué que la dimension de l'obstacle  $a$  est faible devant la longueur d'onde

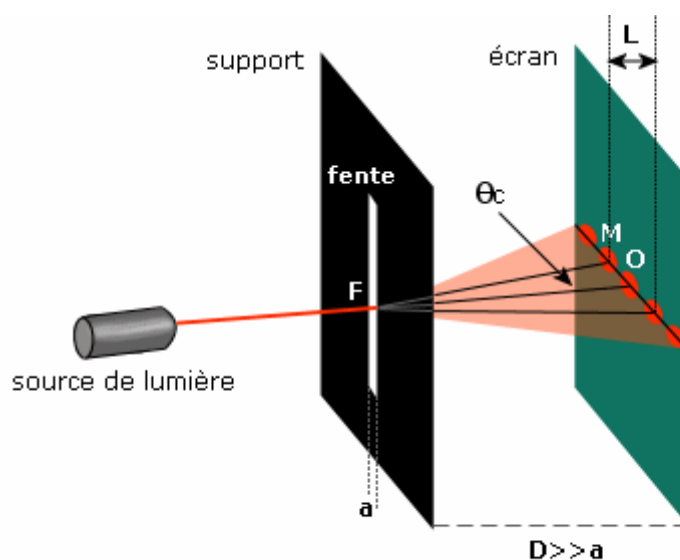
#### Définition de l'écart angulaire

Lors d'une expérience de diffraction avec une fente, on note  $F$  le milieu de la fente,  $O$  le centre de la figure de diffraction sur l'écran et  $M$  le milieu du premier intervalle obscur.

L'angle  $\widehat{OFM}$ , noté  $\theta_c$ , est appelé l'**écart angulaire** tel que :  $\theta_c = \frac{\lambda}{a}$

avec :

- $\theta_c$ , l'écart angulaire en radian (rad) ;
- $\lambda$ , la longueur d'onde en m ;
- $a$ , la dimension de la fente en m.



Sur cette figure, l'écart angulaire est défini par l'angle  $\widehat{OFM}$ .

#### Remarque :

$\theta_c$  est toujours un petit angle. On peut donc faire l'approximation suivante :

$$\tan \theta_c \cong \theta_c .$$

Or, dans le triangle FOM rectangle en O :

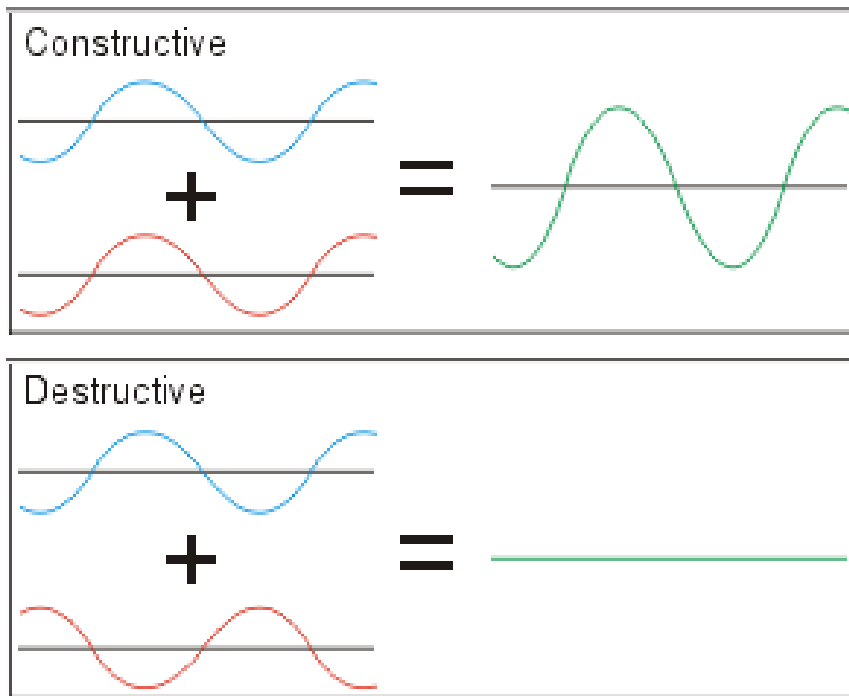
$$\tan \theta_c = \frac{L/2}{D} \cong \theta_c ; \text{ d'où } L = 2 D \theta_c = \frac{2\lambda D}{a} .$$

Ainsi, la largeur de la tache centrale de diffraction dépend de la dimension de la fente, mais également de la distance  $D$ .

Ce qui a beaucoup étonné et questionné les physiciens qui avaient depuis longtemps observé le phénomène de diffraction sans pouvoir l'expliquer, ce sont davantage les zones d'obscurité que les zones de lumière. En effet, on comprend bien que de la lumière peut donner de la lumière, par contre, comment la lumière peut-elle donner naissance à de l'obscurité ? Là encore, seul le concept d'onde peut lever ce paradoxe

Ondes en phase : lumière + lumière = lumière

Ondes en opposition de phase : lumière + lumière = obscurité



## APPLICATIONS

La découverte en 1953 de la structure en doubles hélices de l'ADN a été rendue possible grâce à la diffraction des rayons X

De nos jours, la diffractométrie par rayons X (XRD) est une technique d'analyse très utilisée dans la recherche et l'industrie pour déterminer ou contrôler la structure tridimensionnelle des molécules.

La lecture optique des disques (CD, DVD, Blu-Ray) fait intervenir le phénomène de diffraction.

Dans les instruments optiques (appareil photo, microscope, télescope), le phénomène de diffraction limite la netteté (résolution) des images obtenues.

## III.INTERFERENCES LUMINEUSES

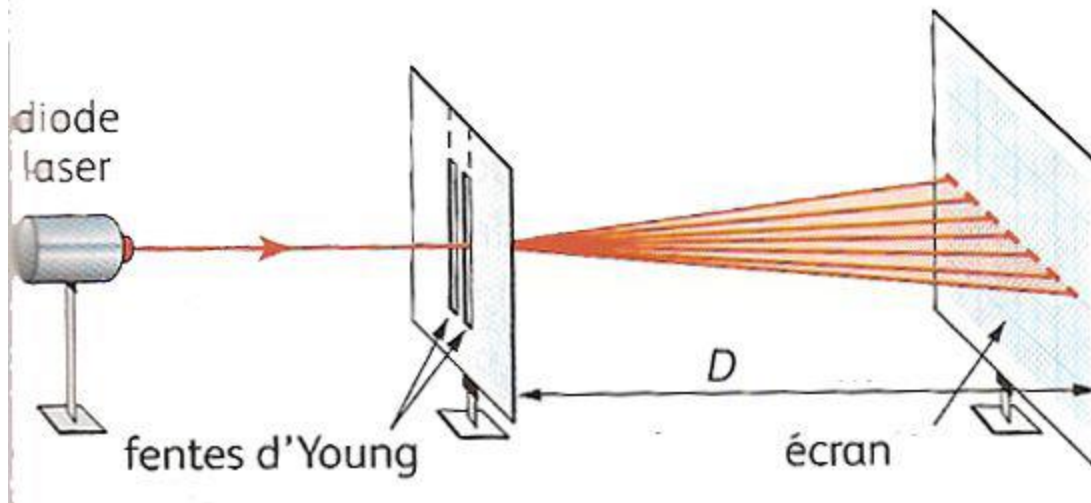
### 1. Les fentes d'YOUNG

Ces sources secondaires émettent alors des ondes de même fréquence et de déphasage constant; elles sont *cohérentes*. Le montage le plus classique est donc celui appelé de fentes d'Young.

**Expérience**

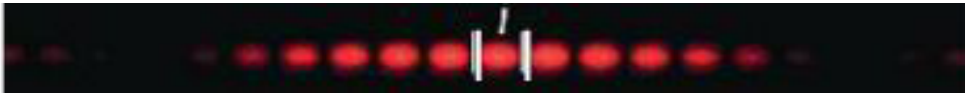


Utilisons les fentes d'Young pour créer deux sources de lumière cohérentes



### Observation

Sur l'écran placé de manière orthogonale par rapport à l'axe de symétrie du système à une distance  $D$  des deux fentes, on observe une succession de franges équidistantes alternativement sombres et brillantes. Ces franges sont visibles quelle que soit la distance qui sépare l'écran des sources et sont dues à la superposition des ondes provenant des deux sources.



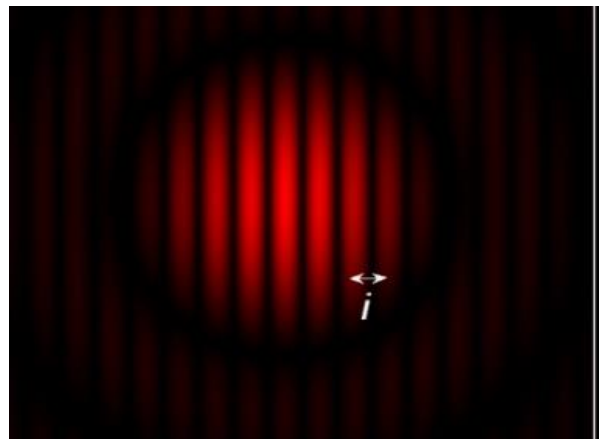
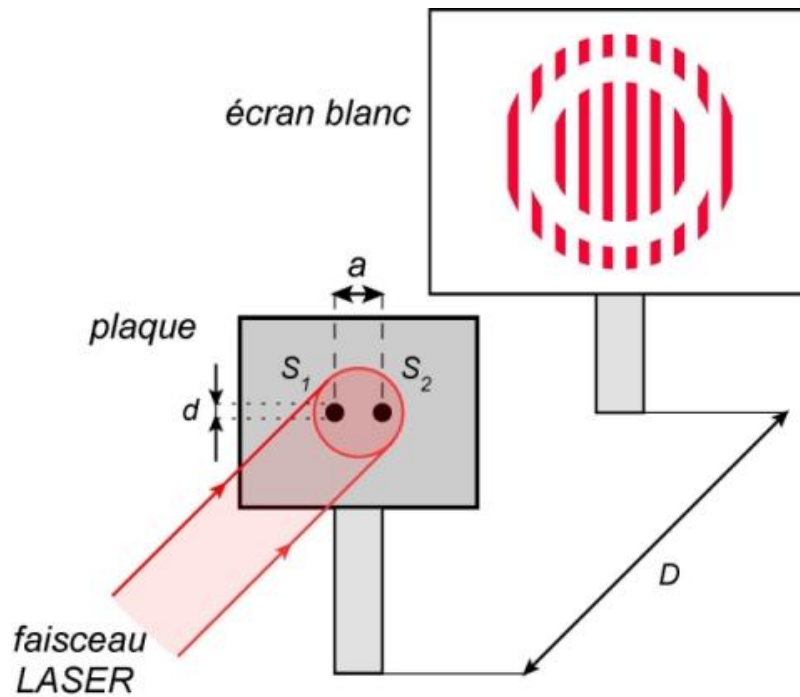
En lumière blanche, la figure d'interférences à l'allure suivante :



## 2. Les trous d'YOUNG (Thomas Young (1773-1829) qui découvrit le phénomène en 1803)

### Source monochromatique

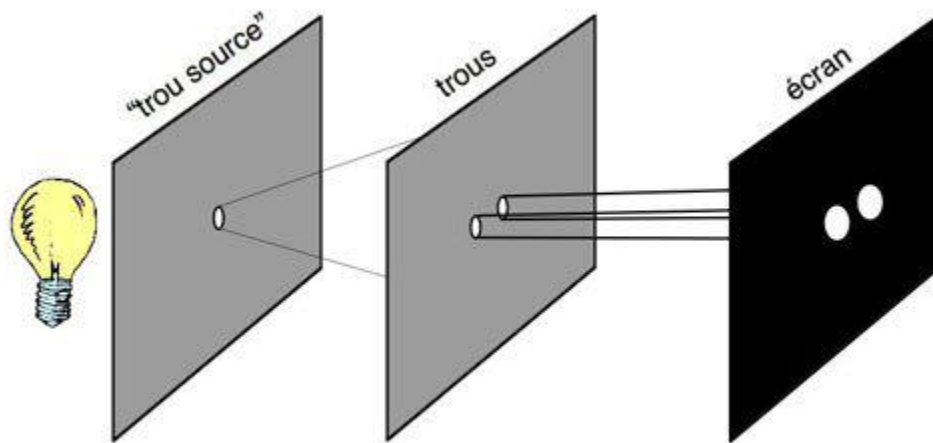
On perce deux trous circulaires  $S_1$  et  $S_2$ , de diamètre  $d$ , dans une plaque opaque. Les trous sont distants d'une longueur  $a$ . Un faisceau LASER (monochromatique), de longueur d'onde  $\lambda$ , est dirigé normalement au plan de la plaque. On place un écran blanc derrière la plaque, à une distance  $D$  de celle-ci.



Sur l'écran, on obtient une figure de diffraction, sous la forme d'un disque, comme observé dans la fiche "diffraction".

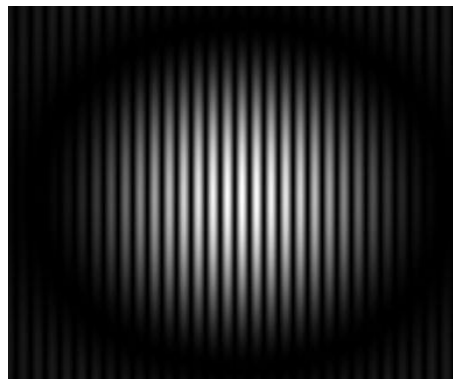
Apparition d'une **alternance de franges sombres et brillantes**. Elles sont selon un axe perpendiculaire à  $(S_1S_2)$ . Ce sont des **franges d'interférences**. **La distance entre deux franges brillantes consécutives est constante**. Cette distance  $i$  est nommée **interfrange**.

**Source polychromatique**



### Observations

Apparition d'une **alternance de franges sombres et brillantes**. Elles sont selon un axe perpendiculaire à  $(S_1S_2)$ . Ce sont des **franges d'interférences**. **La distance entre deux franges brillantes consécutives est constante**. Cette distance  $i$  est nommée **interfrange**.



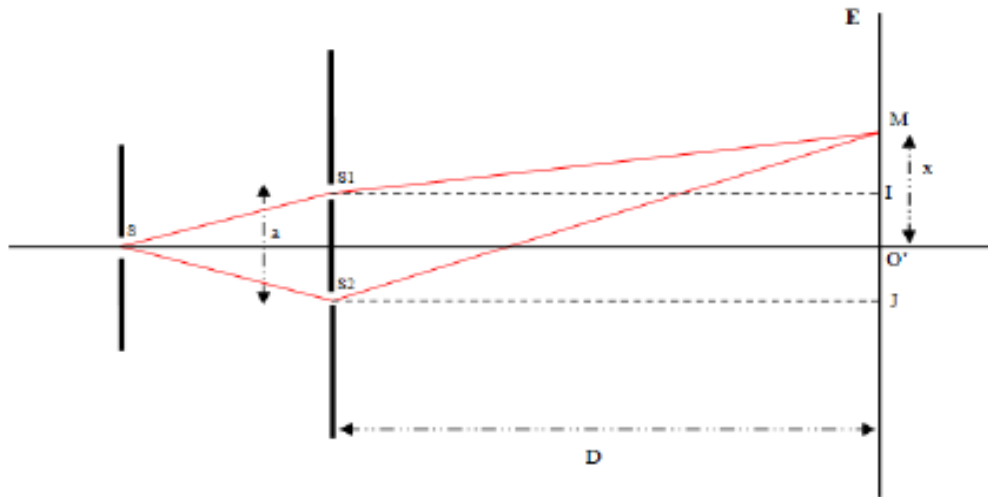
### 3. Interprétation théorique du phénomène d'interférences

Le phénomène d'interférences se produit quand une partie du milieu de propagation se superpose deux ondes provenant de deux sources cohérentes, elles s'additionnent ou s'annulent par endroit : on parle respectivement d'interférences constructives (ondes en phase) et d'interférences destructives (ondes en opposition de phase).

Le phénomène d'interférences ne se manifeste pas seulement avec les ondes lumineuses, mais concerne d'autres types d'ondes, comme les **ondes acoustiques**, ondes électromagnétiques, ondes sonores.

### IV DIFFERENCE DE MARCHE DE LA SUPERPOSITION DE DEUX INTERFERENCES

La différence de marche entre deux rayons lumineux représente la différence de chemins optiques parcourus par ces deux rayons.



$a$  (distance  $S_1 S_2$ ) est très faible devant  $D$  (distance séparant  $S_1 S_2$  de l'écran E) ;  $a \ll \ll D$   
 $x$  (distance  $O'M$ ) est très faible devant  $D$  (distance séparant  $S_1 S_2$  de l'écran E) ;  $x \ll \ll D$

M est un point du champ d'interférence tel que  $O'M = x$

$SS_1M$  et  $SS_2M$  sont les chemins optiques parcourus par ces deux rayons lumineux qui se superposent en M.

La différence de marche  $\delta = SS_2M - SS_1M = S_2M - S_1M$  car  $SS_1 = SS_2$

En posant  $S_1M = d_1$  et  $S_2M = d_2$ , on a  $\delta = d_2 - d_1$ .

D'après le **triangle  $S_1MI$**  :  $(S_1M)^2 = (S_1I)^2 + (IM)^2$  avec  $S_1I = D$ ,  $IM = O'M - O'I$  et  $O'I = \frac{a}{2}$

$$\Rightarrow d_1^2 = D^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2$$

D'après le **triangle  $S_2MJ$**  :  $(S_2M)^2 = (S_2J)^2 + (JM)^2$  avec  $S_2J = D$ ,  $JM = O'M + JO'$  et  $JO' = \frac{a}{2}$

$$\Rightarrow d_2^2 = D^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2$$

$$d_2^2 - d_1^2 = \left[D^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2\right] - \left[D^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2\right] = 2ax$$

$(d_2 + d_1)(d_2 - d_1) = 2ax$ , sachant que  $a \ll D$  et  $x \ll D$ , alors  $d_1$ ,  $d_2$  et  $D$  sont approximativement égales ;  $d_1 \approx d_2 \approx D$ .

$$d_1 + d_2 \approx D + D = 2D \Rightarrow d_2 - d_1 = \frac{ax}{D}$$

La différence de marche  $\delta = \frac{ax}{D}$

## L'interfrange

### a. Définition

L'interfrange, noté  $i$ , est la distance séparant deux franges brillantes (ou deux franges sombres) consécutives.



### b. Position des franges brillantes

Un point M(x) appartient à une frange brillante si la différence de marche  $\delta$  entre les deux ondes qui parviennent en M est  $\delta = k \cdot \lambda$  avec  $k \in \mathbb{Z}$

$$\delta = \frac{ax}{D} = k \cdot \lambda \implies x = k \cdot \frac{\lambda D}{a}$$

Si  $k = 0$  alors  $x = 0$ ; la frange centrale est toujours brillante.

k	.....	-3	-2	-1	0	1	2	3	.....
x	....	$-3 \cdot \frac{\lambda D}{a}$	$-2 \cdot \frac{\lambda D}{a}$	$-\frac{\lambda D}{a}$	0	$\frac{\lambda D}{a}$	$2 \cdot \frac{\lambda D}{a}$	$3 \cdot \frac{\lambda D}{a}$	.....

### c. Position des franges obscures ou sombres

Un point M appartient à une frange sombre si la différence de marche  $\delta$  entre les deux ondes qui parviennent en M est :  $\delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$  avec  $k \in \mathbb{Z}$

$$\delta = \frac{ax}{D} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \implies x = (k + \frac{1}{2}) \cdot \frac{\lambda D}{a}$$

k	.....	-3	-2	-1	0	1	2	3	.....
x	....	$-\frac{5}{2} \cdot \frac{\lambda D}{a}$	$-\frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda D}{a}$	$-\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda D}{a}$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda D}{a}$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda D}{a}$	$\frac{5}{2} \cdot \frac{\lambda D}{a}$	$\frac{7}{2} \cdot \frac{\lambda D}{a}$	.....

### d. Expression de l'interfrange i

#### - Cas des franges brillantes :

Soient deux franges brillantes consécutives dont les milieux ont pour abscisse  $x_k$  et  $x_{k+1}$

L'interfrange  $i$  est telle que :  $i = x_{k+1} - x_k$

$$x_k = k \cdot \frac{\lambda D}{a} \text{ et } x_{k+1} = (k + \frac{1}{2}) \cdot \frac{\lambda D}{a} \implies i = (k + \frac{1}{2}) \cdot \frac{\lambda D}{a} - k \cdot \frac{\lambda D}{a} = \frac{\lambda D}{a}$$

#### - Cas des franges sombres :

Soient deux franges sombres consécutives dont les milieux ont pour abscisse  $x_k$  et  $x_{k+1}$

L'interfrange  $i$  est telle que :  $i = x_{k+1} - x_k$

$$x_k = (k + \frac{1}{2}) \cdot \frac{\lambda D}{a} \text{ et } x_{k+1} = (k + \frac{2}{2}) \cdot \frac{\lambda D}{a} \implies i = (k + \frac{2}{2}) \cdot \frac{\lambda D}{a} - (k + \frac{1}{2}) \cdot \frac{\lambda D}{a} = \frac{\lambda D}{a}$$

L'interfrange  $i$  est indépendante de  $k$ , les franges sont équidistantes.

### e. Ordre d'interférence

Les positions des franges brillantes sont données, en fonction de l'interfrange par :  $x = k \cdot \frac{\lambda D}{a} = k \cdot i$

Celles des franges sombres par:  $x = (k + \frac{1}{2}) \cdot \frac{\lambda D}{a} = (k + \frac{1}{2}) \cdot i$

On appelle ordre d'interférence le rapport  $p = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{ax}{D\lambda} = \frac{x}{i}$

Si  $p = \frac{x}{i} = k$  (entier)  $\implies (\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots)$  la frange correspondante est brillante

Si  $p = \frac{x}{i} = k + \frac{1}{2}$  (demi-entier)  $\implies (\dots, -\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots)$  la frange correspondante est sombre

## V. ONDE LUMINEUSE-ONDE ELECTROMAGNETIQUE

### 1. Définition

Une onde électromagnétique est le phénomène résultant de la vibration transversale d'un champ électrique  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique  $\vec{B}$ , perpendiculaires entre eux. Elles ne nécessitent aucun support matériel pour se propager.

A toute onde électromagnétique correspond, dans l'espace, une longueur d'onde  $\lambda$  et, dans le temps, une période T ou une fréquence  $\nu$

Une onde lumineuse est une onde électromagnétique

## **2. Propriétés des ondes électromagnétiques**

- Réflexion
- Réfraction
- Diffraction
- Interférence de deux ondes

## **3. Longueur d'onde**

La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde électromagnétique pendant une durée égale à la période T de la source de vibrations

$$\lambda = C.T$$

## **4. Exemples d'ondes électromagnétique**

Ondes « hertziennes », rayons X, rayons  $\gamma$

Rayons X : sert dans la radiographie médicale, détection de la nature des liaisons entre atomes, détection des défauts de certaines pièces dans l'industrie

Rayons  $\gamma$  : Permettent d'explorer le cœur des atomes, en radiothérapie

Ondes « hertziennes » : utilisées en télécommunication (télévision, radiodiffusion, radars, ...)