

# Les phénomènes de diffraction et d'interférence

Cours

## Sommaire

### I Le phénomène de diffraction

- A Définition de la diffraction
- B La figure de diffraction
- C L'angle caractéristique de diffraction

### II Les phénomènes d'interférences

- A Définition du phénomène d'interférences
- B La différence de marche et les interférences constructives et destructives
- C Les interférences de deux ondes lumineuses
  - 1. L'observation d'interférences de deux ondes lumineuses
  - 2. L'interfrange d'interférences de deux ondes lumineuses

## I Le phénomène de diffraction

Le phénomène de diffraction se produit lorsqu'une onde rencontre une ouverture ou un obstacle de faible dimension par rapport à sa longueur d'onde. On observe alors un étalement des directions de propagation de l'onde. Cet étalement produit une figure composée de franges alternativement intenses et peu intenses. La longueur entre les franges est l'interfrange de diffraction. L'importance du phénomène de diffraction est mesurée par l'angle caractéristique de diffraction.

### A Définition de la diffraction

Le phénomène de diffraction se produit lorsqu'une onde rencontre une ouverture ou un obstacle de faible dimension par rapport à sa longueur d'onde. On observe un étalement des directions de propagation de l'onde.

#### DÉFINITION

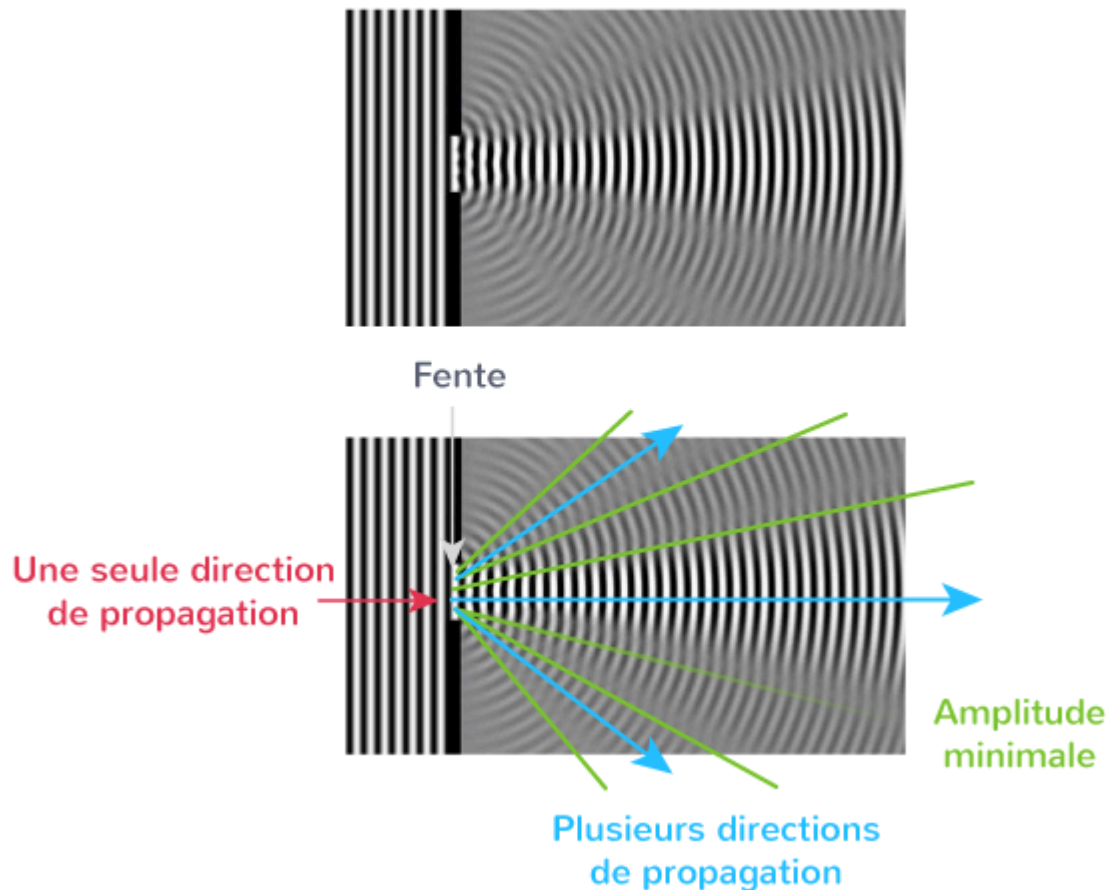
#### Diffraction

La **diffraction** est le phénomène par lequel une onde qui rencontre un obstacle ou une ouverture de faible dimension par rapport à sa longueur d'onde subit un étalement des directions de sa propagation.

#### EXEMPLE

On peut observer le phénomène de diffraction avec une cuve à ondes. Lorsqu'une onde plane, caractérisée par une direction de propagation unique, rencontre une fente de faible dimension par

rapport à sa longueur d'onde, elle émerge en se propageant dans plusieurs directions, telle une onde circulaire. Certaines directions sont caractérisées par une amplitude minimale.



Phénomène de diffraction à la surface d'une cuve à ondes



#### REMARQUE

Un obstacle et une ouverture de même dimension produisent une figure de diffraction similaire au contact de l'onde.

#### EXEMPLE

Une ouverture circulaire et un disque de même taille produisent une figure de diffraction similaire :



Figure de diffraction obtenue avec une ouverture ou un obstacle circulaire

#### PROPRIÉTÉ

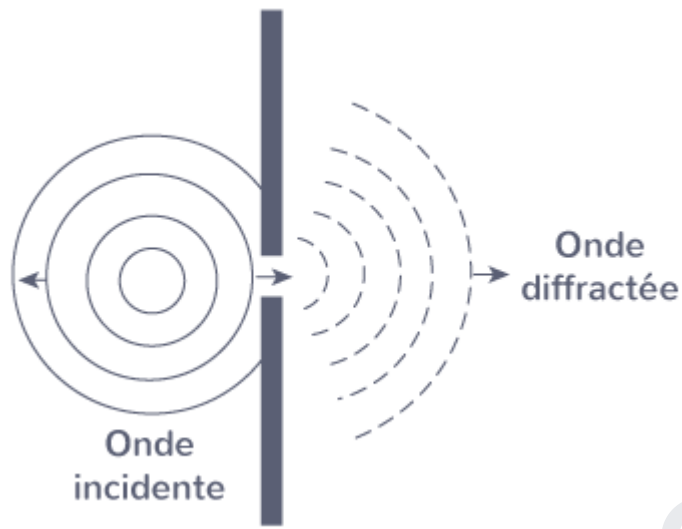
Pour que le phénomène de diffraction soit observable, il faut que la dimension  $a$  de l'obstacle ou de l'ouverture et la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde respectent un critère qui diffère selon la nature de l'onde :

Nature de l'onde	Toutes ondes sauf électromagnétiques	Onde électromagnétique
<b>Critère pour que la diffraction soit observable</b>	La dimension $a$ de l'obstacle ou de l'ouverture doit être du même ordre de grandeur ou inférieure à la longueur d'onde de l'onde $\lambda$ :  $a \leq \lambda$	La dimension $a$ de l'obstacle ou de l'ouverture doit être du même ordre de grandeur ou inférieure à $100 \lambda$ :  $a \leq 100 \lambda$

#### EXEMPLE

Une onde sonore de longueur d'onde  $\lambda = 1,0 \text{ m}$  peut être diffractée par une porte de largeur  $a = 0,90 \text{ m}$  car la taille de cette ouverture est inférieure à la longueur d'onde  $\lambda$  :  $0,90 < 1,0$ .

Après la porte, il se produit donc un étalement de l'onde sonore augmentant son champ de propagation :



Diffraction d'une onde sonore par une porte

Par contre, cette ouverture ne peut pas diffracter la lumière visible : l'ordre de grandeur des longueurs d'onde des radiations visibles est  $1\ \mu\text{m}$ , la taille maximale d'une ouverture les diffractant est donc  $100\ \lambda = 100\ \mu\text{m}$ , soit environ  $0,1\ \text{mm}$ .

## B La figure de diffraction

Le phénomène de diffraction est le plus souvent observé dans le cas d'une onde lumineuse. Sur un écran, on observe une figure de diffraction composée de taches (ou franges) alternativement brillantes et sombres, dont la tache centrale est deux fois plus large que les autres.

### PROTOCOLE D'EXPÉRIMENTATION

#### Observation du phénomène de diffraction

En général, on étudie le phénomène de diffraction dans le cas des ondes électromagnétiques. La source lumineuse est alors le plus souvent un laser et on place une fente de faible ouverture sur le trajet du faisceau émis.

#### EXEMPLE



Dispositif expérimental pour observer la diffraction

La figure de diffraction observée est constituée de plusieurs taches (ou franges) qui s'étalent dans une direction perpendiculaire à celle de la fente et dont la luminosité décroît lorsqu'on s'écarte du centre de l'écran.



Figure de diffraction obtenue avec un laser et une fente verticale

Ces taches sont séparées par des zones d'extinction, sombres. On distingue les taches latérales, qui ont toutes la même largeur, et la tache centrale qui est deux fois plus large.

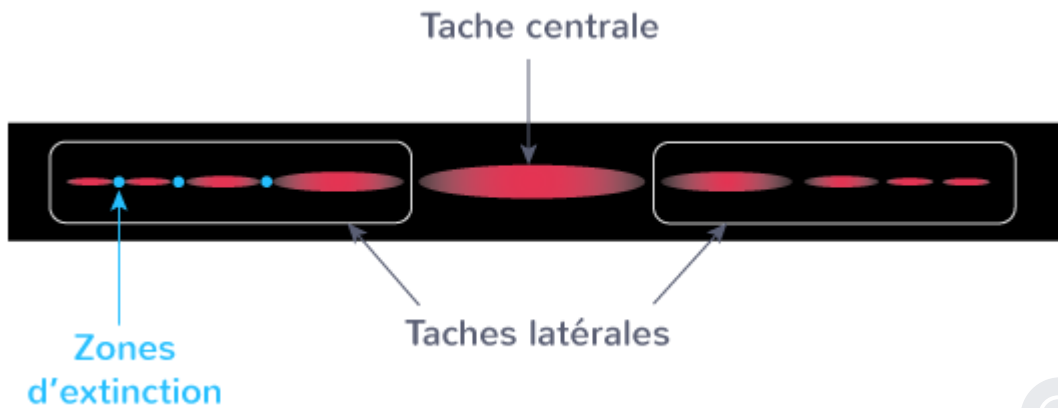


Figure de diffraction obtenue avec un laser et une fente verticale

## C L'angle caractéristique de diffraction

L'angle caractéristique de diffraction  $\theta$  permet de mesurer l'importance du phénomène de diffraction et est lié à la taille de l'obstacle ou de l'ouverture qui provoque la diffraction.

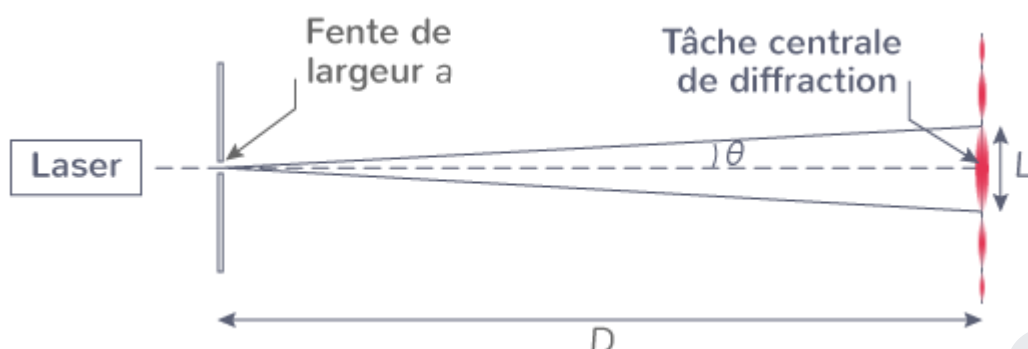
### DÉFINITION

#### Angle caractéristique de diffraction

L'angle caractéristique de diffraction (ou écart angulaire), noté généralement  $\theta$ , représente l'angle entre le centre de la tache centrale et le centre de l'extinction qui la sépare des premières taches latérales.

### EXEMPLE

$\theta$  se mesure comme l'angle séparant le centre de la tache centrale et l'une de ses extrémités en partant du centre de la fente.





REMARQUE

Généralement, l'angle caractéristique  $\theta$  est assez faible, ce qui permet de le déterminer simplement à partir de la largeur  $L$  de la tache centrale de la diffraction.

## FORMULE

### Relation entre l'angle caractéristique de la diffraction et la largeur de la tache centrale de la figure de diffraction

Dans le cas où l'angle caractéristique  $\theta$  est assez faible, il peut être déterminé, en radians, à partir de la largeur  $L$  de la tache centrale de la diffraction et de la distance fente-écran  $D$  :

$$\theta_{(\text{rad})} \approx \tan(\theta) = \frac{L_{(\text{m})}}{2D_{(\text{m})}}$$

L'angle  $\theta$  s'exprime en radians.

## EXEMPLE

Dans un montage de diffraction, la distance fente-écran est  $D = 2,00 \text{ m}$  et la mesure de la largeur de la tache centrale de la diffraction donne :  $L = 0,84 \text{ cm}$ . L'angle caractéristique de la diffraction est alors :

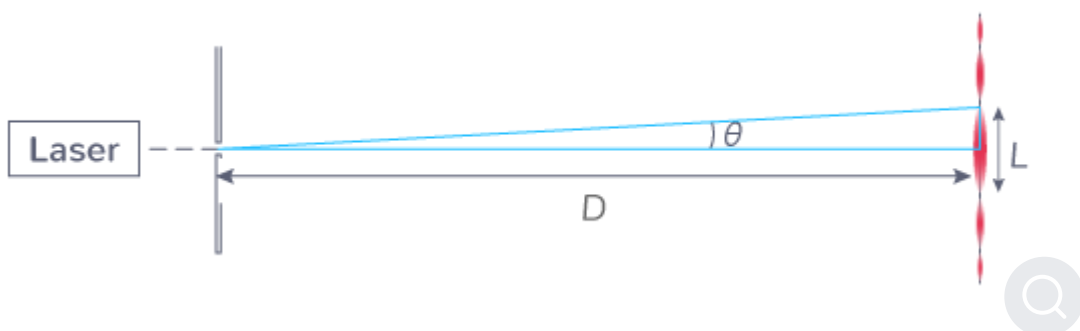
$$\theta_{(\text{rad})} \approx \tan(\theta) = \frac{L_{(\text{m})}}{2D_{(\text{m})}}$$

$$\theta = \frac{0,84 \times 10^{-2}}{2 \times 2,00}$$

$$\theta = 2,1 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

## DÉMONSTRATION

La fente, le centre et l'extinction de la tache centrale définissent un triangle rectangle :



Calcul de l'écart angulaire de diffraction

La tangente de l'angle caractéristique  $\theta$  est alors égale au rapport de :

- la longueur du côté opposé, qui est égale à la moitié de la largeur de la tache centrale, soit  $\frac{L}{2}$  ;
- et de la longueur du côté adjacent, qui est égale à la distance fente-écran, soit  $D$  .

On a donc :

$$\tan(\theta) = \frac{L_{(m)}}{2D_{(m)}}$$

En général, la distance  $D$  est beaucoup plus grande que la largeur  $L$  de la tache centrale. Le rapport

$\frac{L}{2D}$  et donc  $\tan(\theta)$  sont faibles, ce qui permet d'écrire :

$$\tan(\theta) \approx \theta_{(\text{rad})}$$

Finalement, on a :

$$\theta_{(\text{rad})} \approx \tan(\theta) = \frac{L}{2D}$$



ASTUCE

Généralement, la largeur de la tache centrale est assez faible. Pour éviter qu'une mesure directe engendre une grande incertitude :

- On détermine la largeur des taches latérales de diffraction en mesurant une longueur plus grande  $L_{tot}$  , correspondant à  $n$  taches (la tache centrale, plus grande, comptant double). La largeur d'une seule tache latérale est alors :  $\frac{L_{tot}}{n}$  ;
- Finalement, la largeur de la tache centrale est égale au double de celle d'une tache latérale :

$$L = 2 \times \frac{L_{tot}}{n} .$$

#### EXEMPLE

Sur une figure de diffraction, on mesure la longueur totale, correspondant à 10 taches (dont la tache centrale qui compte double) avec une règle graduée au millimètre.

On obtient :  $L_{tot} = 4,2 \text{ cm}$  .

La largeur d'une seule tache latérale est donc :

$$\frac{L_{tot}}{n} = \frac{4,2}{10}$$

$$\frac{L_{tot}}{n} = 0,42 \text{ cm}$$

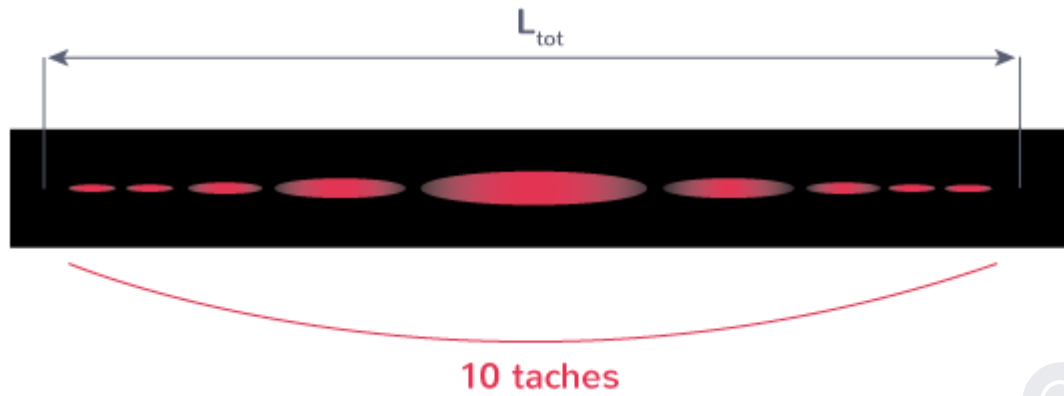
On en déduit la largeur de la tache centrale :

$$L = 2 \times \frac{L_{tot}}{n}$$

$$L = 2 \times 0,42$$

$$L = 0,84 \text{ cm}$$

Ainsi, la mesure de la largeur de la tache centrale est précise au dixième de millimètre près, ce que n'aurait pas permis une mesure directe avec une règle graduée au millimètre.



Détermination de la largeur de la tache centrale

#### FORMULE

### Relation entre l'angle caractéristique de la diffraction et la dimension de l'obstacle ou de l'ouverture

L'angle caractéristique de la diffraction  $\theta$ , exprimé en radians, est égal au rapport de la longueur d'onde de l'onde  $\lambda$  et de la dimension  $a$  de l'obstacle ou de l'ouverture :

$$\theta_{(\text{rad})} = \frac{\lambda_{(\text{m})}}{a_{(\text{m})}}$$

#### EXEMPLE

Un faisceau laser de longueur d'onde 633 nm est diffracté par une fente de largeur 0,45 mm. L'angle caractéristique de diffraction est alors :

$$\begin{aligned}\theta_{(\text{rad})} &= \frac{\lambda_{(\text{m})}}{a_{(\text{m})}} \\ \theta &= \frac{633 \times 10^{-9}}{0,45 \times 10^{-3}} \\ \theta &= 1,4 \times 10^{-3} \text{ rad}\end{aligned}$$

#### PROPRIÉTÉ

Le phénomène de diffraction est d'autant plus marqué que l'angle caractéristique de diffraction  $\theta$  est important et donc que la taille  $a$  de l'obstacle ou de l'ouverture est faible.

#### EXEMPLE

Lorsqu'un faisceau laser de longueur d'onde 633 nm est diffracté par une fente de largeur 0,45 mm, l'angle caractéristique de diffraction est  $\theta = 1,5 \times 10^{-2} \text{ rad}$ , ce qui donne, à une distance

$D = 2,0 \text{ m}$ , une tache centrale de longueur :

$$L = \theta \times 2D$$

Soit :

$$L = \frac{\lambda}{a} \times 2D$$



$$L = \frac{633 \times 10^{-9}}{0,45 \times 10^{-3}} \times 2 \times 2,0$$

$$L = 5,6 \times 10^{-3} \text{ m}, \text{ soit } L = 5,6 \text{ mm}$$

Si on utilise une fente deux fois moins large, telle que  $a' = 0,225 \times 10^{-3} \text{ m}$ , la largeur de la tache centrale sera :

$$L' = \frac{\lambda}{a'} \times 2D$$

$$L' = \frac{633 \times 10^{-9}}{0,225 \times 10^{-3}} \times 2 \times 2,0$$

$$L' = 1,1 \times 10^{-2} \text{ m}, \text{ soit } L' = 1,1 \text{ cm}$$

Ainsi, la largeur de la tache centrale et des taches latérales est multipliée par deux, ce qui fait que la figure de diffraction est davantage visible.

## II Les phénomènes d'interférences

Le phénomène d'interférences se produit quand deux ondes se superposent. Ce phénomène se produit généralement lorsqu'une onde incidente rencontre deux ouvertures où elle est diffractée. On observe alors une variation spatiale de l'intensité. Cette variation spatiale est liée à la différence de marche optique des ondes. Sur un écran, cette variation spatiale de l'intensité s'appelle les interférences.

### A Définition du phénomène d'interférences

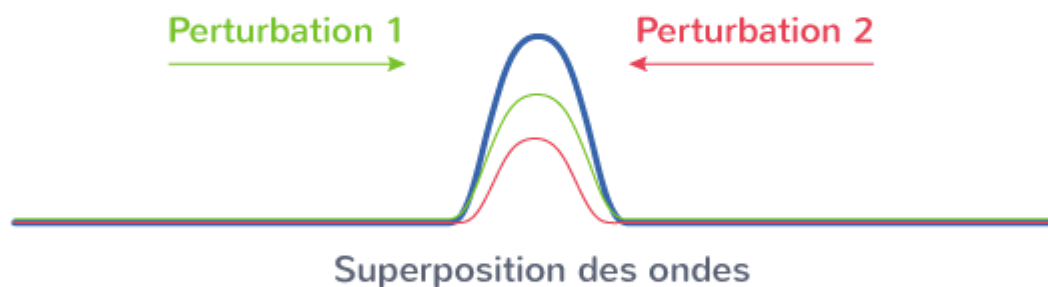
Le phénomène d'interférences se produit lorsque deux ondes de même nature, de même longueur d'onde et de même fréquence se superposent. L'intensité de la perturbation résultante est alors la somme des intensités individuelles des deux ondes. Elle est maximale si les ondes sont en phase et minimale si les ondes sont en opposition de phase.

#### PROPRIÉTÉ

Lorsque deux ondes monochromatiques de même fréquence et de même nature se superposent, l'amplitude de la perturbation résultante est la somme des amplitudes individuelles des deux ondes :

#### EXEMPLE

## Propagation de deux ondes allant en sens inverse



Propagation de deux ondes en sens inverse le long d'une corde

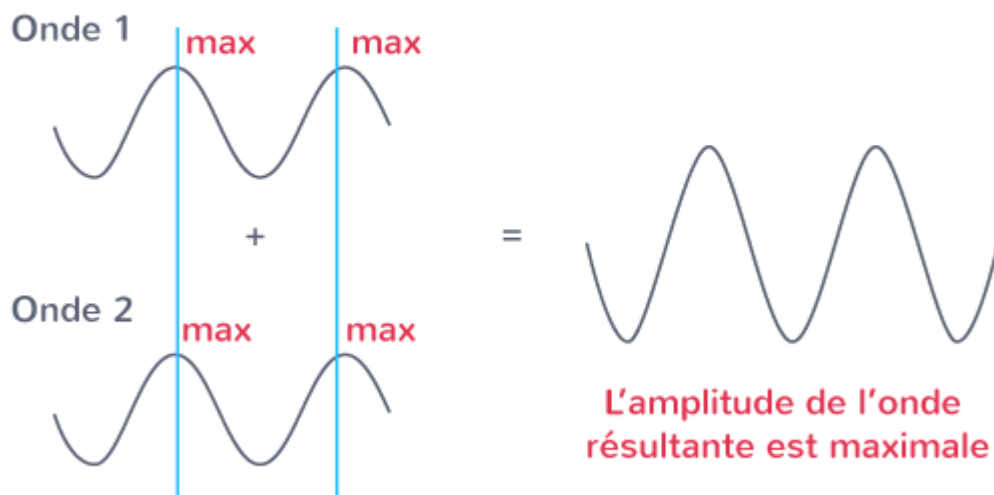
### PROPRIÉTÉ

Lors de la superposition de deux ondes, en un point et à un instant donnés, on distingue deux situations :

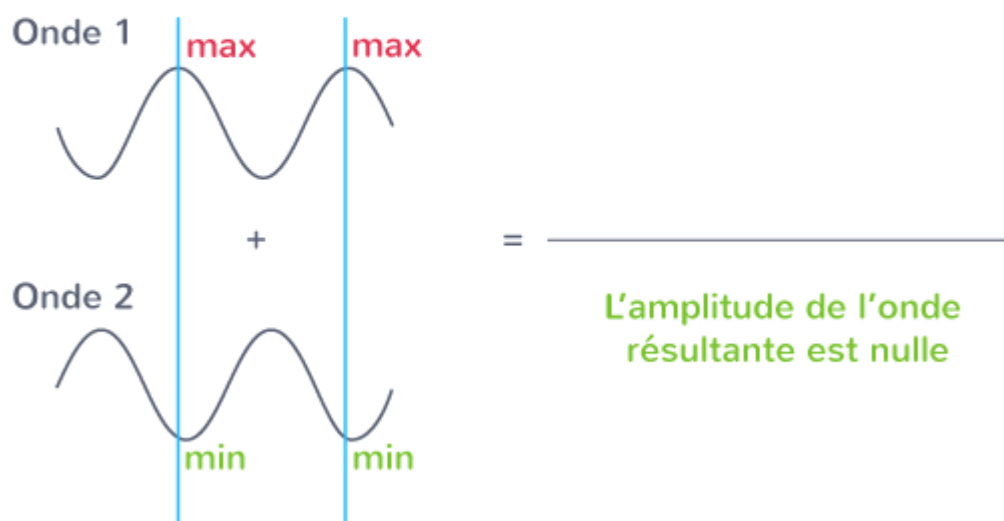
- Les ondes peuvent être en phase, c'est-à-dire être dans le même état vibratoire. L'amplitude de l'onde résultant de leur superposition sera alors maximale.
- Les ondes peuvent être en opposition de phase, c'est-à-dire être dans des états vibratoires opposés. L'amplitude de l'onde résultant de leur superposition sera alors minimale.

### EXEMPLE

## Ondes en phase



## Ondes en opposition de phase



Superposition d'ondes en phase et en opposition de phase

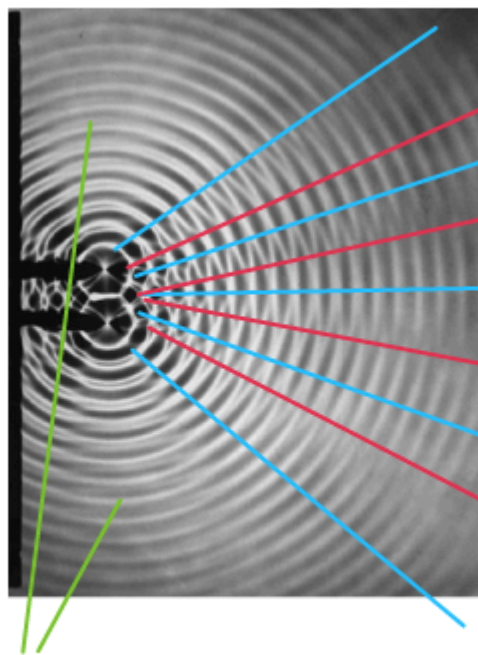
### DÉFINITION

#### Phénomène d'interférences

**Le phénomène d'interférences** se produit quand deux ondes monochromatiques de même nature et de même fréquence se superposent. On observe alors une variation spatiale de l'amplitude résultante de la somme des amplitudes des deux ondes.

#### EXEMPLE

On peut observer le phénomène d'interférences avec une cuve à ondes où deux vibreurs créent des ondes mécaniques circulaires à la surface de l'eau. Dans la zone où les ondes se superposent, l'amplitude de l'onde résultante varie :



Amplitude minimale  
de l'onde résultante

Amplitude maximale  
de l'onde résultante

Zones où les ondes  
ne se superposent pas

Phénomène d'interférences à la surface d'une cuve à ondes



## B La différence de marche et les interférences constructives et destructives

La différence de marche est la différence des chemins parcourus par les deux ondes qui se superposent. Elle explique la formation d'interférences constructives ou destructives.

### DÉFINITION

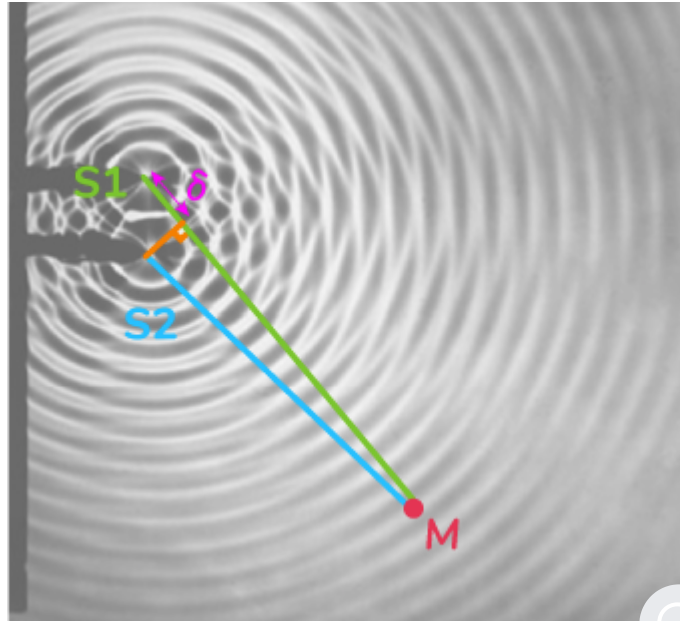
#### Différence de marche

En un point  $M$ , la **différence de marche**, généralement notée  $\delta$ , est égale à la différence de chemin parcouru par les deux ondes qui se superposent.

#### EXEMPLE

Dans le cas où les deux ondes sont émises respectivement par des sources  $S_1$  et  $S_2$ , la différence de marche en un point  $M$  correspond à la différence entre les longueurs  $S_2M$  et  $S_1M$  :

$$\delta = S_2M - S_1M$$



Différence de marche en un point à la surface d'une cuve à ondes

#### PROPRIÉTÉ

En un point donné, les interférences produites par la superposition de deux ondes peuvent être de deux types :

Interférences	Constructives	Destructives
<b>Condition</b>	Les ondes qui se superposent doivent être en phase.	Les ondes qui se superposent doivent être en opposition de phase.
<b>Différence de marche <math>\delta</math></b>  ( $k$ étant un entier naturel)	Elle doit être un multiple entier de la longueur d'onde des deux ondes : $\delta = k \times \lambda$	Elle doit être un multiple entier de la demi-longueur d'onde des deux ondes : $\delta = (2k + 1) \times \frac{\lambda}{2}$

#### EXEMPLE

Deux faisceaux lumineux de longueur d'onde  $\lambda = 633 \text{ nm}$  interfèrent. Si la différence de marche entre ces deux faisceaux est  $\delta = 9,5 \text{ }\mu\text{m}$ , les interférences seront constructives car :

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{9,5 \times 10^{-6}}{633 \times 10^{-9}}$$

$\frac{\delta}{\lambda} = 15$  : la différence de marche est un multiple entier de la longueur d'onde des deux ondes.

## C Les interférences de deux ondes lumineuses

Le phénomène d'interférence est facilement observable avec des ondes lumineuses. Le dispositif comprend généralement une bifente traversée par un même faisceau laser. La longueur entre deux franges d'interférence est définie par l'interfrange d'interférence.

### 1. L'observation d'interférences de deux ondes lumineuses

Le dispositif comprend généralement une bifente (ou trous d'Young) traversée par un même faisceau laser. Il se produit un phénomène de diffraction au niveau de chaque fente. Les ondes résultantes se superposent sur un écran. Sur cet écran, on observe les franges d'interférences, alternativement brillantes et sombres.

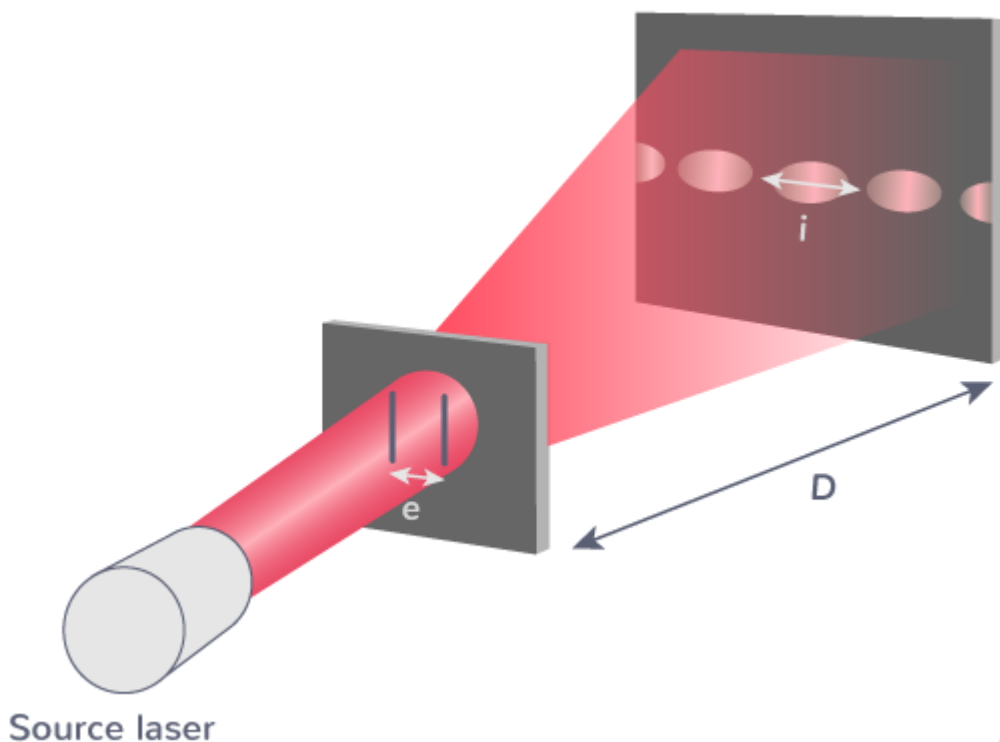
#### PROTOCOLE D'EXPÉRIMENTATION

##### Observation d'interférences de deux ondes lumineuses

Généralement, pour observer le phénomène d'interférences de deux ondes lumineuses, on utilise un faisceau laser que l'on dirige sur une bifente. Cet ensemble de deux fentes de même largeur va diffracter le faisceau incident et produire ainsi deux faisceaux diffractés ayant les mêmes propriétés qui vont pouvoir interagir l'un avec l'autre. On place alors un écran dans la zone où ces deux faisceaux se superposent (le champ d'interférences) et suffisamment loin de la bifente.

La figure d'interférences est constituée de plusieurs taches (ou franges) de même largeur qui s'étalent dans une direction perpendiculaire à celle de la bifente et dont la luminosité décroît lorsque l'on s'écarte du centre de l'écran.

#### EXEMPLE



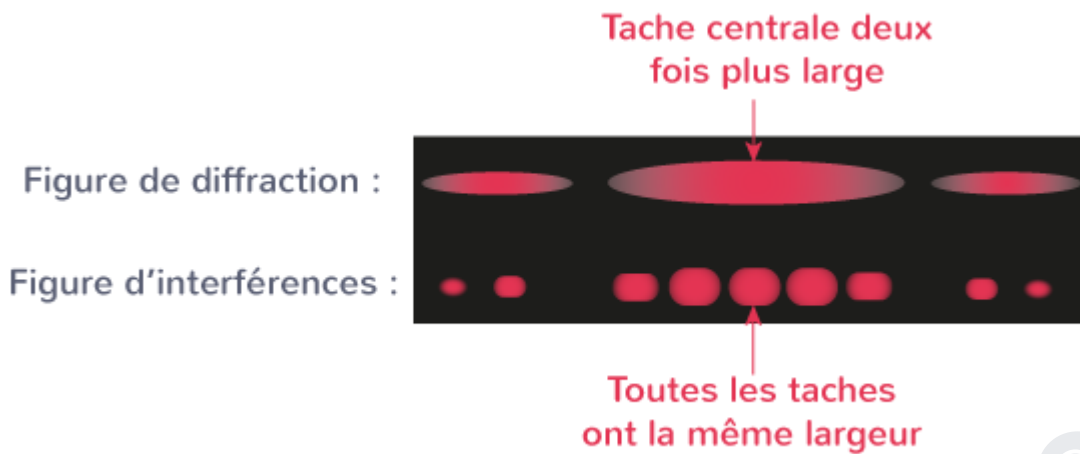


ASTUCE

On peut différencier les figures de diffraction et d'interférences des ondes lumineuses à l'aide de leur tache centrale :

- Dans une figure de diffraction, la tache centrale est deux fois plus large que les autres.
- Dans une figure d'interférences, la tache centrale est aussi longue que toutes les autres taches.

## EXEMPLE



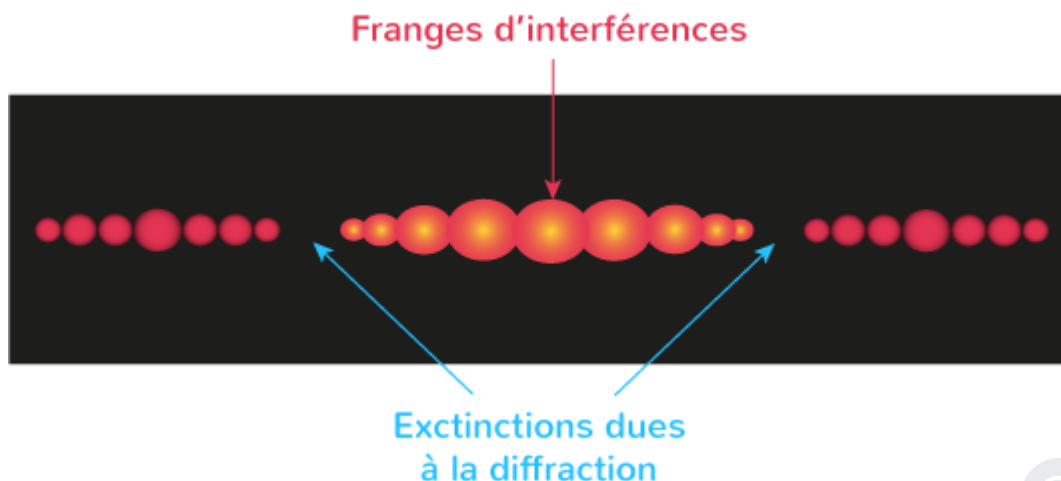
Comparaison d'une figure de diffraction et d'une figure d'interférence



REMARQUE

Lorsque les faisceaux lumineux qui interfèrent sont produits par diffraction d'un premier faisceau, les extinctions relatives au phénomène de diffraction sont visibles dans la figure d'interférences : ces zones sombres ne contiennent pas de franges d'interférences.

## EXEMPLE



## 2. L'interfrange d'interférences de deux ondes lumineuses

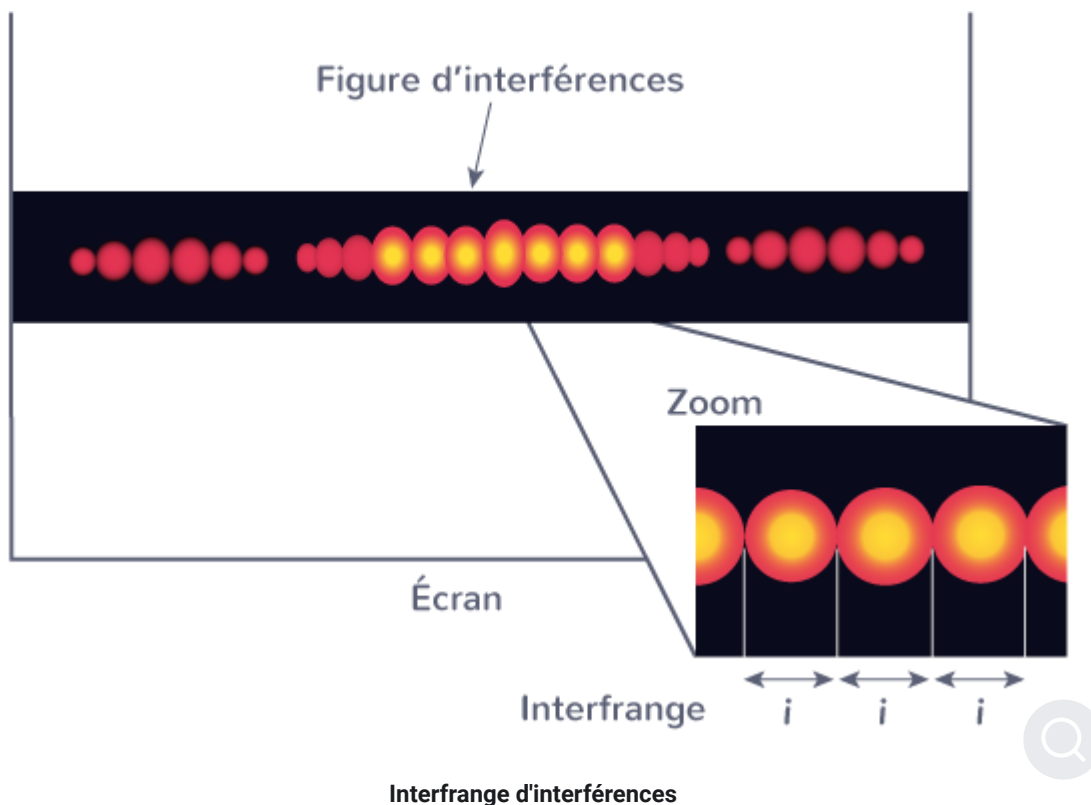
L'interfrange d'interférences est la longueur entre les franges de la figure d'interférences. Sa valeur dépend de la longueur d'onde de la lumière utilisée, de l'écart entre les deux fentes et de la distance bifente-écran.

### DÉFINITION

#### Interfrange d'interférences

L'**interfrange d'interférences**, généralement notée  $i$ , est la longueur qui sépare deux extinctions dans la figure d'interférences. C'est donc aussi la longueur d'une frange brillante.

### EXEMPLE



### FORMULE

#### Interfrange d'interférences

L'interfrange d'interférences  $i$  est liée à la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde considérée, la distance  $D$  entre les bifentes et l'écran et l'écart  $e$  entre les deux fentes :

$$i = \frac{\lambda \times D}{e}$$

Les longueurs sont à exprimer dans la même unité.

### EXEMPLE



Un faisceau laser de longueur d'onde 632 nm est dirigé vers une bifente d'écart 0,050 mm. L'interfrange des interférences observées sur un écran placé à 2,0 m de la bi-fente est :

$$i = \frac{\lambda \times D}{e}$$

$$i = \frac{632 \times 10^{-9} \times 2,0}{0,050 \times 10^{-3}}$$

$$i = 0,025 \text{ m}$$

$$i = 2,5 \text{ cm}$$



#### REMARQUE

Comme pour la diffraction, afin de minimiser l'incertitude sur la mesure de l'interfrange d'interférences, on mesure généralement une longueur plus grande, correspondant à plusieurs interfranges. La valeur de l'interfrange d'interférences est alors déterminée en calculant le rapport de la longueur totale mesurée  $L_{tot}$  par le

nombre  $n$  de franges :

$$i = \frac{L_{tot}}{n}$$

#### EXEMPLE

Sur une figure d'interférences, on mesure la longueur totale, correspondant à 5 franges avec une règle graduée au millimètre.

On obtient :  $L_{tot} = 4,6 \text{ cm}$  .

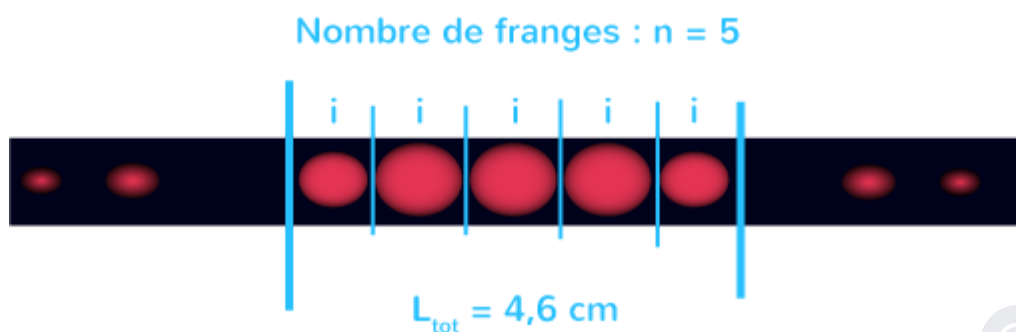
La valeur de l'interfrange d'interférences est donc :

$$i = \frac{L_{tot}}{n}$$

$$i = \frac{4,6}{5}$$

$$i = 0,92 \text{ cm}$$

Ainsi, la mesure de l'interfrange d'interférences est précise au dixième de millimètre près, ce que n'aurait pas permis une mesure directe avec une règle graduée au millimètre.



Mesure de l'interfrange d'interférences

