

Terminale Spécialité Physique-Chimie	Thème : Ondes et signaux	M.KUNST-MEDICA MAJ 10/2024	
<u>Chapitre 4 : Diffraction et interférences</u>		Cours livre p 371 à 374	

Objectifs et trame du chapitre

I. Diffraction

Activité expérimentale n°4.1 : Passage d'une onde par une ouverture (2 séances)

Capacités visées :

- Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes.
- Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture
- Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées.
- Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.

II. Les interférences

Devoir maison : Activité numérique n°4.2 : L'hologramme p 74 cahier Python.

Capacités visées :

- Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes.
- Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène.
- *Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, la somme de deux signaux sinusoïdaux périodiques synchrones en faisant varier la phase à l'origine de l'un des deux.*

Activité expérimentale n°4.3 : Les interférences lumineuses (2 séances)

Capacités visées :

- Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes.
- Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène.
- Prévoir les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young, l'expression linéarisée de la différence de chemin optique étant donnée. Établir l'expression de l'interfrange.
- Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas d'interférences de deux ondes lumineuses, en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.
- Exploiter une série de mesures, discuter de l'influence du protocole et/ou évaluer une incertitude-type pour comparer des résultats.

Synthèse des activités :

Vidéo cours Stella : Diffraction

<https://www.youtube.com/watch?v=KLyGlh3DHCO>



Vidéo cours Stella : Interférences

<https://www.youtube.com/watch?v=QenZTqVq4OM>



Vidéo : Différence de chemin optique (Hachette éducation)

<https://youtu.be/9xxVOMNSQRI>



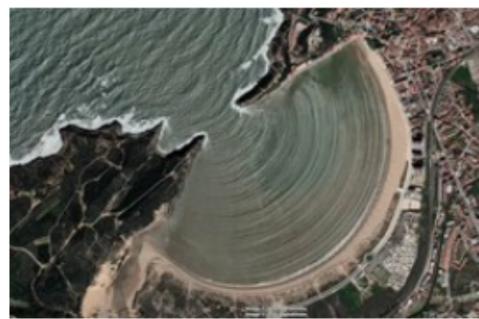
I. Diffraction

A) Introduction

Le phénomène de diffraction est un phénomène qui apparaît lorsqu'une onde rencontre un obstacle.

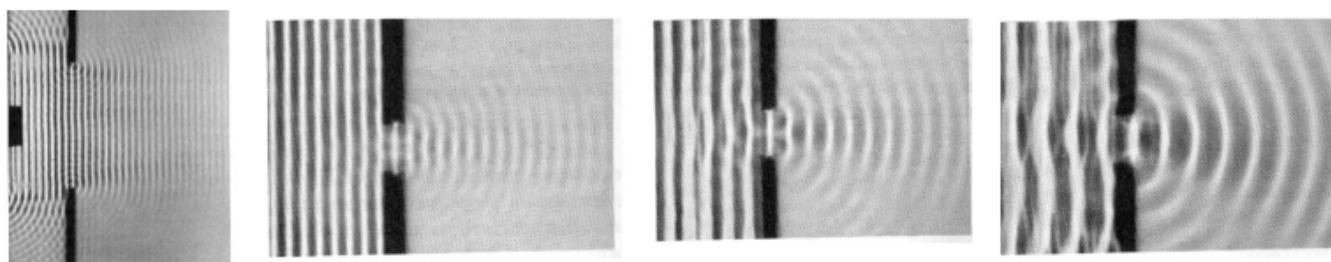
Par exemple, les vagues entrant dans un port peuvent, sous certaines conditions, « s'étendre » dans tout le port alors que l'entrée devrait les restreindre.

On constate alors un étalement des directions de propagation de l'onde.



B) Conditions d'observation

Voici des photos d'une cuve à onde pour différents rapports de longueur d'onde λ sur la taille de l'ouverture a .

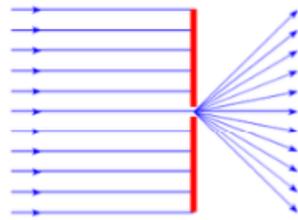


Augmentation du rapport $\frac{\lambda}{a}$ →

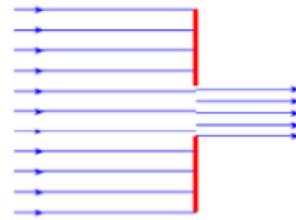
La diffraction est nettement observée lorsque la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle est de **l'ordre de grandeur ou inférieur** à la longueur d'onde.

Remarques :

- Plus l'ouverture est petite, plus le phénomène de diffraction est marqué.
- Dans le cas des ondes lumineuses, le phénomène est encore apparent avec des ouvertures ou des obstacles de dimensions d'ordre de grandeur jusqu'à 100 fois plus grandes que la longueur d'onde.



Petite ouverture = diffraction

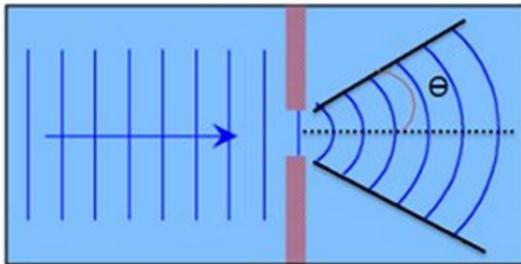


Grande ouverture = pas de diffraction

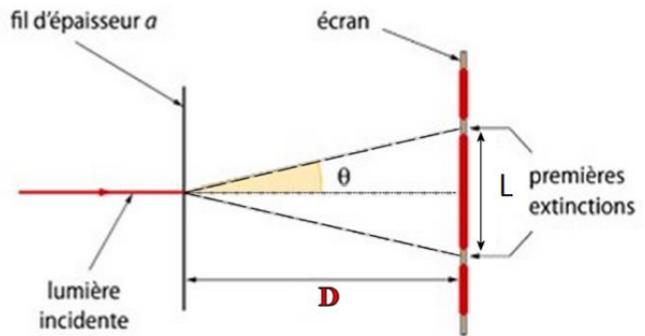
C) Diffraction d'une onde par une fente

Mesures de l'angle caractéristique de diffraction

Ecart angulaire



Onde mécanique



Onde lumineuse

Dans les deux situations on a la relation :

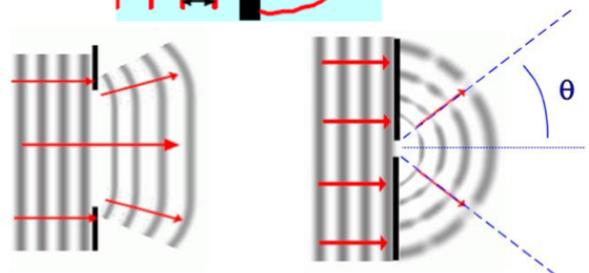
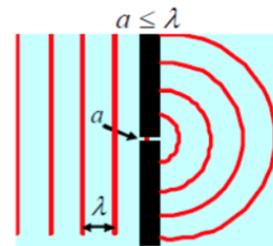
$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Avec θ en radian (rad), λ et a en mètre (m).

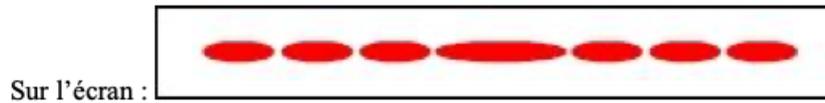
Rappel : conversion : $\pi \text{ rad} = 180^\circ$

• Cas des ondes mécaniques

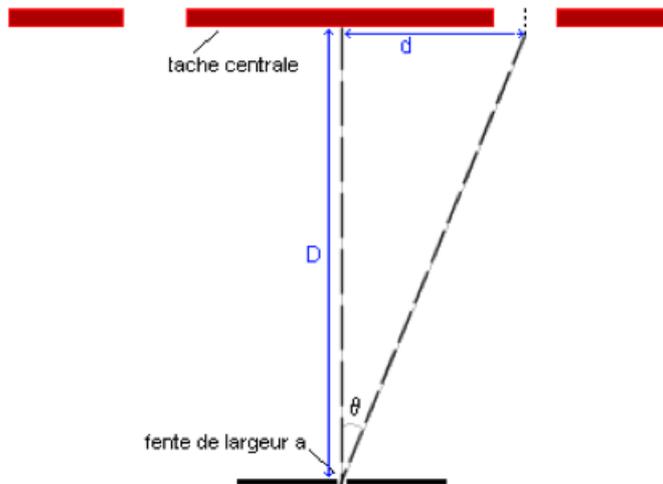
- Si $a \leq \lambda$, l'onde diffractée occupe tout l'espace offert. $\theta \approx \pi/2$
- Si $a > \lambda$ la zone de diffraction n'existera que dans l'ouverture angulaire θ .
- Si $a \gg \lambda$, alors l'onde incidente est peu perturbée, sauf près des bords. L'ouverture agit comme un diaphragme. Il n'y a pas diffraction.



- Cas des ondes lumineuses monochromatiques diffractées par une fente ou un objet fin :



- Pour des ondes lumineuses monochromatiques (λ compris entre 400 et 750 nm), l'écart angulaire θ entre le centre de la tache centrale et la première extinction, caractérise la diffraction et est toujours donné par : $\theta = \frac{\lambda}{a}$ Avec θ en radian (rad), λ et a en mètre (m).
- Pour la lumière on obtient une diffraction à grande distance même si a est trop grand.
- D'autre part si on utilise les relations de trigonométrie on remarque que



$$\tan \theta = d/D$$

Sachant que $d = L/2$

(L : largeur de la tache centrale)

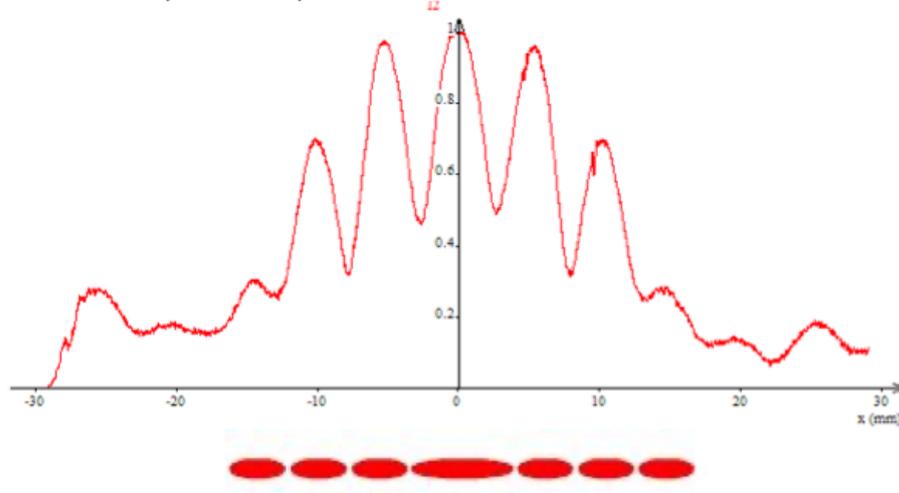
Et que pour des petits angles en radian $\tan \theta \approx \theta$

On obtient
$$\theta = \frac{L}{2D}$$

Schéma du dispositif et de la figure de diffraction (vu du dessus)

Ces deux relations permettent de calculer soit λ soit a donc de connaître la longueur d'onde d'une radiation lumineuse ou la dimension d'un objet très petit.

Remarque : La figure de diffraction peut être représentée à l'aide de la courbe intensité lumineuse = $f(x)$

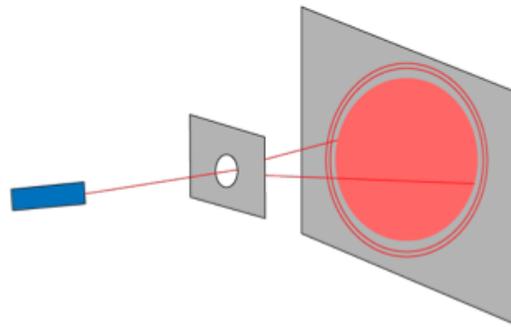


Autour de la tache centrale formée par l'angle caractéristique θ , il y a des extinctions puis des taches secondaires.

- **Cas des ondes lumineuses monochromatiques diffractées par un trou circulaire :**

Lorsqu'une onde monochromatique traverse une ouverture circulaire, on n'observe plus une figure de diffraction classique mais une **tâche d'Airy**.

Le demi-angle d'ouverture θ de la tache centrale dans le cas d'une diffraction par une ouverture circulaire est donnée par la relation : $\theta = 1,22 \lambda / a$



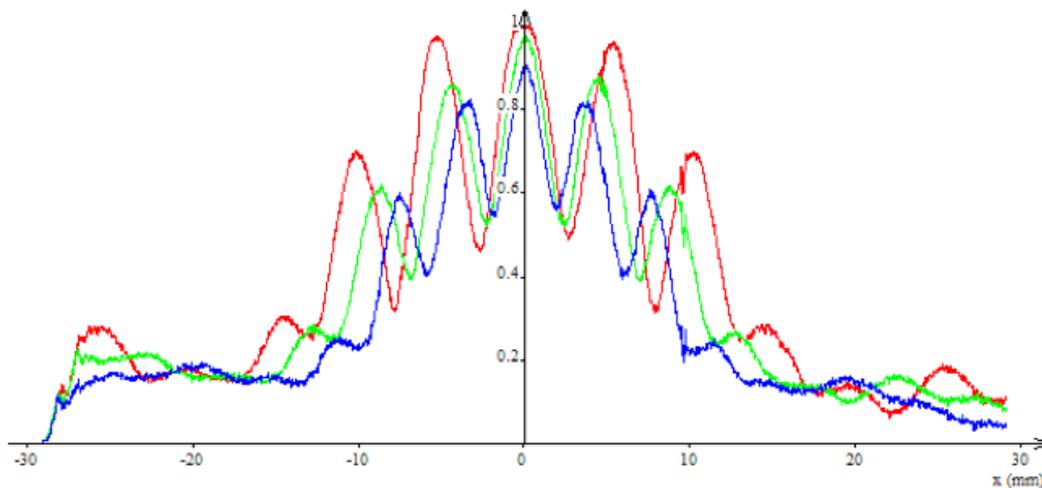
C'est important en astronomie car la lumière d'une étoile passe par le diaphragme du télescope et la diffraction est inévitable si le diaphragme est trop petit.

- **Cas de la lumière blanche**

La lumière blanche est une lumière **polychromatique** composée de toutes les lumières colorées visibles. La figure de diffraction obtenue présente une tache centrale blanche (superposition de toutes les lumières colorées visibles) et des taches latérales irisées.



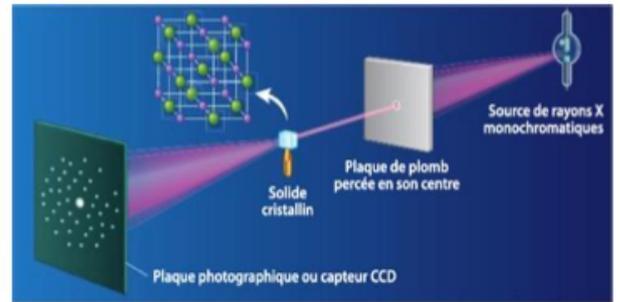
En simplifiant, on peut restreindre la lumière blanche à la superposition de lumières rouge, verte et bleue.



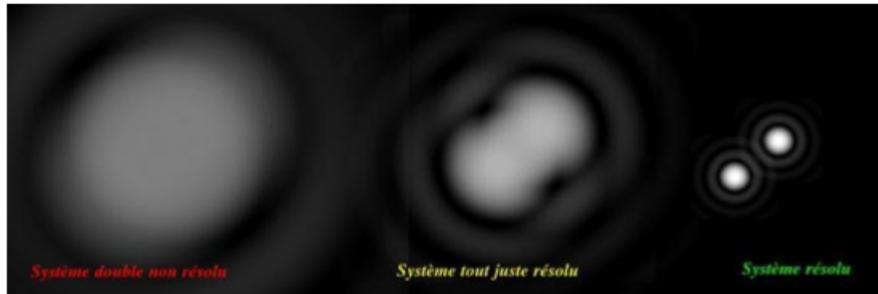
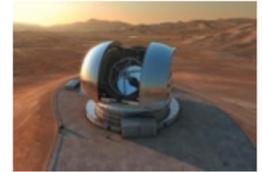
Les courbes ci-dessus montrent que les différentes radiations se superposent dans des proportions proches dans la tache centrale, ainsi elle apparaît blanche. Mais ce n'est pas forcément le cas de part et d'autre de la tache centrale, ce qui explique les **irisations**.

D) Quelques conséquences (Grand oral)

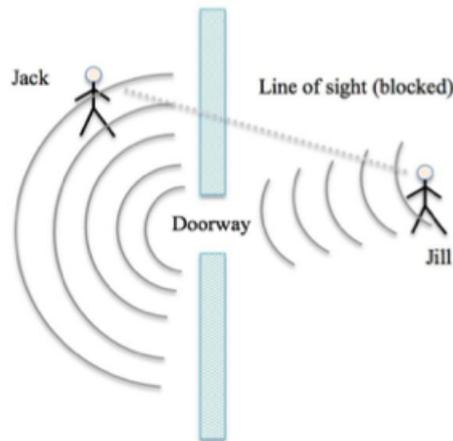
- **Utilisation en cristallographie** : la diffraction de rayons X par un solide cristallin permet de déterminer la structure du cristal et la distance entre les atomes. (Enseignement scientifique 1^{ère})



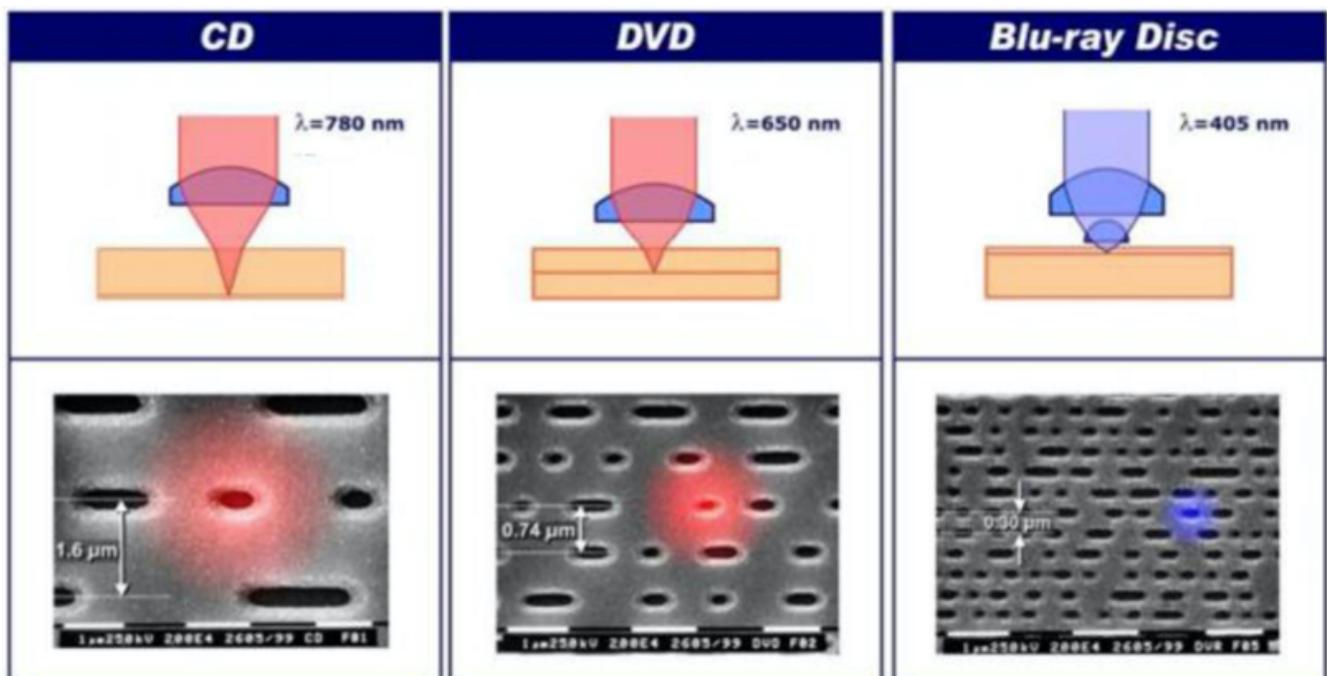
- Problème de résolution d'un télescope** : le diamètre d'ouverture d'un télescope crée de la diffraction. On ne voit plus les étoiles comme des points mais comme des taches. Un exemple frappant est celui d'étoiles doubles. L'observation de ces étoiles avec un télescope a petit diamètre nous donne l'impression de regarder une étoile. Avec un télescope a plus grand diamètre les deux étoiles seront visibles.



- Vie courante** : entendre la voix d'une personne qui est dans la pièce d'à côté pas seulement si on est en face de la porte.



- Limite de lecture d'un support optique (CD, DVD)**

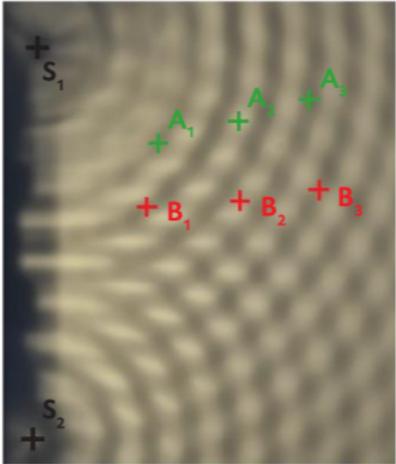


II. Interférences

A- Conditions d'observation et interférences constructives et destructives

On observe des interférences lorsque deux ondes de même longueur d'onde se superposent, elles se renforcent ou s'annulent par endroit : on parle respectivement d'**interférences constructives** (ondes en phase) et d'**interférences destructives** (ondes en opposition de phase).

D Interférences à la surface de l'eau d'une cuve à ondes



• Deux vibreurs, jouant le rôle de sources ponctuelles, oscillent au-dessus de la surface de l'eau d'une cuve à ondes (schéma **D**), de manière synchrone, avec la même fréquence f et un déphasage (différence de phase) constant. Il en résulte la propagation de deux ondes progressives circulaires qui se superposent pour donner une figure d'interférences.

• On observe des zones fortement agitées (points A_1 , A_2 et A_3) et d'autres zones peu agitées (points B_1 , B_2 et B_3). C'est le phénomène d'interférences.

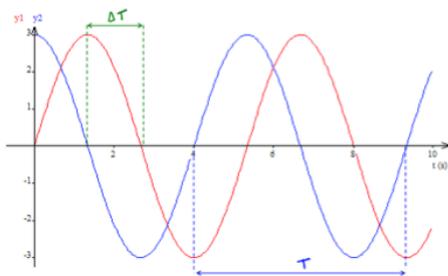
Des **interférences** s'obtiennent avec des **ondes de même fréquence** et présentant un **déphasage constant**. Les sources qui émettent ces ondes sont des **sources ponctuelles en phase**.

> Interférences constructives (A_1 , A_2 , A_3) et destructives (B_1 , B_2 , B_3).

Deux sources sont dites **synchrones** si elles émettent des ondes de même fréquence.

Il y a interférences si les ondes qui se superposent ont :

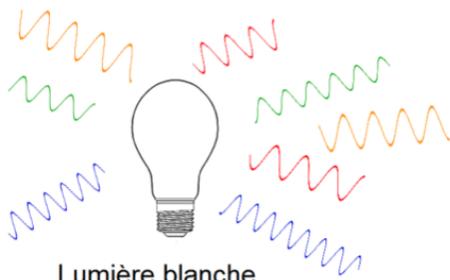
- la même fréquence
- un déphasage ΔT constant c'est à dire que le retard de l'une par rapport à l'autre ne varie pas au cours du temps.



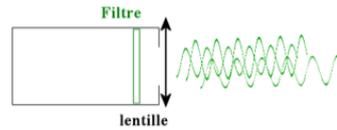
Courbes bleue et rouge déphasées de ΔT

Si ces deux conditions sont réunies on dit que les ondes sont cohérentes.

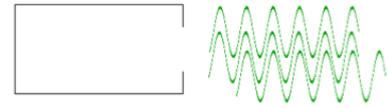
Sources de lumière cohérente :



Lumière blanche
Pas de direction particulière
Pas de même fréquence

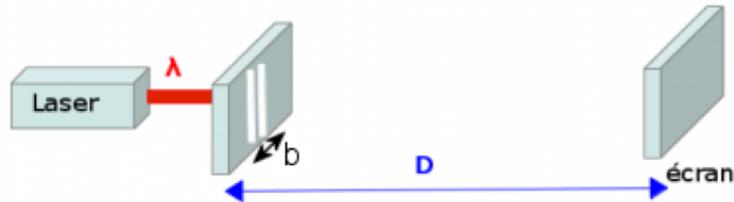


Source monochromatique
Monodirectionnelle
Même fréquence



Laser
Même direction, même fréquence
lumière cohérente

Le plus simple pour obtenir 2 sources cohérentes c'est d'envoyer une lumière sur un système de 2 fentes très proches (fentes d'Young) qui va réémettre par diffraction 2 ondes cohérentes.

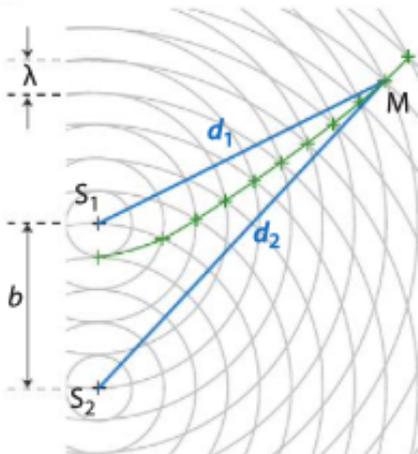


Principe de l'addition des ondes

Imaginons un point M sur lequel arrive les perturbations émises par deux sources S1 et S2 cohérentes (de même fréquence et ayant la même stabilité temporelle). Ces deux perturbations arrivant au point M s'additionnant, le mouvement de M va être une combinaison des deux perturbations.

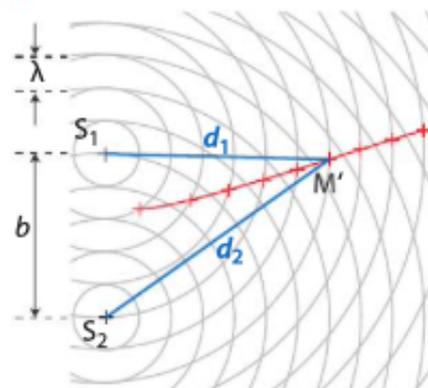
La différence de marche δ entre les 2 ondes est $\delta = |S_1M - S_2M|$

a) Constructives



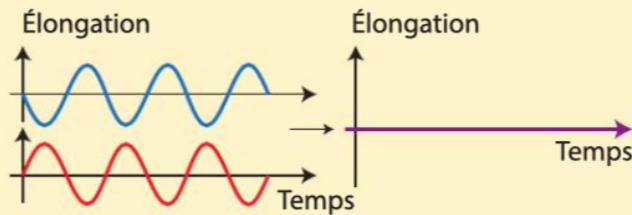
> Les lieux des points tels que $d_2 - d_1 = \lambda, d_2 - d_1 = 2\lambda, \text{ etc.}$
ou $d_2 - d_1 = -\lambda, d_2 - d_1 = -2\lambda, \text{ etc.}$
constituent les franges de forte amplitude.

b) Destructives



> Les lieux des points tels que $d_2 - d_1 = \frac{\lambda}{2}, d_2 - d_1 = \frac{3\lambda}{2}, \text{ etc.}$
ou $d_2 - d_1 = -\frac{\lambda}{2}, d_2 - d_1 = -\frac{3\lambda}{2}, \text{ etc.}$
constituent les franges d'amplitude nulle.

Il y a **interférences destructives** quand deux ondes de longueur d'onde λ , se déplaçant dans un milieu homogène et provenant de deux **sources ponctuelles en phase**, arrivent en **opposition de phase** en un point.

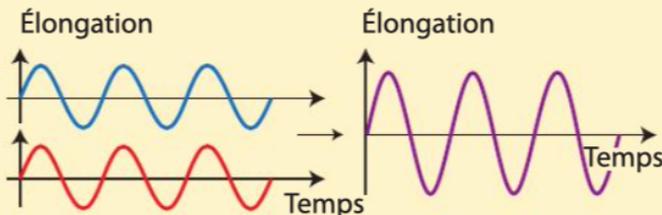


L'amplitude de l'onde résultante est alors nulle.

En un point M' où les interférences sont destructives (schéma **E b**), parviennent des ondes qui ont parcouru les distances $d_1 = S_1M'$ et $d_2 = S_2M'$ de sorte que : $d_2 - d_1 = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda$ avec k entier relatif.

C'est la **condition d'interférences destructives**.

Il y a **interférences constructives** quand deux ondes de longueur d'onde λ , se déplaçant dans un milieu homogène et provenant de deux **sources ponctuelles en phase**, arrivent en **phase** en un point.

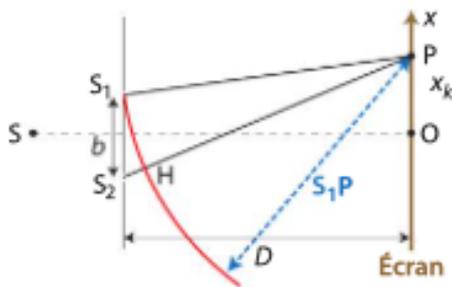


L'amplitude de l'onde résultante est alors supérieure à celle des ondes de départ.

En un point M où les interférences sont constructives (schéma **E a**), parviennent des ondes qui ont parcouru les distances $d_1 = S_1M$ et $d_2 = S_2M$ de sorte que : $d_2 - d_1 = k \times \lambda$, avec k entier relatif.

C'est la **condition d'interférences constructives**.

F Superposition de deux ondes et distances parcourues



> Ici, les ondes arrivant en P après passage par S_2 ont parcouru une plus grande distance que celles arrivant en P après passage par S_1 . La différence de distances est $S_2P - S_1P$.

INFO

Le chemin optique est la distance qui serait parcourue par l'onde dans le vide pendant la même durée que celle de sa propagation dans le milieu d'indice n .

a. Différence de chemin optique

- Deux ondes lumineuses de longueur d'onde dans le vide λ_0 émises par les sources secondaires S_1 et S_2 se superposent en un point P de l'écran après avoir parcouru les distances S_1P et S_2P (schéma **F**).
- On définit la **différence de chemin optique** ΔL entre les deux ondes :

$$\Delta L = n \times (S_2P - S_1P)$$
 avec n l'indice du milieu de propagation

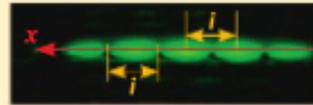
Si la **différence de chemin optique** ΔL est telle que :

- $\Delta L = k \times \lambda_0$ avec $k \in \mathbb{Z}$, les ondes arrivent **en phase** en P. Les interférences sont **constructives**. On observe alors des **franges brillantes** ;
- $\Delta L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0$ avec $k \in \mathbb{Z}$, les ondes arrivent **en opposition de phase** en P. Les interférences sont **destructives**. On observe alors des **franges sombres**.

- Une onde de longueur d'onde λ_0 dans le vide a une longueur d'onde $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ dans un milieu d'indice n .
 Dans l'air, on a $n = 1,00$. Ainsi, $\Delta L = S_2P - S_1P$, et $\lambda = \lambda_0$.

b. Interfrange

L'interfrange i est la distance $x_{k+1} - x_k$ séparant les centres de deux franges brillantes ou sombres consécutives.



La différence de chemin optique ΔL_k en P d'abscisse x_k (schéma F) a pour expression $\Delta L_k = \frac{n \times x_k \times b}{D}$ où b est la distance séparant les sources secondaires et D la distance de ces sources à l'écran (avec $D \gg b$).

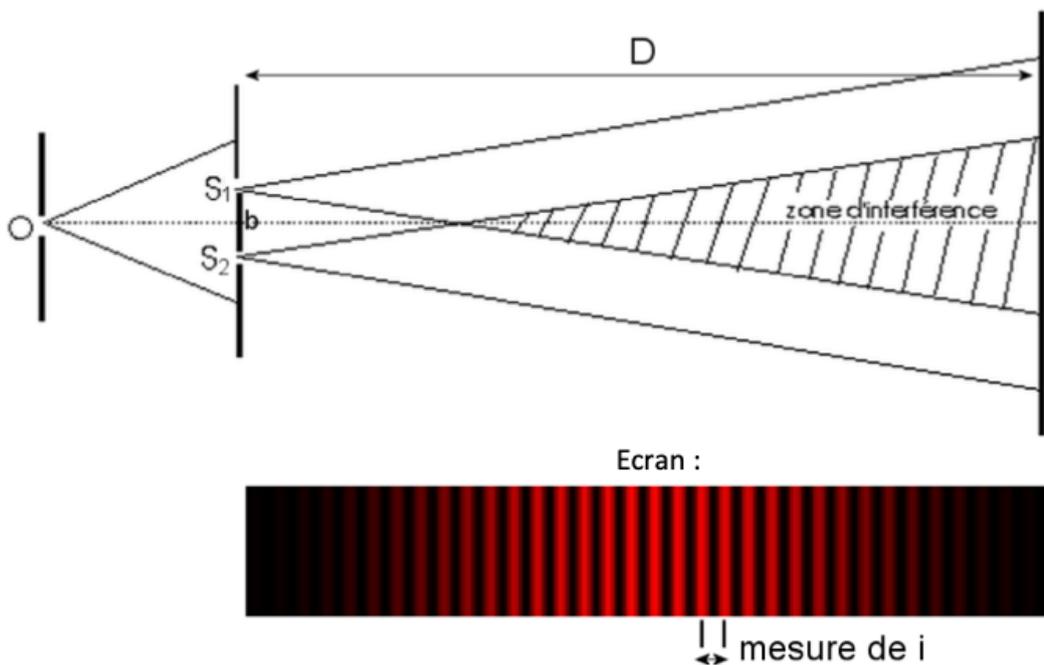
L'interfrange $i = x_{k+1} - x_k$ est déterminé en combinant la condition d'interférences constructives ou celle d'interférences destructives avec l'expression fournie de la différence de chemin optique.

Mesures expérimentales de l'interfrange dans le cas des interférences lumineuses

Un interfrange i est la distance séparant le milieu de deux frange brillantes ou le milieu de deux franges sombres consécutives.

Avec un dispositif du type fentes d'Young, on trouve expérimentalement qu'il est proportionnel à la distance D à l'écran, à la longueur d'onde et inversement proportionnel à la distance entre les fentes, b .

Ce qui donne : $i = \frac{\lambda D}{b}$ (tout en m)



Comme i est petit, on en mesure plusieurs pour minimiser les incertitudes de mesure.

Conséquence : On peut démontrer que la différence de chemin optique δ_k au point M d'abscisse x_k a pour expression

$$\delta_k = \frac{n \times b \times x_k}{D}$$

Application :

- 1) Prévoir les lieux d'interférences constructives.
- 2) Prévoir les lieux d'interférences destructives.
- 3) Établir l'expression de l'interfrange.

Cas de deux franges brillantes consécutives

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\Delta L_{k+1} \times D}{n \times b} - \frac{\Delta L_k \times D}{n \times b}$$

$$i = \frac{(k+1) \times \lambda_0 \times D}{n \times b} - \frac{k \times \lambda_0 \times D}{n \times b}$$

$$\text{soit : } i = \frac{\lambda_0 \times D}{n \times b} (k+1 - k)$$

d'où : i en m $\leftarrow i = \frac{\lambda_0 \times D}{n \times b}$ $\leftarrow \lambda_0$ et D en m
 sans unité $\leftarrow n$ et b en m

Cas de deux franges sombres consécutives

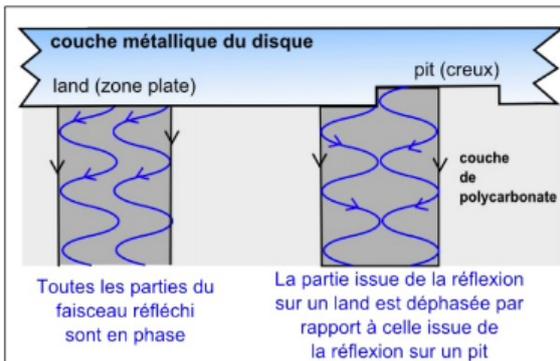
$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\Delta L_{k+1} \times D}{n \times b} - \frac{\Delta L_k \times D}{n \times b}$$

$$i = \frac{\left([k+1] + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0 \times D}{n \times b} - \frac{\left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0 \times D}{n \times b}$$

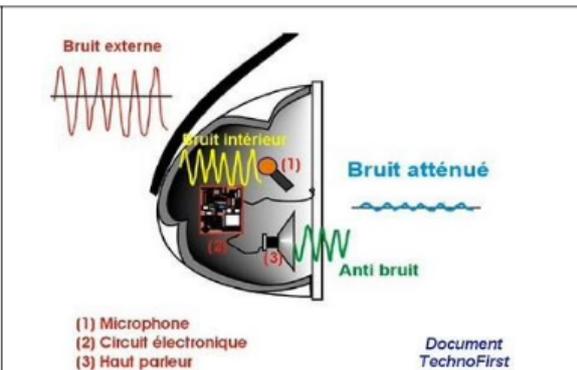
$$\text{soit : } i = \frac{\lambda_0 \times D}{n \times b} \times \left(k + 1 + \frac{1}{2} - k - \frac{1}{2}\right)$$

d'où : i en m $\leftarrow i = \frac{\lambda_0 \times D}{n \times b}$ $\leftarrow \lambda_0$ et D en m
 sans unité $\leftarrow n$ et b en m

Les interférences sont responsables de nombreux phénomènes et sont fréquemment utilisées. On peut citer :



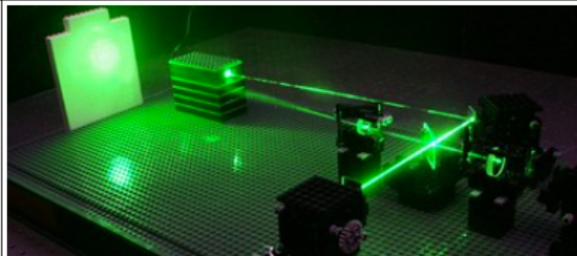
La lecture des disques optiques se fait à l'aide de ce phénomène : la profondeur d'un creux permet de créer des interférences destructives.



Les casques à réduction de bruit actifs utilisent les interférences afin de supprimer les sons extérieurs.



Les couleurs irisées d'une flaque d'essence ou d'une bulle par exemple.



La détermination de longueur d'onde, notamment pour les phénomènes astronomiques (ici à l'aide d'un interféromètre de Michelson).

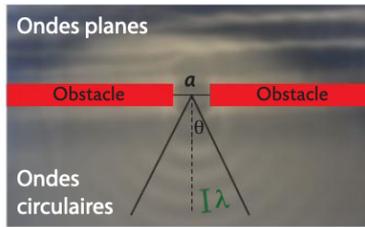
L'essentiel

La diffraction

Diffraction : changement de direction de propagation de tout type d'onde lors de la traversée d'une ouverture.

Conditions d'observation

Dimensions maximales de l'ouverture :
 – du même ordre de grandeur que λ pour les ondes mécaniques ;
 – égales à quelques dizaines de longueurs d'onde pour les ondes lumineuses.



Domaines d'intervention

Cristallographie, astronomie, lecture optique, acoustique, etc.

Angle caractéristique de diffraction θ (aigu et positif)

- Dans le cas d'une ouverture de largeur a : $\sin \theta = \frac{\lambda(m)}{a(m)}$.
- Si le rapport $\frac{\lambda}{a}$ est petit : $\theta(\text{rad}) = \frac{\lambda(m)}{a(m)}$.
- Pour une onde lumineuse, et dans le cas d'une ouverture circulaire de diamètre d :

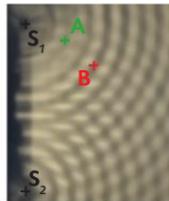
$$\theta(\text{rad}) = 1,22 \times \frac{\lambda(m)}{d(m)}$$

Les interférences

Interférences : superposition d'ondes de même type en un point.

Conditions d'observation

Ondes de même fréquence et de déphasage constant qui se superposent.



Domaines d'intervention

Couleurs de certains objets, brouillage de signaux radio, protection sonore, etc.

Interférences constructives et destructives

Interférences constructives au point **A** :

- Arrivée de deux ondes **en phase** en ce point.
- Amplitude de l'onde résultante maximale.
- $S_2A - S_1A = k \times \lambda$ avec $k \in \mathbb{Z}$

Interférences destructives au point **B** :

- Arrivée de deux ondes **en opposition de phase** en ce point.
- Amplitude de l'onde résultante nulle.
- $S_2B - S_1B = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda$ avec $k \in \mathbb{Z}$

Les interférences de deux ondes lumineuses monochromatiques

Observation de **franges brillantes** en un point **P** si :

- les **interférences** sont **constructives** ;
- la différence de chemin optique ΔL est :

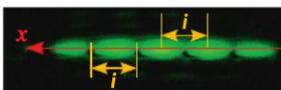
$$\Delta L = k \times \lambda_0 \text{ avec } k \in \mathbb{Z}$$

Observation de **franges sombres** en un point **P** si :

- les **interférences** sont **destructives** ;
- la différence de chemin optique ΔL est :

$$\Delta L = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \lambda_0 \text{ avec } k \in \mathbb{Z}$$

Établissement de l'interfrange



Interfrange = distance séparant les centres de deux franges brillantes ou sombres consécutives

Poser la condition soit d'interférences constructives soit d'interférences destructives

Utiliser l'expression fournie de la différence de chemin optique ΔL pour exprimer x_{k+1} et x_k

En déduire l'expression de i à partir de $i = x_{k+1} - x_k$