

Interférences et spectroscopie

HA8402H – Physique et sciences de l'ingénieur 4

Kenneth MAUSSANG

Université de Montpellier

Polytech Montpellier – PeiP

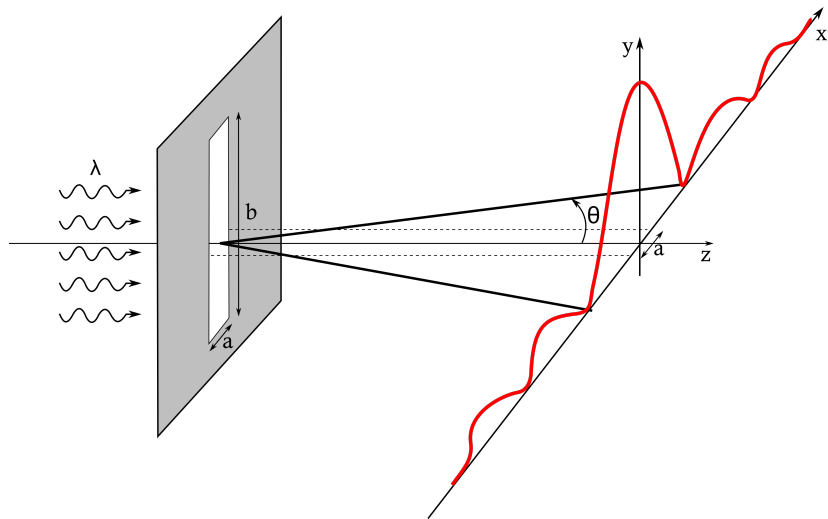
2021 – 2022

- O7.1 Description du phénomène d'interférences.
- O7.2 Notion de cohérence entre deux ondes et conditions d'obtention des interférences.
- O7.3 Étude d'un exemple d'interféromètre à deux ondes : le dispositif des fentes d'Young.

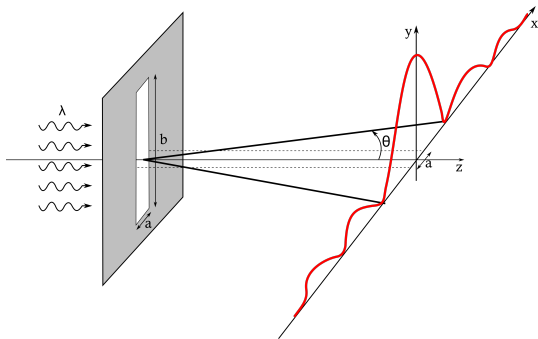
- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie

- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie

1. Diffraction des ondes lumineuses



1. Diffraction des ondes lumineuses



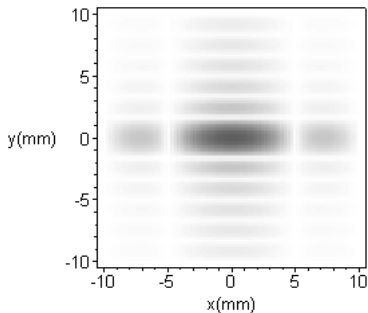
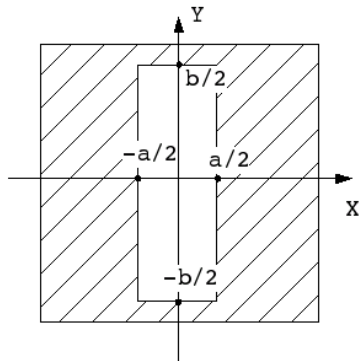
On observe dans le plan (O, x, y) de l'écran le profil d'intensité $I(x, y)$ de la forme suivante

$$I(x, y) = I_0 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi a x}{\lambda D} \right) \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi b y}{\lambda D} \right).$$

La largeur de la tache centrale selon x est de $\Delta x = 2 \frac{\lambda D}{a}$, alors que le modèle de l'optique géométrique prévoit une tache de largeur a .

Il s'agit du **phénomène de diffraction**. Par exemple, pour $\lambda = 638\text{nm}$ (laser He-Ne), $a = 100\mu\text{m}$ (diamètre d'un cheveu) et $D = 2\text{m}$:
 $\Delta x = 2,5\text{cm}$.

1. Diffraction des ondes lumineuses



https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorie_de_la_diffraction

1. Diffraction des ondes lumineuses

Dans le cas d'une ouverture circulaire de rayon r , on obtient une *tache d'Airy*. Il s'agit d'une tache à symétrie cylindrique, de diamètre angulaire

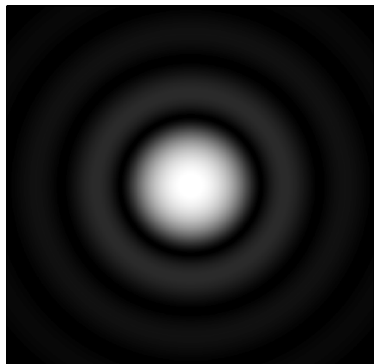
$$\theta \approx 1,22 \frac{\lambda}{r}.$$

Ainsi, pour une observation sur un écran à une distance D , la taille de la tache d'Airy est

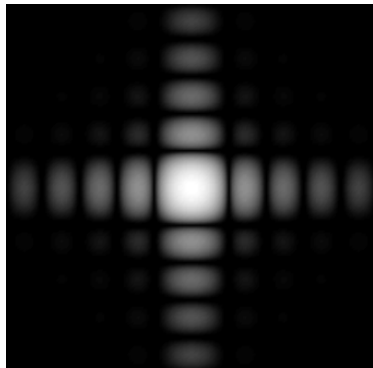
$$\Delta x \approx 1,22 \frac{\lambda D}{r},$$

alors que l'optique géométrique prévoit une tache de $2r$.

1. Diffraction des ondes lumineuses



Ouverture circulaire.

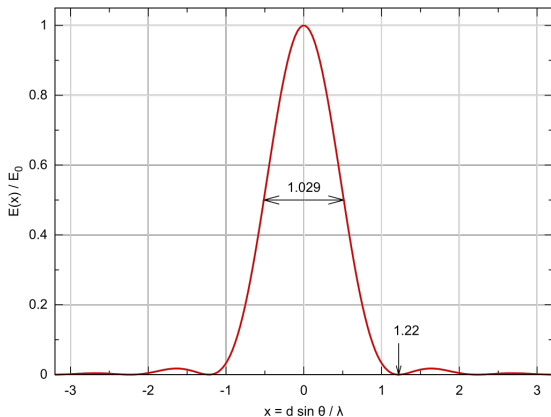


Ouverture carrée.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffraction>

1. Diffraction des ondes lumineuses

Coupe de l'éclairement en fonction de la position dans une tache d'Airy.



https://fr.wikipedia.org/wiki/Tache_d'Airy

1. Diffraction des ondes lumineuses

Le phénomène de diffraction est une conséquence du caractère ondulatoire de la lumière, et ne peut être décrit par le modèle de l'optique géométrique.

Un autre phénomène ne peut être décrit par l'optique géométrique et nécessite de tenir compte de l'aspect ondulatoire de la lumière : le **phénomène d'interférences**.

Les interférences sont un phénomène propre au caractère ondulatoire d'une grandeur physique.

1. Diffraction des ondes lumineuses

On considère deux ondes de même nature, d'amplitudes s_1 et s_2 .

L'intensité de l'onde (au sens énergétique) est proportionnelle au carré de l'amplitude $I_i(\vec{r}, t) \propto s_i(\vec{r}, t)^2$.

L'équation d'onde est linéaire donc l'onde totale issue de la superposition de $s_1(\vec{r}, t)$ et $s_2(\vec{r}, t)$ vaut

$s_{\text{tot}}(\vec{r}, t) = s_1(\vec{r}, t) + s_2(\vec{r}, t)$, **mais ce n'est pas vrai pour les intensités**

$$I_{\text{tot}} \neq I_1 + I_2.$$

Ainsi, si $I_{\text{tot}}(\vec{r}, t) \neq I_1(\vec{r}, t) + I_2(\vec{r}, t)$, **on parle de phénomène d'interférences.**

- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
 - Définition
 - Conditions d'observation des interférences
 - Interférences à deux ondes
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie

- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
 - Définition
 - Conditions d'observation des interférences
 - Interférences à deux ondes
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie

2.1. Définition

L'équation d'onde est linéaire. L'onde résultante de la superposition d'ondes est la somme de ces ondes

$$s_{\text{tot}} = s_1 + s_2 + \dots + s_N.$$

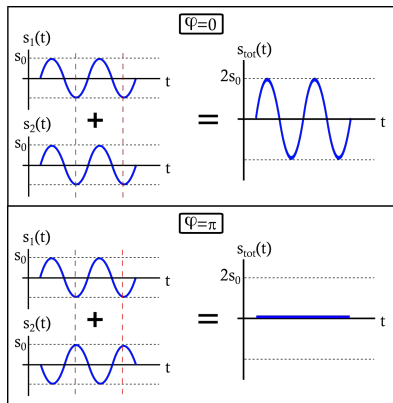
Cependant, la nature ondulatoire ne permet pas de dire la même chose pour l'intensité dans le cas général

$$I_{\text{tot}} \neq I_1 + I_2 + \dots + I_N.$$

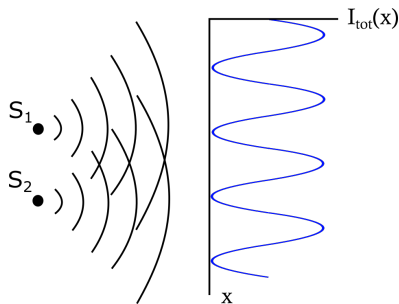
***lumière + lumière
= obscurité***

2.1. Définition

Une onde, c'est une amplitude **et** une phase!



La phase dépend du parcours de l'onde. Dans le cas de deux sources ponctuelles, on obtient une figure d'interférences.



2.1. Définition

Flaque d'essence sur sol mouillé : figure d'interférences en lumière blanche.



<https://en.wikipedia.org/wiki/Optics>

- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
 - Définition
 - Conditions d'observation des interférences
 - Interférences à deux ondes
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie

2.2. Conditions d'observation des interférences

Cependant, l'observation commune ne permet pas d'obtenir des interférences systématiquement. Deux sources S_1 et S_2 quelconques sans précautions particulières, au contraire, donnent lieu à une superposition des intensités lumineuses. Si la superposition d'intensité se fait linéairement,

$$I_{\text{tot}} = I_1 + I_2,$$

il n'y a pas de phénomène d'interférences, bien que les sources soient des ondes lumineuses. On dit alors que les deux sources S_1 et S_2 sont **incohérentes**. Si, en revanche, S_1 et S_2 donnent lieu à des interférences ($I_{\text{tot}} \neq I_1 + I_2$), on dit que les sources S_1 et S_2 sont **cohérentes** entre elles.

2.2. Conditions d'observation des interférences

Si la phase $\varphi(t)$ entre les deux ondes est constante dans le temps, on aura des interférences.

Deux ondes sont cohérentes si leur déphasage est stable dans le temps.

Deux ondes cohérentes interfèrent. Pour $s_{\text{tot}}(t) = s_1(t) + s_2(t)$, alors

$$s_{\text{tot}}(t)^2 = s_1(t)^2 + s_2(t)^2 + 2s_1(t)s_2(t).$$

Le terme croisé $s_1(t)s_2(t)$ sera non nul en valeur moyenne si le déphasage entre les deux ondes est constant.

2.2. Conditions d'observation des interférences

Si on considère des ondes de la forme

$$s_i(t) = \sqrt{2I_i} \cos(\omega t + \phi_i(t)),$$

alors, en notant $\phi(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t)$ la phase relative entre les deux ondes, on obtient

$$I_{\text{tot}}(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \phi(t) \rangle,$$

Si la phase $\phi(t)$ fluctue au cours du temps, le profil spatial du champ d'interférences va être moyenné à l'échelle du temps de réponse du détecteur par le terme $\langle \cos \phi(t) \rangle$.

Si $\phi(t)$ fluctue sur $[0; 2\pi[$, alors $\langle \cos \phi(t) \rangle \rightarrow 0$ donc

$$I_{\text{tot}} = I_1 + I_2.$$

2.2. Conditions d'observation des interférences

Deux ondes sont incohérentes si leur déphasage fluctue sur $[0; 2\pi[$ à une échelle de temps inférieure au temps de réponse du détecteur.

Pour la lumière, la grandeur détectée n'est pas le champ électrique \vec{E} mais l'intensité lumineuse $\langle \vec{E}^2 \rangle$: c'est le cas des détecteurs les plus courants comme l'œil, un pixel de caméra, etc... De même pour la plupart des ondes, les détecteurs sont sensibles à l'**intensité** et non la grandeur ondulatoire. Le processus de détection est donc **quadratique** avec l'amplitude de l'onde s

$$I \propto s^2.$$

Les interférences seront observables suivant la cohérence des ondes superposées à l'échelle de temps de réponse du détecteur utilisé.

- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
 - Définition
 - Conditions d'observation des interférences
 - Interférences à deux ondes
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie



Approximation scalaire

Une onde lumineuse est une onde vectorielle de champs électrique et magnétique (\vec{E}, \vec{B}) . L'approximation scalaire consiste à négliger le caractère vectoriel de l'onde et ne conserver que l'information sur le caractère ondulatoire en introduisant une grandeur appelée *vibration lumineuse* $s(\vec{r}, t)$ (par exemple l'amplitude du champ électrique).

2.3. Interférences à deux ondes

On considère deux sources S_1 et S_2 , de pulsations ω_1 et ω_2 et de phases φ_1 et φ_2 . Soit M un point de l'espace où se superposent les ondes $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$ avec

$$s_1(M, t) = s_{1,0} \cos \left(\omega_1 t - \vec{k}_1 \cdot \overrightarrow{S_1 M} + \varphi_1 \right),$$

et

$$s_2(M, t) = s_{2,0} \cos \left(\omega_2 t - \vec{k}_2 \cdot \overrightarrow{S_2 M} + \varphi_2 \right),$$

et alors l'onde résultante s'écrit $s(M, t) = s_1(M, t) + s_2(M, t)$. Ainsi

$$\underbrace{\langle s(M, t)^2 \rangle}_{=I} = \underbrace{\langle s_1(M, t)^2 \rangle}_{=I_1} + \underbrace{\langle s_2(M, t)^2 \rangle}_{=I_2} + \underbrace{2\langle s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle}_{\text{terme d'interférences}}.$$

2.3. Interférences à deux ondes

$$\langle s_1(M, t) s_2(M, t) \rangle =$$

$$\frac{s_{1,0} s_{2,0}}{2} \left(\left\langle \cos \left((\omega_1 - \omega_2) t - 2\pi \left(\frac{1}{\lambda_1} L_1 - \frac{1}{\lambda_2} L_2 \right) + \varphi_1 - \varphi_2 \right) \right\rangle \right. \\ \left. + \left\langle \cos \left((\omega_1 + \omega_2) t - 2\pi \left(\frac{1}{\lambda_1} L_1 + \frac{1}{\lambda_2} L_2 \right) + \varphi_1 + \varphi_2 \right) \right\rangle \right)$$

Or

$$\left\langle \cos \left((\omega_1 + \omega_2) t - 2\pi \left(\frac{1}{\lambda_1} L_1 + \frac{1}{\lambda_2} L_2 \right) + \varphi_1 + \varphi_2 \right) \right\rangle = 0,$$

2.3. Interférences à deux ondes

si $\omega_1 \neq \omega_2$,

$$\left\langle \cos \left((\omega_1 - \omega_2) t - 2\pi \left(\frac{1}{\lambda_1} L_1 - \frac{1}{\lambda_2} L_2 \right) + \varphi_1 - \varphi_2 \right) \right\rangle = 0.$$

En revanche, **si** $\omega_1 = \omega_2$,

$$\left\langle \cos \left((\omega_1 - \omega_2) t - 2\pi \left(\frac{1}{\lambda_1} L_1 - \frac{1}{\lambda_2} L_2 \right) + \varphi_1 - \varphi_2 \right) \right\rangle \neq 0 \text{ a priori}$$

2.3. Interférences à deux ondes

On note alors

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1,$$

le déphasage entre les deux sources.

$$\langle s_1(M, t) s_2(M, t) \rangle = \frac{s_{1,0} s_{2,0}}{2} \left\langle \cos \left(2\pi \left(\frac{\delta}{\lambda} \right) + \Delta\varphi \right) \right\rangle,$$

2.3. Interférences à deux ondes

Si $\Delta\varphi = \text{Cte}$, alors $\langle s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle \neq 0$. Si $\Delta\varphi$ varie de 0 à 2π , $\langle s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle \approx 0$. Donc les deux sources S_1 et S_2 sont **cohérentes** si leur déphasage reste constant au cours du temps.

$$\langle s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle = \frac{s_{1,0}s_{2,0}}{2} \cos \left(2\pi \left(\frac{\delta}{\lambda} \right) + \Delta\varphi \right),$$

avec δ la **différence de marche entre les deux rayons lumineux**

$$\delta = L_1 - L_2.$$

Attention, la différence de marche est une différence de chemin optique et non de chemin géométrique, elle inclue les effets d'indices.

2.3. Interférences à deux ondes

D'où le résultat final

$$I(M, t) = I_1(M, t) + I_2(M, t) + 2\sqrt{I_1(M, t)I_2(M, t)} \cos\left(2\pi\left(\frac{\delta}{\lambda}\right) + \Delta\varphi\right).$$

Dans le cas de deux sources d'intensités égales $I_1 = I_2 = I_0/2$, on obtient

$$I = I_0 \left(1 + \cos\left(2\pi\frac{\delta}{\lambda} + \Delta\varphi\right) \right).$$

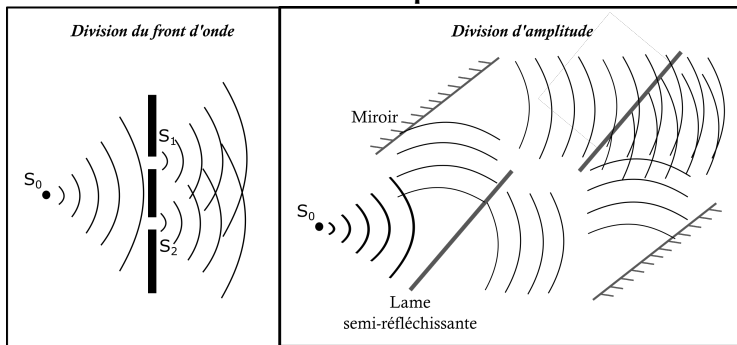
Dans le cas général, on obtient

$$I(\delta) = (I_1 + I_2) \left(1 + \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \cos\left(2\pi\frac{\delta}{\lambda} + \Delta\varphi\right) \right).$$

2.3. Interférences à deux ondes

En pratique, pour avoir deux sources émettant des fronts d'ondes de déphasage constant, on prend une source primaire produisant deux sources secondaires intrinsèquement synchrones.

Dispositifs interférenciels à division du front d'onde et division d'amplitude.



2.3. Interférences à deux ondes

Dans le cas général, on obtient

$$I(\delta) = (I_1 + I_2) \left(1 + \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \cos \left(2\pi \frac{\delta}{\lambda} + \Delta\varphi \right) \right),$$

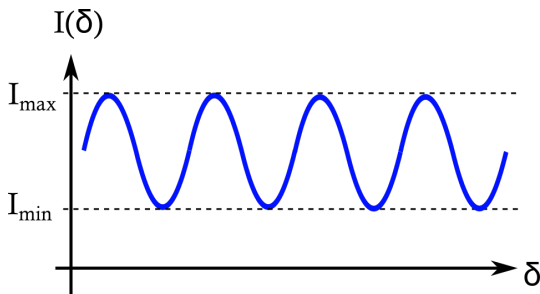
que l'on peut reformuler en introduisant le **contraste**

$$I(\delta) = (I_1 + I_2) \left(1 + C \cos \left(2\pi \frac{\delta}{\lambda} + \Delta\varphi \right) \right).$$

2.3. Interférences à deux ondes

Notion de contraste de franges d'interférences.

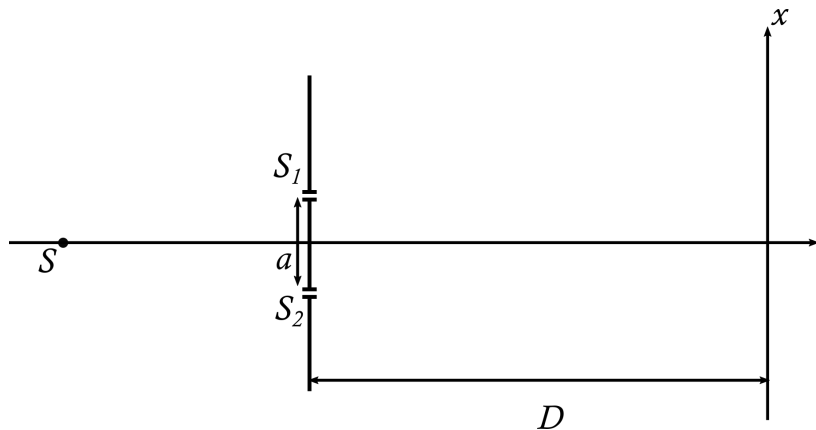
$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$



- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie

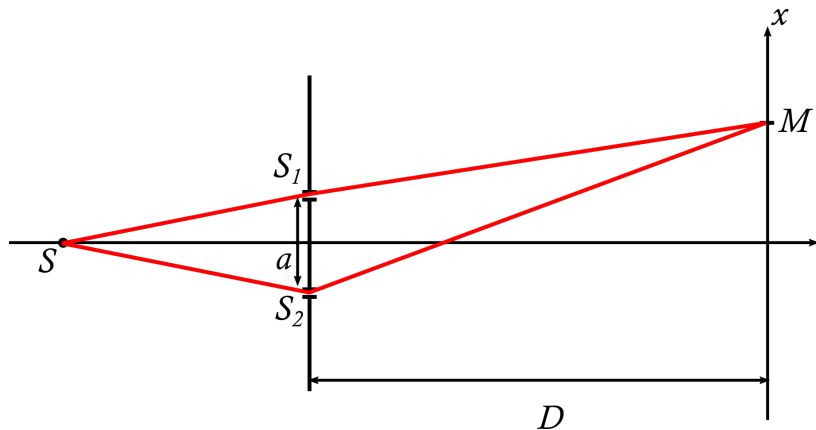
3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

Dispositif des fentes d'Young



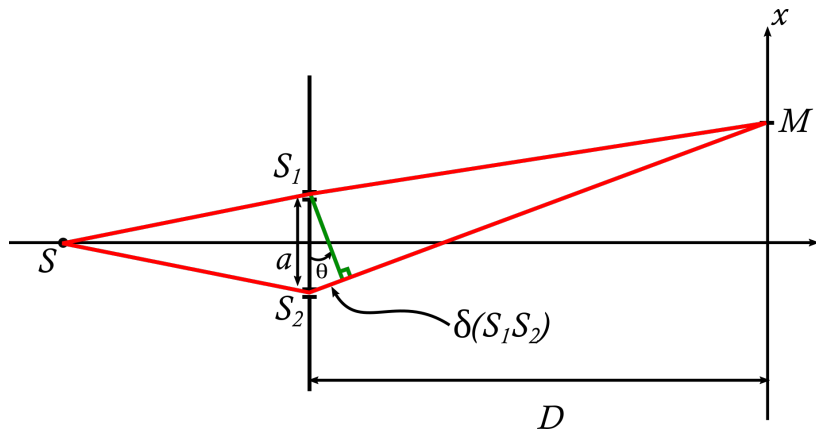
3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

Dispositif des fentes d'Young



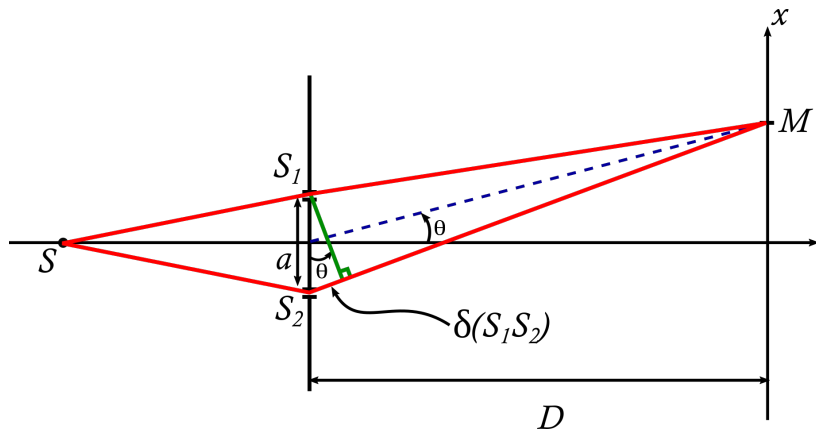
3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

Dispositif des fentes d'Young



3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

Dispositif des fentes d'Young



3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

Etant donné que $SS_1 = SS_2$, les deux sources S_1 et S_2 sont en phase, soit

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 0.$$

La différence de marche δ vaut alors

$$\delta = \frac{a}{D}x.$$

D'où

$$I(x) = I_0 \left(1 + \cos \left(2\pi \frac{a}{\lambda D} x \right) \right).$$

On introduit l'**interfrange** i comme la périodicité spatiale des franges d'interférences selon

$$I(x) = I_0 \left(1 + \cos \left(2\pi \frac{x}{i} \right) \right).$$

3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

Interprétation en terme de différence de marche

$$I(\delta) = I_0 \left(1 + \cos \left(2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right) \right),$$

avec

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

la différence de marche entre deux points sources S_1 et S_2 . Un maximum d'intensité correspond à des interférences constructives soit

$$\delta = p\lambda, \quad p \in \mathbb{Z}.$$

3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

On introduit k , l'**ordre d'interférence** en M , tel que

$$k = \frac{\delta}{\lambda}.$$

Si k est entier, les interférences seront constructives. si k est demi-entier, les interférences seront destructives.

3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

On peut définir les **surfaces d'interférences constructives**.

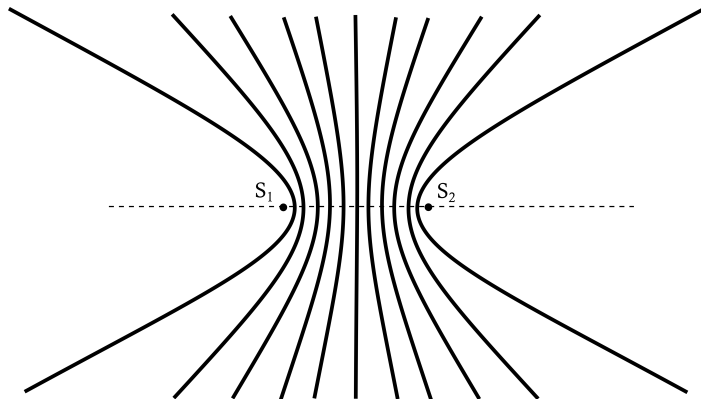
$M \in \Sigma_k$ surface d'interférences constructives d'ordre k , si et seulement si

$$S_2M - S_1M = k\lambda.$$

C'est l'équation d'un hyperboloïde de révolution de foyers S_1 et S_2 . Dans la limite des petits angles, on observe donc des **franges d'interférences** selon l'axe normal à l'axe S_1S_2 , alors que l'on observe des **anneaux d'interférences** selon l'axe S_1S_2 .

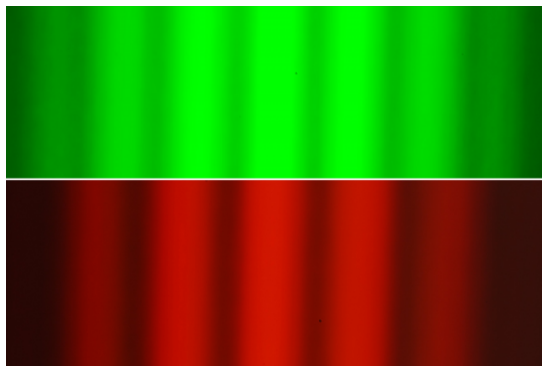
3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

Plan de coupe d'hyperboloïdes de révolution Σ_k contenant les foyers S_1 et S_2 .



3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

Expérience des fentes d'Young éclairé en lumière monochromatique.

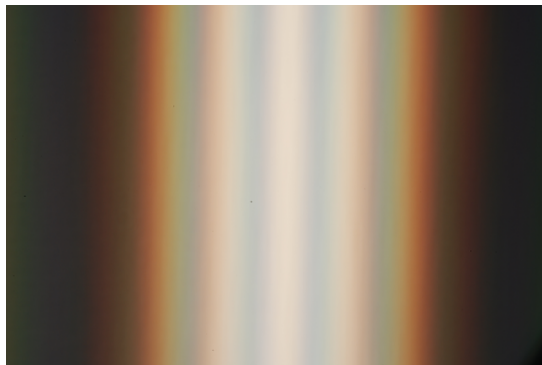


Archives ouvertes de la société française d'optique.

<https://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/>

3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

Expérience des fentes d'Young éclairé en lumière blanche.

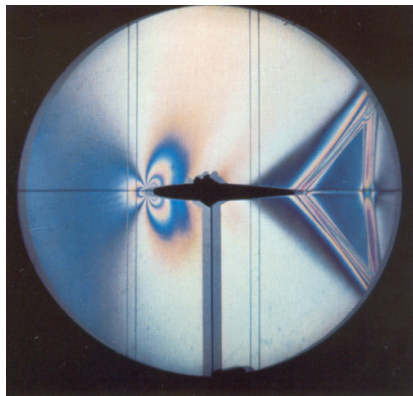


Archives ouvertes de la société française d'optique.

<https://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/>

3. Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young

Exemple d'application des interférences : visualisation d'écoulements en soufflerie.



Archives ouvertes de la société française d'optique.

<https://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/sfo-00608121/en/>

- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie
 - Réseau
 - Influence du nombre de fentes éclairées
 - Spectromètre à réseau

- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie
 - Réseau
 - Influence du nombre de fentes éclairées
 - Spectromètre à réseau

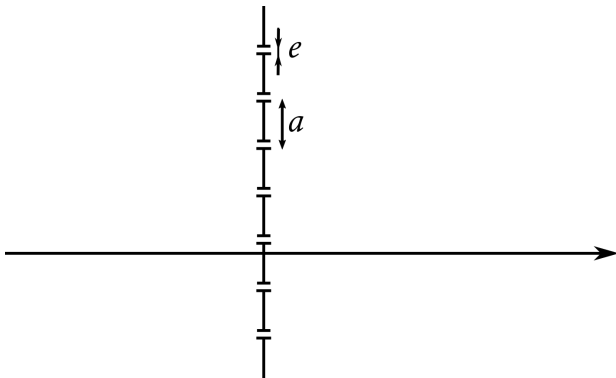


Réseau

Un réseau est un dispositif constitué de N fentes se comportant comme N sources secondaires lorsqu'elles sont éclairées par une source unique. Issues de la même source, elles sont cohérentes entre elles.

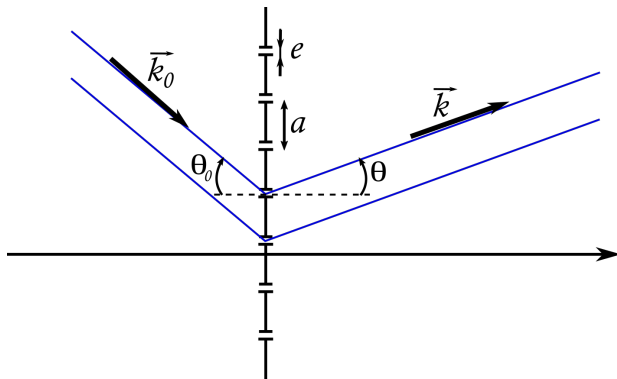
4.1. Réseau

Diffraction par un réseau plan.



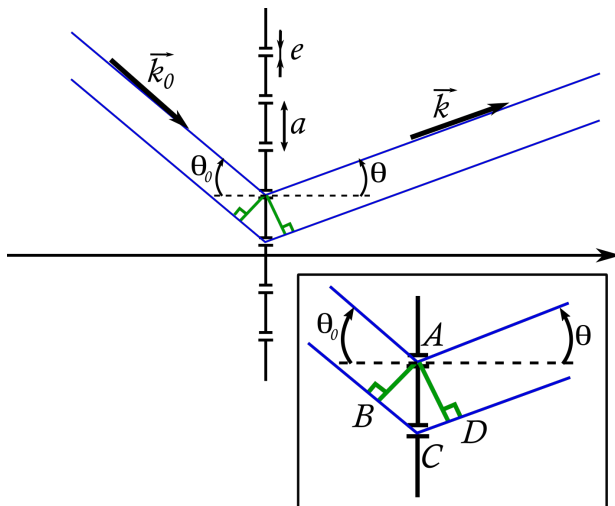
4.1. Réseau

Diffraction par un réseau plan.



4.1. Réseau

Diffraction par un réseau plan.



4.1. Réseau

Entre deux rayons consécutifs, on a une différence de marche non nulle δ_0 . On considère une onde incidente à la longueur d'onde λ .

On suppose pour simplifier que cette onde est à l'incidence normale et que l'on observe à l'infini dans une direction θ .

Soit a la distance entre deux fentes consécutives. On a

$$\delta_0 = a \sin \theta.$$

Les ondes vont interférer constructivement si $\delta_0 = p\lambda$, $p \in \mathbb{Z}$ donc

$$p\lambda = a \sin \theta_p.$$

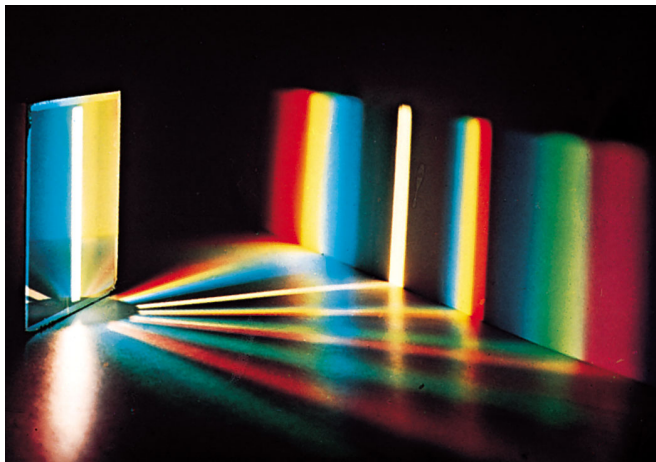
On a donc des directions privilégiées θ_p pour la propagation de la lumière

$$\sin \theta_p = p \frac{\lambda}{a},$$

où p est l'ordre d'interférence. Pour un réseau donné (a), à un ordre donné (p), l'angle dépend de λ : $\theta_p(\lambda)$. Cette dépendance permet de décomposer spatialement la lumière en fonction des longueurs d'onde qui la composent.

4.1. Réseau

Lumière blanche à travers un réseau de diffraction.



<https://www.britannica.com/technology/diffraction-grating>

- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie
 - Réseau
 - Influence du nombre de fentes éclairées
 - Spectromètre à réseau

4.2. Influence du nombre de fentes éclairées

Soit $s(\theta)$ l'onde totale dans la direction θ , s_0 l'amplitude d'une onde émergeant d'une fente et φ le déphasage entre deux fentes consécutives

$$\varphi = 2\pi \frac{\delta_0}{\lambda} = 2\pi \frac{a}{\lambda} \sin \theta.$$

L'onde totale $s(\theta)$ dans la direction θ est la superposition des N ondes

$$s(\theta) = s_0 \sum_{k=0}^{N-1} (e^{j\varphi})^k = s_0 \frac{1 - e^{jN\varphi}}{1 - e^{j\varphi}} = s_0 e^{j(\frac{N}{2} - \frac{1}{2})\varphi} \frac{\sin(\frac{N\varphi}{2})}{\sin(\frac{\varphi}{2})},$$

4.2. Influence du nombre de fentes éclairées

On note $I_0 = s_0^2$ et on obtient

$$I(\varphi) = N^2 I_0 f(\varphi), \quad \text{avec} \quad f(\varphi) = \frac{\sin^2\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{N^2 \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)},$$

avec

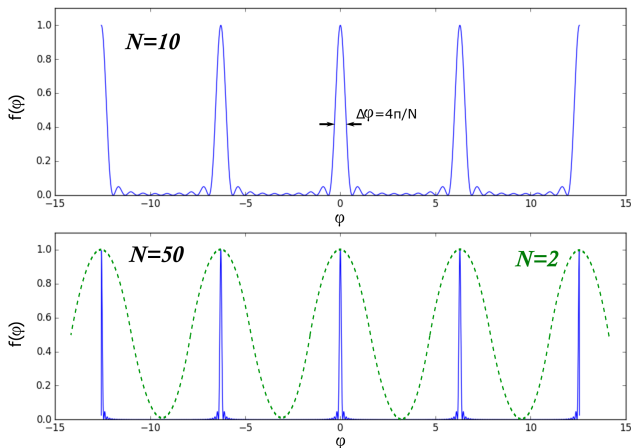
$$\varphi = 2\pi \frac{a}{\lambda} \sin \theta = 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$$

où f est la fonction réseau.

Intérêt de travailler à N ondes : la largeur d'un pic d'interférences constructives est en $\Delta\varphi = 4\pi/N$. N est le nombre de fentes éclairées. Il faut donc éclairer un réseau sur toute sa surface pour l'utiliser efficacement. Ces pics très fins permettent d'utiliser le réseau en spectroscopie.

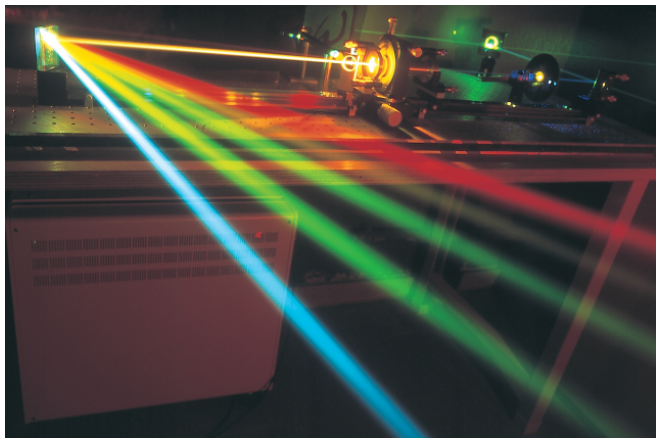
4.2. Influence du nombre de fentes éclairées

Représentation graphique de la fonction réseau $f(\varphi)$ pour $N = 10$ et $N = 50$.



4.2. Influence du nombre de fentes éclairées

Décomposition d'un faisceau lumineux par un réseau.



Archives ouvertes de la société française d'optique.

<https://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/>

- 1 Diffraction des ondes lumineuses
- 2 Cas général - position du problème
- 3 Exemple de dispositif interférométrique : les fentes d'Young
- 4 Complément : interférences à N ondes - spectroscopie
 - Réseau
 - Influence du nombre de fentes éclairées
 - Spectromètre à réseau

4.3. Spectromètre à réseau

La direction de l'onde constructive issue d'un réseau dépend de la longueur d'onde λ . À un ordre d'interférence p donné, pour un réseau connu, la mesure de $\theta_p(\lambda)$ permet de calculer λ . L'application directe de ce phénomène est la spectroscopie, et la mesure du spectre d'une source lumineuse. **Tous les spectromètres modernes sont basés sur des systèmes à réseaux.**

4.3. Spectromètre à réseau

La **résolution** ($\Delta\lambda$ minimal que l'on peut résoudre avec l'instrument) dépend de la largeur des pics mais aussi du pouvoir dispersif, *i.e.* de la grandeur

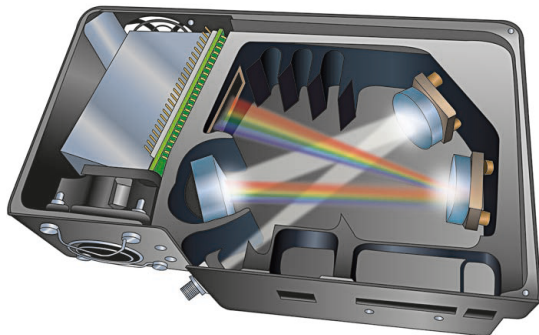
$$\left(\frac{d\theta_p}{d\lambda} \right),$$

la variation d'angle due à une variation de longueur d'onde. Un bon réseau a donc un pas **faible** et est éclairé sur une surface importante.

La **spectroscopie** est l'étude des phénomènes physiques par leur signature sur le spectre lumineux. C'est une science présente en recherche fondamentale mais également dans l'industrie : chimie analytique, physique, astronomie, etc....

4.3. Spectromètre à réseau

Spectromètre à réseau compact pour applications industrielles.



<https://www.photoniques.com/>

<https://www.photoniques.com/articles/photon/pdf/2018/05/photon201893p49.pdf>

4.3. Spectromètre à réseau



Mesure à l'aide d'un spectromètre Raman portable de la nature des verres (silicates mixtes de potassium, calcium et sodium) constitutifs des vitraux (XIII^e siècle) de la verrière de la Sainte-Chapelle (Paris).

Archives ouvertes de la société française d'optique.

<https://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/>

Ce document est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons “Attribution – Pas d’utilisation commerciale – Pas de modification 4.0 International”.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>

