

Leçon 6 : superposition de deux ondes lumineuses

E. Capitaine

TSI 2 - Lycée Charles Coëffin

8 octobre 2026

Plan

- 1 Introduction
- 2 Superposition de deux ondes lumineuses
 - Terme d'interférences
 - Ondes cohérentes
 - Formule de Fresnel
 - Différence de marche
- 3 Figure d'interférence
 - Champ et franges d'interférences
 - Contraste
 - Retour sur la notion de cohérence
- 4 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young
 - Présentation
 - Figure d'interférence
 - Franges d'interférence et ordre d'interférences
 - Interfrange

Plan

1 Introduction

2 Superposition de deux ondes lumineuses

- Terme d'interférences
- Ondes cohérentes
- Formule de Fresnel
- Différence de marche

3 Figure d'interférence

- Champ et franges d'interférences
- Contraste
- Retour sur la notion de cohérence

4 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

- Présentation
- Figure d'interférence
- Franges d'interférence et ordre d'interférences
- Interfrange

Introduction

Introduction

Comment expliquer les différences entre les figures observées lorsque l'on met une bi-fente devant une source de lumière naturelle et un laser ?

Plan

- 1 Introduction
- 2 Superposition de deux ondes lumineuses
 - Terme d'interférences
 - Ondes cohérentes
 - Formule de Fresnel
 - Différence de marche
- 3 Figure d'interférence
 - Champ et franges d'interférences
 - Contraste
 - Retour sur la notion de cohérence
- 4 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young
 - Présentation
 - Figure d'interférence
 - Franges d'interférence et ordre d'interférences
 - Interfrange

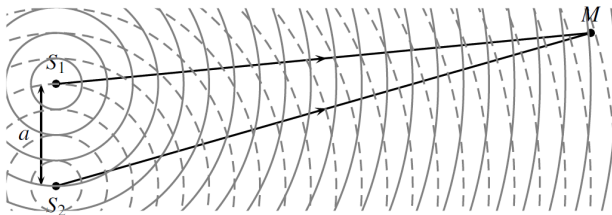
Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

On considère deux ondes lumineuses monochromatiques issues de deux sources S_1 et S_2 . On regarde leur superposition au point M . Ces ondes n'ont pas forcément la même pulsation ω (donc fréquence).

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

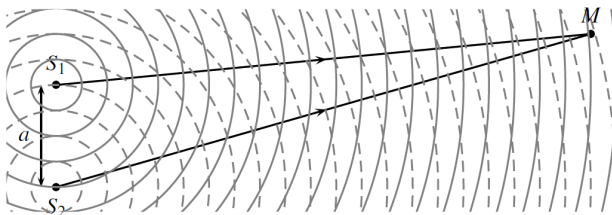


$$s_1(M, t) = s_{01} \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M)) \quad \text{et} \quad s_2(M, t) = s_{02} \cos(\omega_2 t - \varphi_2(M))$$

$$\varphi_1(M) = \quad \quad \quad \text{et} \quad \varphi_2(M) =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

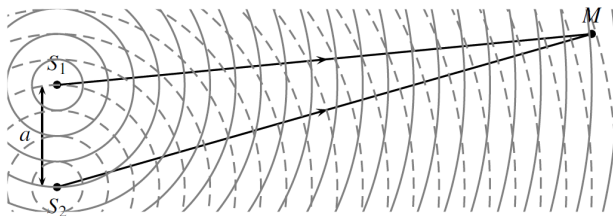


$$s_1(M, t) = s_{01} \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M)) \quad \text{et} \quad s_2(M, t) = s_{02} \cos(\omega_2 t - \varphi_2(M))$$

$$\varphi_1(M) = \varphi_1(S_1) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_1M) \quad \text{et} \quad \varphi_2(M) =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

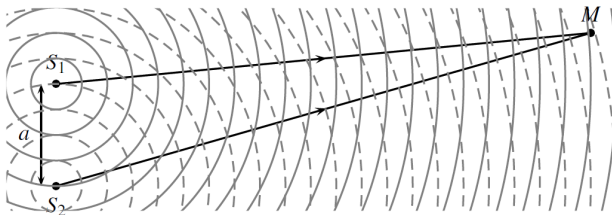


$$s_1(M, t) = s_{01} \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M)) \quad \text{et} \quad s_2(M, t) = s_{02} \cos(\omega_2 t - \varphi_2(M))$$

$$\varphi_1(M) = \varphi_1(S_1) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_1 M) \quad \text{et} \quad \varphi_2(M) = \varphi_2(S_2) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_2 M).$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences



Les phases $\varphi_1(S_1)$ et $\varphi_2(S_2)$ sont les phases lors de l'émission des ondes au niveau des sources S_1 et S_2 .

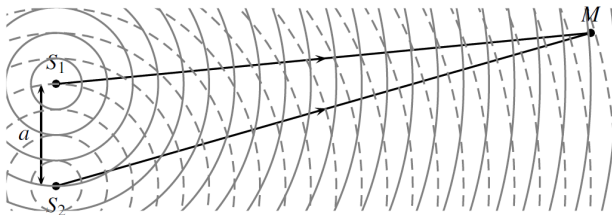
La superposition $s(M, t)$ des deux ondes en M correspond à la somme des vibrations lumineuses $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$

$$s(M, t) = s_1(M, t) + s_2(M, t)$$

$$s(M, t) =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences



Les phases $\varphi_1(S_1)$ et $\varphi_2(S_2)$ sont les phases lors de l'émission des ondes au niveau des sources S_1 et S_2 .

La superposition $s(M, t)$ des deux ondes en M correspond à la somme des vibrations lumineuses $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$

$$s(M, t) = s_1(M, t) + s_2(M, t)$$

$$s(M, t) = s_{01} \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M)) + s_{02} \cos(\omega_2 t - \varphi_2(M)).$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

On définit l'intensité lumineuse $I(M)$ en un point M comme la moyenne temporelle du carré de la vibration lumineuse $s(M, t)$ en ce point sur le temps de réponse d'un détecteur T_r

$$I(M) =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

On définit l'intensité lumineuse $I(M)$ en un point M comme la moyenne temporelle du carré de la vibration lumineuse $s(M, t)$ en ce point sur le temps de réponse d'un détecteur T_r

$$I(M) = \left\langle s^2(M, t) \right\rangle_{T_r} \equiv \left\langle s^2(M, t) \right\rangle.$$

On peut faire le lien avec l'éclairement $\mathcal{E}(M)$ en ce point

$$\mathcal{E}(M) =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

On définit l'intensité lumineuse $I(M)$ en un point M comme la moyenne temporelle du carré de la vibration lumineuse $s(M, t)$ en ce point sur le temps de réponse d'un détecteur T_r

$$I(M) = \left\langle s^2(M, t) \right\rangle_{T_r} \equiv \left\langle s^2(M, t) \right\rangle.$$

On peut faire le lien avec l'éclairement $\mathcal{E}(M)$ en ce point

$$\mathcal{E}(M) = K \left\langle s^2(M, t) \right\rangle = KI(M).$$

L'éclairement (ou puissance surfacique moyenne) et l'intensité sont proportionnelles. On verra plus tard la dimension de I , donc de s^2 , soit E^2 .

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

Calculons $I(M)$ à partir de $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$

$$I(M) = \langle s^2(M, t) \rangle = \langle (s_1(M, t) + s_2(M, t))^2 \rangle$$
$$=$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

Calculons $I(M)$ à partir de $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$

$$\begin{aligned} I(M) &= \langle s^2(M, t) \rangle = \langle (s_1(M, t) + s_2(M, t))^2 \rangle \\ &= \langle s_1^2(M, t) + s_2^2(M, t) + 2s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle \\ &= \langle s_1^2(M, t) \rangle + \langle s_2^2(M, t) \rangle + 2 \langle s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle \end{aligned}$$

On reconnaît les intensités individuelles des ondes $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$ au point M

$$I_1(M) = \quad \quad \quad \text{et} \quad I_2(M) =$$

donc

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

Calculons $I(M)$ à partir de $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$

$$\begin{aligned} I(M) &= \langle s^2(M, t) \rangle = \langle (s_1(M, t) + s_2(M, t))^2 \rangle \\ &= \langle s_1^2(M, t) + s_2^2(M, t) + 2s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle \\ &= \langle s_1^2(M, t) \rangle + \langle s_2^2(M, t) \rangle + 2 \langle s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle \end{aligned}$$

On reconnaît les intensités individuelles des ondes $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$ au point M

$$I_1(M) = \langle s_1^2(M, t) \rangle \quad \text{et} \quad I_2(M) = \langle s_2^2(M, t) \rangle$$

donc

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

Calculons $I(M)$ à partir de $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$

$$\begin{aligned} I(M) &= \langle s^2(M, t) \rangle = \langle (s_1(M, t) + s_2(M, t))^2 \rangle \\ &= \langle s_1^2(M, t) + s_2^2(M, t) + 2s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle \\ &= \langle s_1^2(M, t) \rangle + \langle s_2^2(M, t) \rangle + 2 \langle s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle \end{aligned}$$

On reconnaît les intensités individuelles des ondes $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$ au point M

$$I_1(M) = \langle s_1^2(M, t) \rangle \quad \text{et} \quad I_2(M) = \langle s_2^2(M, t) \rangle$$

donc

$$I(M) = I_1(M) + I_2(M) + 2 \langle s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle .$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

Développons le produit $s_1(M, t)s_2(M, t)$

$$I(M) = I_1(M) + I_2(M) + 2 \langle s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Terme d'interférences

Développons le produit $s_1(M, t)s_2(M, t)$

$$\begin{aligned} I(M) &= I_1(M) + I_2(M) + 2 \langle s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle \\ &= I_1(M) + I_2(M) + 2s_{01}s_{02} \langle \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M)) \cos(\omega_2 t - \varphi_2(M)) \rangle \end{aligned}$$

On constate que l'intensité totale n'est pas égale à **la somme des intensités individuelles** : $I(M) \neq I_1(M) + I_2(M)$!

Il s'ajoute un terme nommé **terme d'interférences** noté $I_{12}(M)$. C'est la valeur de ce terme qui permettra d'expliquer les phénomènes observés

$$I_{12}(M) = 2s_{01}s_{02} \langle \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M)) \cos(\omega_2 t - \varphi_2(M)) \rangle .$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

Étudions le terme d'interférences $I_{12}(M)$ qu'on a introduit.

$$I_{12}(M) = 2s_{01}s_{02} \langle \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M)) \cos(\omega_2 t - \varphi_2(M)) \rangle.$$

Utilisons la relation trigonométrique

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a - b) + \cos(a + b)], \text{ ainsi}$$

$$I_{12}(M) =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

Étudions le terme d'interférences $I_{12}(M)$ qu'on a introduit.

$$I_{12}(M) = 2s_{01}s_{02} \langle \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M)) \cos(\omega_2 t - \varphi_2(M)) \rangle.$$

Utilisons la relation trigonométrique

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a - b) + \cos(a + b)], \text{ ainsi}$$

$$I_{12}(M) = s_{01}s_{02} [\langle \cos((\omega_1 - \omega_2)t - (\varphi_1(M) - \varphi_2(M))) \rangle + \langle \cos((\omega_1 + \omega_2)t - (\varphi_1(M) + \varphi_2(M))) \rangle].$$

A priori, les fonctions cosinus dépendent du temps donc leur moyenne temporelle est

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

Étudions le terme d'interférences $I_{12}(M)$ qu'on a introduit.

$$I_{12}(M) = 2s_{01}s_{02} \langle \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M)) \cos(\omega_2 t - \varphi_2(M)) \rangle.$$

Utilisons la relation trigonométrique

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a - b) + \cos(a + b)], \text{ ainsi}$$

$$I_{12}(M) = s_{01}s_{02} [\langle \cos((\omega_1 - \omega_2)t - (\varphi_1(M) - \varphi_2(M))) \rangle + \langle \cos((\omega_1 + \omega_2)t - (\varphi_1(M) + \varphi_2(M))) \rangle].$$

A priori, les fonctions cosinus dépendent du temps donc leur moyenne temporelle est **nulle ! (car leur période T est très petite devant la durée sur laquelle on fait la moyenne)**

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

Pour que les cosinus ne s'annulent pas, il faut annuler leur dépendance temporelle, soit

$$\omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \text{ou} \quad \omega_1 + \omega_2 = 0$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

Pour que les cosinus ne s'annulent pas, il faut annuler leur dépendance temporelle, soit

$$\omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \text{ou} \quad \omega_1 + \omega_2 = 0$$

$$\omega_1 = \omega_2 \quad \text{ou} \quad \omega_1 = -\omega_2.$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

Pour que les cosinus ne s'annulent pas, il faut annuler leur dépendance temporelle, soit

$$\omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \text{ou} \quad \omega_1 + \omega_2 = 0$$
$$\omega_1 = \omega_2 \quad \text{ou} \quad \omega_1 = -\omega_2.$$

Mais les pulsations ou les fréquences ne peuvent pas être négatives, donc il ne reste que $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, ainsi

$$I_{12}(M) =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

Pour que les cosinus ne s'annulent pas, il faut annuler leur dépendance temporelle, soit

$$\begin{aligned}\omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \text{ou} \quad \omega_1 + \omega_2 = 0 \\ \omega_1 = \omega_2 \quad \text{ou} \quad \omega_1 = -\omega_2.\end{aligned}$$

Mais les pulsations ou les fréquences ne peuvent pas être négatives, donc il ne reste que $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, ainsi

$$\begin{aligned}I_{12}(M) = s_{01}s_{02} [\langle \cos(-(\varphi_1(M) - \varphi_2(M))) \rangle \\ + \langle \cos(2\omega t - (\varphi_1(M) + \varphi_2(M))) \rangle].\end{aligned}$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

Pour que les cosinus ne s'annulent pas, il faut annuler leur dépendance temporelle, soit

$$\omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \text{ou} \quad \omega_1 + \omega_2 = 0$$
$$\omega_1 = \omega_2 \quad \text{ou} \quad \omega_1 = -\omega_2.$$

Mais les pulsations ou les fréquences ne peuvent pas être négatives, donc il ne reste que $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, ainsi

$$I_{12}(M) = s_{01}s_{02} [\langle \cos(-(\varphi_1(M) - \varphi_2(M))) \rangle + \langle \cos(2\omega t - (\varphi_1(M) + \varphi_2(M))) \rangle].$$

Le deuxième cosinus s'annule car il dépend du temps, il vient que

$$I_{12}(M) = s_{01}s_{02} \langle \cos(\varphi_2(M) - \varphi_1(M)) \rangle.$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

On constate que le cosinus restant dans l'expression de $I_{12}(M)$ peut encore varier au cours du temps, si **la différence de phases**

$\Delta\varphi = \varphi_2(M) - \varphi_1(M)$ **varie au cours du temps de réponse du détecteur** : $\Delta\varphi(t)$.

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

On constate que le cosinus restant dans l'expression de $I_{12}(M)$ peut encore varier au cours du temps, si **la différence de phases**

$\Delta\varphi = \varphi_2(M) - \varphi_1(M)$ **varie au cours du temps de réponse du détecteur** : $\Delta\varphi(t)$.

Pourquoi les phases varient-elles ? Les atomes de la source émettent un rayonnement. Dès que ces atomes subissent **aléatoirement** un choc, la phase de l'onde change (comme si on donnait un coup sur un lecteur CD et qu'on faisait sauter la musique).

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

On constate que le cosinus restant dans l'expression de $I_{12}(M)$ peut encore varier au cours du temps, si **la différence de phases**

$\Delta\varphi = \varphi_2(M) - \varphi_1(M)$ **varie au cours du temps de réponse du détecteur** : $\Delta\varphi(t)$.

Pourquoi les phases varient-elles ? Les atomes de la source émettent un rayonnement. Dès que ces atomes subissent **aléatoirement** un choc, la phase de l'onde change (comme si on donnait un coup sur un lecteur CD et qu'on faisait sauter la musique).

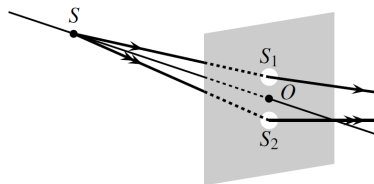
Deux **sources distinctes**, même si elles ont la même pulsation, **ne peuvent pas interférer entre elles** car leur déphasage varie aléatoirement

$$I_{12}(M) = s_{01}s_{02} \langle \cos(\Delta\varphi(t)) \rangle = 0.$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

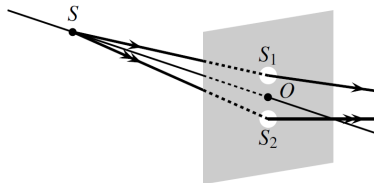
En pratique, on utilise une astuce pour obtenir deux sources à partir d'une seule, on dispose deux trous devant une source ponctuelle S : on crée alors deux sources S_1 et S_2 dont le déphasage $\Delta\varphi$ **restera constant** durant un certain temps qu'on appelle **temps de cohérence** τ_c de la source. Au-delà, une nouvelle collision va faire varier $\Delta\varphi$.



Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

En pratique, on utilise une astuce pour obtenir deux sources à partir d'une seule, on dispose deux trous devant une source ponctuelle S : on crée alors deux sources S_1 et S_2 dont le déphasage $\Delta\varphi$ **restera constant** durant un certain temps qu'on appelle **temps de cohérence** τ_c de la source. Au-delà, une nouvelle collision va faire varier $\Delta\varphi$.

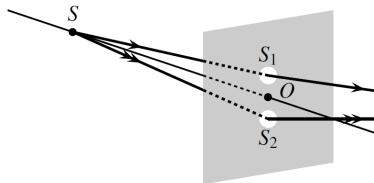


En résumé : il y a interférences si **le terme d'interférence** $I_{12}(M)$ **est non nul** donc si

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

En pratique, on utilise une astuce pour obtenir deux sources à partir d'une seule, on dispose deux trous devant une source ponctuelle S : on crée alors deux sources S_1 et S_2 dont le déphasage $\Delta\varphi$ **restera constant** durant un certain temps qu'on appelle **temps de cohérence** τ_c de la source. Au-delà, une nouvelle collision va faire varier $\Delta\varphi$.



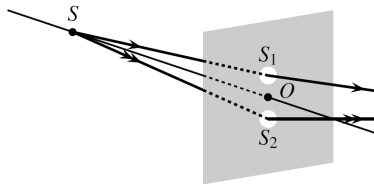
En résumé : il y a interférences si **le terme d'interférence** $I_{12}(M)$ **est non nul** donc si

- les ondes émises par les 2 sources ont la même pulsation $\omega = \omega_1 = \omega_2$

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

En pratique, on utilise une astuce pour obtenir deux sources à partir d'une seule, on dispose deux trous devant une source ponctuelle S : on crée alors deux sources S_1 et S_2 dont le déphasage $\Delta\varphi$ **restera constant** durant un certain temps qu'on appelle **temps de cohérence** τ_c de la source. Au-delà, une nouvelle collision va faire varier $\Delta\varphi$.



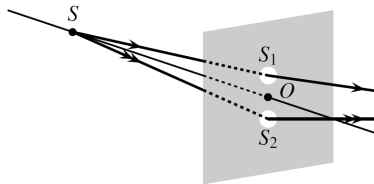
En résumé : il y a interférences si **le terme d'interférence** $I_{12}(M)$ **est non nul** donc si

- les ondes émises par les 2 sources ont la même pulsation $\omega = \omega_1 = \omega_2$
- les 2 sources sont construites à partir d'une source dont le temps de cohérence τ_c est important (on reviendra sur ce critère).

Superposition de deux ondes lumineuses

Ondes cohérentes

En pratique, on utilise une astuce pour obtenir deux sources à partir d'une seule, on dispose deux trous devant une source ponctuelle S : on crée alors deux sources S_1 et S_2 dont le déphasage $\Delta\varphi$ **restera constant** durant un certain temps qu'on appelle **temps de cohérence** τ_c de la source. Au-delà, une nouvelle collision va faire varier $\Delta\varphi$.



En résumé : il y a interférences si **le terme d'interférence** $I_{12}(M)$ **est non nul** donc si

- les ondes émises par les 2 sources ont la même pulsation $\omega = \omega_1 = \omega_2$
- les 2 sources sont construites à partir d'une source dont le temps de cohérence τ_c est important (on reviendra sur ce critère).

On dit alors que les deux ondes issues de S_1 et S_2 sont cohérentes.

Superposition de deux ondes lumineuses

Formule de Fresnel

On suppose maintenant que les conditions d'interférences sont respectées et que les deux ondes sont cohérentes. L'intensité en M est donc

$$I(M) =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Formule de Fresnel

On suppose maintenant que les conditions d'interférences sont respectées et que les deux ondes sont cohérentes. L'intensité en M est donc

$$I(M) = I_1 + I_2 + I_{12}(M) = I_1 + I_2 + s_{01}s_{02} \cos(\Delta\varphi).$$

Or on a vu que

$$I_1 = \langle s_1^2(M, t) \rangle = \quad \text{et} \quad I_2 = \langle s_2^2(M, t) \rangle =$$

donc

$$s_{01} = \quad \text{et} \quad s_{02} =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Formule de Fresnel

On suppose maintenant que les conditions d'interférences sont respectées et que les deux ondes sont cohérentes. L'intensité en M est donc

$$I(M) = I_1 + I_2 + I_{12}(M) = I_1 + I_2 + s_{01}s_{02} \cos(\Delta\varphi).$$

Or on a vu que

$$I_1 = \langle s_1^2(M, t) \rangle = \frac{1}{2} s_{01}^2 \quad \text{et} \quad I_2 = \langle s_2^2(M, t) \rangle =$$

donc

$$s_{01} = \quad \text{et} \quad s_{02} =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Formule de Fresnel

On suppose maintenant que les conditions d'interférences sont respectées et que les deux ondes sont cohérentes. L'intensité en M est donc

$$I(M) = I_1 + I_2 + I_{12}(M) = I_1 + I_2 + s_{01}s_{02} \cos(\Delta\varphi).$$

Or on a vu que

$$I_1 = \langle s_1^2(M, t) \rangle = \frac{1}{2} s_{01}^2 \quad \text{et} \quad I_2 = \langle s_2^2(M, t) \rangle = \frac{1}{2} s_{02}^2$$

donc

$$s_{01} = \quad \text{et} \quad s_{02} =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Formule de Fresnel

On suppose maintenant que les conditions d'interférences sont respectées et que les deux ondes sont cohérentes. L'intensité en M est donc

$$I(M) = I_1 + I_2 + I_{12}(M) = I_1 + I_2 + s_{01}s_{02} \cos(\Delta\varphi).$$

Or on a vu que

$$I_1 = \langle s_1^2(M, t) \rangle = \frac{1}{2} s_{01}^2 \quad \text{et} \quad I_2 = \langle s_2^2(M, t) \rangle = \frac{1}{2} s_{02}^2$$

donc

$$s_{01} = \sqrt{2I_1} \quad \text{et} \quad s_{02} =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Formule de Fresnel

On suppose maintenant que les conditions d'interférences sont respectées et que les deux ondes sont cohérentes. L'intensité en M est donc

$$I(M) = I_1 + I_2 + I_{12}(M) = I_1 + I_2 + s_{01}s_{02} \cos(\Delta\varphi).$$

Or on a vu que

$$I_1 = \langle s_1^2(M, t) \rangle = \frac{1}{2} s_{01}^2 \quad \text{et} \quad I_2 = \langle s_2^2(M, t) \rangle = \frac{1}{2} s_{02}^2$$

donc

$$s_{01} = \sqrt{2I_1} \quad \text{et} \quad s_{02} = \sqrt{2I_2}$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Formule de Fresnel

L'intensité au point M est donc

$$I(M) = I_1 + I_2 + I_{12}(M) = I_1 + I_2 + s_{01}s_{02} \cos(\Delta\varphi)$$

$$I(M) =$$

$$I(M) =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Formule de Fresnel

L'intensité au point M est donc

$$I(M) = I_1 + I_2 + I_{12}(M) = I_1 + I_2 + s_{01}s_{02} \cos(\Delta\varphi)$$

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

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

On retiendra la dernière formule pour l'intensité de la superposition de deux ondes cohérentes qu'on nomme **formule de Fresnel**.

Superposition de deux ondes lumineuses

Différence de marche

On suppose ici que deux sources sont cohérentes :

- les pulsations ω_1 et ω_2 sont .
- Le déphasage $\Delta\varphi = \varphi_2(M) - \varphi_1(M)$ dépend .

Superposition de deux ondes lumineuses

Différence de marche

On suppose ici que deux sources sont cohérentes :

- les pulsations ω_1 et ω_2 sont égales.
- Le déphasage $\Delta\varphi = \varphi_2(M) - \varphi_1(M)$ dépend

Superposition de deux ondes lumineuses

Différence de marche

On suppose ici que deux sources sont cohérentes :

- les pulsations ω_1 et ω_2 sont égales.
- Le déphasage $\Delta\varphi = \varphi_2(M) - \varphi_1(M)$ dépend seulement du point de l'espace étudié M et pas du temps t .

Superposition de deux ondes lumineuses

Différence de marche

On suppose ici que deux sources sont cohérentes :

- les pulsations ω_1 et ω_2 sont égales.
- Le déphasage $\Delta\varphi = \varphi_2(M) - \varphi_1(M)$ dépend seulement du point de l'espace étudié M et pas du temps t .

On considère également que les phases des ondes au niveau des sources sont les mêmes : $\varphi_1(S_1) = \varphi_2(S_2)$: on dit que les sources sont **synchrones**.

Il vient que

$$\Delta\varphi = \varphi_2(M) - \varphi_1(M) =$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Différence de marche

On suppose ici que deux sources sont cohérentes :

- les pulsations ω_1 et ω_2 sont égales.
- Le déphasage $\Delta\varphi = \varphi_2(M) - \varphi_1(M)$ dépend seulement du point de l'espace étudié M et pas du temps t .

On considère également que les phases des ondes au niveau des sources sont les mêmes : $\varphi_1(S_1) = \varphi_2(S_2)$: on dit que les sources sont **synchrones**.

Il vient que

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \varphi_2(M) - \varphi_1(M) = \varphi_2(S_2) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_2M) - \varphi_1(S_1) - \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_1M) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda_0} [(S_2M) - (S_1M)].\end{aligned}$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Différence de marche

On nomme **différence de marche au point** M la différence de chemins optiques entre les deux ondes depuis leur source jusqu'au point M . On note cette grandeur $\delta(M)$ telle que

$$\delta(M) = (S_2M) - (S_1M) = c_0 (t_{S_2M} - t_{S_1M}).$$

Superposition de deux ondes lumineuses

Différence de marche

On nomme **différence de marche au point** M la différence de chemins optiques entre les deux ondes depuis leur source jusqu'au point M . On note cette grandeur $\delta(M)$ telle que

$$\delta(M) = (S_2M) - (S_1M) = c_0 (t_{S_2M} - t_{S_1M}).$$

On peut alors récrire la différence de phase en fonction de la différence de marche

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta(M).$$

On voit que si

Superposition de deux ondes lumineuses

Différence de marche

On nomme **différence de marche au point** M la différence de chemins optiques entre les deux ondes depuis leur source jusqu'au point M . On note cette grandeur $\delta(M)$ telle que

$$\delta(M) = (S_2M) - (S_1M) = c_0 (t_{S_2M} - t_{S_1M}).$$

On peut alors récrire la différence de phase en fonction de la différence de marche

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta(M).$$

On voit que si

- $\delta(M) > 0$, $\Delta\varphi(M) > 0$, donc l'onde 2 arrive en retard en M par rapport à l'onde 1

Superposition de deux ondes lumineuses

Différence de marche

On nomme **différence de marche au point** M la différence de chemins optiques entre les deux ondes depuis leur source jusqu'au point M . On note cette grandeur $\delta(M)$ telle que

$$\delta(M) = (S_2M) - (S_1M) = c_0 (t_{S_2M} - t_{S_1M}).$$

On peut alors récrire la différence de phase en fonction de la différence de marche

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta(M).$$

On voit que si

- $\delta(M) > 0$, $\Delta\varphi(M) > 0$, donc l'onde 2 arrive en retard en M par rapport à l'onde 1
- $\delta(M) < 0$, $\Delta\varphi(M) < 0$, donc l'onde 2 arrive en avance en M par rapport à l'onde 1.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Superposition de deux ondes lumineuses
 - Terme d'interférences
 - Ondes cohérentes
 - Formule de Fresnel
 - Différence de marche
- 3 Figure d'interférence
 - Champ et franges d'interférences
 - Contraste
 - Retour sur la notion de cohérence
- 4 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young
 - Présentation
 - Figure d'interférence
 - Franges d'interférence et ordre d'interférences
 - Interfrange

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

On nomme **champ d'interférences** la zone de l'espace éclairée par les deux ondes cohérentes. C'est dans cette zone limitée qu'on voit apparaître le phénomène d'interférences.

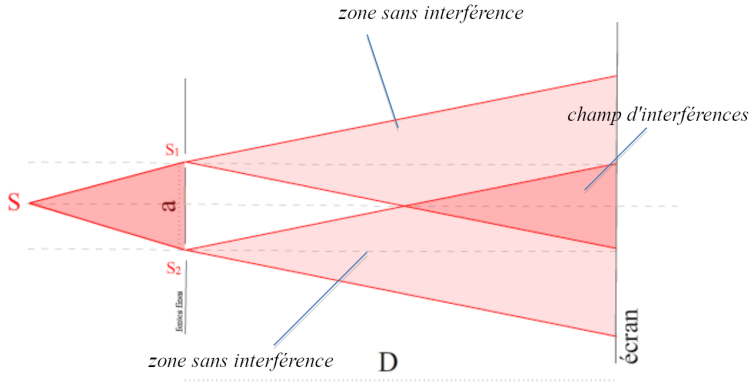


Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

L'éclairement $\mathcal{E}$ ou l'intensité I dus à la superposition de deux ondes varie en fonction de la différence de phase $\Delta\varphi(M)$, qui dépend elle-même du point M où est mesuré $\mathcal{E}$ ou I .

En fonction de la valeur de $\Delta\varphi(M)$ on observe des surfaces brillantes ou sombres appelées **franges d'interférences brillantes** et **franges d'interférences sombres**. Sur un écran on peut voir une succession de franges brillantes et sombres avec des formes dépendant du montage optique utilisé.

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges brillantes** ?

D'après la formule de Fresnel

$$I(M) =$$

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges brillantes** ?

D'après la formule de Fresnel

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

Les franges brillantes apparaissent lorsque l'intensité $I(M)$ est maximale donc lorsque

$$\begin{aligned} \cos(\Delta\varphi(M)) &= \\ I(M) &= \\ \Delta\varphi(M) &= \\ \delta(M) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Delta\varphi(M) &= \end{aligned} .$$

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges brillantes** ?

D'après la formule de Fresnel

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

Les franges brillantes apparaissent lorsque l'intensité $I(M)$ est maximale donc lorsque

$$\cos(\Delta\varphi(M)) = +1$$

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) =$$

$$\delta(M) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Delta\varphi(M) = .$$

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges brillantes** ?

D'après la formule de Fresnel

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

Les franges brillantes apparaissent lorsque l'intensité $I(M)$ est maximale donc lorsque

$$\cos(\Delta\varphi(M)) = +1$$

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) = 2\pi \times m \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}$$

$$\delta(M) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Delta\varphi(M) = \quad .$$

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges brillantes** ?

D'après la formule de Fresnel

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

Les franges brillantes apparaissent lorsque l'intensité $I(M)$ est maximale donc lorsque

$$\cos(\Delta\varphi(M)) = +1$$

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) = 2\pi \times m \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}$$

$$\delta(M) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Delta\varphi(M) = \lambda_0 \times m \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}.$$

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges sombres** ?

D'après la formule de Fresnel

$$I(M) =$$

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges sombres** ?

D'après la formule de Fresnel

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

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges sombres** ?

D'après la formule de Fresnel

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

Les franges sombres apparaissent lorsque l'intensité $I(M)$ est minimale
donc lorsque

$$\cos(\Delta\varphi(M)) =$$

$$I(M) = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) =$$

$$\delta(M) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Delta\varphi(M) =$$

.

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges sombres** ?

D'après la formule de Fresnel

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

Les franges sombres apparaissent lorsque l'intensité $I(M)$ est minimale donc lorsque

$$\cos(\Delta\varphi(M)) = -1$$

$$I(M) = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) =$$

$$\delta(M) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Delta\varphi(M) =$$

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges sombres** ?

D'après la formule de Fresnel

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

Les franges sombres apparaissent lorsque l'intensité $I(M)$ est minimale donc lorsque

$$\cos(\Delta\varphi(M)) = -1$$

$$I(M) = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) = \pi \times (2m + 1) \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}$$

$$\delta(M) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Delta\varphi(M) = \quad .$$

Figure d'interférence

Champ et franges d'interférences

Quand observe-t-on des **franges sombres** ?

D'après la formule de Fresnel

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

Les franges sombres apparaissent lorsque l'intensité $I(M)$ est minimale donc lorsque

$$\cos(\Delta\varphi(M)) = -1$$

$$I(M) = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) = \pi \times (2m + 1) \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}$$

$$\delta(M) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Delta\varphi(M) = \frac{\lambda_0}{2} \times (2m + 1) \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}.$$

Figure d'interférence

Contraste

On définit le **contraste** d'une figure d'interférence comme la grandeur C comprise entre 0 et 1 telle que

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

avec I_{max} et I_{min} les intensités des franges brillantes et sombres respectivement. Il vient que

$$C =$$

Figure d'interférence

Contraste

On définit le **contraste** d'une figure d'interférence comme la grandeur C comprise entre 0 et 1 telle que

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

avec I_{max} et I_{min} les intensités des franges brillantes et sombres respectivement. Il vient que

$$C = \frac{4\sqrt{I_1 I_2}}{2(I_1 + I_2)} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}.$$

Figure d'interférence

Contraste

On définit le **contraste** d'une figure d'interférence comme la grandeur C comprise entre 0 et 1 telle que

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

avec I_{max} et I_{min} les intensités des franges brillantes et sombres respectivement. Il vient que

$$C = \frac{4\sqrt{I_1 I_2}}{2(I_1 + I_2)} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}.$$

Le contraste C est d'autant plus grand que I_1 et I_2 **sont proches**. Si $I_1 = I_2 = I_0$, le contraste est maximal

$$I(M) =$$

Figure d'interférence

Contraste

On définit le **contraste** d'une figure d'interférence comme la grandeur C comprise entre 0 et 1 telle que

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

avec I_{max} et I_{min} les intensités des franges brillantes et sombres respectivement. Il vient que

$$C = \frac{4\sqrt{I_1 I_2}}{2(I_1 + I_2)} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}.$$

Le contraste C est d'autant plus grand que I_1 et I_2 **sont proches**. Si $I_1 = I_2 = I_0$, le contraste est maximal

$$I(M) = \frac{2\sqrt{I_0^2}}{2I_0} = 1.$$

Figure d'interférence

Contraste

Déterminer le contraste dans ces trois cas.



$$I_1/I_2 = 0,9$$



$$= 0,5$$

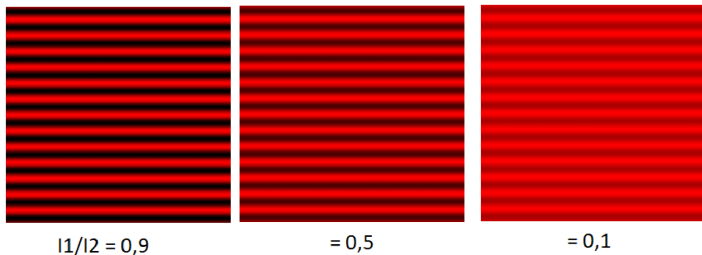


$$= 0,1$$

Figure d'interférence

Contraste

Déterminer le contraste dans ces trois cas.

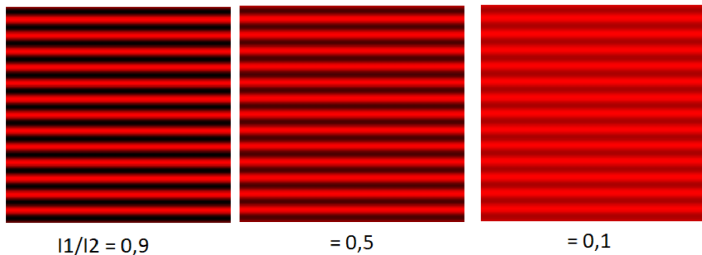


$$C_a = \frac{2\sqrt{I_1 \times 0,9I_1}}{I_1 + 0,9I_1} = \frac{2\sqrt{0,9I_1}}{1,9I_1} = 0,999.$$

Figure d'interférence

Contraste

Déterminer le contraste dans ces trois cas.

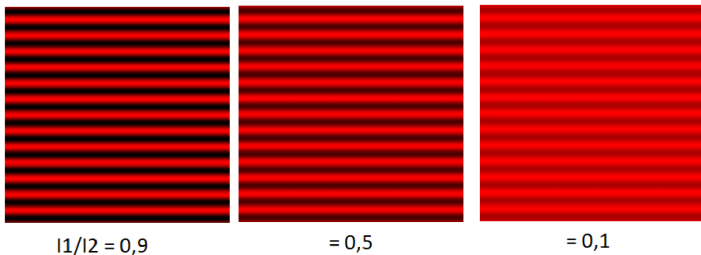


$$C_b = \frac{2\sqrt{I_1 \times 0,5I_1}}{I_1 + 0,5I_1} = \frac{2\sqrt{0,5I_1}}{1,5I_1} = 0,943.$$

Figure d'interférence

Contraste

Déterminer le contraste dans ces trois cas.



$$C_c = \frac{2\sqrt{I_1 \times 0,1I_1}}{I_1 + 0,1I_1} = \frac{2\sqrt{0,1}I_1}{1,1I_1} = 0,575.$$

Figure d'interférence

Retour sur la notion de cohérence

Considérons deux sources S_1 et S_2 mutuellement cohérentes produites à partir d'une même source S_0 . Cette source émet des **trains d'onde**.

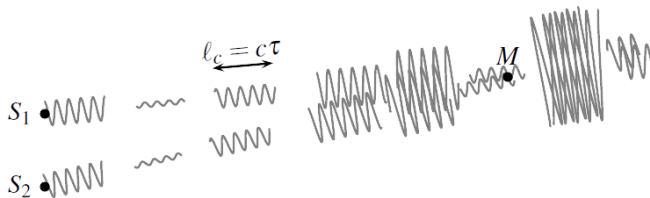
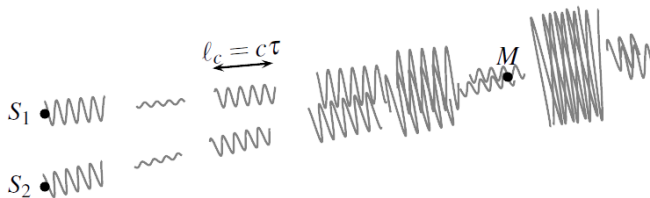


Figure d'interférence

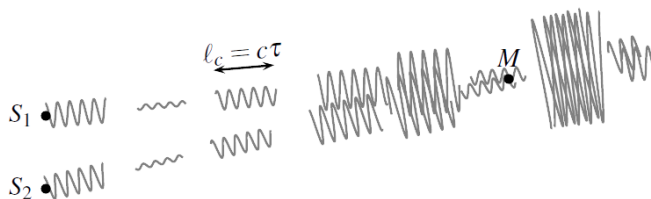
Retour sur la notion de cohérence



Un **train d'onde** correspond à la partie d'une onde dont la phase à l'origine $\varphi(S_0)$ est constante. Un train d'onde a une durée moyenne τ_c qui correspond à la durée moyenne durant laquelle la source S_0 maintient une phase à l'origine $\varphi(S_0)$ constante. Quand cette phase change (car l'atome émetteur subit un choc) l'atome émet un train d'onde différent.

Figure d'interférence

Retour sur la notion de cohérence



Dans le cas des trous d'Young ou des fentes d'Young ces trains d'onde sont "clonés" au niveau des deux sources S_1 et S_2 .

Figure d'interférence

[Retour sur la notion de cohérence](#)

Ainsi, dans le champ d'interférence, on a deux trains d'ondes avec des chemins optiques différents mais des phases à l'origine identiques, soit

Figure d'interférence

[Retour sur la notion de cohérence](#)

Ainsi, dans le champ d'interférence, on a deux trains d'ondes avec des chemins optiques différents mais des phases à l'origine identiques, soit

$$\varphi_1(M) = \varphi_1(S_1) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_1M) = \varphi(S_0) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_0S_1) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_1M)$$

$$\varphi_2(M) = \varphi_2(S_2) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_2M) = \varphi(S_0) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_0S_2) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_2M)$$

$$\Delta\varphi(M) = \varphi_2(M) - \varphi_1(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0} [(S_0S_2M) - (S_0S_1M)].$$

Le déphasage $\Delta\varphi$ **ne dépend pas du temps** donc le terme d'interférence

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\langle \Delta\varphi(M) \rangle)$$

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi(M))$$

est non nul : il peut y avoir interférences !

Figure d'interférence

[Retour sur la notion de cohérence](#)

Mais que se passe-t-il maintenant si la différence de marche en un point M $\delta(M) = (S_0S_2M) - (S_0S_1M)$ est supérieure à la **longueur de cohérence** $\ell_c = c_0\tau_c$, soit la longueur moyenne d'un train d'onde ?

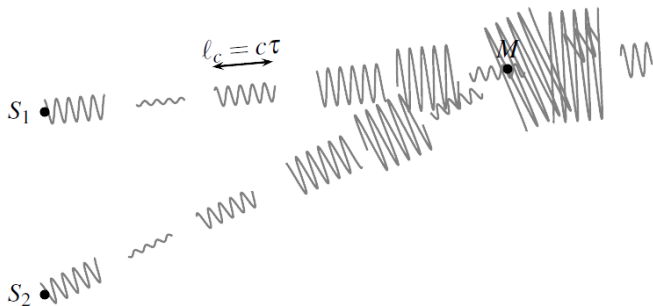


Figure d'interférence

[Retour sur la notion de cohérence](#)

Mais que se passe-t-il maintenant si la différence de marche en un point M $\delta(M) = (S_0S_2M) - (S_0S_1M)$ est supérieure à la **longueur de cohérence** $\ell_c = c_0\tau_c$, soit la longueur moyenne d'un train d'onde ?

Alors les trains d'onde qui interfèrent en M ne sont pas les mêmes !

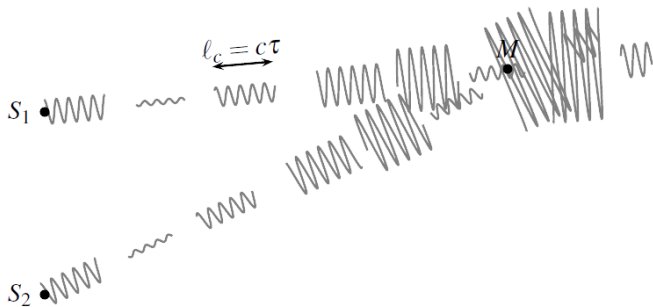


Figure d'interférence

[Retour sur la notion de cohérence](#)

Ainsi, dans le champ d'interférence, on a deux trains d'ondes avec des chemins optiques différents et des phases à l'origine différentes, soit

Figure d'interférence

[Retour sur la notion de cohérence](#)

Ainsi, dans le champ d'interférence, on a deux trains d'ondes avec des chemins optiques différents et des phases à l'origine différentes, soit

$$\varphi_1(M) = \varphi_1(S_1) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_1M) = \varphi(S_0)_{\text{to } a} + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_0S_1) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_1M)$$

$$\varphi_2(M) = \varphi_2(S_2) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_2M) = \varphi(S_0)_{\text{to } b} + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_0S_2) + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_2M)$$

$$\Delta\varphi(M) = \varphi(S_0)_{\text{to } b} - \varphi(S_0)_{\text{to } a} + \frac{2\pi}{\lambda_0} [(S_0S_2M) - (S_0S_1M)] .$$

Le déphasage $\Delta\varphi$ **dépend du temps** car la différence de phases à l'origine $\varphi(S_0)_{\text{to } b} - \varphi(S_0)_{\text{to } a}$ va varier au cours du temps pour les paires de trains d'onde différentes (b et a , puis c et b , etc.)

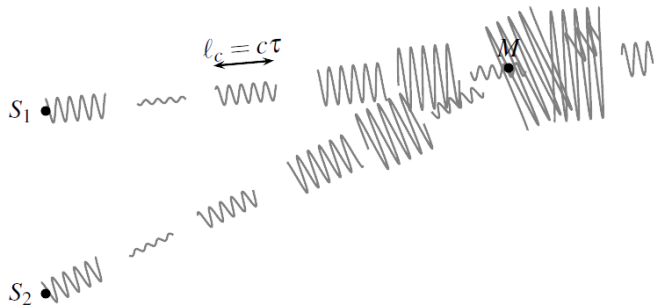
$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\langle \Delta\varphi(M) \rangle)$$

$$I_{12} = 0$$

Le terme d'interférence est nul : il ne peut pas y avoir interférences !

Figure d'interférence

Retour sur la notion de cohérence



On retiendra que deux ondes cohérentes peuvent interférer en un point M si leur différence de marche $\delta(M)$ est inférieure à la longueur de cohérence $\ell_c = c_0\tau_c$.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Superposition de deux ondes lumineuses
 - Terme d'interférences
 - Ondes cohérentes
 - Formule de Fresnel
 - Différence de marche
- 3 Figure d'interférence
 - Champ et franges d'interférences
 - Contraste
 - Retour sur la notion de cohérence
- 4 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young
 - Présentation
 - Figure d'interférence
 - Franges d'interférence et ordre d'interférences
 - Interfrange

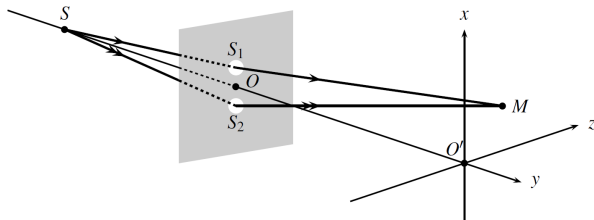
Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Présentation

Une source ponctuelle S éclaire à une grande distance un écran opaque percé de deux trous. Ces trous forment deux nouvelles sources ponctuelle S_1 et S_2 .

On dispose également à grande distance de S_1 et S_2 un autre écran parallèle à S_1 et S_2 .

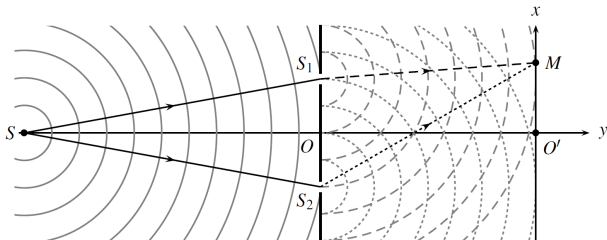
Le point O est le centre du segment S_1S_2 et O' est son projeté orthogonal sur l'écran d'observation (S n'est pas forcément alignée avec O et O').



Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Présentation

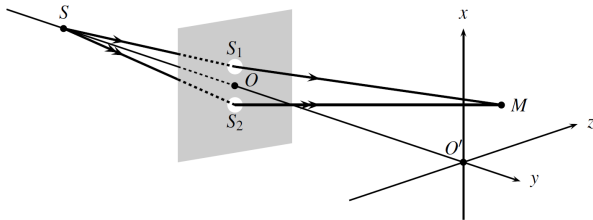
Ce dispositif fait partie de la famille des **dispositifs interférentiels à division du front d'onde**. Il y a division du front d'onde lorsque les deux rayons lumineux qui viennent interférer en M sont issus de deux rayons distincts qui émergent de la source S .



Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Comme les sources S_1 et S_2 sont issues de la même source on peut dire que les ondes sont cohérentes. De plus, on considérera que les sources sont synchrones, c'est-à-dire que le retard de phases des ondes 1 et 2 en S_1 et S_2 sont les mêmes : $\varphi_1(S_1) = \varphi_2(S_2)$.

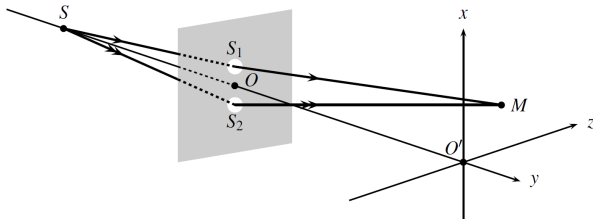


Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Calculons l'intensité $I(M)$ en un point M de l'écran d'observation. D'après la formule de Fresnel

$$I(M) =$$



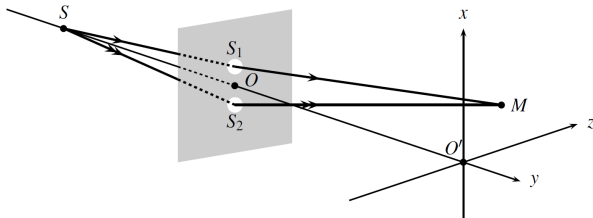
Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Calculons l'intensité $I(M)$ en un point M de l'écran d'observation. D'après la formule de Fresnel

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

On doit donc calculer le déphasage $\Delta\varphi(M)$ entre les deux ondes en M .

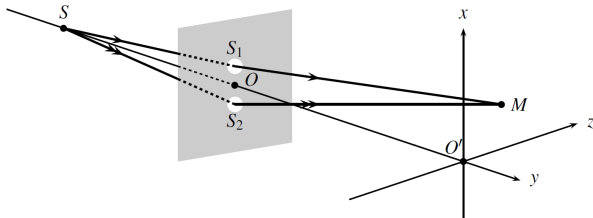


Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Calculons la différence de phase $\Delta\varphi(M)$ en un point M de l'écran d'observation. Pour des sources synchrones

$$\Delta\varphi(M) =$$



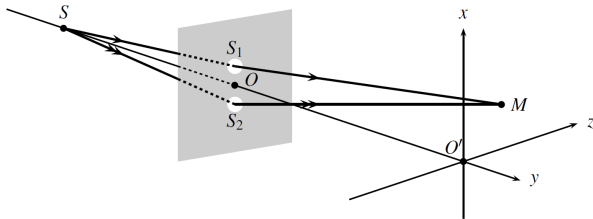
Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Calculons la différence de phase $\Delta\varphi(M)$ en un point M de l'écran d'observation. Pour des sources synchrones

$$\Delta\varphi(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta(M).$$

On doit donc calculer la différence de marche $\delta(M)$ en M .

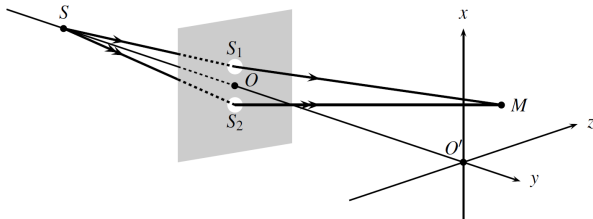


Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Calculons la différence de marche $\delta(M)$ en un point M de l'écran d'observation. Par définition

$$\delta(M) =$$



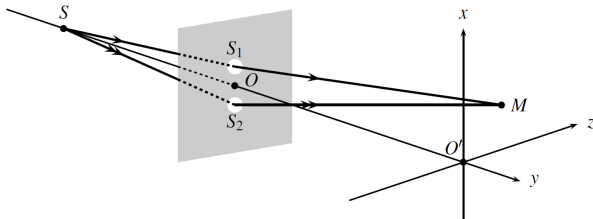
Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Calculons la différence de marche $\delta(M)$ en un point M de l'écran d'observation. Par définition

$$\delta(M) = (S_2M) - (S_1M).$$

Le point M se trouve à l'abscisse z_M et à l'ordonnée x_M de l'écran d'observation.

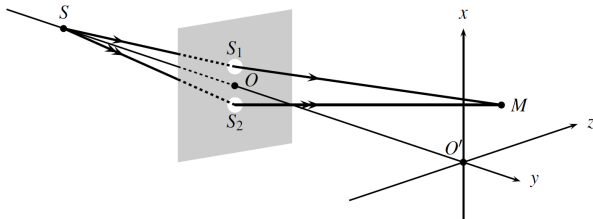


Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Exprimons la distance S_1M en fonction de a la distance entre S_1 et S_2 , D la distance entre O et O' , z_M et x_M à l'aide d'un triangle rectangle.

$$S_1M =$$

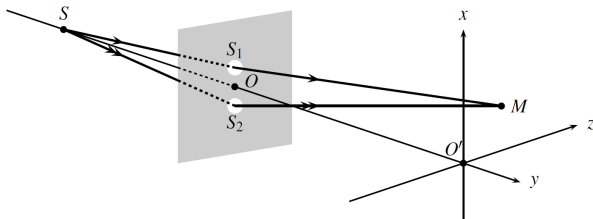


Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Exprimons la distance S_1M en fonction de a la distance entre S_1 et S_2 , D la distance entre O et O' , z_M et x_M à l'aide d'un triangle rectangle.

$$\begin{aligned} S_1M &= \sqrt{D^2 + z_M^2 + (x_M - a)^2} \\ &= D \sqrt{1 + \frac{z_M^2 + (x_M - a)^2}{D^2}}. \end{aligned}$$



Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Exprimons la distance S_1M en fonction de a la distance entre S_1 et S_2 , D la distance entre O et O' , z_M et x_M à l'aide d'un triangle rectangle.

$$\begin{aligned} S_1M &= \sqrt{D^2 + z_M^2 + (x_M - a/2)^2} \\ &= D\sqrt{1 + \frac{z_M^2 + (x_M - a/2)^2}{D^2}}. \end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Exprimons la distance S_1M en fonction de a la distance entre S_1 et S_2 , D la distance entre O et O' , z_M et x_M à l'aide d'un triangle rectangle.

$$\begin{aligned} S_1M &= \sqrt{D^2 + z_M^2 + (x_M - a/2)^2} \\ &= D \sqrt{1 + \frac{z_M^2 + (x_M - a/2)^2}{D^2}}. \end{aligned}$$

On se place dans le cas où $D \gg a$ et $D \gg x_M$. Dans ce cas on peut faire l'approximation du premier ordre $(1+x)^b \simeq 1+bx$, ainsi

$$S_1M \simeq$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Exprimons la distance S_2M en fonction de a la distance entre S_1 et S_2 , D la distance entre O et O' , z_M et x_M à l'aide d'un triangle rectangle.

$$\begin{aligned} S_2M &= \sqrt{D^2 + z_M^2 + (x_M + a/2)^2} \\ &= D\sqrt{1 + \frac{z_M^2 + (x_M + a/2)^2}{D^2}}. \end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Exprimons la distance S_2M en fonction de a la distance entre S_1 et S_2 , D la distance entre O et O' , z_M et x_M à l'aide d'un triangle rectangle.

$$\begin{aligned} S_2M &= \sqrt{D^2 + z_M^2 + (x_M + a/2)^2} \\ &= D \sqrt{1 + \frac{z_M^2 + (x_M + a/2)^2}{D^2}}. \end{aligned}$$

On se place dans le cas où $D \gg a$ et $D \gg x_M$. Dans ce cas on peut faire l'approximation du premier ordre $(1+x)^b \simeq 1+bx$, ainsi

$$S_2M \simeq$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Exprimons la distance S_2M en fonction de a la distance entre S_1 et S_2 , D la distance entre O et O' , z_M et x_M à l'aide d'un triangle rectangle.

$$\begin{aligned} S_2M &= \sqrt{D^2 + z_M^2 + (x_M + a/2)^2} \\ &= D \sqrt{1 + \frac{z_M^2 + (x_M + a/2)^2}{D^2}}. \end{aligned}$$

On se place dans le cas où $D \gg a$ et $D \gg x_M$. Dans ce cas on peut faire l'approximation du premier ordre $(1+x)^b \simeq 1+bx$, ainsi

$$S_2M \simeq D \left(1 + \frac{z_M^2 + (x_M + a/2)^2}{2D^2} \right) = D + \frac{z_M^2 + (x_M + a/2)^2}{2D}.$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Au final la différence de marche est

$$\begin{aligned}\delta(M) &= (S_2M) - (S_1M) = n [S_2M - S_1M] \\ &\simeq n \left[D + \frac{z_M^2 + (x_M + a/2)^2}{2D} - \left(D + \frac{z_M^2 + (x_M - a/2)^2}{2D} \right) \right]\end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Au final la différence de marche est

$$\begin{aligned}\delta(M) &= (S_2M) - (S_1M) = n [S_2M - S_1M] \\ &\simeq n \left[D + \frac{z_M^2 + (x_M + a/2)^2}{2D} - \left(D + \frac{z_M^2 + (x_M - a/2)^2}{2D} \right) \right] \\ &= n \frac{(x_M + a/2)^2 - (x_M - a/2)^2}{2D}\end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

Au final la différence de marche est

$$\begin{aligned}\delta(M) &= (S_2M) - (S_1M) = n [S_2M - S_1M] \\ &\simeq n \left[D + \frac{z_M^2 + (x_M + a/2)^2}{2D} - \left(D + \frac{z_M^2 + (x_M - a/2)^2}{2D} \right) \right] \\ &= n \frac{(x_M + a/2)^2 - (x_M - a/2)^2}{2D} \\ &= n \frac{x_M^2 + ax_M + a^2/4 - (x_M^2 - ax_M + a^2/4)}{2D}\end{aligned}$$

$$\delta(M) \simeq n \frac{2ax_M}{2D} = n \frac{ax_M}{D}$$

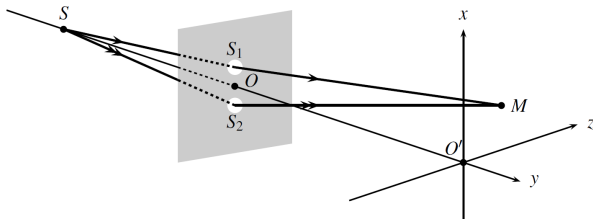
Le chemin optique, donc la différence de phase et l'intensité M dépendent uniquement de l'ordonnée x_M : on aura la même valeur de I_M pour une droite parallèle à z passant par x_M .

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

$$\delta(M) \simeq n \frac{2ax_M}{2D} = n \frac{ax_M}{D}$$

Le chemin optique, donc la différence de phase et l'intensité M dépendent uniquement de l'ordonnée x_M : on aura la même valeur de I_M pour une droite parallèle à z passant par x_M .



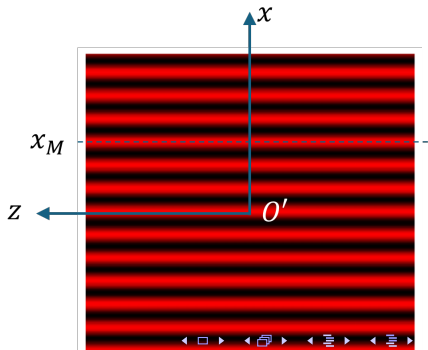
Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Figure d'interférence

La différence de marche $\delta(M)$ ne dépend que de la position x_M selon l'axe $(O'x)$, soit l'axe parallèle à la droite passant par les sources S_1 et S_2 .

Si on fixe une valeur x_M alors on fixe une valeur de l'intensité $I(M)$: l'intensité sera la même le long de x_M , les franges sont parallèles à l'axe $(O'z)$ soit l'axe perpendiculaire à la droite passant par les sources S_1 et S_2 .

Pour une position x_M donnée l'intensité est la même : on voit une frange perpendiculaire à l'axe $(O'x)$.



Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Pour quelle position x_M observe-t-on une frange brillante ?

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange brillante apparaît dans le cas d'une interférence constructive

$$I(M) = I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) =$$

$$\delta(M) =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange brillante apparaît dans le cas d'une interférence constructive

$$\begin{aligned}I(M) &= I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \\ \Delta\varphi(M) &= m \times 2\pi \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z} \\ \delta(M) &= \end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange brillante apparaît dans le cas d'une interférence constructive

$$\begin{aligned}I(M) &= I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \\ \Delta\varphi(M) &= m \times 2\pi \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z} \\ \delta(M) &= m \times \lambda_0.\end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange brillante apparaît dans le cas d'une interférence constructive

$$\begin{aligned}I(M) &= I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \\ \Delta\varphi(M) &= m \times 2\pi \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z} \\ \delta(M) &= m \times \lambda_0.\end{aligned}$$

Or, on a montré que dans le cas des trous d'Young la différence de marche était

$$\delta(M) = \quad \text{soit } x_M =$$

.

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange brillante apparaît dans le cas d'une interférence constructive

$$\begin{aligned}I(M) &= I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \\ \Delta\varphi(M) &= m \times 2\pi \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z} \\ \delta(M) &= m \times \lambda_0.\end{aligned}$$

Or, on a montré que dans le cas des trous d'Young la différence de marche était

$$\delta(M) = n \frac{ax_M}{D} \quad \text{soit} \quad x_M =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange brillante apparaît dans le cas d'une interférence constructive

$$\begin{aligned}I(M) &= I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \\ \Delta\varphi(M) &= m \times 2\pi \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z} \\ \delta(M) &= m \times \lambda_0.\end{aligned}$$

Or, on a montré que dans le cas des trous d'Young la différence de marche était

$$\begin{aligned}\delta(M) &= n \frac{ax_M}{D} \quad \text{soit} \quad x_M = \frac{\delta(M)D}{na} = m \times \frac{D\lambda_0}{na} \\ x_M &= m \times \frac{D\lambda}{a}.\end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Toutes les franges de positions

$$x_M = m \times \frac{D\lambda}{a} \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}$$

seront des **franges brillantes**.

Leur déphasage $\Delta\varphi(M)$ est

$$\Delta\varphi(M) =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Toutes les franges de positions

$$x_M = m \times \frac{D\lambda}{a} \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}$$

seront des **franges brillantes**.

Leur déphasage $\Delta\varphi(M)$ est

$$\begin{aligned}\Delta\varphi(M) &= \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0} n \frac{ax_M}{D} \\ \Delta\varphi(M) &= 2\pi \frac{ax_m}{\lambda_0 D}.\end{aligned}$$

Pour $x_M = 0$, $\Delta\varphi(M)$ est nul donc il y a une frange brillante. De plus, dans ce cas seulement, $\Delta\varphi(M)$ ne dépend pas de la longueur d'onde : pour une lumière blanche **la frange en $x_M = 0$ est brillante et blanche**.

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On introduit une grandeur sans unité nommée **l'ordre d'interférence** p en un point M et définie telle que

$$p = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad \text{ou} \quad p = \frac{\delta(M)}{\lambda_0}.$$

Dans le cas de franges brillantes, les ordres d'interférences sont

$$p =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On introduit une grandeur sans unité nommée **l'ordre d'interférence** p en un point M et définie telle que

$$p = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad \text{ou} \quad p = \frac{\delta(M)}{\lambda_0}.$$

Dans le cas de franges brillantes, les ordres d'interférences sont

$$p = \frac{\delta(M)}{\lambda_0} = m \times \frac{\lambda_0}{\lambda_0}$$
$$p = m \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}.$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On introduit une grandeur sans unité nommée **l'ordre d'interférence** p en un point M et définie telle que

$$p = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad \text{ou} \quad p = \frac{\delta(M)}{\lambda_0}.$$

Dans le cas de franges brillantes, les ordres d'interférences sont

$$p = \frac{\delta(M)}{\lambda_0} = m \times \frac{\lambda_0}{\lambda_0}$$
$$p = m \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}.$$

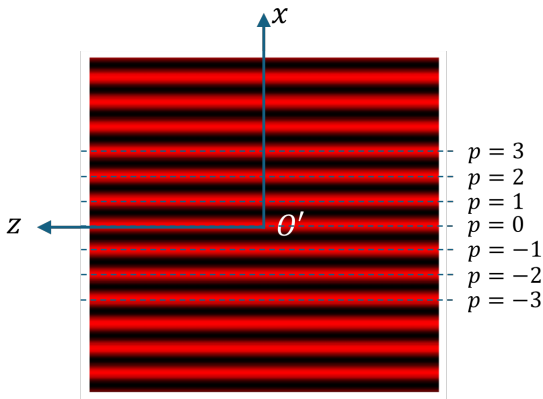
On peut aussi obtenir la valeur de l'ordre d'interférence p à partir de la position x_M de la frange

$$p = \frac{\delta(M)}{\lambda_0} = n \frac{ax_M}{\lambda_0 D}$$
$$p = \frac{ax_M}{\lambda D}.$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Les ordres des franges brillantes p sont donc $\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$. On nomme souvent la frange d'ordre $p = 0$ **la frange centrale** car elle se situe en $x_M = 0$.



Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Pour quelle position x_M observe-t-on une frange sombre ?

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange sombre apparaît dans le cas d'une interférence destructive

$$\begin{aligned} I(M) &= I_{min} = \\ \Delta\varphi(M) &= \\ \delta(M) &= \end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange sombre apparaît dans le cas d'une interférence destructive

$$I(M) = I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) =$$

$$\delta(M) =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange sombre apparaît dans le cas d'une interférence destructive

$$I(M) = I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) = (2m + 1) \times \pi \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}$$

$$\delta(M) =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange sombre apparaît dans le cas d'une interférence destructive

$$I(M) = I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$\Delta\varphi(M) = (2m + 1) \times \pi \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}$$

$$\delta(M) = (2m + 1) \times \frac{\lambda_0}{2}.$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange sombre apparaît dans le cas d'une interférence destructive

$$\begin{aligned}I(M) &= I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \\ \Delta\varphi(M) &= (2m + 1) \times \pi \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z} \\ \delta(M) &= (2m + 1) \times \frac{\lambda_0}{2}.\end{aligned}$$

Or, on a montré que dans le cas des trous d'Young la différence de marche était

$$\delta(M) = \quad \text{soit } x_M =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange sombre apparaît dans le cas d'une interférence destructive

$$\begin{aligned}I(M) &= I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \\ \Delta\varphi(M) &= (2m + 1) \times \pi \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z} \\ \delta(M) &= (2m + 1) \times \frac{\lambda_0}{2}.\end{aligned}$$

Or, on a montré que dans le cas des trous d'Young la différence de marche était

$$\delta(M) = n \frac{ax_M}{D} \quad \text{soit} \quad x_M =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

On a vu qu'une frange sombre apparaît dans le cas d'une interférence destructive

$$\begin{aligned}I(M) &= I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \\ \Delta\varphi(M) &= (2m + 1) \times \pi \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z} \\ \delta(M) &= (2m + 1) \times \frac{\lambda_0}{2}.\end{aligned}$$

Or, on a montré que dans le cas des trous d'Young la différence de marche était

$$\begin{aligned}\delta(M) &= n \frac{ax_M}{D} \quad \text{soit} \quad x_M = \frac{\delta(M)D}{na} = (2m + 1) \times \frac{D\lambda_0}{2na} \\ x_M &= (2m + 1) \times \frac{D\lambda}{2a}.\end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Toutes les franges de positions

$$x_M = (2m + 1) \times \frac{D\lambda}{2a} \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}$$

seront des **franges sombres**.

Leur déphasage $\Delta\varphi(M)$ est

$$\Delta\varphi(M) =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Toutes les franges de positions

$$x_M = (2m + 1) \times \frac{D\lambda}{2a} \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}$$

seront des **franges sombres**.

Leur déphasage $\Delta\varphi(M)$ est

$$\begin{aligned}\Delta\varphi(M) &= \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0} n \frac{ax_M}{D} \\ \Delta\varphi(M) &= 2\pi \frac{ax_m}{\lambda_0 D}.\end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Dans le cas de franges brillantes, les ordres d'interférences sont

$$p =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Dans le cas de franges brillantes, les ordres d'interférences sont

$$p = (2m + 1) \times \frac{\lambda_0}{2\lambda_0} = (m + \frac{1}{2}) \times \frac{\lambda_0}{\lambda_0}$$
$$p = m + \frac{1}{2} \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}.$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Dans le cas de franges brillantes, les ordres d'interférences sont

$$p = (2m + 1) \times \frac{\lambda_0}{2\lambda_0} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \times \frac{\lambda_0}{\lambda_0}$$
$$p = m + \frac{1}{2} \quad \text{avec } m \in \mathbb{Z}.$$

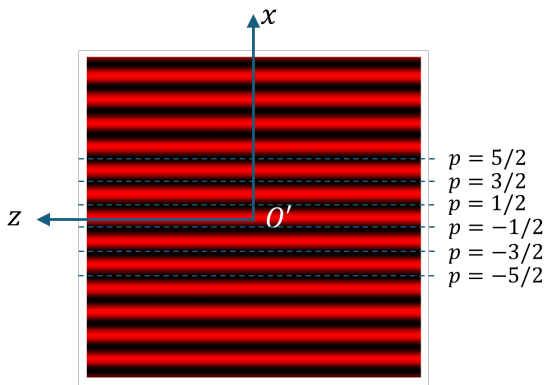
On peut aussi obtenir la valeur de l'ordre d'interférence p à partir de la position x_M de la frange

$$p = \frac{\delta(M)}{\lambda_0} = n \frac{ax_M}{\lambda_0 D}$$
$$p = \frac{ax_M}{\lambda D}.$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Franges d'interférence et ordre d'interférences

Les ordres des franges sombres p sont donc
..., $-5/2$, $-3/2$, $-1/2$, $1/2$, $3/2$, $5/2$,



Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Interfrange

On nomme **interfrange** i la distance entre deux franges d'égales intensité.

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Interfrange

Prenons le cas d'une frange brillante, on a vu que sa position est

$$x_M =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Interfrange

Prenons le cas d'une frange brillante, on a vu que sa position est

$$x_M = m \times \frac{\lambda D}{a}.$$

La frange brillante suivante est donc positionnée en

$$x'_M =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Interfrange

Prenons le cas d'une frange brillante, on a vu que sa position est

$$x_M = m \times \frac{\lambda D}{a}.$$

La frange brillante suivante est donc positionnée en

$$x'_M = (m + 1) \times \frac{\lambda D}{a}.$$

L'interfrange i est donc

$$i =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Interfrange

Prenons le cas d'une frange brillante, on a vu que sa position est

$$x_M = m \times \frac{\lambda D}{a}.$$

La frange brillante suivante est donc positionnée en

$$x'_M = (m + 1) \times \frac{\lambda D}{a}.$$

L'interfrange i est donc

$$\begin{aligned} i &= |x'_M - x_M| = (m + 1) \times \frac{\lambda D}{a} - m \times \frac{\lambda D}{a} \\ i &= \frac{\lambda D}{a}. \end{aligned}$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Interfrange

Prenons cette fois le cas d'une frange sombre, on a vu que sa position est

$$x_M =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Interfrange

Prenons cette fois le cas d'une frange sombre, on a vu que sa position est

$$x_M = (2m + 1) \times \frac{\lambda D}{2a}.$$

La frange sombre suivante est donc positionnée en

$$x'_M =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Interfrange

Prenons cette fois le cas d'une frange sombre, on a vu que sa position est

$$x_M = (2m + 1) \times \frac{\lambda D}{2a}.$$

La frange sombre suivante est donc positionnée en

$$x'_M = (2(m + 1) + 1) \times \frac{\lambda D}{2a}.$$

L'interfrange i est donc

$$i =$$

Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Interfrange

Prenons cette fois le cas d'une frange sombre, on a vu que sa position est

$$x_M = (2m + 1) \times \frac{\lambda D}{2a}.$$

La frange sombre suivante est donc positionnée en

$$x'_M = (2(m + 1) + 1) \times \frac{\lambda D}{2a}.$$

L'interfrange i est donc

$$\begin{aligned} i &= |x'_M - x_M| = (2(m + 1) + 1) \times \frac{\lambda D}{2a} - (2m + 1) \times \frac{\lambda D}{2a} = 2 \times \frac{\lambda D}{2a} \\ i &= \frac{\lambda D}{a}. \end{aligned}$$

L'interfrange est le même quelque soit le type de frange.