

# Interférences à deux ondes en optique

**Niveau :** 2ème année CPGE (PC)

## Pré-requis :

- Optique géométrique
- Modèle scalaire de la lumière (front d'onde, chemin optique, intensité lumineuse)
- Ondes électromagnétiques dans le vide

## Bibliographie :

- Optique, José-Philippe Perez, Dunod
- Optique expérimentale, Sextant, Hermann
- Physique Tout en un PC-PC\* , Dunod
- Optique – Une approche expérimentale et pratique , Houard , De Boeck

## Introduction

17<sup>ème</sup> siècle : division des chercheurs sur la lumière : onde ou corpuscule

1704 : Newton publie OPTIKS -> lumière corpusculaire

1803 : Young publie les résultats d'un phénomène d'interférences -> lumière ondulatoire

Le phénomène d'interférences est une manifestation agrante de la nature ondulatoire de la lumière  
Il est admis maintenant que la lumière présente un double caractère. C'est une onde électromagnétique tout en étant constituée de particules élémentaires sans masse appelées photons.  
On parle de dualité onde-corpuscule

L'expérience Virgo, menée depuis 2003 à Pise qui a permis de détecter l'existence d'ondes gravitationnelles.

Introduction : Mise en contexte avec l'exemple des irisations sur une bulle de savon ou lecture CD

Le phénomène d'interférences existe lorsqu'il y a superposition de deux ou plusieurs ondes dans un volume d'espace. Il se traduit par une profonde modification de l'éclairement, faisant apparaître des figures structurées.

Les interférences sont découvertes au début du XIX<sup>e</sup> siècle par Thomas Young et Augustin Fresnel.

## I. Superposition d'ondes lumineuses

### A. Terme d'interférence

Considérons 2 sources monochromatiques ponctuelles  $S_1$  et  $S_2$  à 2 pulsations différentes. Chaque source émet une onde polarisée perpendiculairement à la direction de propagation :

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} \cos(\omega_i t - \phi_i(M))$$

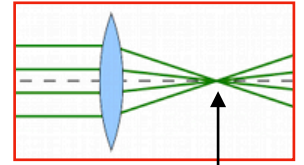
Avec le terme de phase  $\phi_i = \phi_{0i} + k_i(S_i M) = \phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda_0}(S_i M) = \phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{S_i M}$

Tel que  $\phi_0$  est la phase à la source,  $\omega$  pulsation temporelle,  $k$  pulsation spatiale,  $\lambda_0$  dans le vide

$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$  et  $(SM) = n \overline{SM}$  le chemin optique.

De plus du déphasage lié à la propagation, il y a aussi un déphasage supplémentaire de  $\pi$  s'il y a

- Une réflexion sur une surface métallique (avec l'amplitude réfléchie est à l'opposé)
- Une réflexion sur un milieu plus réfringent ( $n_2 > n_1$ )
- Passage par un point de convergence



Pt convergence

Puisque les sources sont monochromatiques, donc les  $\phi_{0i}$  sont bien définies.

Si elles sont quasi-monochromatiques, il y a des phases fluctuantes.

Alors le champ total est :  $\vec{E}(M, t) = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

Mais ce qui nous intéresse est plutôt l'intensité (l'éclairement) :  $I(M) \propto \langle \|\vec{E}(M, t)\|^2 \rangle$

$$I(M) \propto \langle \|\vec{E}_1(M, t)\|^2 \rangle + \langle \|\vec{E}_2(M, t)\|^2 \rangle + \langle 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos(\omega_1 t - \phi_1(M)) \cos(\omega_2 t - \phi_2(M)) \rangle$$

Alors :  $I(M) = I_1(M) + I_2(M) + I_{12}(M)$  Avec le terme croisé  $I_{12}$  est le terme d'interférence

Si ce terme d'interférence est nul, l'éclairement résultat = la somme des éclairements des 2 ondes.

## B. Conditions d'interférence et formule de Fresnel

$$\text{Par : } \cos(A) \cos(B) = \frac{1}{2} [\cos(A+B) + \cos(A-B)]$$

$$I_{12} \propto \langle \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t - (\phi_1 + \phi_2)] \rangle + \langle \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - (\phi_1 - \phi_2)] \rangle$$

La durée d'observation par le détecteur est beaucoup plus grande que la période d'une onde visible ( $T \sim 2 \times 10^{-15}$  s) donc le 1er terme est en moyenne nul si  $(\omega_1 + \omega_2) \neq 0$  (sinon il n'y aura pas de termes temporels). Pour le 2nd terme, si  $\omega_1 \neq \omega_2$  alors cette moyenne donne aussi 0.

Dans ce cas il n'y a pas d'interférences :  $I = I_1 + I_2$

**1ère condition** : pas d'interférences entre 2 ondes de pulsations différentes.

Pour avoir des interférences :  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  alors :

$$I_{12} \propto \langle \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(k[(S_2 M) - (S_1 M)] + (\phi_{02} - \phi_{01})) \rangle$$

Pour une onde monochromatique,  $\vec{E}_0$  et  $\phi_0$  restent invariables.

En pratique on choisit des sources synchrones donc  $\phi_{01} = \phi_{02}$  :  $I_{12}(M) \propto \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\Delta\phi(M))$

Si les ondes sont de polarisation  $\perp$  donc  $\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} = 0$  et donc  $I_{12} = 0$

**2ème condition** : 2 ondes de polarisation orthogonales ne produisent pas d'interférences.

Pour  $\Delta\phi(M) = \phi_2(M) - \phi_1(M)$ , les retards de phase  $\phi_1$  et  $\phi_2$  varient aléatoirement. S'ils varient de manière indépendante alors  $\Delta\phi$  prend toutes les valeurs possibles avec une probabilité égale donc  $\langle \cos(\Delta\phi) \rangle = 0$  et il n'y aura pas d'interférences.

**3ème condition** : Pas d'interférence entre 2 ondes monochromatiques provenant de sources indépendantes même si elles ont la même pulsation.

On aura donc des ondes incohérentes et dans ce cas :  $I = I_1 + I_2$

Pour stabiliser le déphasage pendant une durée au moins égale à quelques  $\tau$  (avec  $\tau$  le temps de réponse du récepteur utilisé pendant laquelle la moyenne est calculée). Ceci est réalisé en fabriquant les 2 ondes par dédoublement d'une seule onde. On dit alors que les 2 ondes sont cohérentes.

On obtient des interférences entre 2 ondes monochromatiques cohérentes de même pulsation, provenant d'une onde initiale unique. L'éclairement est donné par la formule des interférences :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad \text{Formule de Fresnel}$$

Le facteur 2 car  $I \propto \langle \vec{E}^2 \rangle = k \langle \vec{E}^2 \rangle = \frac{k}{2} E_0^2$

Ou en complexe :  $\underline{E} = E_0 e^{i(\omega t - \phi)}$  alors  $I = \frac{1}{2} k \underline{E} \underline{E}^*$

donc  $I = \frac{k}{2} E_{01}^2 + \frac{k}{2} E_{02}^2 + k^2 E_{01} E_{02} \cos(\Delta\phi)$  et alors  $I = I_1 + I_2 + \sqrt{4I_1 I_2} \cos(\Delta\phi)$

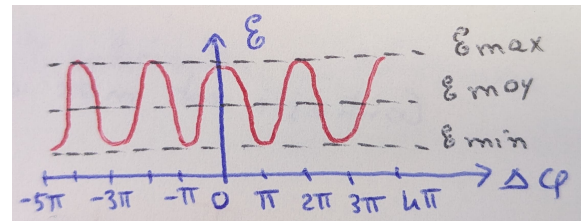
### C. Interprétation de la formule de Fresnel

Selon le signe de  $\cos(\Delta\phi)$ , l'éclairement résultant est positif ou négatif à la somme des  $I_1, I_2$

**Interférences constructives** : les points où  $I > I_1 + I_2$

**Interférences destructives** : les points où  $I < I_1 + I_2$

Et la valeur moyenne =  $I_1 + I_2$  ce qui est conforme à la conservation de l'énergie. Alors le phénomène d'interférence modifie juste la distribution spatiale d'énergie mais pas l'énergie totale



**Eclairement maximal** :  $\cos(\Delta\phi) = +1$  donc  $\Delta\phi = 2m\pi$  avec  $m \in \mathbb{Z}$

$I_{max} = \left( \sqrt{I_1} + \sqrt{I_2} \right)^2$  et l'interférence est totalement constructive

**Eclairement minimal** :  $\cos(\Delta\phi) = -1$  donc  $\Delta\phi = (2m+1)\pi$  avec  $m \in \mathbb{Z}$

$I_{min} = \left( \sqrt{I_1} - \sqrt{I_2} \right)^2$  et l'interférence est totalement destructive

Si les 2 sources ont même éclairement  $I_0$  au point M donc Fresnel sera :  $I = 2I_0 (1 + \cos\Delta\phi)$

Alors  $I_{min} = 0$

comportement paradoxal : lumière + lumière = obscurité

### D. Modèle du train d'onde, notion de cohérence

### E. Contraste

**La différence de marche** = la  $\Delta$  du chemin optique :  $\delta(M) = (S_2 M) - (S_1 M) = n \overline{S_2 M} - n \overline{S_1 M}$

Lien entre la différence de phase et la différence de marche :  $\Delta\phi(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta$

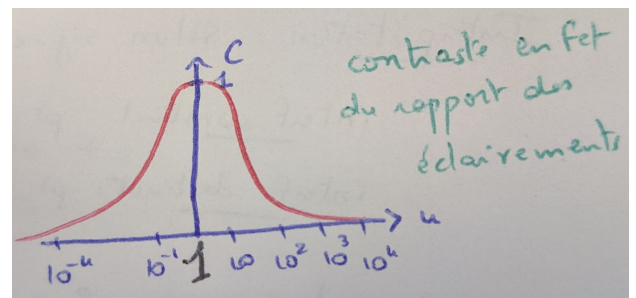
Si  $\delta > 0$  alors l'onde qui provient de  $S_2$  arrive à M en retard par rapport à celle venant de  $S_1$

**Ordre d'interférence** :  $p(M) = \frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\delta(M)}{\lambda_0}$

éclairement max si  $p(M)$  est un entier ( $m$  avec  $m \in \mathbb{Z}$ )

éclairement min s'il est entier + demi entier ( $m + \frac{1}{2}$ )

**Contraste** :  $C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$  avec  $0 < C < 1$ .



Par  $I_{max} = \left(\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2}\right)^2$  et  $I_{min} = \left(\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2}\right)^2$  donc  $C = \frac{2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2}}{I_1 + I_2}$

Par  $u = \frac{I_1}{I_2}$  on a  $C = \frac{2\sqrt{u}}{1 + u}$  et le contraste est maximum si  $u = 1$  donc  $I_1 = I_2$

### **Site “ Animation Superposition de 2 ondes PhET ”**

[https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference\\_all.html?locale=fr](https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_all.html?locale=fr)

## **II. Les fentes d’Young**

### **A. Présentation**

### **Site “ Animation Fentes d’Young PhET ”**

[https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference\\_all.html?locale=fr](https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_all.html?locale=fr)

### **B. Dispositif expérimental**

**Surface d'onde** relative au point source = surface formée des points tel que  $(SM) = \text{cste}$  donc  $\phi(M) = \text{cste}$

**Théorème de Malus :** Les surfaces d'onde relatives au point source S sont  $\perp$  aux rayons lumineux issus de S.

Surfaces d'ondes (pour onde sphérique) sont des sphères de centre S.

Surfaces d'ondes (pour onde plane) sont  $\parallel$  entre elles  $\rightarrow$  plans d'onde.

### Onde Sphérique :

Les rayons sont des droites concourantes en 1 point S.

Elle peut être divergente (convergente) dans une zone où les rayons s'éloignent du (se dirigent vers le) centre.

Onde Sphérique Harmonique :  $s(M, t) = \frac{s_0}{r} \cos(\omega t - \phi(M))$  avec  $\phi = \phi_0 + kr$  et  $r = SM$  donc  $\phi = \phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda_0}(SM)$ . Pour une onde convergente :  $\phi = \phi_0 - kr$  et  $\phi = \phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda_0}(MS)$

L'amplitude décroît par distance au centre donc l'éclairement  $I = \frac{A}{2} \frac{s_0^2}{r^2}$  décroît au carré de distance.

La puissance moyenne traversant une sphère :  $P = \iiint I(M) dS = \frac{A}{2} \frac{s_0^2}{R^2} 4\pi R^2 = 2\pi A s_0^2$  ne dépend pas de R donc il y a une conservation d'énergie lumineuse.

Au point de source pour onde divergente (ou point de convergence pour onde convergente) :  $r=0$  donc le modèle de source ponctuelle (modèle mathématique idéale) n'est pas valable.

### Onde Plane :

Les rayons sont des droites  $\parallel$  entre elles.

On considère que c'est une onde plane par exemple si la source est lointaine (distance  $\gg$  dimensions instrument) et quasi-ponctuelle (sa dimension  $\ll$  distance) par exemple les étoiles.

$s(M, t) = s_0 \cos(\omega t - \phi(M))$  mais on peut pas appliquer  $\phi = \phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda_0}(SM)$  car  $(SM) \rightarrow \infty$

donc  $\phi = \phi(O) + \vec{k} \cdot \overrightarrow{OM}$

**Titre :** Interférence de deux ondes en optique

**Présenté par :** François Kamal Youssef

**Rapport écrit par :** Adrien DDC

**Correcteur :** Agnès Maitre

**Date :** 14/10/2024

| Bibliographie                                    |         |            |
|--|---------|------------|
| Titre  | Auteurs | Éditeur    |
| Optique – Une approche expérimentale et pratique | Houard  | De Boeck   |
| Physique – PC/PC*                                |         | Dunod 2022 |
| Optique expérimentale                            | Sextant | Hermann    |
| Optique physique et électronique                 | Mauras  | Puf        |
|  |         |            |

## Compte-rendu détaillé de la leçon

*Pas de photographies de brouillons ! Le compte-rendu doit être rédigé, pour que l'enseignant puisse corriger si nécessaire.*

**Niveau choisi pour la leçon :** PC/PC\*

### Pré-requis :

- Optique géométrique
- Equation de propagation des ondes

## Introduction

17<sup>ème</sup> siècle : division des chercheurs sur la lumière : onde ou corpuscule

1704 : Newton publie OPTIKS -> lumière corpusculaire

1803 : Young -> publie les résultats d'un phénomène d'interférences -> lumière ondulatoire

Si : source monochromatique émet une onde polarisée perpendiculairement à la direction de propagation  $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \varphi)$

Terme de phase :  $\varphi = \varphi_0 + K\delta$  où  $\varphi$  phase,  $\varphi_0$  phase à la source,  $K$  pulsation spatiale,  $\delta$  différence de marche

## I / Superposition de 2 ondes

Deux sources S1 et S2 donnent un champ total de la forme :  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

Mais ce qui nous intéresse est plutôt à l'intensité :

$$I \propto \langle \vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2 + 2\vec{E}_1 \vec{E}_2 \rangle$$

$$I \propto I_1 + I_2 + \langle 2\vec{E}_{01} \vec{E}_{02} \cos(\omega_1 t - \varphi_1) \cos(\omega_2 t - \varphi_2) \rangle$$

Le terme croisé qu'on appelle  $I_{12}$  est appelé terme d'interférences

$$I_{12} \propto \langle \vec{E}_{01} \vec{E}_{02} \cos([\omega_1 + \omega_2]t - [\varphi_1 + \varphi_2]) \rangle + \langle \vec{E}_{01} \vec{E}_{02} \cos([\omega_1 - \omega_2]t - [\varphi_1 - \varphi_2]) \rangle$$

Premier terme nul car la période du détecteur est beaucoup plus grande que la période du  $\cos([\omega_1 + \omega_2]t)$

Si  $\omega_1 \neq \omega_2$ , alors la moyenne temporelle du second terme est aussi nulle.

- 1<sup>ère</sup> condition pour avoir des interférences : 2 sources cohérentes :  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$  Dans le cas où  $\omega_1 = \omega_2$ , on a :

$$I_{12} \propto \vec{E}_{01} \vec{E}_{02} \cos \Delta\varphi$$

Or  $\Delta\varphi$  est la différence de phases à la source et la différence de marche entre les deux sources

Dans le cas de sources synchrones (même phase à la source) :

$$\Delta\varphi = K[(S_1M) - (S_2M)]$$

On peut aussi regarder le produit scalaire  $\vec{E}_{01} \vec{E}_{02}$  :

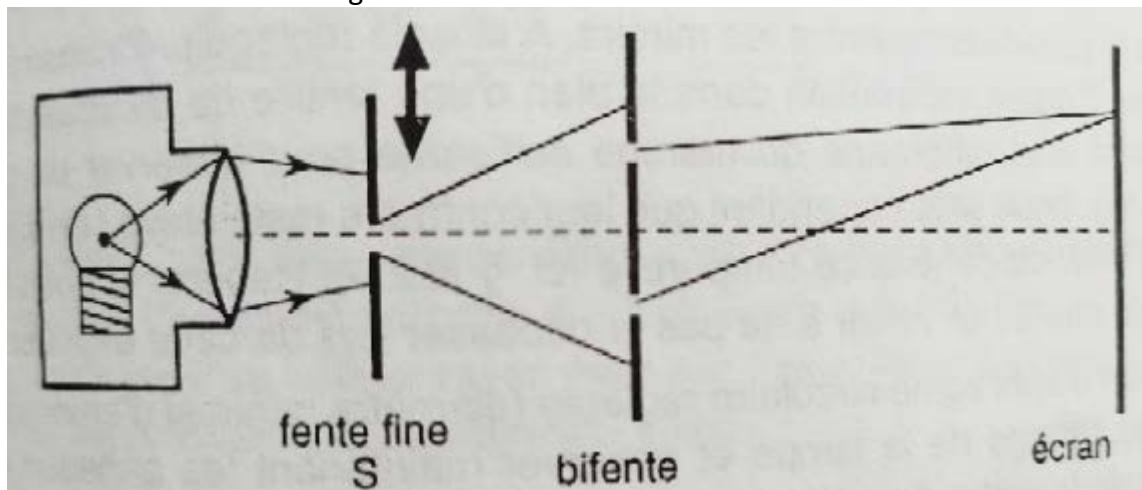
$$I_{12} \propto \vec{E}_{01} \vec{E}_{02} \cos \Delta\varphi$$

- 2<sup>ème</sup> condition pour avoir des interférences ->  $\vec{E}_{01}$  et  $\vec{E}_{02}$  parallèle pour avoir  $I_{12}$  non nulle

Ainsi l'intensité totale vaut :

$$I \propto I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi$$

Schéma des fentes d'Young



Calcul de la différence de marche entre les deux rayons :  $(S_2M) - (S_1M) = (S_2H) + (HM) - (S_1M) = (S_2H)$

Avec l'approximation des petits angles, on obtient comme différence de marche (a est la distance entre fentes, D la distance de l'écran à la bifente, qu'on suppose très grande pour rester dans l'approximation petits angles) :

$$\delta(M) = n\overline{S_2H} = \frac{na x}{D}$$

La différence de marche ne dépend que de x donc on aura des franges rectilignes

Ainsi l'intensité vaut :

$$I \propto I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi na}{\lambda_0 D} x\right)$$

Cas 1 :  $I > I_1 + I_2$

$\cos \Delta\varphi > 0 \rightarrow$  Interférences constructives

Pour le maximum, on a  $\Delta\varphi = 2\pi p$  avec  $p \in \mathbb{N}$

Cas 3 :  $I < I_1 + I_2$

Interférences destructives  $\rightarrow \cos \Delta\varphi < 0$

Pour le minimum, on a  $\Delta\varphi = 2\pi(p + 1/2)$  avec  $p \in \mathbb{N}$

On peut calculer x  $\rightarrow x = \frac{\lambda D}{a} p$  où  $\frac{\lambda D}{a}$  correspond à l'interfrange.

➔ Expérience de fentes d'Young

Contraste :

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

On peut réécrire le contraste avec  $u = \frac{I_1}{I_2}$

Cela donne  $C = \frac{2\sqrt{u}}{1+u}$  (Voir graphique)



Si les deux sources ont la même intensité, on obtient la formule de Fresnel :

$$I \propto 2I_0[1 + \cos \Delta\varphi]$$

## II/ Source étendue

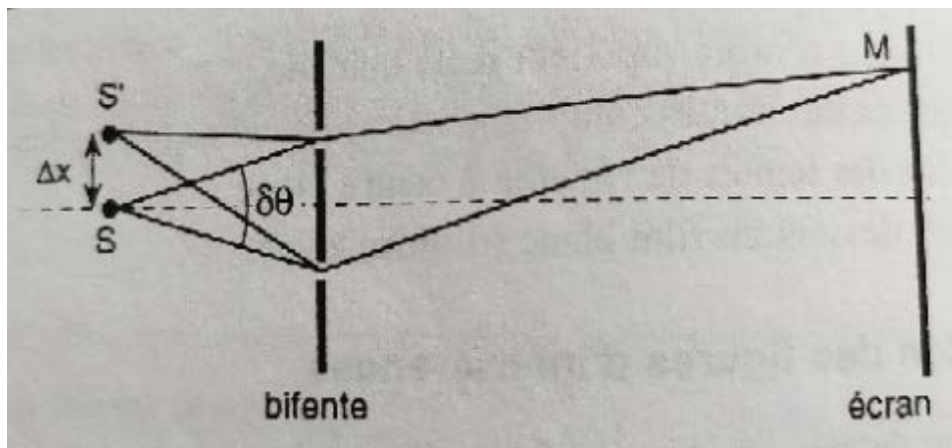
Superposition de sources étendues dans la direction hors plan (y)  $\rightarrow$  n'influence pas les interférences  $\rightarrow$  donc permet d'avoir plus de luminosité



Si on déplace la source  $S$  en  $S'$  avec un petit déplacement  $\rightarrow$  on a  $\Delta\delta = n \frac{\delta \vec{s} \cdot \vec{S_2 S_1}}{d}$

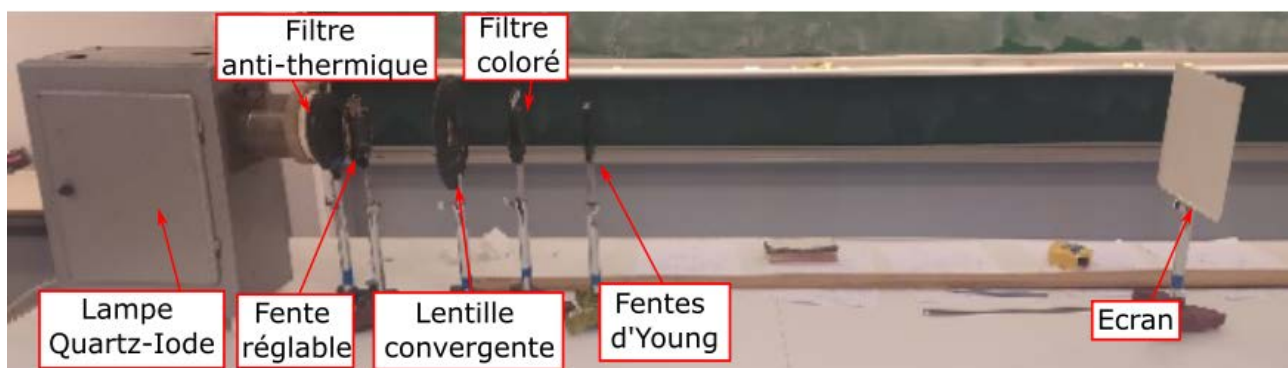
On a une nouvelle figure de d'interférences sur l'écran centrée autour du maximum à l'intersection de la droite  $(S'O)$  et de l'écran

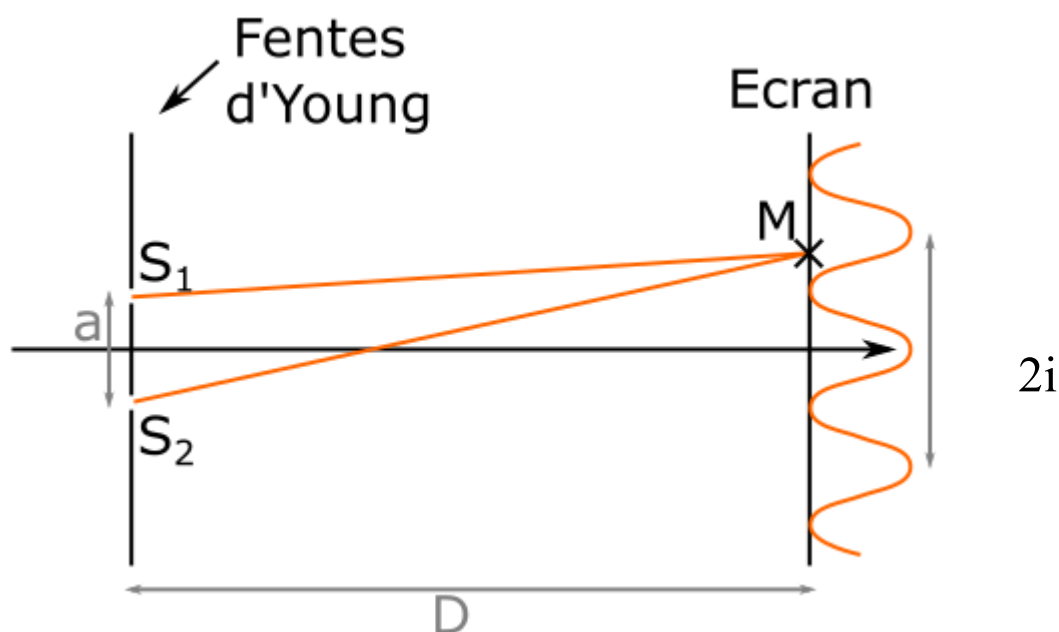
Si on a une source en  $S$  et une en  $S'$  on additionne les intensités des deux figures d'interférence. Suivant leur décalage relatif, les franges pourront se brouiller ou pas.



#### Expérience réalisée :

- Interférences avec des fentes d'Young
- Référence : Sextant





### Protocole expérimental

- Mise en place de la fente réglable devant la lampe
- Mise en place du filtre anti-thermique pour protéger les éléments optiques suivants (notamment le filtre coloré)
- Mise en place de la lentille convergente ( $f'=20\text{cm}$ ) de manière à concentrer la lumière issue de la fente réglable sur les fentes
- Mise en place des fentes d'Young à la position où la lumière en sortie de la lentille est la plus concentrée afin d'avoir l'intensité maximale sur les fentes.
- Réglage de la fente devant la lampe afin de voir les interférences en lumière blanche sur l'écran. Attention cela se brouille vite quand on s'éloigne de l'axe optique
- Insertion du filtre coloré ( $\lambda = 592 \text{ nm}$ ) dans le montage
- Observation des franges

### Exploitation de résultats

- Mesure de 3 interfranges ( $3i$  sur le schéma) (en lumière verte, de préférence, pour éviter le brouillage et l'irisation des franges en lumière blanche)
- Mesure de la distance entre les fentes et l'écran ( $D$  sur le schéma)
- Utilisation d'un code python pour faire le calcul de  $\lambda$  et les incertitudes associées
- Explication de l'origine de chaque incertitude
- Comparaison de la valeur mesurée avec la valeur tabulée du filtre (calcul du z-score)

## Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

C'est au binôme de prendre en note les questions posées par l'enseignant. Et autant que possible de prendre en note les **bonnes** réponses (donc pas nécessairement celles données par l'étudiant au tableau)

L'enseignant pourra compléter les questions et bien sûr les réponses.

*Merci de respecter le format ci-dessous autant que possible.*

**Question : Pulsation spatiale, est-ce que ça a un autre nom ? Et c'est égal à quoi ?**

*Réponse : Vecteur d'onde et égal à  $2\pi/\lambda$*

**Question : C'est quoi l'approximation faite sur le schéma ? Quand est-ce qu'elle s'est exprimée ? Elle est valable jusqu'à quand ?**

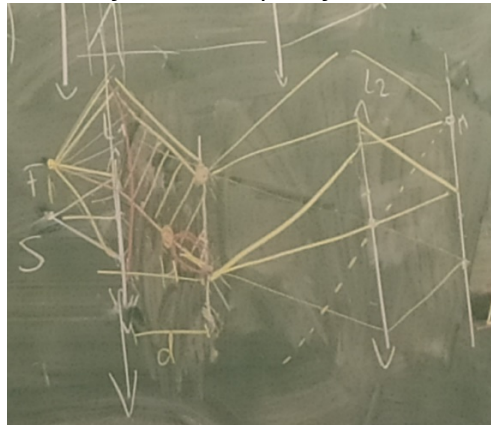
*Réponse : On fait l'approximation qu'on a des ondes planes. Pour le calcul de la différence de marche. Tant que  $a \ll D$*

**Question : C'est quoi la longueur d'onde ?**

*Réponse : 592 nm*

**Question : Est-ce qu'il est possible de faire ce montage sans faire l'approximation de l'écran à l'infini ?**

*Réponse : si on place après la biseau une lentille  $f$  et qu'on met un écran dans le plan focal de cette lentille, alors on a « ramené » l'infini dans le plan focal de cette lentille*



**Question : Pourquoi la lumière ne va pas tout droit en S2 ? Même chose en S1 ?**

*Réponse : À cause de la diffraction. Oui*

**Question : Comment est la source en S2 ?**

*Réponse : Source d'ondes sphériques*

**Question : Est-ce que c'est important que l'onde arrivant en S1 et S2 soit plane ?**

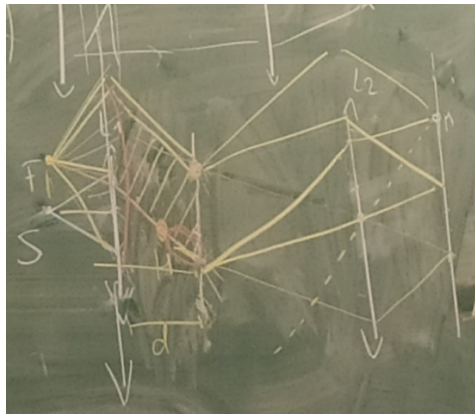
*Réponse : non*

**Question : C'est quoi un front d'onde ? Quelles est la phase de deux rayons à une distance infinitésimale de la source ? Dessiner les fronts d'ondes partant de la source ?**

*Réponse : Surface pour laquelle tous les rayons sont en phase.  
Ils sont en phase s'ils sont à la même distance infinitésimale de la source.  
Voir photo.*

**Question : Est-ce qu'il y a un déphasage entre S1 et S2 ? Où, sur le dessin, on retrouve la phase de S1 ? Que vaut ce déphasage ?**

$$\text{Réponse : } \delta = \frac{aSS'}{f'}$$



**Question : C'est quoi le temps caractéristique pour la moyenne temporelle ? D'ailleurs la moyenne temporelle se fait sur quoi ?**

*Réponse : Se fait sur le temps de mesure. Un œil à un temps de réponse de 10-20 Hz, une photodiode peut aller jusqu'au ns (mais usuellement jusqu'à la ms, ou  $\mu s$ ) On peut trouver des détecteurs plus rapides que la ns.*

**Question : C'est quoi la fréquence optique dans le vide ? C'est quoi le temps caractéristique pour l'œil ?**

*Réponse :  $10^{-17}$  s pour la fréquence optique. 0.041 s pour l'œil, soit 24 Hz. On travaille généralement avec l'œil ou des détecteurs de l'ordre du kHz.*

**Question : Sur l'expérience, pourquoi avoir placé le filtre coloré là où il est ? Est-ce que ça change qqch de la placer après ?**

*Réponse : C'est là où il a le plus de place avant les fentes. Ça n'a aucune importance.*

**Question : C'est quoi l'incertitude sur la largeur de la fente ?**

*Réponse :  $1\mu m$*

## Commentaires lors de la correction de la leçon

Le binôme prend en note les commentaires de l'enseignant liés au contenu de la leçon : choix des thématiques abordées, plan choisi, notions hors-programme, expériences, respect du format de la leçon. **L'enseignant ajoute ou modifie abondamment des commentaires à posteriori.**

Les commentaires relatifs à la prestation de l'étudiant (rapidité, élocution, enthousiasme, niveau disciplinaire, etc.) sont à remplir sur la fiche « Évaluation » par l'enseignant, qui sera mis à disposition de l'étudiant passé à l'oral uniquement.

### Notes :

Pas de plan -> il faut mettre un plan dans tous les cas -> plus c'est structuré, plus ça aidera.

Faire attention au titre -> bien analyser le titre

Chercher des images d'interférences et des animations (script présent sur le site du concours) permettant de voir l'influence de la largeur des fentes sur les interférences.

Intro historique pertinente qui a mis en lumière la dualité de celle-ci

Il faut absolument une conclusion. Attention ne pas conclure sur des aspects qu'on ne maîtrise pas.

Sur la partie présentation, la partie contraste aurait dû être abordé plus tôt. Les calculs sont bien menés. C'est toujours bien d'avoir des applications numériques dans la leçon (c'est arrivé dans l'exploitation de l'expérience).

On peut utiliser une caméra à la place de l'écran pour avoir une meilleure mesure de l'interfrange.

Utiliser un montage à double lentille pour rendre l'expérience plus propre (voir question)

Mettre une animation qui montre l'effet des fentes

## Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

### ➔ Mesure stellaire :

Mesurer la taille d'une étoile avec les fentes d'Young en considérant une source étendue.  
Quand on perd les interférences, on peut remonter à la taille d'une étoile

### ➔ Présenter un interféromètre de Michelson : Chariotage jusqu'à la perte d'interférences.

Expérience qualitative du gaz au contact optique. Expérience quantitative sur les anneaux (taille, nombre...)

- Présenter une application métrologique de l'interféromètre de Michelson. (2024)
- Mettre en œuvre expérimentalement une mesure d'indice de réfraction à l'aide d'un interféromètre de Michelson. (2024)
- Présenter, en justifiant les choix pédagogiques effectués, l'énoncé et la résolution d'un exercice traitant de la mesure de l'indice de réfraction d'un gaz. (2024)
- (24-25) Présenter le principe d'une observation stellaire interférométrique. (2024)

**Titre :** Interférence à deux ondes en optique

**Présentée par :** Anne-Cécile Buellet

**Rapport écrit par :** Romain Taureau

**Correcteur :** Agnès Maître

**Date :** 16/10/2023

| Bibliographie                                   |           |          |
|---|-----------|----------|
| Titre   | Auteurs   | Éditeur  |
| Optique: Une approche expérimentale et pratique | S. Houard | De boeck |
| Physique Tout-en-un PC/PC*                      | M-N. Sanz | DUNOD    |
|   |           |          |
|   |           |          |
|   |           |          |

## Plan détaillé

I/ Superposition de deux ondes

1) Monochromatiques quelconques

Rappels sur les interférences, exemple de la cuve à onde en mécanique. Qu'est ce qui va en être en optique. Rappels de la vie de tous les jours (lire les CD, irisation bulles de savon et ailes de papillon). Équations de superposition de deux ondes E.M (forme exponentielle). Expression générale de l'intensité lumineuse et calcul et mise en lumière du terme d'interférence. Introduction de notion de cohérence (si terme d'interférence est non-nul).

Pour que les sources soient cohérentes, une condition nécessaire est que  $w_1 = w_2$ . il faut surtout que la relation entre les phases des deux ondes soit déterministe (par exemple constante à l'échelle de temps de la mesure). Si cette relation de phase est aléatoire à l'échelle de la mesure, il n'y a pas cohérence temporelle

Exemple lumière blanche → pas d'interférence. Il faut une deuxième condition.

2) Sources  $w_1 = w_2$ , étendues

Introduction et calcul de la différence de marche, différence de phase, ordre d'interférence et conditions pour avoir interférences. Introduction du contraste C. Diminue taille de la fente on voit apparaître les franges et l'irisation.

Simulation avec une animation sur [institutoptique.fr](http://institutoptique.fr)

3) Lasers à  $w_1 = w_2$

Solution pour ça c'est d'utiliser une seule source monochromatique ponctuelle où l'on va diviser le faisceau.

## *II/ Applications : Les fentes/trous d'Young*

### *1) Dispositif*

*Schéma et explication. Def de la zone d'interférences.*

*Introduction notion de division du front d'onde. Calcul de l'intensité en fonction de la différence de marche.*

### *2) Différence de marche*

*Calcul explicite de la différence de marche.*

*Notion d'interfrange.*

*Expérience : elle va mesurer l'interfrange  $i = D\lambda/a$ .  $D = 60,0 \pm 0.1$  cm, taille pixel =  $8 \mu\text{m}$ , elle utilise une caméra CCD pour avoir le profil de la figure de l'interférence. Elle mesure l'interfrange en pixel. Elle obtient à  $i_{th} = 1.90 \times 10^{-3} \pm 0.02 \times 10^{-3}$  m et  $i_{exp} = 1.80 \times 10^{-3} \pm 0.04 \times 10^{-3}$  m.*

### *3) Mouvement de la source*

*Étude de ce qu'il se passe pour l'interfrange si on décale la source. Calcul*

## *IV/ Conclusion :*

*ouverture sur division d'amplitude.*

Niveau choisi pour la leçon : CPGE 2<sup>e</sup> année

Pré-requis : Modèle scalaire de la lumière (front d'onde, chemin optique, intensité lumineuse)



## Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

*Q : Détailler ce que vous avez fait sur les expériences.*

*R : Détaille le dispositif, lampe LED, condenseur, fente permet de faire une source plus ou moins fine, autre fente pour avoir une visualisation plus lumineuse.*

*Q : Pourquoi ces fentes ?*

*R : Permet d'avoir un  $a$  pas trop petit pas trop grand pour voir suffisamment d'interfranges.*

*Q : C'est quoi concrètement petit et grand ? Taille des fentes ?*

*R :  $200\ \mu\text{m}$  la distance entre les deux fentes. Trop grand trop petit relatif à la taille d'observation, si j'ai trop d'interfranges, très difficile à discerner à l'oeil nu et sinon j'aurais qu'une seule.*

*Q : Trop d'interfrange, vous en voyez combien ?*

*R : Un peu moins de 10 sur une épaisseur de 2 cm.*

*Q : Par rapport à l'image des interférences en lumière blanche, est-ce que c'est ça qu'on voit ?*

*R : Oui, mais pas autant d'irisation et pas autant que contraste*

*Q : De quoi dépend l'irisation ?*

*R : Des longueurs d'ondes de la source.*

*Q : Est-ce que l'irisation dépend de  $a$  ?*

*R : L'interfrange oui, mais elles vont dépendre « ensemble ».*

*Q : Si  $a$  deux fois plus petit qu'est ce qu'il se passe ?*

*R : Étalement et irisation moins visible, vont nécessiter plus d'ordres pour être visibles.*

*Q : Expliquer deuxième expérience ?*

*R : On considère des trous à la place des fentes car luminosité suffisante avec un laser pour utiliser des trous.  $200\ \mu\text{m}$  l'un de l'autre. On a placé une caméra ccd qui mesure l'intensité lumineuse devant laquelle on a placé un filtre. Pas besoin de lentille car figure d'interférence très nette.*

*Q : Sur l'écran on voit un rond, pourquoi on a ce rond ?*

*R : Même chose que tout à l'heure pour les fentes, terme en sinus cardinal  $\rightarrow$  figure de diffraction due à un seul trou. Tâche centrale d'Airy. Les franges s'observent au sein de la tache d'Airy*

*Q : Si vous aviez des trous plus petits ?*

*R : Figure plus large à cause de la diffraction. L'interfrange ne change pas si l'écart entre les trous,  $a$ , ne change pas.*

*Q : Au début vous avez écrit des relations vectorielles, pourquoi les avoir supprimées ?*

*R : Pcq on suppose que l'on a de la lumière polarisée de manière similaire. Une condition supprimée c'est que les polarisations soient non-orthogonales.*

Q : Vous avez parlé de division d'amplitude et vous avez dit qu'il y avait division du front d'onde, explicitez, donnez des exemples et pourquoi c'est important ?

R : Deux rayons différents initialement à partir de la même source  $\rightarrow$  division du front d'onde. Division d'amplitude on a un rayon qui va avoir une intensité divisée par deux, (exemple avec une lame séparatrice), on exemple avec le Michelson, très utile dans plein de domaines (ophtalmologie, détection ondes gravitationnelles etc.)

Q : Pq intéressant en ophtalmologie ?

R : Tomographie en cohérence optique pour faire l'image du fond de l'oeil.

Q : Comment ils font ?

R :

On utilise un interféromètre de Michelson avec une source de très faible longueur de cohérence. les franges ne s'observe que la différence de longueur entre les bras est inférieure à la longueur de cohérence de la source. On peut ainsi mesure des reliefs optiquement donc sans contact et avec une très grande précision (typiquement le micromètre si la source est suffisamment large spectralement)

Q : Vous avez parlé de cohérence, lié à la différence de phase, qu'est ce que c'est exactement la cohérence ?

R : Lumière pas parfaitement monochromatique, il va y avoir une distribution de la longueur d'onde et donc on va être cohérent que sur la longueur du train d'onde et on va pouvoir interférer que dans cette partie. Pour que deux ondes soient cohérentes entre elle il faut que la relation de phase entre elles soit déterministe (par exemple constante sur la durée de la mesure). Si on a une onde séparée en deux on peut faire interférer les mêmes trains d'onde car leur différence de phase est constante. En revanche si la différence de marche est suffisamment grande pour que ce soit des trains d'onde différents qui se superposent, la différences de phase étant aléatoire entre deux trains d'onde, il n'y aura pas interférence.

Q : Longueur de cohérence ?

R : .

$L_c = c t_c$  ou  $t_c$  est le temps de cohérence, inversement proportionnel à la largeur spectrale de la source

Q : Si je bouge en y ça change rien, si je bouge en z ça change rien, est-ce vrai ?

R : Le D va changer donc on change la diff de marche.

Q : Quand on bouge en x ça fait que décaler, c'est vrai pour toutes les sources ?

R : Oui (démonstration avec l'appli en ligne).

Q du public : Quand il y avait l'image de la CDD, ça oscillait pq ?

R : Luminosité de la pièce qui fait osciller

Q du public : Sur ta def des interférences t'as dit que c'était quand le terme croisé était non-nul est-ce que c'est vraiment ça la définition ?

R : Il n'y a pas d'interférence si le terme d'interférence est nul pour tout  $x$ . Remarque de Rodrigue : Pourtant dans les trous d'Young t'as des endroits où le terme d'interférence est nul. Oui, mais il n'est pas nul pour tout  $x$ .

Q : T'as bcp parlé d'ordre d'interférence. Ce serait quoi le sens physique sur l'écran ?

*R : quand  $p$  entier on a une frange brillante. On peut prédire l'emplacement des franges sombres,  $p$  l'ordre d'interférence, correspond au nombre de franges brillantes à partir de la frange centrale.*

*Q : Comment ça marche un lecteur CD ?*

*R : Un peu comme un Michelson. Sur le cd on a des petits trous à la surface dont la profondeur est  $\lambda/4$ . Dans un lecteur CD t'as un laser et un petit miroir qui chariotte et qui va lire le cd, ça va introduire une différence de marche de  $\lambda/2 \rightarrow$  interférence destructive quand il y a un trou.*

*Q : Comment ça marche les CD qu'on peut graver ?*

*R : On va faire refondre le trou (cf. DM Chimie)*

## Commentaires lors de la correction de la leçon

*Rouge un peu dangereux en écriture. Bonne utilisation du tableau. Dessins biens.*

*Très diversifié, très visuel, animation, illustration, expérience, équations. Calculs bien exposés.*

*Quelques critiques : sur les interférences le début était bien mais un moment il manquait qqchose essentiel. Pourquoi on voit des formes ? Des franges ? La raison c'est le  $k_r$  qui joue : indispensable d'en parler. Un moment il faut discuter de  $k_r$  et pourquoi on voit des franges, c'est un gros manque de la leçon. Mieux parler de la cohérence (terme d'interférence  $\Delta \Phi$ ). Ce qui est important c'est pourquoi ces franges. On peut également parler d'anneau. Ensuite il faut parler de la phase et si à l'échelle de la mesure ça varie ou pas, intégrer pendant un certain temps.*

*Moi je pense qu'il ne fallait pas démarrer sur la lumière blanche. Commencer par un truc simple : Laser par exemple.*

*Connaître les caractéristiques de ses trous/fentes. On a vu que ça marchait bien mais il est indispensable d'être quantitatif en docteur (par exemple taille d'interfrange)*

*Très bien l'animation.*

*Il fallait faire le calcul il a été fait. Préciser les incertitudes, nécessaire pour les docteurs.*

*Toute la discussion sur interféromètre division du front d'onde et d'amplitude intéressante mais pas assez bien traitée. Elle n'est pas indispensable ici.*

*Quand on discute les sources étendues, il faut parler du brouillage. Expliquer pourquoi c'est différent.*

*En fait, la discussion sur les sources étendue est quasiment hors sujet pour la leçon interférométrie à 2 ondes. Quand on parle de brouillage avec une source étendue, on décompose la source en plein de sources indépendantes donc en beaucoup plus que 2. . En tout cas, la source étendue n'est pas la chose plus importante à discuter en 30 mn dans le cadre de cette leçon.*

*La manip lumière blanche assez casse-gueule et là en l'occurrence pas convaincue que ce qu'on ait regardé ce soit vraiment ce qu'on pensait. Plusieurs choses ont été mélangées dans cette expérience : lumière blanche donc un interfrange par longueur d'onde et donc franges blanches au centre, puis irisées, puis brouillage. L'agrandissement de la fente mène à la notion de cohérence ce spatiale. On mélange là les notions de cohérence spatiale et temporelle/spectrale. Ce n'est pas une bonne idée. Dans cette leçon compte tenu du temps imparti, il vaut mieux se limiter à la cohérence temporelle.*

*Bien expliquer les dispositifs et les justifier. En docteur, il est indispensable de faire des mesures, comme en montage. Par exemple ; interfrange, pour une source laser et différentes fentes d'Young*

## Un plan possible

Conditions pour observer des interférences sur la polarisation, la fréquence

Calcul des interférences à deux ondes planes,

Notion de cohérence temporelle

Différence de marche, champ d'interférences, contraste...

Suivant le système interférentiel choisi discuter de la forme des franges (sources alignées perpendiculaires au plan d'observation ou parallèle au plan d'observation).

Calcul de l'interfrange,

Manip docteurs ou pas : fentes d'Young en éclairage laser (plus visible et les sources associées à chacune des fentes sont bien cohérentes)