

MP08 - Interférences lumineuses

Rafael Canonge*, Tommy Kopp†, Charles Mazuet‡, Luc Pourque§

1 Introduction

Le principe d'**interférences lumineuses** est né en même temps que la conception d'optique ondulatoire. Les premières lois de l'optique géométrique sont connues depuis l'antiquité, mais ce n'est qu'en 1801, devant la *Royal Society* que Thomas Young présente pour la première fois un dispositif d'interférences lumineuses basé sur une analogie avec les interférences sonores. Le phénomène n'est pas trivial et pourtant observable autour de nous. Thomas Young tentait alors d'expliquer les irisations observées sur des surfaces striées. On observe aussi le phénomène sur des bulles de savons qui paraissent colorées. Dans la nature, la couleur de nombreux insectes est due à un phénomène d'interférences lumineuses : les ailes du papillon Morpho sont recouvertes d'écaillés transparentes et pourtant c'est une couleur bleu-vert de ses ailes que nous percevons.

Ce montage va donc permettre d'illustrer le phénomène d'interférences lumineuses pour comprendre le phénomène physique observé dans les exemples cités juste avant. Nous allons donc commencer par le commencement : le point de départ de l'optique ondulatoire : l'expérience des fentes de Young.

2 Bibliographie

- Pérez, Optique, pp.310 et 337
- ALD p.218
- Taillet (mémento sciences) Optique Ondulatoire, p.57
- Houard, pp.197 et 208
- Spectre cannelé : <https://docplayer.fr/18298462-E-application-de-la-spectrometrie-a-l-etude-des-c.html>
- Interférences Morpho : https://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9782287094071-c1.pdf?SGWID=0-0-45-963418-p173822487

3 Objectifs pédagogiques du MP

- **Revenir** sur les expériences historiques qui ont permis de construire le modèle ondulatoire de la lumière au XIX^e siècle.
- **Illustrer** le phénomène d'interférences lumineuses et vérifier ses propriétés.
- **Aborder** la notion de cohérence de la source.
- **Remonter** aux caractéristiques de la source émettrice de lumière.
- **Expliquer** des phénomènes simples observés tous les jours.

*canonge.rafael@hotmail.fr

†tom.kopp1@laposte.net

‡charles.mazuet@gmail.com

§luc.pourque@outlook.fr

4 Proposition de plan

4.1 Division du front d'onde : le dispositif des fentes de Young (1801)

4.1.1 Source de lumière ponctuelle

- La source est **spatialement cohérente**.
- La **formule d'interférences à 2 ondes** donne :

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

- En prenant en compte la **diffraction (conditions de Fraunhofer)**, on a :

$$I(M) = I_0 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi y e}{\lambda f_2} \right) \times \cos^2 \left(\frac{\pi y a}{\lambda f_2} \right) \quad (4.1)$$

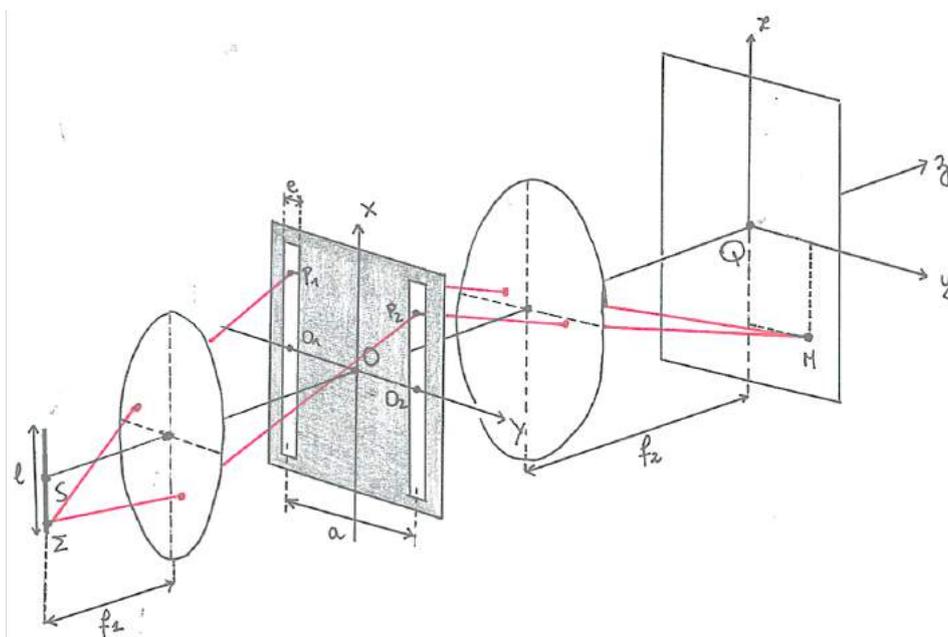


FIGURE 1 – Montage des fentes d'Young

- Les focales ont été mesurées au préalable avec la méthode de Bessel. On a $f_1 = 14,9$ cm et $f_2 = 14,7$ cm.
- La longueur d'onde de chaque filtre a été mesurée avec un **spectromètre** :

$\lambda_{theorique}$ (nm)	436	470	532	546	589	633
λ_{mesure} (nm)	440	469	529	549	586	630
d λ (nm)	7	8	9	10	9	10

- On obtient les figures d'interférence suivantes :

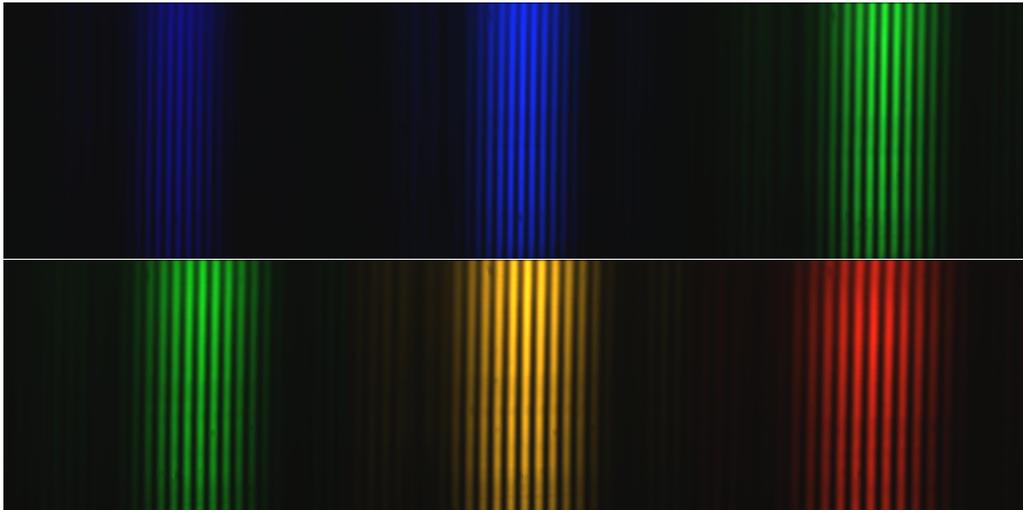
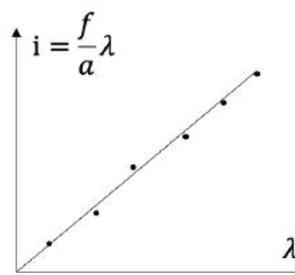


FIGURE 2 – Figures d'interférences de fentes de Young

- On mesure l'**interfrange** $i = \frac{\lambda f_2}{a}$ pour plusieurs longueurs d'onde λ avec le carrousel de filtres.
- On remonte à l'espacement entre les fentes de Young :

$$a = \dots \pm \dots \mu m$$
- Le calcul d'incertitudes se fait à partir de la pente p :

$$p = \frac{f_2}{a} \rightarrow \frac{\delta(a)}{a} = \sqrt{\left(\frac{-\delta(p)}{p}\right)^2 + \left(\frac{\delta(f_2)}{f_2}\right)^2}$$



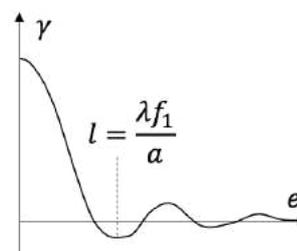
4.1.2 Source de lumière étendue

- La source **n'est plus cohérente**.
- La figure d'interférence a une intensité qui obéit à la relation :

$$I(M) = 2I_0 \left(1 + \text{sinc} \left(\frac{\pi a l}{\lambda f_1} \right) \cos \left(\frac{2\pi a x}{\lambda f_2} \right) \right)$$

- **Théorème de Van Cittert & Zernike** sur le contraste :

$$\gamma = \left\| \text{sinc} \left(\frac{\pi a l}{\lambda f_1} \right) \right\|$$



- **Inversion de visibilité** pour $l = \frac{\lambda f_1}{a}$ (longueur de cohérence spatiale)

4.2 Division d'amplitude avec l'interféromètre de Michelson (1880s)

4.2.1 Incohérence temporelle : le doublet du sodium

- Le **spectre du sodium** contient deux bandes d'émission très proche dans la couleur orange : on parle du **doublet du sodium**. Il est difficile de les distinguer à l'aide d'un prisme. La longueur d'onde moyenne de ces deux longueurs d'onde est de $\lambda_m = 589,3 \pm 0,1$ nm.

- On note $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ la différence de longueur d'onde entre les deux bandes. On suppose de plus que $\Delta\lambda \ll \lambda_m$, hypothèse justifiée compte tenu des observations faites au prisme où les deux bandes apparaissent comme deux traits très proches.
- Pour chaque longueur d'onde λ_1 et λ_2 , on peut écrire la formule d'interférences à deux ondes :

$$I_1(M) = 2I_0 \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda_1} \right) \right) \quad \text{et} \quad I_2(M) = 2I_0 \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda_2} \right) \right)$$

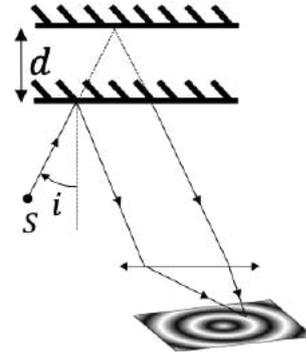
- La source étant **incohérente** (temporellement), on additionne les intensités $I_1(M)$ et $I_2(M)$:

$$I(M) = 4I_0 \left(1 + \cos \left(\frac{4\pi\delta}{\lambda_m} \right) \cos \left(2\pi\delta \frac{\Delta\lambda}{\lambda_m^2} \right) \right)$$

- On utilise le Michelson en configuration **lame d'air** : les deux miroirs sont parallèles et les franges sont envoyées à l'infini.
- La **différence de marche** d'un Michelson en configuration **lame d'air** vaut :

$$\delta = 2d \cos(i)$$

- Le schéma équivalent du Michelson permet de retrouver cette formule.
- On observe à l'écran des **anneaux d'Haidinger**.
- En tradant le miroir, on observe des **brouillages** lorsque $\cos \left(2\pi\delta \frac{\Delta\lambda}{\lambda_m^2} \right) \approx 0$.

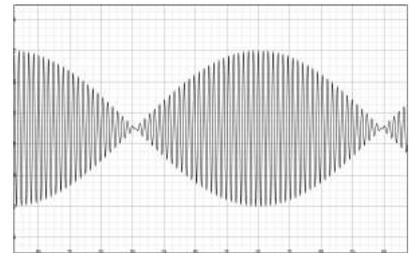


- On repère les brouillages par un entier k tel que :

$$2\pi\delta \frac{\Delta\lambda}{\lambda_m^2} = \frac{\pi}{2} + k\pi$$

- En **incidence normale**, on peut donc tracer δ en fonction de k :

$$\delta = \frac{1}{4} \frac{\lambda_m^2}{\Delta\lambda} + \frac{\lambda_m^2}{2\Delta\lambda} \times k$$



- On mesure :

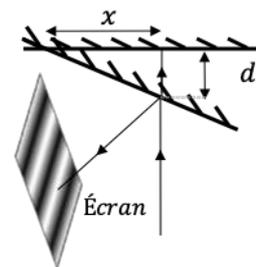
$$\frac{\Delta\lambda = \dots \pm \dots \text{nm}}{(\Delta\lambda_{tab} = 0,597 \text{ nm})}$$

- Mesure de l'incertitude :

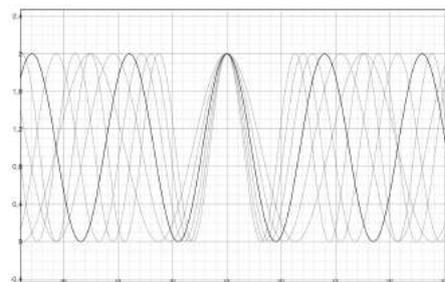
$$\frac{\delta(\Delta\lambda)}{\Delta\lambda} = \sqrt{\left(2 \frac{\delta(\lambda_m)}{\lambda_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta a}{a} \right)^2}$$

4.2.2 Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre

- On utilise le Michelson dans la configuration **coïn d'air** éclairé avec une lampe quartz-iode.
- Le schéma équivalent du Michelson en coïn d'air permet de retrouver l'expression de la différence de marche entre deux rayons lumineux $\delta = 2\alpha x$ avec α l'angle d'inclinaison du miroir \mathcal{M}_2 et x la distance du rayon envisagé au contact optique.
- On observe des **franges de Fizeau**.
- On insère une **lame de verre** d'indice n et d'épaisseur e sur l'un des chemins des rayons lumineux. On observe à l'oeil nu un **blanc d'ordre supérieur**.



- On rajoute un spectromètre à la place de l'écran (logiciel Ava-soft).
On observe un **spectre cannelé**, où certaines longueurs d'ondes sont manquantes.
- On peut retrouver ce phénomène en rajoutant un filtre de couleur devant le Michelson. Les franges réapparaissent.



- On note λ les longueurs d'onde qui sont absentes du spectre (telles que $\cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) = -1$). Elles vérifient la relation :

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{1}{2} - p$$

avec p un entier et $\delta = 2e(n-1)$ la différence de différence de marche introduite par l'insertion de la lame.

- On peut donc tracer une droite :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4e(n-1)} - \frac{1}{2e(n-1)}p$$

- ...et calculer l'incertitude de mesure de e en fonction de la pente $\alpha = -\frac{1}{2e(n-1)}$:

$$\Delta(e) = \sqrt{\left(-\frac{d\alpha}{2(n-1)\alpha^2}\right)^2 + \left(\frac{dn}{2\alpha(n-1)^2}\right)^2}$$

- On mesure :

$$e = \dots \pm \dots \mu\text{m}$$

5 Ouvertures possibles, prolongements et conclusion de la leçon

La présentation de ce montage permet de comprendre le phénomène d'interférences lumineuses en l'illustrant à l'aide d'expériences historiques qui ont été réalisées au XIX^e siècle. La couleur du Morpho a été un débat entre Michelson partisan d'une couleur pigmentaire et Rayleigh qui proposait une couleur interférentielle, théorie qui l'a finalement emporté avec l'apparition des microscopes électroniques. Dans chaque situation on a vu que la nature de la source conditionnait l'observation d'interférences. Notre oeil n'étant pas capable de séparer les couleurs d'un blanc d'ordre supérieur, il faut travailler avec une source monochromatique pour bien les observer, c'est ce qu'on a appelé la cohérence temporelle. De même une source étendue localise les interférences, pour bien les observer on a vu qu'une source ponctuelle était préférable, c'est ce que l'on a appelé la cohérence spatiale.

6 Subtilités de la leçon et points disciplinaire essentiels

- L'observation de la figure d'interférence des fentes de Young nécessite un alignement relativement propre. Ce n'est pas évident du premier coup.
- Il faut bien choisir la fente qu'on peut utiliser. Toutes les fentes ne ferment pas bien et la caméra sature très vite en intensité.
- Se placer dans le cas de la diffraction de Fraunhofer et obtenir la figure d'interférences théorique est plus dur qu'il n'y paraît.
- Obtenir l'inversion de contraste n'est pas intuitif non plus...
- Le Michelson doit pouvoir être réglé les yeux fermés. Impossible d'utiliser 2 Michelson (lame d'air/coin d'air) il faut nous voir l'utiliser et passer d'une configuration à l'autre.
- La mesure de l'épaisseur d'une lame de verre au vernier ne sera pas plus précise qu'avec un micromètre. Le spectromètre est plus précis mais plus long. S'il n'est pas précis, il faut se limiter à des épaisseurs de lame de 10 μm , sinon il y a trop de cannelure d'amplitudes très faibles et difficiles à distinguer.

7 Remarques

- Ne pas parler "des scientifiques" ou "des gens" en intro.
- Ne pas faire une intro historique. Remplacer par une expérience introductive : la bulle de savon.
- Bien décrire les manipulations.
- Il faut trouver un critère quantifié pour l'évaluation de l'incertitude sur la longueur d'onde du carousel de filtre.
- Le a trouvé est de $413 \mu\text{m}$ alors qu'il est indiqué $500 \mu\text{m}$ sur les fentes. C'est possible que l'indication soit fausse. Les mesures ont donné trois fois des résultats sensiblement identiques aux alentours de $413 \mu\text{m}$.
- Il faut indiquer d'où viennent les valeurs tabulées présentées.
- Il faut faire l'expérience avec le changement de la taille de la fente source et pourquoi pas calculer le contraste pour différentes valeurs de l'ouverture avec ImageJ.
- Bien préciser que l'on s'affranchit de la cohérence spatiale avec le Michelson.
- Pour la dernière partie...ne pas mesurer une longueur. C'est mieux dans le montage de mesure de longueur.
- On pourrait remonter à l'enveloppe d'une raie du spectre du mercure avec un spectromètre (profil gaussien/lorentzien).
- Pourquoi pas présenter un montage avec un Fabry Perrot à condition de savoir le maîtriser.