

# LP 34 : Interférométrie à division d'amplitude

Louis Heitz et Vincent Brémaud

Lundi 11 janvier 2021



imgflip.com

JAKE-CLARK.TUMBLR

# Sommaire

<b>Rapport du jury</b>	<b>3</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>3</b>
<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>I Théorème de localisation</b>	<b>4</b>
I.1 Notion de cohérence spatiale . . . . .	4
I.2 Théorème de localisation . . . . .	4
I.3 Présentation de l'interféromètre de Michelson . . . . .	5
<b>II Configuration en "lame d'air"</b>	<b>5</b>
II.1 Disposition des miroirs et localisation . . . . .	5
II.2 Figure d'interférence . . . . .	5
II.3 Application à la spectrométrie . . . . .	5
<b>III Configuration en coin d'air</b>	<b>6</b>
III.1 Figure d'interférence et localisation . . . . .	6
III.2 Application à la mesure d'indice optique . . . . .	6
<b>Conclusion</b>	<b>6</b>
<b>A Correction</b>	<b>6</b>
<b>B Commentaires</b>	<b>7</b>
<b>C <math>\langle \text{Titre} \rangle_{T=0}</math> (titre alternatif)</b>	<b>8</b>

Le code couleur utilisé dans ce document est le suivant :

- → Pour des éléments de correction / des questions posées par le correcteur
- Pour les renvois vers la bibliographie
- Pour des remarques diverses des auteurs
- ⚠ Pour des points particulièrement délicats, des erreurs à ne pas commettre
- Pour des liens cliquables

## Rapports du jury

- **2017** : Le candidat doit réfléchir aux conséquences du mode d'éclairage de l'interféromètre (source étendue, faisceau parallèle ou non...).
- **2016** : La distinction entre divisions du front d'onde et d'amplitude doit être précise.

## Bibliographie

- [1] *Champeau, ondes lumineuses* Très utile pour être au clair sur les notions de cohérence, bouquin théorique.
- [2] *Hprépa : optique ondulatoire édition de 2004* Indispensable pour le théorème de localisation, pas mal d'exemples et de d'exercices corrigés
- [3] *Houard : optique expérimentale* Utile pour des idées de manips et des schémas à présenter
- [4] Physique expérimentale ALD et al.
- [5] [Site d'Etienne Thibierge](#) Site expliquant très bien le théorème de localisation

## Introduction

Animation en montrant que l'extension spatiale d'une source induit une perte de contraste pour l'expérience des fentes d'Young. C'est problématique car si on veut gagner en intensité en sortie il faut augmenter le nombre de source ponctuelle, donc avoir une grande source. Avec l'animation, on voit qu'une source de l'ordre du millimètre provoque déjà un brouillage. Comment s'en affranchir ?

## I Théorème de localisation

### I.1 Notion de cohérence spatiale

L'extension spatiale de la source peut induire une perte de contraste: on parle de *cohérence spatiale* de la source.

Comment s'en affranchir pour gagner en intensité sans perdre en contraste ? Quel type d'interféromètre utiliser ?

### I.2 Théorème de localisation

On considère un interféromètre à deux voies. On cherche les points  $M$  tels que  $\delta(S, M) \simeq \delta(S', M)$  pour tout point  $S, S' \in$  source.

En notant  $\vec{u}_1$  et  $\vec{u}_2$  les directions des rayons entrant dans la voie 1 et 2, on montre que :

$$\delta(S, M) - \delta(S', M) \simeq (\vec{u}_2 - \vec{u}_1) \cdot \vec{SS'}$$

C'est un calcul à l'ordre un en la dimension de la source. **Démonstration dans [2] p.79, il y a quelques subtilités. Il faut la lire. Attention à l'édition !**

A quelle condition a-t-on  $\delta(S, M) \simeq \delta(S', M)$

- $(\vec{u}_2 - \vec{u}_1)$  orthogonal à  $\vec{SS'}$  : on ne s'y intéresse pas ici, condition sur la source
- $\vec{u}_2 = \vec{u}_1$  : Les rayons qui interfèrent proviennent du même rayon entrant dans l'interféromètre. Il s'agit d'interféromètres à division d'amplitude.

**Pour un interféromètre à division d'amplitude, éclairé par une source étendue, les interférences sont localisées au voisinage des points où les rayons qui interfèrent proviennent du même rayon entrant dans l'interféromètre.**

On s'affranchir de la cohérence spatiale de la source au prix de la localisation des interférences.

*Remarque :* Lorsque  $\vec{u}_2 \neq \vec{u}_1$  on parle d'interféromètre à division du front d'onde

## I.3 Présentation de l'interféromètre de Michelson

Présenter le principe en live et sur une diapo, avec les faisceaux qui sont séparés et recombinaés, le rôle de la compensatrice, le schéma équivalent du michelson pour le calcul des différences de marche.

Présenter les différents éléments de l'interféromètre.

Il y a deux configurations qu'on va étudier, chacune ayant son intérêt.

## II Configuration en "lame d'air"

### II.1 Disposition des miroirs et localisation

Miroirs équivalents parallèles. On utilise une source étendue avec beaucoup d'angles d'incidence  $i$ . Justifie l'utilisation d'un objectif de microscope après le laser.

Où sont localisées les interférences ? Pour que ce soit issu du même rayon, il faut qu'on regarde à une incidence  $i$  donné, autrement dit, elles sont localisées à l'infini.

Quelle est la figure d'interférence ? Différence de marche dépend géométriquement de l'angle  $i$ , on s'attend à des anneaux d'égale inclinaison.

### II.2 Figure d'interférence

Calcul de la différence de marche. Faire le schéma équivalent au tableau. Appliquer principe du retour inverse + théorème de Malus.

On trouve après calcul [3]

$$\delta = 2n_0 \cos(i)$$

où  $n_0$  est l'indice de l'air

*J'avais fait un calcul du rayon des anneaux, montrant qu'ils se rapprochent lorsqu'on s'éloigne du centre, mais ce n'est pas à propos, pas la peine de le faire, c'est une perte de temps*

### II.3 Application à la spectrométrie

Faire expérience avec doublet du sodium, montrer l'existence des anticoincidence.

Faire schéma du spectre du sodium, introduire  $\Delta\lambda$  et  $\lambda_m$ . Selon le temps qu'il reste, développer ou non le calcul. Mentionner que les sources sont incohérentes.

On trouve : [3]

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

Tracer  $I(M)$  et montrer qu'il y a des endroits où le contraste est nul, c'est ici qu'on a les anticoincidence. On regarde à  $i = 0$ , donc  $\delta = 2e \lambda_m$ . On montre alors qu'entre deux anticoincidence on a déplacé le miroir de

$$\Delta e = \frac{\lambda_m^2}{2\Delta\lambda}$$

On a directement accès à  $\Delta\lambda$ . Dans la biblio on trouve [4]

$$\Delta\lambda = (0.597 \pm 0.002) \text{ nm}$$

S'extasier devant la précision de la mesure, c'est quand même fou de pouvoir faire ça avec un appareil disponible en salle de TP !

*Je me suis arrêté ici mais en grattant du temps sur mon intro qui était clairement trop longue (je n'ai pas tout mis ici), on peut faire le coin d'air en conclusion / troisième partie au tableau ou sur transparent*

**Transition :** On peut mesurer des choses très fines, notamment des variations d'indice optique, on peut le faire avec l'autre configuration de manière plus simple.

## III Configuration en coin d'air

### III.1 Figure d'interférence et localisation

Il s'agit de franges d'égale épaisseur, localisées au niveau des miroirs (là où les rayons se croisent).

### III.2 Application à la mesure d'indice optique

*Pas faisable en live je pense, mais sur diapo*

On place une cuve de longueur  $\ell$  dans un des bras, avec une pompe qui permet de contrôler la pression, cela fait varier l'indice optique. On ajoute alors une différence de marche  $\delta' = 2(n - n_0)\ell$ . On peut mesurer des variations de  $n$  de l'ordre de  $10^{-5}$  (d'après [3]). C'est fou !

## Conclusion

Intérêt de l'interférométrie à division d'amplitude est de s'affranchir de la cohérence spatiale de la source, on a donc directement accès à la cohérence temporelle de celle-ci. On peut donc en particulier étudier la densité spectrale de puissance de la source, le lien est fait avec le théorème de Wiener-Kitchine. [1]

## A Correction

→ **Différence Fabry-Perot/Michelson :** FB interférences à N ondes, Michelson à 2 ondes, donc interférogramme beaucoup plus piqué autour de  $\delta = p\lambda$ . On a une meilleure résolution.

→ **Autres interféromètres à division d'amplitude ?** Mach-Zender et Sagnac. Sagnac sert à mesurer des vitesses angulaires de rotation (cf Houard)

→ **Comment mesurer  $\lambda_m$  avec le Michelson ?** On se place en coin d'air, on trace I en fonction de  $\delta$  on en déduit  $\lambda_m$

- Quel matériau pour la compensatrice ? Même matériau que la séparatrice pour avec la même variation  $n(\lambda)$
- Fabrication lame semi-réfléchissante ? Traitement de surface, petite couche de diélectrique pour changer coefficient de réflexion/transmission
- Est-ce que la formule du théorème de localisation est exacte ? Non, ordre 1 en l'étendue de la source. En pratique, avec les sources qu'on utilise en TP ça suffit
- Exemple où  $(\vec{u}_2 - \vec{u}_1)$  orthogonal à  $\vec{SS}'$  ? Fentes d'Young avec une fente source parallèle aux fentes des sources secondaires.
- Eclairage de l'instrument en lame d'air/coin d'air ? En coin d'air, on veut beaucoup d'incidences, donc on place un condenseur pour avoir beaucoup d'angles. En lame d'air, on se place en incidence normale, on utilise un laser épuré.
- Nombre d'anneau limité par quoi ? Limité par la taille des miroirs qui limite l'incidence maximale
- Comment vérifier que les anneaux sont bien localisés à l'infini en lame d'air ? On place son œil en sortie de l'interféromètre et en bougeant la tête on voit toujours les anneaux, ça veut dire qu'on n'accomode pas.
- Que se passe-t-il en lumière blanche en coin/lame d'air ? En coin d'air la différence de marche est trop grande, on ne voit pas les anneaux (problème de cohérence temporelle :  $\delta > L_c$ ). En coin d'air on a une différence de marche plus faible : on observe les teintes de Newton.
- Origine élargissement spectral ? collisions entre émetteurs et effet Doppler. Temps de collision  $\tau$  induit une largeur  $1/\tau$  en fréquence.
- Longueur cohérence lampe sodium ? Lumière blanche ? Laser ? Sodium : millimètre/centimètre, blanche : micromètre, laser : mètre
- Pourquoi le laser est-il très bien résolu en fréquence ? On place une cavité avec un gros coefficient de réflexion qui sélectionne des modes, comme pour le Fabry-Perot (interférences à N ondes)
- Que se passe-t-il si on change un miroir par un miroir sphérique ? On observe des franges d'égale épaisseur, la différence de marche dépendant de l'endroit où on tape sur le miroir. Elles sont localisées sur les miroirs.
- Théorème de Wiener-Kitchine ? Relie la densité spectrale de puissance à la fonction d'auto corrélation. En pratique l'interférogramme est l'image de la fonction d'auto-corrélation avec  $\delta = c\tau$ . Donc en en faisant la TF on obtient la densité spectrale de puissance.

## B Commentaires

Cette leçon doit vraiment s'envisager comme un TP-cours sur le Michelson. Bien rappeler à chaque fois les conditions d'éclairement et où sont localisées les interférences. Insister sur le fait qu'on s'affranchit de la cohérence spatiale de la source. Bref, faire le lien avec le théorème de localisation tout au long de la leçon.

## C < Titre ><sub>T=0</sub> (titre alternatif)

Une leçon possiblement plus axée sur la notion de cohérence temporelle. On pourrait alors la placer niveau L3, considérer le Michelson comme acquis, et parler de TF, de Wiener-Kitchine, voir comment on fait en pratique.