

# TP2 INTERFEROMETRE DE MICHELSON

## PRESENTATION

### Sujet

Utilisation de l'interféromètre de Michelson pour réaliser des interférences d'épaisseur (en configuration « coin d'air ») et des interférences d'inclinaison (en configuration « lame d'air »).

### Objectifs

- Comprendre le fonctionnement d'un système optique complexe.
- Savoir réaliser un protocole de réglage en contrôlant les étapes successives.
- Prendre conscience de la très forte sensibilité des méthodes interférométriques.

### Consignes et sécurité

- Utiliser la barre des tâches pour accéder aux logiciels utiles.
- **Les fichiers utiles SERONT exclusivement sauvegardés dans « E:/MesDocs »**
- **Les fichiers de documentations et de simulation sont dans « E:/MesDocs »**
- La lampe spectrale chauffée en 5 mn environ. Elle ne sera éteinte QU'A LA FIN des manipulations de TP. Le cas échéant, éclairer vers le mur pour ne pas éblouir.

### Plan du TP

- 1- Principe de l'interféromètre de Michelson p 2
- 2- Réglages préliminaires du Michelson p 4
- 3- Configuration du Michelson « en coin d'air » p 4
- 4- Configuration du Michelson « en lame d'air » p 5

#### Annexes :

**Version en couleur accessible dans E:\MesDocs**

A1- Liste du matériel utilisé p 9

## 0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP

La documentation et le texte du TP1 en couleur **avec ses annexes complètes** sont disponibles sur la page des TP d'optique S3 accessible par <http://mpsn.free.fr>

- Lire attentivement le texte de TP au moins deux fois.
- Revoir le chapitre sur les « Interférences à 2 ondes »
- Revoir le début du chapitre sur les « Interférences sur lames minces ».
- Préparer les questions Q4.3a et b, Q4.4a et b

## 1- PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRE DE MICHELSON

La configuration du « Michelson » est probablement la configuration d'interféromètre à deux ondes la plus célèbre et la plus féconde. Elle est toujours très utilisée ; actuellement les plus grands ont des distances entre « miroirs » en milliers de km (radioastronomie), les plus petits sont intégrés à l'échelle micro et millimétrique dans des capteurs MOEMS (par ex. pour la métrologie dimensionnelle).

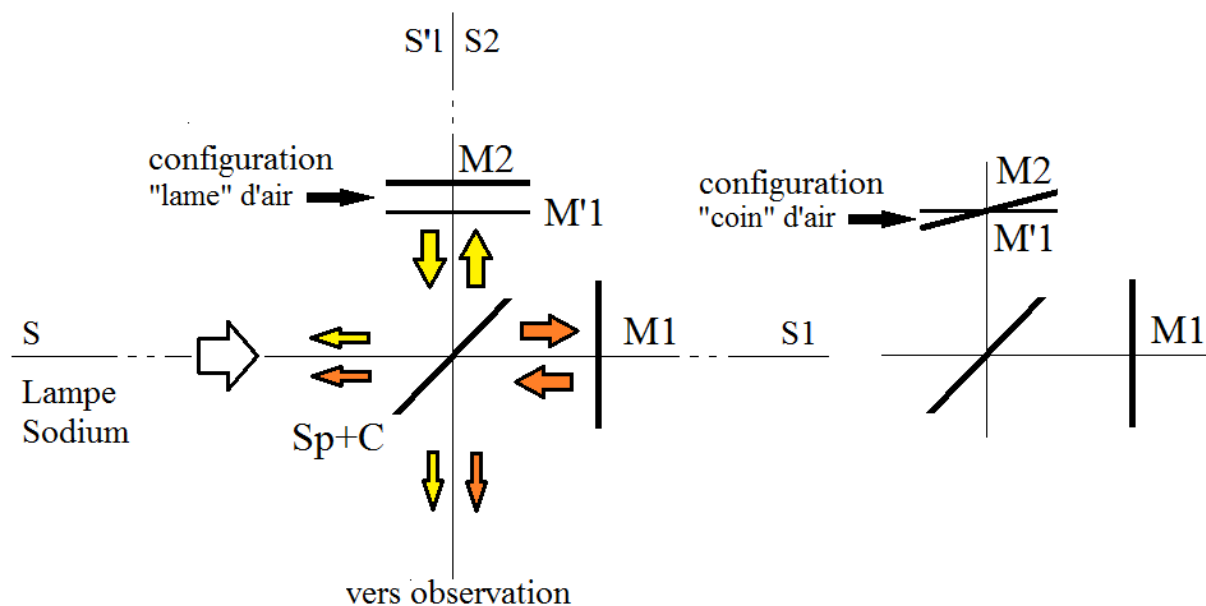
On a montré dans le Cours que pour garantir que les deux ondes interférentes sont bien **isochromes** et **cohérentes** spatialement et temporellement, le plus simple est de **dédoubler en amplitude** une même onde initiale.

Ainsi le faisceau de lumière jaune issu d'une lampe spectrale au sodium est dédoublé en deux faisceaux de flux équivalents par une lame séparatrice  $S_p$  semi-réfléchissante ( $T = R = 50\%$ ).

Les deux miroirs  $M1$  et  $M2$  renvoient toute la lumière reçue de sorte que dans la direction de sortie, l'observateur reçoit deux faisceaux issus de ces deux miroirs ; ils sont d'amplitudes équivalentes et superposés spatialement.

Le miroir  $M2$  est en position fixe, le miroir  $M1$  est monté sur un « chariot » que l'on peut translater le long de la direction initiale. Les miroirs sont réglables finement en orientation par des vis.

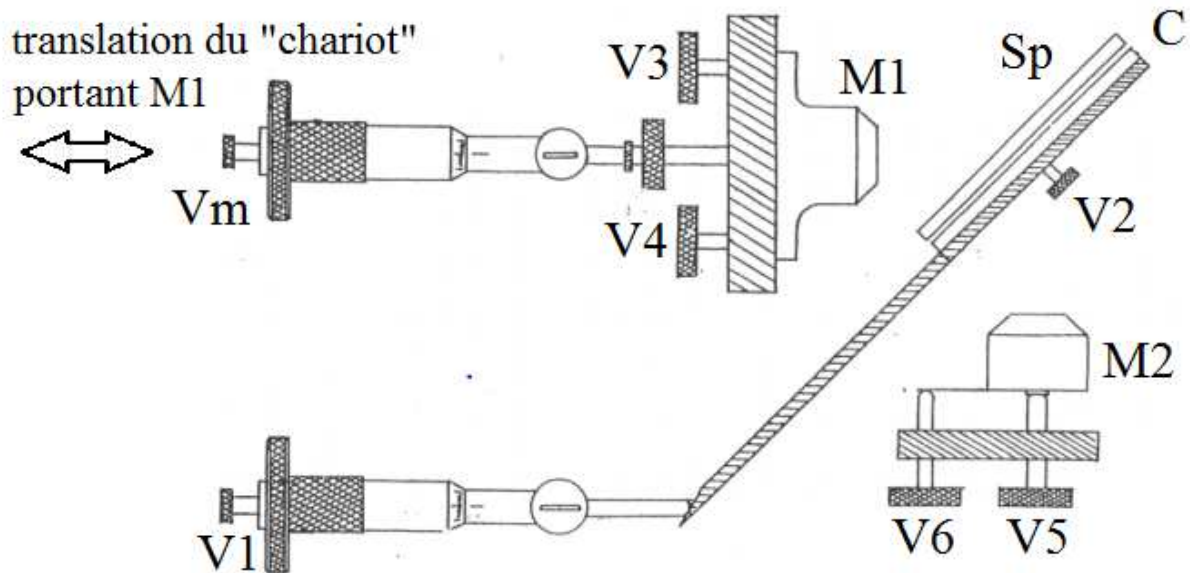
« L'astuce » du Michelson est la position à  $45^\circ$  de la lame séparatrice : l'observateur constate ainsi en regardant dans l'interféromètre qu'il « voit » les deux images de la lampe source  $S$  créées par chacun des miroirs. L'un des faisceaux semble provenir de  $S2$  situé en arrière de  $M2$  (image virtuelle de  $S$  par  $S_p+M2$ ). L'autre faisceau semble provenir de  $S'1$  (image virtuelle de  $S$  par  $S_p+M'1$ ). Tout se passe en effet comme si on utilisait un miroir  $M'1$  symétrique de  $M1$  par rapport à la lame :  $S'1$  est alors symétrique de  $S1$  et situé en arrière de  $M'1$ . La position relative de  $M'1$  par rapport à  $M2$  se règle par la translation du chariot portant  $M1$ .



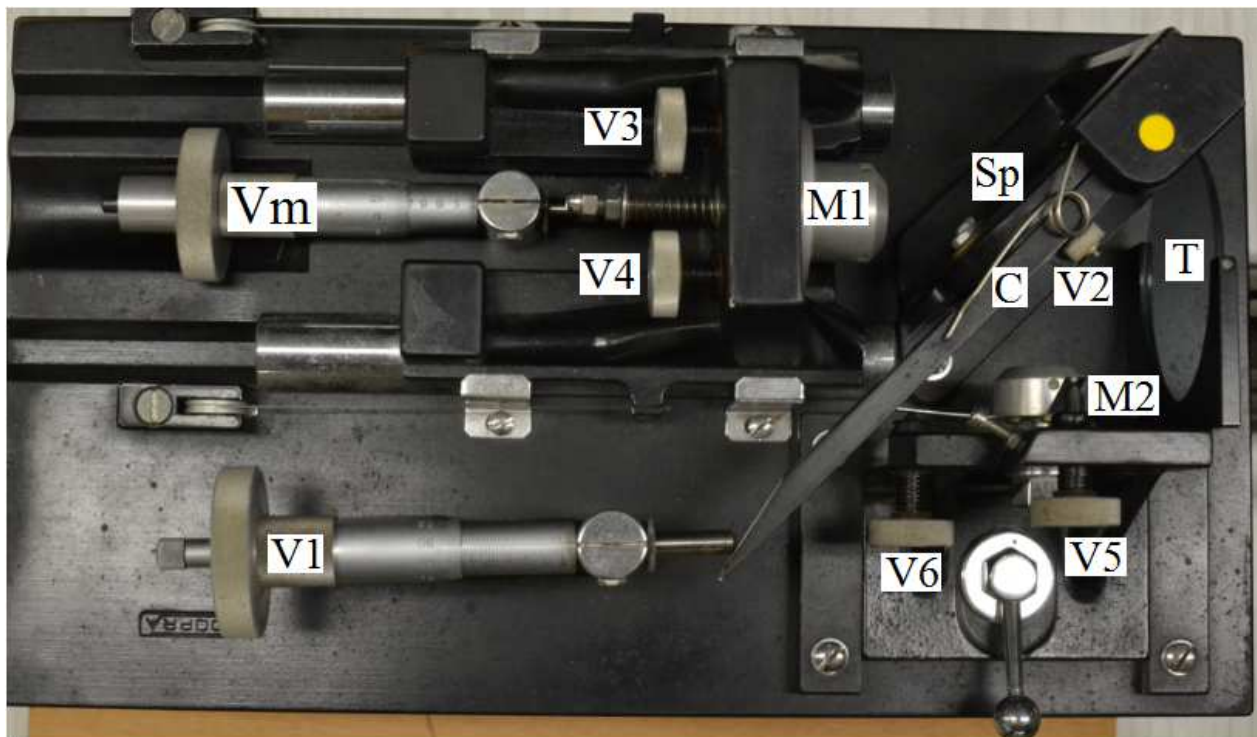
On commence le réglage en symétrisant le plus possible les deux miroirs par rapport à la lame séparatrice :  $M'1$  est alors plus ou moins superposé à  $M2$ .

La première configuration obtenue lorsqu'on cherche à rendre les miroirs bien parallèles, est celle « du coin d'air » (cf. Cours et TD). On constatera que l'angle résiduel  $\alpha$  est très petit lorsqu'on observe quelques franges parallèles sur l'écran d'observation.

Lorsque l'angle est bien annulé, on obtient la configuration « en lame d'air » dont l'épaisseur constante est réglée par le déplacement du chariot portant  $M1$ . On observera des franges en formes d'anneaux concentriques.



D'après un dessin de S. Caroff / M. Saillard



L'interféromètre de Michelson vu de dessus

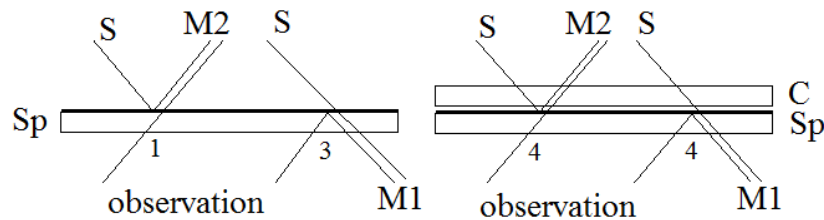
Sp est la **lame séparatrice** semi-réfléchissante,  
 C est la **lame compensatrice**,  
 V1 et V2 permettent le réglage préliminaire de parallélisme entre Sp et C.

V3 et V4 permettent de régler « grossièrement » l'orientation du miroir M1,  
 V5 et V6 permettent de finir le réglage « fin » de l'orientation de M2,  
 ( pour le plus souvent assurer le parallélisme de M'1 et M2 « en lame d'air »).

T est un filtre thermique en entrée du Michelson, en cas d'utilisation d'une lampe « blanche » type halogène de forte puissance qui « chauffe » trop : cela créerait un peu de dilation ou de mouvement d'air dans l'appareil qui est très sensible (le filtre coupe les infrarouges).

## 2- REGLAGES PRELIMINAIRES DU MICHELSON

### 2.1- Réglage du parallélisme des lames séparatrice/compensatrice (5 mn)

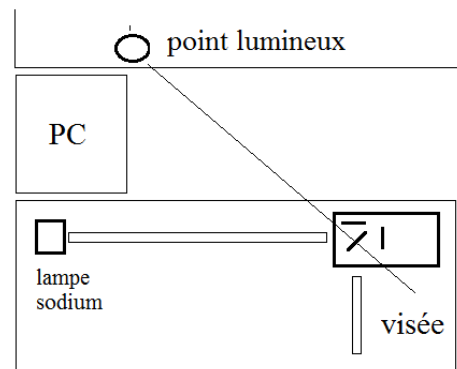


L'effet « miroir » est dû à un dépôt métallique sur une face de la lame séparatrice. Seule, cette lame créerait une différence de marche entre les deux faisceaux (à gauche : 1 et 3 traversées de lames !).

La lame compensatrice (identique à la séparatrice) assure que chacun des deux faisceaux observés en sortie suit un même chemin optique (à droite : 4 traversées de lames). Une **bonne compensation** implique que Sp et C soient bien parallèles.

*Q2.1- Réglage du parallélisme Sp et C :*

- Observer une source ponctuelle placée sur l'autre table en la visant perpendiculairement à travers les deux lames Sp+C.
- On voit une image principale et plusieurs images secondaires : régler V1 et V2 pour bien superposer les deux points les plus lumineux. Noter le réglage de V1.
- **Faire constater à l'enseignant** puis éteindre la source ponctuelle.



### 2.2- Préréglages des deux miroirs (5 mn max)

- **Allumer la lampe sodium** (durée de préchauffage 5 mn) et la placer en bout de banc optique.

*Q2.2a- Préréglages des vis des miroirs : régler les vis V3, V4, V5 et V6 à mi-course.*

*Q2.2b- Réglages approchés des miroirs : en regardant le Michelson par dessus, régler Vm pour que les deux miroirs M1 et M2 paraissent bien symétriques par rapport à la séparatrice (Vm est proche de la position 20.0 mm).*

## 3- CONFIGURATION DU MICHELSON « EN COIN D'AIR »

### 3.1- Obtention des franges du « coin d'air »

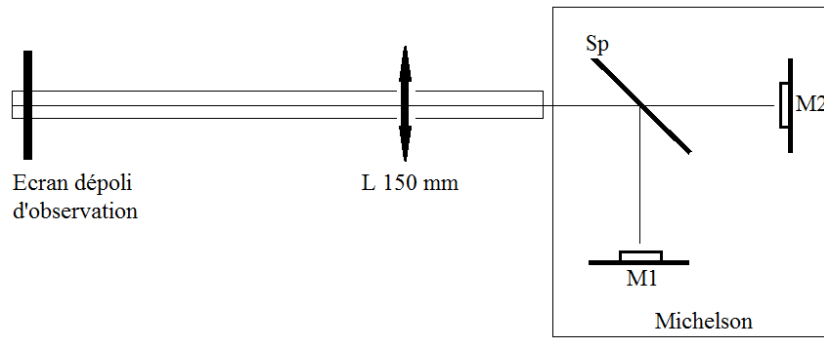
- La lampe Sodium est au bout du banc. Elle éclaire en direct (sans lentille) : les lumières entrant dans le Michelson sont ainsi quasi-parallèles.
- Le petit banc d'observation ne porte ni lentille, ni écran.
- Se placer dans l'axe du banc d'observation et regarder à l'œil « dans l'interféromètre ». On voit deux « rectangles jaunes » qui sont les images du tube de la lampe S par les miroirs M'1 et M2.

*Q3.1- « Jouer » doucement sur les vis V3 et V4 pour déplacer une image « en crabe » et faire se superposer les deux images. Lorsqu'elles sont bien superposées, on voit apparaître des franges localisées vers le miroir M2. Si après 3 mn d'essai, il n'y avait pas encore de franges, alors tourner un peu Vm (il y a des positions sans contraste !) Sinon demander à l'enseignant.*

### 3.2- Observation des franges parallèles à l'arête du « coin d'air »

Le comportement de ce coin d'air a été étudié dans le chapitre « Interférences à 2 ondes ». Il est analogue à celui étudié dans la partie 4 : les résultats obtenus en TD sont valables ici.

- Les franges obtenues sont parallèles à l'arête du « coin d'air », elles correspondent à des lieux d'égalité d'épaisseurs d'air.
- Les franges sont **localisées** sur la surface du miroir M2 (on les voit en regardant directement M2).
- L'interfrange  $i$  est donné par l'expression  $i = \lambda_0 / 2\alpha$  où  $\alpha$  est le très petit angle entre M'1 et M2 et  $\lambda_0 = 589 \text{ nm}$  est la longueur d'onde dans le vide de la lumière jaune du sodium.



- Pour faciliter les observations, placer l'écran dépoli en bout de banc court ; serrer son cavalier.
- Placer une lentille de focale 150 mm sur le banc court.

**Réglage de l'interfrange :**

- Positionner la lentille L « en projection » et former sur le dépoli l'image nette et agrandie des franges présentes à la surface de M2.
- Reprendre le réglage des vis « rapides » V3 et V4 de M1 puis des vis « lentes » V5 et V6 de M2 afin d'obtenir 5 franges noires sur l'écran.

**Faire constater à l'enseignant.**

*Q3.2- Calcul de l'angle  $\alpha$  pour ce réglage*

- Mesurer rapidement au régle, directement sur l'écran, le diamètre de l'image d'un miroir, puis la longueur correspondant à 4 interfranges.
- Sachant que le miroir a un diamètre de 20 mm, estimer la valeur en mm d'un interfrange  $i$ .
- En déduire un ordre de grandeur de l'angle  $\alpha$  présent entre M'1 et M2 pour ce réglage. Commenter.

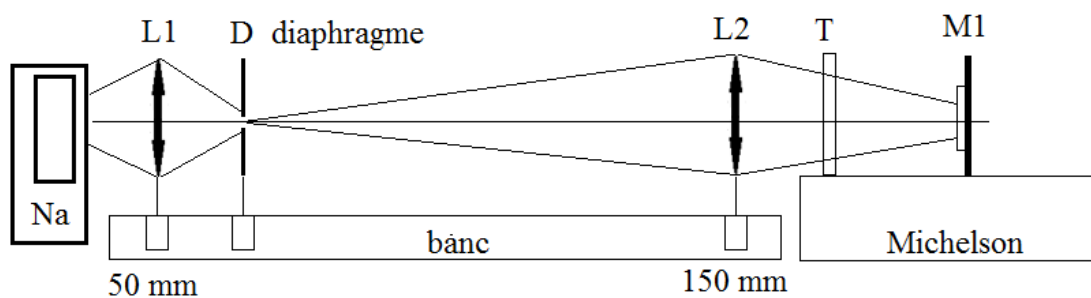


**4- CONFIGURATION DU MICHELSON « EN LAME D'AIR »**

**4.1- Obtention du parallélisme des miroirs M'1 et M2**

*Q4.1a- A l'aide des vis « lentes » V5 et V6 de M2, élargir l'interfrange jusqu'à ne plus visualiser de franges noires. Pourquoi les miroirs M'1 et M2 sont-ils alors quasi-parallèles ?*

**4.2- Obtention d'un éclairage conique sur M1 (donc aussi sur M'1 et M2)**



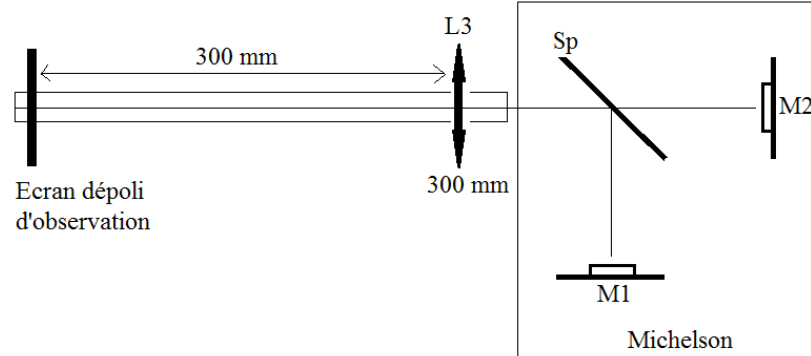
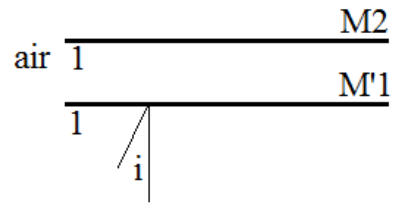
- Placer la lentille convergente L1 ( $f = 50$  mm) en bout de banc. Régler l'ouverture du diaphragme D à environ 1 cm. Positionner L1 et D pour que L1 forme un image lumineuse de S sur l'arrière du diaphragme D.
- Déplacer la lentille L2 ( $f = 150$  mm) près du verre thermique T du Michelson. Régler et contrôler avec un morceau de papier que les faisceaux arrivent bien conique sur M1 et M2.

*Q4.2- Que doit-on observer sur les deux miroirs lorsque le réglage est correct ? Faire constater à l'enseignant.*

### 4.3- Obtention des anneaux d'égalé inclinaison

Le comportement d'une « lame d'air » à faces parallèles a été étudié dans le chapitre « Interférences sur lames minces ».

Q4.3a- Dessiner les premiers rayons réfléchis sur le miroir M2 et le pseudo-miroir M'1. Montrer que les interférences sont localisées à l'infini.



Q4.3b- Placer la lentille L ( $f=300$  mm) en sortie du Michelson sur le banc court. Que fait-on en plaçant la lentille à 300 mm de l'écran dépoli ?

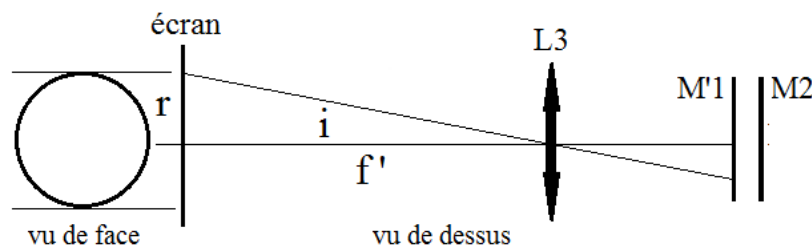
On observe alors des anneaux d'égalé inclinaison. On règle la figure avec la vis Vm de « chariotage » : « charioter » revient à changer l'épaisseur  $e$  de la lame d'air.

### 4.4- Modèle théorique pour la position des anneaux brillants

L'étude théorique du Cours indique que pour le cas d'une lame d'air ( $n = 1$ ), la différence de marche entre deux rayons réfléchis pour l'angle d'incidence  $i$  est  $\delta = 2e \cos i$  (avec  $n = 1$  pour de l'air et  $e$  épaisseur de la lame d'air réglable par la translation de M1).

La distribution d'éclairement sur l'écran est alors  $E = 2E_0 [ 1 + \cos(2\pi \delta / \lambda_0) ]$

Q4.4a- Montrer qu'un anneau brillant correspond à une valeur entière de l'ordre  $p(M) = 2e \cos i / \lambda_0$ .



Les lumières du cône arrivant sur les miroirs avec le même angle  $i$  d'incidence se retrouve sur l'écran sous la forme d'un anneau. Si l'ordre  $p$  correspondant est entier, alors l'anneau est brillant.

$p(M)$  est alors maximal au centre ( $\cos i = 1$ ), l'ordre diminue lorsque  $i$  augmente.

On règle la position de M1 avec la vis Vm de sorte que la tache centrale soit brillante. La valeur maximale de l'ordre sera donc entière et vaut  $p_0 = \frac{2e}{\lambda}$  (puisque  $\cos i = 1$ ).

La figure montre que le rayon  $r$  de l'anneau vérifie  $r = f' \tan i \approx f' i$  soit  $i \approx r / f'$  si  $i$  est assez petit. De même on développe alors  $\cos i \approx 1 - i^2/2$

Q4.4b- Montrer que l'expression précédente de  $p(M)$  devient en remplaçant

$$r^2 = \frac{f'^2 \lambda}{e} (p_0 - p) = \frac{f'^2 \lambda}{e} q \quad \text{ou encore} \quad r = f' \sqrt{\frac{\lambda}{e}} \sqrt{q}$$



L'entier  $q$  numérote alors les franges brillantes ( $q=0$  au centre,  $q=1$  pour le premier anneau,  $q=2$  pour le second anneau etc.)

## 4.5- Etude quantitative d'une photographie des anneaux brillants

### Réglage des anneaux avec centre brillant

- Affiner la position du chariot portant le miroir M1 pour obtenir une figure bien nette à centre brillant.  
**Faire constater à l'enseignant**

### Photographier la figure des anneaux

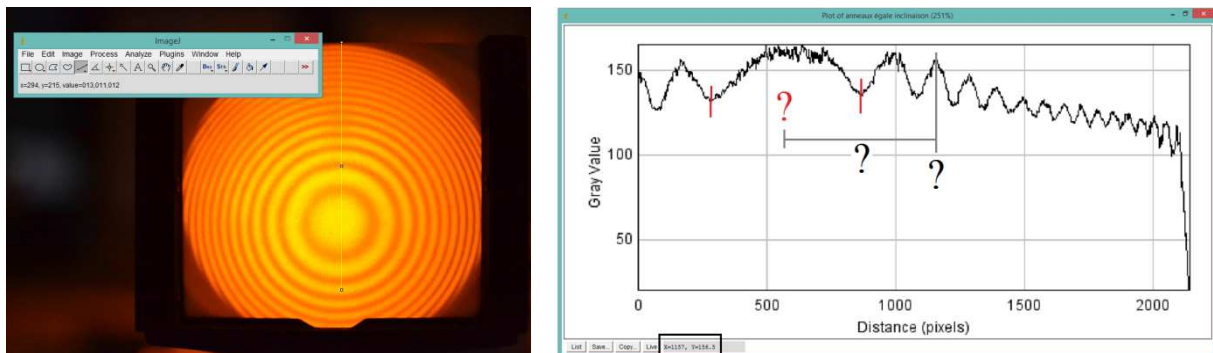
- Mise en place de l'appareil photo sur son pied **avec l'enseignant**.
- Cadrer l'image à l'aide du viseur.
- Vérifier sur l'objectif que l'autofocus est débrayé (Position M). Mise au point manuelle de l'image sur le dépoli à l'aide de la bague de l'objectif.
- Réglage en « Priorité Ouverture » A, ouverture maximale à F 1.8 réglée avec la molette. La durée d'exposition se règle automatiquement. Affichage des données avec le bouton , en bas à gauche de l'écran.
- La sensibilité est a priori maximale : iso 3200.
- Réglage en mode « retardateur » (10 s entre l'appui long sur le déclencheur et la prise de vue : indicateur sonore).
- Photographier puis contrôler la qualité de l'image réalisée avec . Prendre quelques photos en affinant la mise au point.
- **L'enseignant extrait la carte photo de l'appareil.**



Remarque : L'enseignant déposera l'appareil du pied en fin de TP

### Analyse de l'image avec les logiciels ImageJ et Calc

- **Transfert des fichiers sur l'ordinateur avec le lecteur USB** : copier les images réalisées exclusivement dans le dossier E:/MesDocs (pas sur le « bureau » !)
- Exécuter ImageJ et ouvrir l'image jugée la plus nette (menu *File/Open*).
- Placer une ligne de coupe comme sur l'image test du bas vers le haut.
- Obtenir le profil correspondant (menu *Analyse/Plot profile*).
- Passer en plein écran puis imprimer le graphe.



- Placer à la souris le curseur sur la courbe : les coordonnées du pixel pointé sont disponibles en bas à gauche de la fenêtre (voir le rectangle).

Q4.5a- Déterminer les coordonnées horizontales  $nb1$  et  $nb2$  des bords du disque brillant central . En déduire  $nc$  l'abscisse en pixel du centre du disque. Noter les trois valeurs sur le graphe.

Q4.5b- Lire et noter les abscisses en pixel  $n1, n2, \dots, n10$  des max des 10 premiers anneaux brillants.

Q4.5c- Créer une feuille de calcul dans **Calc** regroupant pour les 10 anneaux brillants : le  $n^o$   $q$  de l'anneau, sa position et son rayon. Tracer le graphe et la courbe de tendance pertinents afin de vérifier le modèle proposé en Q4.4b et d'estimer sa qualité. Imprimer le graphe.

### Expérience complémentaire (à réaliser selon le temps disponible) :

## 4.6- Mesure du doublet du sodium par l'étude des « anticoincidence »

### Doublet du Sodium

Le spectre d'émission de la lampe spectrale à vapeur de sodium présente dans le jaune deux raies de même intensité et de longueurs d'ondes très proches : le « doublet » du sodium.

Ces valeurs vérifient  $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \lambda \approx 589 \text{ nm}$  et  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 < 1 \text{ nm} \ll \lambda$

### Analyse approfondie de la figure d'interférence

Les deux couleurs  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont « différentes » et ne peuvent pas interférer. On observe de fait la superposition des deux figures d'interférences similaires. La distribution d'éclairement sur l'écran est alors  $E = E_1 + E_2 = 2E_0 [1 + \cos(2\pi 2e \cos i / \lambda_1)] + 2E_0 [1 + \cos(2\pi 2e \cos i / \lambda_2)]$ .

On pose symétriquement  $a_1 = 2\pi 2e \cos i / \lambda_1$  et  $a_2 = 2\pi 2e \cos i / \lambda_2$

De plus  $\cos a_1 + \cos a_2 = 2 \cos \frac{a_1 - a_2}{2} \times \cos \frac{a_1 + a_2}{2}$

$$E = 4E_0 \left[ 1 + \frac{1}{2} \{ \cos a_1 + \cos a_2 \} \right] = 4E_0 \left[ 1 + \cos \frac{a_1 - a_2}{2} \times \cos \frac{a_1 + a_2}{2} \right]$$

Q4.6a- Montrer alors que  $E = 4E_0 \left[ 1 + C \cos \left( 2\pi \frac{2e \cos i}{\lambda} \right) \right]$  en posant  $C = \cos \left( 2\pi e \cos i \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \right)$ .

Reconnaitre là l'expression d'une figure d'anneaux d'interférences modulée par le facteur  $C$ , c'est-à-dire pour l'essentiel par l'épaisseur de la lame d'air.

Q4.6b- Montrer que le facteur  $C$  est en fait le contraste défini par  $|C| = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}$

On fera les observations ultérieures dans la zone centrale des anneaux, de sorte que

$|C| \approx \left| \cos \left( 2\pi e \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \right) \right|$  puisque dans la zone centrale de la figure, on a  $\cos i \approx 1$ .

### Coincidence et anticoincidence

Lorsqu'on fait varier le réglage de  $V_m$ , on déplace  $M1$  le long d'un axe  $x$ .

On constate que pour certaines positions, le contraste s'annule (on ne distingue plus le anneaux) : il s'agit d'une « anticoincidence. Pour d'autres positions, le contraste est maximal (on observe parfaitement les anneaux) : il s'agit de « coincidence ».

Q4.6c- Montrer que la variation minimale de déplacement entre deux anti-coincidence successives vérifie  $\Delta e = \Delta x = \frac{\lambda^2}{2 \Delta\lambda}$

Q4.6d- Relever expérimentalement les positions du chariot pour 6 anticoincidence successives. Proposer une méthode d'exploitation de ces données et en déduire votre meilleure estimation de  $\Delta\lambda$  pour la lampe au sodium utilisée.



# Annexes

## Annexe A1- LISTE DU MATERIEL UTILISE

### Matériel utilisé

- un interféromètre de Michelson et ses trois cales de contreplaqué
- un banc optique court, un banc moyen
- 5 cavaliers standards
- lentilles convergentes de focale 50 mm, 150 mm et 300 mm
- un diaphragme circulaire
- un écran dépoli verre
- la lampe spectrale Na noire parallélépipédique (sans alimentation extérieure) et un support élévateur
- APN Nikon D3100 et son pied
- Réglet, lampe de poche
  
- deux textes de TP avec annexes

### Matériel informatique et logiciels utilisés

- un ordinateur PC « MP-Optique1 » avec suite Libre Office dont CALC
- logiciel de photo ImageJ en version portable sans installation
- un lecteur de carte photo SD
  
- accès à l'imprimante réseau

### Applet de simulation

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiphy/michelson.html>

Cet applet est dû à **Jean-Jacques ROUSSEAU**, Professeur de l'Université du Maine.

# TP2

## INTERFEROMETRE DE MICHELSON

<b>PRESENTATION</b> .....	<b>1</b>
<b>0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP</b> .....	<b>1</b>
<b>1- PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRE DE MICHELSON</b> .....	<b>2</b>
<b>2- REGLAGES PRELIMINAIRES DU MICHELSON</b> .....	<b>4</b>
<b>3- CONFIGURATION DU MICHELSON « EN COIN D'AIR »</b> .....	<b>4</b>
<b>4- CONFIGURATION DU MICHELSON « EN LAME D'AIR »</b> .....	<b>5</b>
<b>Annexe A1- LISTE DU MATERIEL UTILISE</b> .....	<b>9</b>

**Ouvrir une session sur l'ordinateur :**

Utilisateur : **etmp**

Mot de passe : **mesures**