

# TDO3 – Interférences par division d'amplitude

## 0 Exercices classiques vus en cours sur l'interféromètre de Michelson :

**C.1** : Configuration lame d'air : expression de  $\delta(M)$  pour une source monochromatique et un point M à l'infini

**C.3.b** : Configuration lame d'air : influence de l'épaisseur de la lame sur la figure d'interférences

**D.3** : Configuration coin d'air : expression de l'interfrange  $i$  et influence de l'angle du coin sur la figure d'interférences

**D.4** : Configuration coin d'air : interprétation de la figure d'interférences en lumière blanche

**D.5.b** : Configuration coin d'air : principe de la mesure d'un défaut de planéité

Capacités exigibles	Ch O3	Ex 1,3	Ex 4,5, 8,12,13	Ex 2, 7,9-11	Ex 6	TP 10C-D
<b>Interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue. Localisation (admise) des franges.</b> Citer les conditions d'éclairage et d'observation en lame d'air et en coin d'air.	•	•		•		•
<b>Lame d'air : franges d'égale inclinaison.</b> Etablir et utiliser l'expression de la différence de marche en fonction de l'épaisseur de la lame d'air équivalente et de l'angle d'incidence des rayons. <i>Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue à l'aide d'un protocole proposé.</i> <i>Mettre en œuvre un protocole pour accéder au profil spectral d'une raie ou d'un doublet à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</i>	•	•	•		•	
<b>Coin d'air : franges d'égale épaisseur.</b> Utiliser l'expression admise de la différence de marche en fonction de l'épaisseur. <i>Caractériser la géométrie d'un objet ou l'indice d'un milieu à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</i> <i>Interpréter qualitativement les observations en lumière blanche.</i>	•			•	•	•

## 1 Anneaux d'égale inclinaison obtenus avec une source monochromatique

Considérons un interféromètre de Michelson réglé de telle sorte que l'on observe des anneaux avec une source étendue monochromatique ( $\lambda = 600\text{nm}$ ). On souhaite observer ces anneaux sur un écran en utilisant une lentille convergente  $\mathcal{L}$  placée à la sortie de l'interféromètre.

1 - Préciser la position relative des miroirs.

2 - Comment l'écran doit-il être placé par rapport à la lentille pour observer les interférences les mieux contrastées ?

3 - On considère la famille de rayons issus de la source arrivant sur l'interféromètre avec un angle d'incidence  $i$ .  
 Établir l'expression de la différence de marche pour ces rayons.

4 - Montrer que tous ces rayons convergent en un même point de l'écran dont on exprimera la distance  $r$  par rapport à l'axe optique en fonction de la focale  $f'$  de la lentille et de  $i$ .

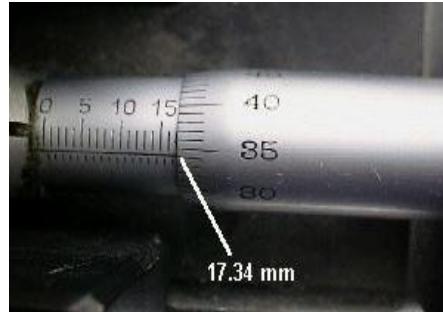
5 - On dispose de lentilles de distance focale 10, 50 et 100 cm. Laquelle donne la figure d'interférences la plus grande ?

6 - Partant du contact optique, on translate l'un des miroirs de 0,05 mm. Quel est l'ordre de l'anneau brillant de plus petit rayon que l'on observe sur l'écran ?

7 - Calculer le rayon sur l'écran des trois premiers anneaux brillants.

8 - Le vernier de l'interféromètre est représenté ci-contre. Que penser du calcul effectué à la question 6 ?

*Rq : A la question 7, on peut discuter de l'expression donnée au § C.3.a du ChO3 pour le rayon des anneaux.*



## 2 Angle du coin d'air

Un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air est éclairé par une source monochromatique ( $\lambda = 546 \text{ nm}$ ). Sur un écran situé à une distance  $D = 1 \text{ m}$  derrière la lentille de projection de focale  $f' = 20 \text{ cm}$ , on observe des franges rectilignes d'interfrange  $i = 3,5 \text{ mm}$ .

- Où sont localisées les interférences dans ce montage ? Préciser la position de l'écran.
- Calculer l'angle entre les deux miroirs. Donner sa valeur numérique en minutes d'arc.

**Donnée :** La différence de marche dépend de l'épaisseur locale du coin d'air :  $\delta = 2e(x) \approx 2\alpha x$  avec  $x$  l'abscisse mesurée par rapport à l'axe d'intersection des miroirs

## 3 Ecart spectral du doublet du Sodium (proche de CCINP MP 2018 / CCMP MP 2025)

La lampe à vapeur de sodium (Na) émet principalement un doublet jaune (couleur de la lampe allumée).

On note  $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$  la valeur moyenne du nombre d'onde du doublet et  $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$  l'écart entre les nombres d'onde de chaque raie.

1) Rappeler les conditions d'éclairage du Michelson et d'observation des interférences dans la configuration « lame d'air ». Décrire les franges à l'écran.

2) Justifier qu'en un point M où la différence de marche est  $\delta$ , l'intensité s'écrit :

$$I(M) = 4I_0(1 + \cos(2\pi\sigma_m\delta) \cdot \cos(\pi\Delta\sigma\delta))$$

et que le contraste vérifie  $C = |\cos(\pi\Delta\sigma\delta)|$

L'observation de l'évolution de la visibilité de la figure d'interférences avec la variation de la différence de marche permet de mesurer l'écart spectral du doublet.

3) Lorsque l'on translate le miroir mobile, le contraste s'annule périodiquement près du centre. Expliquer.

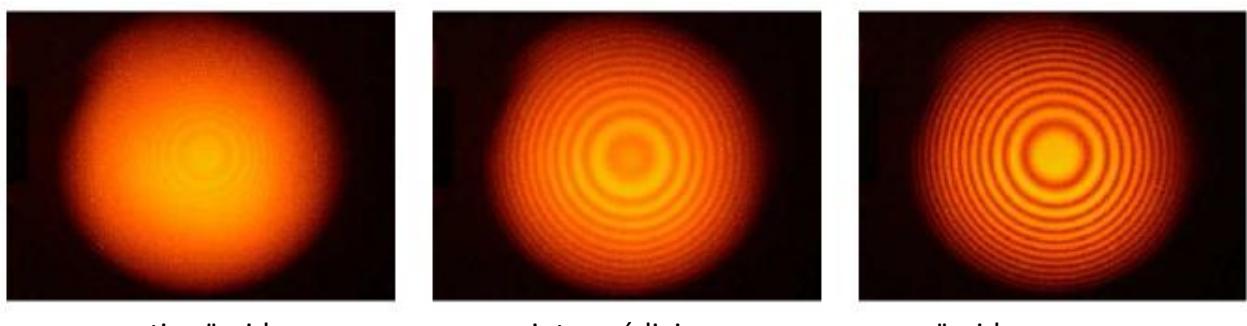
4) Au maximum de contraste, on parle de coïncidence et lorsque que le contraste est nul, on parle d'anti-coïncidence (brouillage de la figure d'interférence). Du même côté de la teinte plate, les positions du miroir mobile  $d = 3,24 \text{ mm}$  et  $d' = 4,11 \text{ mm}$  correspondent à des anti-coïncidences. Entre ces deux positions, on comptabilise deux autres anti-coïncidences.

On note  $\Delta e$  le déplacement du chariot entre deux anti-coïncidences successives.

a) Exprimer  $\Delta e$ .

b) En déduire l'écart spectral  $\Delta\lambda$  du doublet jaune du sodium, sachant que la longueur d'onde moyenne est de  $589,3 \text{ nm}$ .

c) Pourquoi ne pas avoir considéré deux annulations de contraste successives ?



*Rq : Cet exercice porte sur la notion de cohérence temporelle. Il est à relier au § C.4.a du Ch03 et il correspond à l'étude théorique de l'expérience du § 3<sup>e</sup> partie.4 du TP10C-D.*

#### 4 Estimation de la longueur de cohérence d'une raie spectrale (proche de CCINP MP 2025)

On considère une source non monochromatique dont le spectre d'émission a une largeur spectrale  $\Delta\lambda$  autour d'une valeur moyenne  $\lambda_m$ .

- 1) Justifier qu'il y a interférence à la condition :  $\delta < L_c$  où  $L_c$  est la longueur de cohérence temporelle de la source et  $\delta$  la différence de marche.

*Rq : Cette étude a été faite au § C.2 du Ch02 avec les trous d'Young.*

- 2) L'observation de l'évolution de la visibilité de la figure d'interférences avec la variation de la différence de marche permet de mesurer la longueur de cohérence temporelle d'une source.

On éclaire avec une lampe à vapeur de mercure, munie d'un filtre vert, un interféromètre de Michelson en configuration lame d'air. A partir du contact optique, on translate dans un sens puis dans l'autre le miroir  $M_2$  jusqu'à la disparition de la figure d'interférences. Soit  $d = 15,21 \text{ mm}$  et  $d' = 9,32 \text{ mm}$ , les deux positions du chariot correspondant à la disparition de la figure d'interférences.

- a) Exprimer  $L_c$  en fonction de  $d$  et  $d'$ . Faire l'application numérique.  
b) En déduire la largeur spectrale  $\Delta\lambda$  de la raie verte du mercure, sachant que la longueur d'onde moyenne est de  $546,1 \text{ nm}$ .

*Rq : Cet exercice porte sur la notion de cohérence temporelle. Il est à relier au critère semi-quantitatif de brouillage des franges vu au § C.4.b du Ch03 et il correspond à l'étude théorique de l'expérience du § 3<sup>e</sup> partie.3 du TP10C-D.*

#### 5 Mesure de la largeur d'une raie (proche de CCINP MP 2019)

Une source ponctuelle monochromatique éclaire un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air de telle sorte que l'un des miroirs  $M_1$  soit fixe et que l'autre puisse se déplacer parallèlement à lui-même à partir de sa position initiale correspondant à une différence de marche nulle. Un détecteur  $P$  situé sur l'axe du faisceau donne un signal électrique proportionnel à l'intensité  $I$  du faisceau qu'il reçoit.

1. Exprimer  $I$  en fonction de la fréquence  $\nu_0$  de la radiation émise et de  $\tau = 2x/c$ ,  $x$  étant le déplacement de  $M_2$  et  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide.
2. La source n'émet pas une onde monochromatique, comme cela est supposé précédemment, mais une onde quasi-monochromatique centrée sur la fréquence  $\nu_0$ . On note  $\Delta\nu$  la largeur totale à mi-hauteur de l'intensité spectrale de la source. Trouver l'intensité  $I(\tau)$  lorsque l'intensité spectrale de la raie  $I_\nu$  est rectangulaire.
3. Un calculateur associé au détecteur fournit la fonction :  $V(\tau) = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$ . Trouver  $V(\tau)$ . Tracer son graphe.
4. La raie verte du Mercure ( $\lambda_0 = 546,1 \text{ nm}$ ) présente une densité spectrale d'éclairage  $\varepsilon_\nu$  approximativement rectangulaire. On observe pour la 1<sup>e</sup> fois  $V(\tau) = 0$  pour  $x = 2,95 \text{ mm}$ . En déduire  $\Delta\nu$  et  $\Delta\lambda$ .

*Rq : Comme l'exercice 2, cet exercice porte sur la notion de cohérence temporelle. Il correspond à une version quantitative du critère de brouillage des franges d'interférences (analogue à la discussion du § B.2.c du Ch02).*

## 6 (MP) Spectre cannelé

On considère un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air et éclairé par une source de lumière blanche.

- ❶ La source comporte donc toutes les longueurs d'onde du visible. Estimer sa largeur en fréquence  $\Delta\nu$  en fonction de  $\nu_0$ , fréquence centrale du domaine visible.
- ❷ Que peut-on en déduire sur le nombre de franges visibles?
- ❸ Décrire la fringe centrale  $\delta = 0$ . Comment sont colorés ses bords?
- ❹ Pour la fringe correspondant à une différence de marche  $\delta = \lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$ , calculer les longueurs d'onde "éteintes", c'est à dire interférant destructivement. Quelle est la couleur de cette fringe? On prend  $\lambda = 600 nm$ .
- ❺ Pour la fringe correspondant à une différence de marche de  $\delta = 10\lambda_0$ , calculer les longueurs d'onde éteintes c'est à dire interférant destructivement. Quelle est la couleur de cette fringe? Pourquoi parle-t-on de blanc d'ordre supérieur?
- ❻ On perce un trou dans l'écran à ce niveau et on décompose la lumière passant à travers le trou à l'aide d'un prisme. Expliquer ce qu'on observe.

Donnée : La différence de marche dépend de l'épaisseur locale du coin d'air :  $\delta = 2e(x) \approx 2\alpha x$  avec  $x$  l'abscisse mesurée par rapport à l'axe d'intersection des miroirs

## 7 Mesure de l'épaisseur d'une lame avec l'interféromètre de Michelson

On observe un coin d'air éclairé en lumière blanche.

- a) Expliquer en quelques mots le montage expérimental. Qu'observe-t-on sur l'écran ?

Sur l'un des trajets, on insère en incidence quasi normale une lamelle de microscope, d'épaisseur  $\ell$  et d'indice  $n = 1,5$  (Fig. 17).

- b) Qu'observe-t-on alors sur l'écran ?

c) Expliquer quels réglages il faut effectuer afin d'observer à nouveau les interférences.

d) Ces interférences sont observables sur l'image de la lame pour un déplacement d'une distance  $d = 0,08 mm$ . En déduire l'épaisseur  $\ell$  de la lame.

e) En fait, les interférences réapparaissent sur les bords de la lame pour un déplacement  $\frac{d}{2}$ . Expliquer.

f) Pourquoi cette mesure ne peut-elle être faite avec une lampe spectrale ou un laser ?

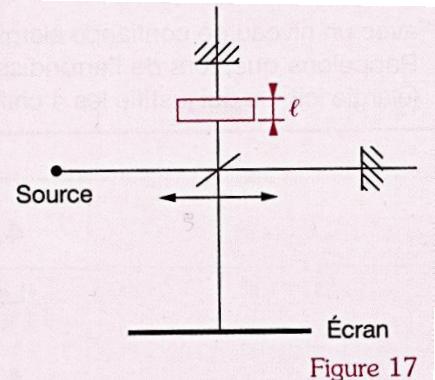


Figure 17

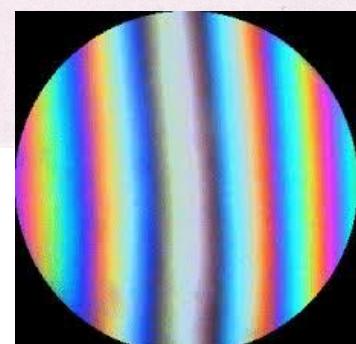


Figure d'interférences :

Rq : Cet exercice porte sur la notion de **cohérence temporelle**. Il est à relier aux § D.4 et D.5.a du Ch03 et il correspond à l'étude théorique de l'expérience du § 3<sup>e</sup> partie.1 du TP10C-D.

## 8 Spectroscopie par transformée de Fourier (*d'après oral PT*)

On considère un interféromètre de Michelson en lame d'air, éclairé par une lampe au mercure dont on isole par un filtre la raie verte de longueur d'onde dans le vide  $\lambda$ .

Le miroir mobile est motorisé et se déplace avec une vitesse constante  $v_0 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ . On place un photodétecteur au centre de la figure d'interférences, il renvoie une tension image de l'éclairement de la forme :

$$u(t) = U_0 + U_1 \cos(\omega t + \varphi)$$

- 1) Justifier l'expression de  $u(t)$  et exprimer  $\omega$  en fonction de  $v_0$  et  $\lambda$ .
- 2) Une transformée de Fourier numérique de  $u(t)$  donne un pic à la fréquence  $f = 3,7 \text{ Hz}$ . En déduire la longueur d'onde dans le vide  $\lambda$ .

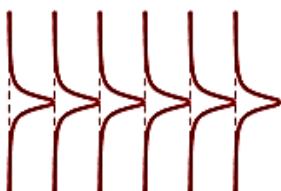
## 9 Mesure expérimentale de l'indice d'un gaz (*d'après oral PT*)

On souhaite mesurer l'indice optique d'un gaz en utilisant un interféromètre de Michelson. On dispose d'un laser, d'un condenseur, de polariseurs, de diaphragmes à iris, d'un écran, et de quatre lentilles de focales respectives 20 cm, 100 cm, 5 cm et -30 cm.

1 - Schématiser le montage permettant d'obtenir des raies lumineuses. Comment se nomme la configuration de l'interféromètre ?

2 - Où les franges sont-elles observables ? Pourquoi parle-t-on de « franges localisées » ?

3 - La distance entre les miroirs et l'écran est égale à 2 m. En déduire la lentille à utiliser et sa position.



Les miroirs forment un angle  $\alpha$ . On rappelle que la différence de chemin optique vaut  $\delta(x) = 2\alpha x$ , avec  $x$  l'abscisse mesurée par rapport à l'axe d'intersection des miroirs. On fait alors passer un flux de gaz de diamètre 1 mm entre la séparatrice et l'un des miroirs, perpendiculairement au trajet des rayons lumineux. Les franges prennent l'allure ci-contre.

4 - Déterminer la nouvelle différence de chemin optique  $\delta'$ . En déduire l'écart  $\Delta n$  entre l'indice du gaz et celui de l'air.

*Rq : Cet exercice correspond à l'étude théorique de l'expérience qualitative du § 3<sup>e</sup> partie.2 du TP10C-D.*

## 10 Mesure expérimentale de l'indice de l'air

On considère un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air. On note  $\alpha$  l'angle (très faible) entre les deux miroirs. La source de lumière est un LASER de longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$  en incidence normale.

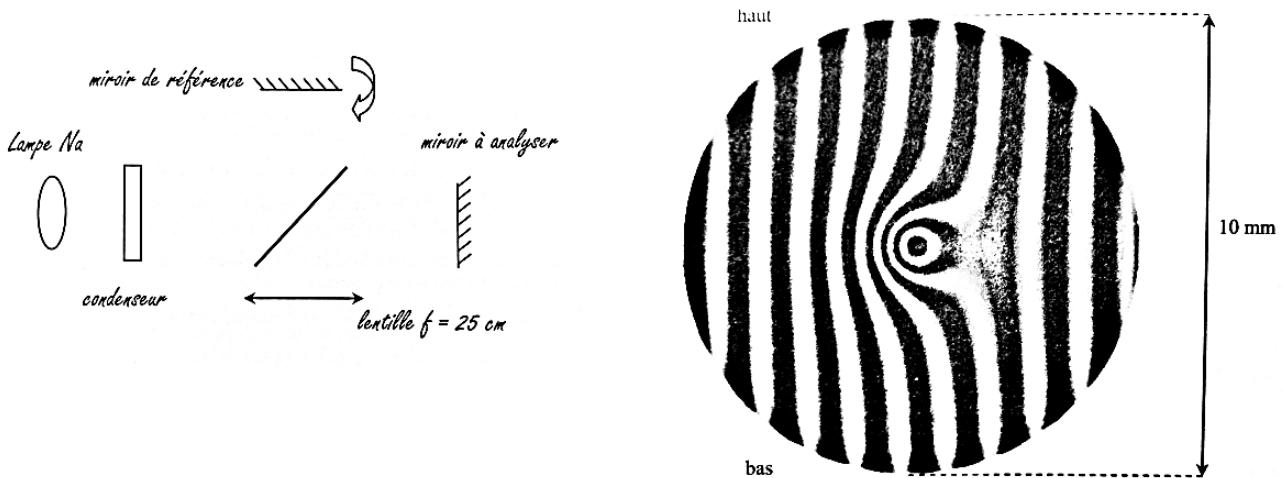
On note  $n$  l'indice de l'air et  $\mu$  sa masse volumique. L'air supposé parfait suit la loi de Gladstone  $(n-1)/\mu = \text{Cste}$ . La pression atmosphérique vaut 1013 hPa. Sur le trajet de l'un des faisceaux, on interpose une cuve à faces parallèles d'épaisseur  $e = 10 \text{ mm}$ . Avec une pompe à main, on crée une dépression de 700 mbar. Avec une vis, on fait rentrer progressivement de l'air à température ambiante. On mesure 6 franges qui défilent en un point de l'écran.

- 1) Réaliser un schéma du dispositif.
- 2) Exprimer la différence de marche en présence de la cuve en fonction de la différence de marche en l'absence de la cuve.
- 3) En déduire l'indice de l'air à 1013 hPa. La valeur tabulée étant 1,000277 dans les conditions usuelles de température et de pression, conclure sur la mesure.

## 11 Miroir déformé

Dans un laboratoire d'optique, un expérimentateur a malencontreusement fait focaliser un faisceau laser très puissant sur l'un des miroirs. Pour contrôler la déformation du miroir, il insère le miroir déformé dans un Michelson. Il utilise pour l'éclairer une lampe spectrale au sodium ( $\lambda = 589 \text{ nm}$ ).

À l'écran, on observe la figure d'interférence suivante :



1. En quoi consiste le réglage en coin d'air ? Comment doit être réglé le condenseur ?
2. Sachant que la lentille est à 35 cm du miroir de référence, indiquer à quelle distance de la lentille l'expérimentateur a dû placer l'écran pour voir des franges nettes ?
3. Estimer l'angle  $\theta$  entre le miroir ( $M'$ ) image du miroir à analyser par la lame séparatrice et le miroir de référence.
4. Préciser la largeur de la zone sur laquelle le miroir est déformé.
5. Estimer l'épaisseur du défaut. Quel est le problème posé par ce défaut ?

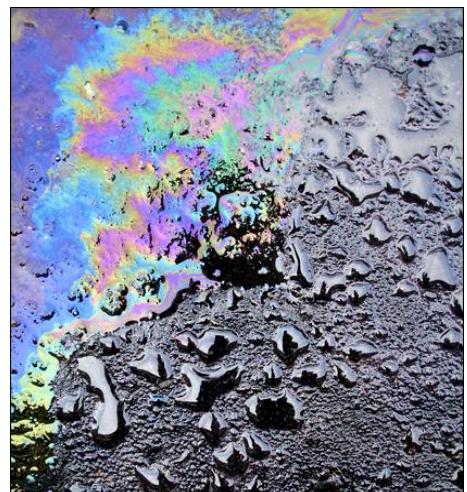
### Donnée :

La différence de marche dépend de l'épaisseur locale du coin d'air :  $\delta = 2e(x) \approx 2\alpha x$   
avec  $x$  l'abscisse mesurée par rapport à l'axe d'intersection des miroirs

## 12 (MP) Iridation d'une flaque d'huile

Une goutte d'huile est déposée sur une flaque d'eau. Elle s'étale en surface et forme une mince couche dont on supposera l'épaisseur  $e$  constante. L'indice de réfraction de l'huile est  $n = 1,5$ , supérieur à celui de l'eau (1,33). Un observateur regarde un reflet du Soleil, en se plaçant quasiment à la verticale de cette flaque. Il observe une teinte magenta.

- En considérant uniquement les interférences entre une onde réfléchie sur l'interface air/huile et l'autre sur l'interface huile/eau, écrire la condition d'interférences *destructives*, en fonction de la longueur d'onde  $\lambda_0$  de la lumière dans le vide (ou dans l'air, d'indice  $n \approx 1$ ).
- Expliquer alors pourquoi le reflet est coloré. On admettra que l'œil perçoit une teinte blanche si les couleurs rouge, vert et bleu de la vision trichromique sont représentées de façon équilibrée dans le spectre de la lumière.
- Sachant que le magenta est la teinte complémentaire du vert ( $\lambda_0 \approx 550 \text{ nm}$ ), estimer l'épaisseur  $e$  minimale de la couche d'huile donnant cette teinte. Commenter.

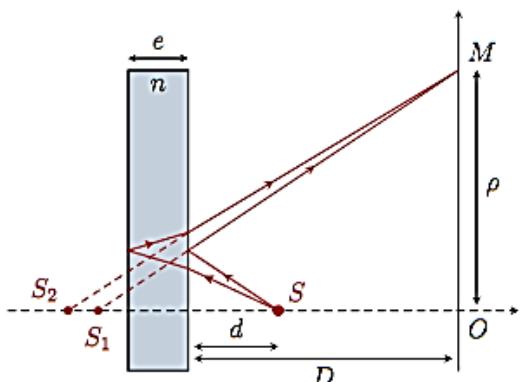


### Données :

- Dans le cas d'une réflexion sur un milieu plus réfringent (on parle de réflexion vitreuse) l'onde subit un déphasage de  $\pi$  (coefficient de réflexion négatif).

Il n'y a pas de déphasage dans le cas d'une réflexion sur un milieu moins réfringent ou lors d'une transmission.

## 13 Franges de Pohl (d'après oral PT)



L'utilisation d'une lame mince, à faces parallèles, en verre ou en mica, d'indice  $n$ , permet d'observer un phénomène d'interférences. La figure ci-contre présente le dispositif expérimental pour une source ponctuelle monochromatique  $S$  de longueur d'onde  $\lambda_0$  dans le vide.

L'écran est situé parallèlement à la lame, à une distance  $D$  de celle-ci, la source  $S$  étant située à une distance  $d$  de la lame. Deux rayons issus de  $S$  interfèrent en  $M$  situé à la distance  $\rho$  de  $O$ . Le premier se réfléchit sur la face avant de la lame, ce qui rajoute un déphasage supplémentaire de  $\pi$ . Le second se réfléchit sur la face arrière sans introduire de déphasage.

- Montrer en argumentant la présence d'interférences sur l'écran.
- Déterminer sans faire de calcul la forme de la figure d'interférences.
- Déterminer le chemin optique  $(SM)_1$  associé au premier rayon en fonction de  $d$ ,  $D$ ,  $\rho$  et  $\lambda_0/2$ .

On donne pour le second rayon pour  $e$  et  $\rho$  très petits

$$(SM)_2 = D + d + 2ne + \frac{\rho^2}{2(D + d + 2e)}.$$

- Déterminer une expression approchée de la différence de marche et de l'ordre d'interférence.
- Donner l'ordre et le rayon du premier cercle brillant pour  $d + D = 1,25 \text{ m}$ ,  $n = 1,617$ ,  $e = 13 \mu\text{m}$  et  $\lambda_0 = 0,580 \mu\text{m}$ .