



Exercice 1 : Distance apparente à travers un dioptre

oral banque PT | 💡 3 | ✂️ 1

- ▷ Formation d'image optique ;
- ▷ Lois de Descartes.

1 L'image A' est par définition le point d'intersection des rayons issus de A et traversant le dioptre. Un rayon évident est confondu avec l'axe (zz'), l'autre s'obtient par application de la loi de la réfraction, voir figure 1, sachant que comme $n > n'$ alors $i < i'$. On constate que ces rayons ne se coupent pas à droite du dioptre, mais leur prolongement se coupe côté gauche. L'image A' est donc virtuelle.

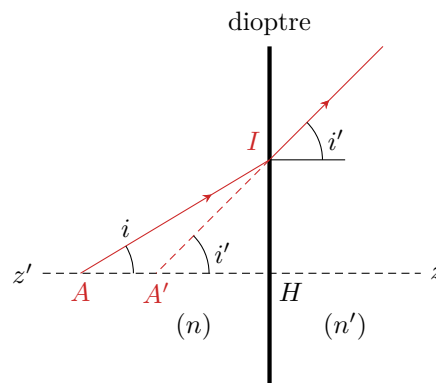


Figure 1 – Image à travers un dioptre.

2 En raisonnant dans les triangles rectangle AHI et $A'HI$, on obtient

$$\tan i = \frac{IH}{AH} \quad \text{et} \quad \tan i' = \frac{IH}{A'H}$$

d'où on déduit par identification des expressions de IH

$$AH \tan i = A'H \tan i'.$$

3 Un système optique est dit dans les conditions de Gauss lorsque les rayons qui le traversent sont faiblement inclinés par rapport à l'axe optique et à proximité de cet axe. Dans cette hypothèse, tous les angles sont petits. La relation précédente devient donc

$$AH i = A'H i' \quad \text{soit} \quad A'H = \frac{i}{i'} AH$$

et la loi de la réfraction s'écrit

$$n \sin i = n' \sin i' \quad \text{soit} \quad ni = n'i' \quad \text{et} \quad \frac{i}{i'} = \frac{n'}{n},$$

ce qui permet d'obtenir

$$A'H = \frac{n'}{n} AH.$$

4 On note A le poisson, A' son image par le dioptre eau/verre et A'' l'image finale, qui est l'image de A' par le dioptre verre/air. H est le projeté orthogonal de A sur le dioptre eau/verre et H' celui sur le dioptre verre/air. La distance cherchée est $A''H'$, qui est la distance apparente à partir du dioptre verre/air.

D'après la question précédente,

$$A'H = \frac{n_{\text{verre}}}{n_{\text{eau}}} AH = 5,6 \text{ cm.}$$

On en déduit

$$A'H' = A'H + e = 6,4 \text{ cm}$$

puis

$$A''H' = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{verre}}} A'H' = 4,3 \text{ cm.}$$

Ainsi, le poisson **semble se trouver à 4,3 cm en arrière du dioptre air-verre** alors qu'il se trouve en réalité à 5,8 cm.

Exercice 2 : Tripleur de focale de Barlow

oral banque PT | 💡 2 | ✂️ 2



▷ Instrument d'optique ;

▷ Relations de conjugaison.

1 La distance minimale entre la Terre et Jupiter est $D_{\min} = R_J - R_T = 6,3 \cdot 10^8 \text{ km}$. En utilisant directement l'approximation des petits angles,

$$\alpha_0 = \frac{D_J}{D_{\min}} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ rad} = 1,3 \cdot 10^{-2} \circ.$$

2 Jupiter étant située à l'infini, son image par L_1 se forme dans le plan focal image. C'est donc là qu'il faut placer le capteur, à une distance $D_c = f'_1 = 2550 \text{ mm}$ de L_1 . Comme Jupiter est vue sous un angle α_0 alors les rayons les plus extrêmes arrivent sur la lentille en formant un angle $\alpha_0/2$ avec l'axe optique. Ainsi, l'image de Jupiter a pour rayon

$$r = f'_1 \tan \frac{\alpha_0}{2} = \frac{D_J f'_1}{2D_{\min}} = 0,28 \text{ mm.}$$

3 Voir figure 2. Se lancer à main levée n'est pas évident pour que les rayons convergent bien sur le capteur ... il faut donc *commencer* par tracer les rayons, *puis ensuite* placer le capteur sur la figure à l'endroit où se forme l'image.

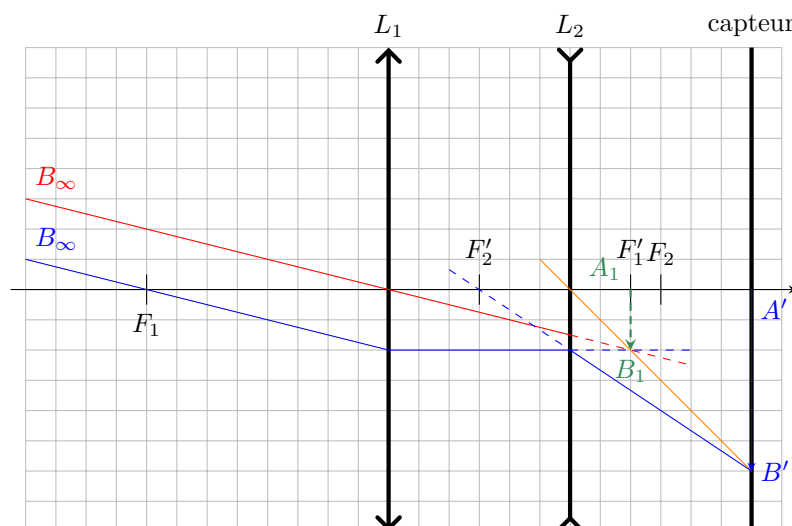


Figure 2 – Marche des rayons dans l'instrument.

4 L'objet pour L_2 est l'image de Jupiter par L_1 . On sait qu'elle se trouve dans le plan focal image de L_1 . Ainsi, en notant O_c le centre du capteur où se trouve l'image finale, la relation de grandissement donne

$$\frac{\overline{O_2 O_c}}{\overline{O_2 F'_1}} = 3 \quad \text{donc} \quad \overline{O_2 F'_1} = \frac{1}{3} \overline{O_2 O_c} \quad \text{soit} \quad \overline{O_2 O_1} + \overline{O_1 F'_1} = \frac{1}{3} \overline{O_2 O_c}$$

Remplaçons les distances algébriques par les paramètres géométriques de la lunette, avec D_{12} la distance entre les centres optiques des deux lentilles,

$$-D_{12} + f'_1 = \frac{d}{3} \quad \text{d'où} \quad \boxed{D_{12} = f'_1 - \frac{d}{3} = 2483 \text{ mm.}}$$

La relation conjugaison de Descartes appliquée à L_2 donne ensuite

$$\frac{1}{O_2O_c} - \frac{1}{O_2F'_1} = \frac{1}{f'_2} \quad \text{soit} \quad \frac{1}{O_2O_c} - \frac{3}{O_2O_c} = \frac{1}{f'_2}$$

d'où


$$\boxed{f'_2 = -\frac{d}{2} = -100 \text{ mm.}}$$

La lentille est divergente, il est donc normal de trouver $f'_3 < 0$.

5 Comme démontré précédemment, la taille de l'image sur le capteur sans oculaire est directement proportionnelle à la distance focale image de l'objectif L_1 . L'oculaire de Barlow permet d'obtenir une image trois fois plus grande sur le capteur, ce qui nécessiterait de tripler la focale de la lentille objectif si on voulait l'utiliser seule. L'intérêt de l'oculaire est bien sûr un encombrement bien moindre.

Exercice 3 : Observation de franges d'interférences

oral banque PT | 💡 3 | ✂️ 2

-  ▷ Différence de marche à grande distance ;
▷ Modèle de l'œil ;
▷ Lentille convergente.

1 Les franges sont rectilignes, parallèles aux fentes, incluses à l'intérieur de la figure de diffraction par une fente seule.

2 Cf. cours :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi bx}{\lambda D} \right) \right]$$

avec x une abscisse orthogonale à la direction des franges.

3 L'interfrange, c'est-à-dire la distance entre deux franges brillantes consécutives, ou encore la période spatiale de la figure d'interférences, vaut

$$i = \frac{\lambda D}{b} = 50 \mu\text{m}$$

On peut donc estimer qu'une frange a une extension spatiale $i/2$. En plaçant l'œil le plus proche possible des franges, elle est vue sous un angle

$$\theta = \frac{i/2}{PP} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ rad.}$$

Sachant que $1' = 3 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$, les franges **ne sont pas visibles à l'œil nu**.

Rappelons que $1' = 1/60^\circ$, soit

$$1' = \frac{1}{60} \times \frac{\pi}{180} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ rad.}$$

4 Si l'image des franges est à l'infini alors elles sont dans le plan focal objet de la lentille. En raisonnant sur la figure 3, on constate qu'en présence de la lentille les franges sont vues sous un angle

$$\theta' \simeq \frac{i/2}{f'}$$

Pour qu'elles puissent être vues par l'observateur, il faut alors avoir

$$\theta' > \alpha \quad \text{soit} \quad \boxed{f' < \frac{i}{2\alpha} = 8,3 \text{ cm.}}$$

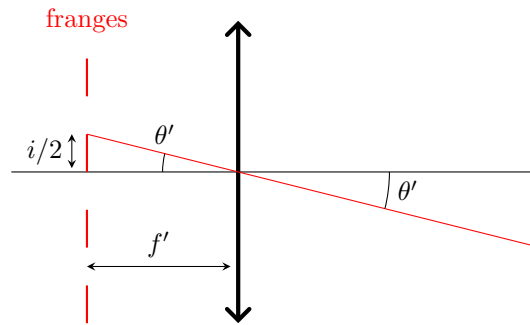


Figure 3 – Observation des franges au travers d'une lentille.

Exercice 4 : Mesure de l'indice de l'air

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2

- 
 ▷ *Lame d'air;*
 ▷ *Objet de phase.*

1 Cf. cours. Les franges d'interférence sont des cercles concentriques. Avec une source étendue incohérente, elles sont localisées à l'infini ... mais ce n'est pas le cas avec un laser, car les mécanismes d'émission lui permettent de former une source spatialement *cohérente*.

La distinction sur la cohérence spatiale d'un laser par rapport à une source classique me semble hors programme en PT ... mais en même temps le retour du candidat n'est pas très précis, et je ne suis pas certain que la question ait réellement été posée de la sorte.

2 Pour une lame d'air d'épaisseur e , l'ordre d'interférences au centre vaut

$$p = \frac{2n_0e}{\lambda}.$$

Le candidat précise dans son retour d'oral que l'examineur a accepté qu'il lui donne le résultat sans démonstration ... mais attention à ne pas oublier l'indice optique de l'air, car c'est lui qui nous intéresse dans cet exercice.

3 Notons n l'indice instantané du gaz contenu dans la cuve, compris entre n_0 et 1, et ℓ sa longueur. Les parois de verre sont d'indice n_v et d'épaisseur e_v . On en déduit la différence de marche entre les rayons traversant la cuve et ceux qui ne la traversent pas,

$$\delta = 2n_0e + 2(n_v e_v + n\ell + n_v e_v) - 2n_0(e_v + \ell + e_v)$$

d'où on en déduit l'ordre d'interférences à un instant quelconque de l'expérience,

$$p = \frac{2n_0e + 4(n_v - n_0)e_v + 2(n - n_0)\ell}{\lambda}.$$

Au début de l'expérience, $n = n_0$ donc

$$p_I = \frac{2n_0e + 4(n_v - n_0)e_v}{\lambda}$$

et à la fin $n = 1$ ce qui donne

$$p_F = \frac{2n_0e + 4(n_v - n_0)e_v + 2(1 - n_0)\ell}{\lambda}.$$

Ainsi, l'ordre d'interférences a varié en valeur absolue de

$$\Delta p = |p_F - p_I| = \frac{2(n_0 - 1)\ell}{\lambda} \quad \text{d'où} \quad n_0 - 1 = \frac{\lambda \Delta p}{2\ell}.$$

Or une variation d'une unité de l'ordre d'interférences se traduit par le retour à une frange brillante au centre de l'écran. On observe sur la courbe donnée par l'énoncé 13 maxima puis un minimum d'intensité, ce qui permet d'en déduire

$$13,5 < \Delta p < 14$$


soit en prenant les valeurs numériques

$$2,67 \cdot 10^{-4} < n_0 - 1 < 2,77 \cdot 10^{-4}.$$

À titre de comparaison, la valeur tabulée est de $2,72 \cdot 10^{-4}$ à 20°C . Une exploitation plus fine de la courbe laisse clairement entendre que $\Delta p \simeq 13,75$, ce qui mènerait encore plus près de cette valeur.

Exercice 5 : lame de verre

oral banque PT |  3 |  3

-  ▷ *Lame à faces parallèles ;*
- ▷ *Calcul de chemin optique ;*
- ▷ *Étude détaillée de la figure d'interférences.*

Les notations utilisées pour l'ensemble de l'exercice sont représentées figure 4.

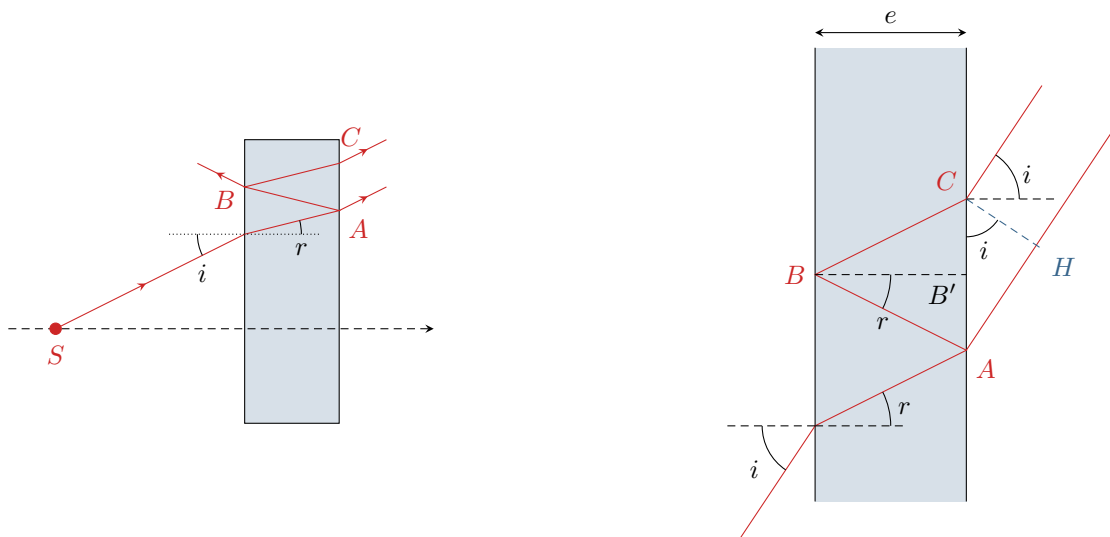


Figure 4 – Interférences avec une lame de verre. La loi de Descartes de la réfraction appliquée à l'entrée et à la sortie de la lame montre que l'angle d'émergence est égal à l'angle d'incidence : « $\sin i = n \sin r = \sin i$ ».

- 1** Les deux ondes qui interfèrent sont d'une part l'onde qui traverse directement la lame et en ressort au point A , et d'autre part celle qui fait un aller-retour dans la lame en étant réfléchi aux points A et B pour en ressortir au point C . L'énoncé indique que l'onde qui se réfléchit en C et fait un deuxième aller-retour dans la lame est négligeable, il s'agit bien d'interférences à deux ondes seulement.
- 2** Dans un Michelson en lame d'air, les interférences sont localisées à l'infini. Par analogie, on peut penser qu'il en est de même ici. Il faut donc utiliser une **lentille convergente** et placer l'écran d'observation **dans le plan focal image**.

Complément complètement hors-programme : Il existe un théorème appelé théorème de localisation, démontrable comme tout théorème qui se respecte, qui indique que les interférences par division d'amplitude sont localisées là où se coupent les deux rayons émergents de l'interféromètre issus du même rayon incident. Ici, les deux rayons représentés sont issus du même rayon incident et ressortent parallèles de « l'interféromètre », ce qui revient à dire qu'ils se coupent à l'infini.

- 3** • **Première démonstration :** une première possibilité consiste à prolonger les deux rayons émergents de la lame jusqu'à l'axe optique pour identifier les sources secondaires ... mais aboutir au résultat est moins immédiat qu'en lame d'air à cause de la réfraction qu'il n'est pas si simple de prendre en compte.

• **Deuxième démonstration :** on peut également adapter la deuxième méthode pour démontrer le résultat en lame d'air, qui consiste à raisonner avec les miroirs. Si la source était située au point d'observation M , alors d'après le principe de retour inverse de la lumière et le théorème de Malus, les points H et C seraient situés sur le même plan d'onde et ainsi $(CM) = (HM)$. Ainsi,

$$\delta = (SM)_C - (SM)_A = [(SA) + (AB) + (BC) + (CM)] - [(SA) + (AH) + (HM)] .$$

En raisonnant dans le triangle ABB' ,

$$\cos r = \frac{BB'}{AB} = \frac{e}{AB} \quad \text{d'où} \quad AB + BC = \frac{2e}{\cos r} .$$

Par ailleurs, en raisonnant dans le triangle ACH ,

$$\sin i = \frac{AH}{AC} = \frac{AH}{2AB'} \quad \text{soit} \quad AH = 2AB' \sin r$$

et en revenant au triangle ABB'

$$\tan r = \frac{AB'}{BB'} = \frac{AB'}{e}$$

si bien que

$$AH = 2e \tan r \sin i.$$

En prenant en compte les indices pour exprimer les chemins optiques,

$$\delta = (AB) + (AC) - (AH) = \frac{2ne}{\cos r} - 2e \tan r \sin i.$$

Or d'après la loi de la réfraction $\sin i = n \sin r$, d'où

$$\delta = \frac{2ne}{\cos r} - 2e \frac{\sin r}{\cos r} n \sin r = \frac{2ne}{\cos r} (1 - \sin^2 r) = \frac{2ne}{\cos r} \cos^2 r$$

ce qui conduit en fin de compte à

$$\boxed{\delta = 2ne \cos r.}$$

4 Le rayon R sur l'écran est relié à l'angle i , par $\tan i \simeq i = R/f'$. Par un développement limité,

$$p = \frac{2ne}{\lambda} \left(1 - \frac{r^2}{2}\right)$$

et en combinant avec la loi de la réfraction linéarisée, $i = nr$, on aboutit à

$$\boxed{p(M) = \frac{2ne}{\lambda} \left(1 - \frac{R^2}{2n^2 f'^2}\right).}$$

5 Comme toujours en configuration « lame », l'ordre est maximal au centre (ce qui se voit sur l'expression précédente de p), où il vaut

$$p_{\max} = \frac{2ne}{\lambda} = 54,5.$$

L'ordre est maximal au centre, donc le premier anneau brillant a pour ordre l'entier immédiatement inférieur, soit $p_1 = 54$. D'après l'expression précédente,

$$1 - \frac{R_1^2}{2n^2 f'^2} = \frac{p_1 \lambda}{2ne} \quad \text{soit} \quad \frac{R_1^2}{2n^2 f'^2} = 1 - \frac{p_1 \lambda}{2ne} \quad \text{d'où} \quad \boxed{R_1 = n f' \sqrt{2 - \frac{p_1 \lambda}{ne}} = 4,2 \text{ cm}.}$$