

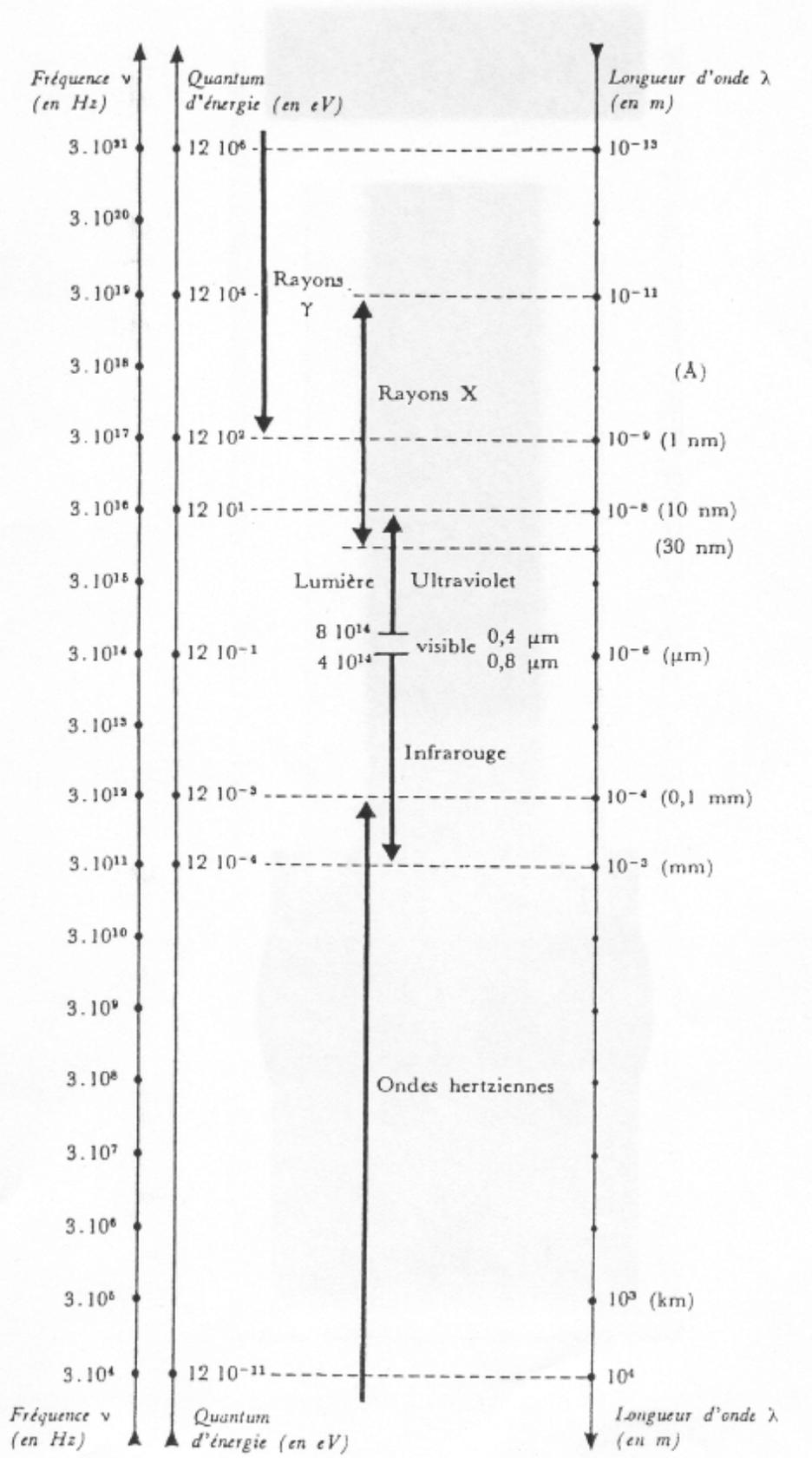
**I N S A de RENNES**  
**Physique 1<sup>ère</sup> Année de 1<sup>er</sup> Cycle**

# **TRAVAUX DIRIGES**

## **d'OPTIQUE**

**Année universitaire 2006-2007**

# LES RADIATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES



## **SOMMAIRE**

	<b>Pages</b>
<b>Sélection d'ouvrages</b>	<b>2</b>
<b>Animations optiques avec Cabri</b>	<b>3</b>
<b>Quelques remarques...</b>	<b>4</b>
<b>Liste des exercices qui seront traités en TD...</b>	<b>5</b>
<b>1. Applications des lois de Snell-Descartes</b>	<b>6 à 11</b>
<b>2. Miroirs</b>	<b>12 à 16</b>
<b>3. Dioptries</b>	<b>17 à 20</b>
<b>4. Lentilles minces</b>	<b>21 à 22</b>
<b>5. Œil</b>	<b>23 à 24</b>
<b>6. Instruments d'optique</b>	<b>25 à 29</b>
<b>Réponses aux exercices</b>	<b>30 à 31</b>

**SELECTION D'OUVRAGES**  
**« OPTIQUE »**

- J.M. BREBEC, P. DENEVE, ...  
Optique 1<sup>ère</sup> année, exercices et problèmes corrigés  
(collection H. prépa -Hachette )
- A. MAUREL, J.M. MALBEC  
  
Optique Géométrique, rappels de cours et exercices (Belin Sup)
- J.P. PARISOT, P. SEGONDS, S. LE BOITEUX  
  
Optique, cours et exercices avec solutions (Dunod)
- J.P. PARISOT , S. LE BOITEUX, P. SEGONDS, M. DOBRIJEVIC  
  
T D optique (Dunod)
- P. BRENDERS, M. SAUZEIX  
  
Optique, cours, méthodes exercices résolus (Les Nouveaux Précis Bréal)
- G. SOUM, M. DENIZART, R. JAGUT  
  
Travaux dirigés, 1er cycle  
Optique géométrique (Hachette )

## Animations optiques avec CABRI

De nombreuses figures d'optique réalisées avec le logiciel de géométrie dynamique «Cabri-géomètre II» sont accessibles des PC du Centre Multimédia en cliquant sur les icônes suivantes: **Scientifique – optique - cabri-géomètre II - (ouvrir) - optique géométrique**

Ces figures sont également accessibles des résidences avec votre PC personnel ; pour ce faire :

- installer le logiciel Cabri-géomètre II disponible sur le site Intranet INSA (services CRI- services en ligne – logiciels)
- se connecter au dossier réseau Cabri via : **Poste de travail – outils - connecter à un lecteur réseau** <\\educ1.educ.insa\apps\cabri> avec votre identifiant insa (educ\ « login »)

Les noms des figures qui se rapportent directement à des exercices de ce fascicule sont précisés ci-dessous.

### Correspondance exercices TD Optique - Figures réalisées avec Cabri

Répertoire	Nom des fichiers (.fig)
Réfraction-Dioptres	Réflexion-réfraction
Réfraction-Dioptres	Incidence Brewster
Instruments	Réfractomètre Pulfrich 1 (liquide)
Réfraction-Dioptres	Lame faces parallèles 1/2
Prismes	Prisme 0/1/2/3 (déviation); Prisme 1/2/3 (dispersion)
Réfraction-Dioptres	Arc-en-ciel 1/2/3/4
Réfraction-Dioptres	Mirage inférieur 1/2 (milieu stratifié); Mirage supérieur (milieu stratifié)
Réflexion-Miroirs	Miroir plan 1 (translation) ; Miroir plan 2 (rotation)
Instruments	Sextant 1 (principe); Sextant 2 (pratique)
Instruments	Télémetre
Réflexion-Miroirs	Miroir parabolique
Réflexion-Miroirs	Miroir sphérique concave 1/2 ; Miroir sphérique concave (stigmatisme)
Lentilles minces	Lentille convergente-divergente
Lentilles minces	Loupe 1/2
Instruments	Microscope
Instruments	Lunette astro 0/1/2
Instruments	Téléobjectif
Lentilles minces	Doublet général mnp
Réflexion-Miroirs; Réfraction-Dioptres	Miroir sphérique convexe 1/2; Dioptré sphérique (stigmatisme)

PS: vous trouverez d'autres figures sur le site :

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/enseignement/tp/optique>

## Quelques remarques importantes sur le nombre de chiffres significatifs utilisés dans l'écriture des constantes physiques

La plupart des constantes physiques sont connues avec une très grande précision :

$$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$e = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$N_A = 6,02205 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$m_e = 9,10959 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

...

Or, on écrit souvent, abusivement et pour des raisons de facilité :

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

...

Il faut être conscient que cette notation simplifiée n'est en rien significative de la précision sur ces grandeurs. On prendra donc pour habitude de considérer, même si le nombre de chiffres significatifs donné dans l'énoncé est inférieur à celui-ci :

- la vitesse de la lumière dans le vide avec 3 chiffres significatifs :

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

- l'indice de l'air avec 4 chiffres significatifs :  $n_o = 1,000$

**Liste des exercices qui seront traités en TD en 2005-2006**  
**(Exercices à préparer)**

Semaine	Sujet de l'exercice	Exercices
1	Lois de la réfraction	1.01- 1.03 - 1.04
2	Lois de la réfraction	1.06 - 2.01- 2.03
3	Miroirs	2.06 - 2.07 - 2.08
4	Dioptries	3.01- 3.05 - 3.07
5	Lentilles	4.01 - 4.02
6	Œil	5.01 - 5.02 - 5.05
7	Instruments d'optique	6.01 - 6.02

## 1 – APPLICATIONS DES LOIS DE SNELL-DESCARTES

### 1-01) Réfraction limite, réflexion totale

Deux milieux homogènes et isotropes, d'indices respectifs  $n_1$  et  $n_2$ , sont séparés par un plan (P). On considère les rayons lumineux qui passent du milieu  $\eta$  dans le milieu  $\iota$  en un même point I de (P) sous des angles d'incidence compris entre  $-\pi/2$  et  $\pi/2$ .

1) Dans le cas où  $n_1 < n_2$ , c'est-à-dire où le second milieu est plus réfringent que le premier, déterminer le demi-angle au sommet du cône dans lequel se trouvent les rayons réfractés.

A.N. :  $n_1 = 1$  (air) et  $n_2 = 4/3$  (eau).

2) Dans le cas où  $n_1 > n_2$ , déterminer le demi-angle au sommet du cône dans lequel se trouvent les rayons incidents qui subissent la réfraction en I. Qu'advient-il des rayons incidents extérieurs à ce cône ?

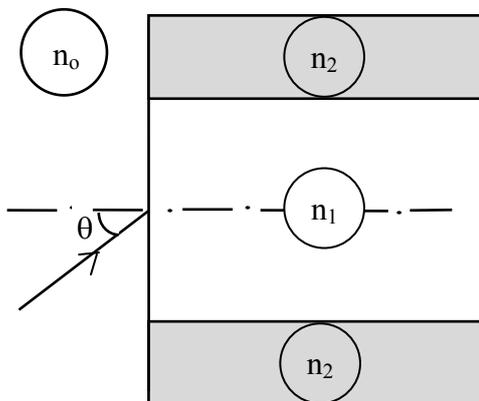
A.N. :  $n_1 = 1,5$  (verre) et  $n_2 = 1$  (air).

### 1-02) Incidence de Brewster

On considère un rayon lumineux qui se propageant dans l'air arrive à une interface plane air(1)-verre(n). Pour quelle valeur  $i_B$  de l'angle d'incidence, le rayon réfléchi dans l'air est-il perpendiculaire au rayon réfracté dans le verre ?

A.N. Calculer  $i_B$  pour  $n = 1,5$ .

1.03) Une fibre optique à saut d'indice est constituée par un cylindre (le cœur) d'indice  $n_1$  entouré par une enveloppe (la gaine) d'indice  $n_2 < n_1$ .



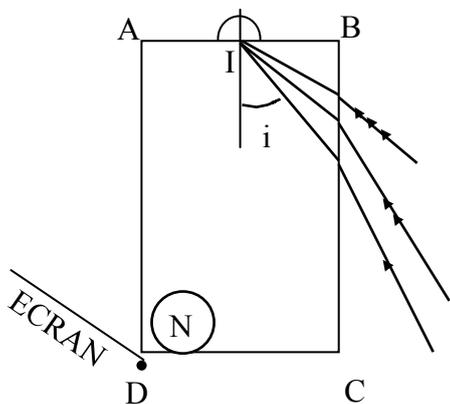
Cette fibre est placée dans un milieu d'indice  $n_0$  et a pour face d'entrée un plan de section droite. Montrer que tout rayon incident situé dans le plan méridien de la fibre et formant un angle  $\theta$  avec son axe reste ensuite prisonnier dans le cœur de la fibre si  $\theta$  est inférieur à une valeur limite  $\theta_L$ .

Exprimer l'ouverture numérique  $A = \sin \theta_L$  de la fibre en fonction des indices  $n_0$ ,  $n_1$  et  $n_2$ .

A.N. : Calculer A et  $\theta_L$  dans le cas où  $n_0 = 1$ ,  $n_1 = 1,492$  et  $n_2 = 1,417$ .

### 1-04) Réfractomètre à réflexion totale

On dépose, au centre I de la face horizontale AB d'un bloc de verre parallélépipédique d'indice connu  $N$  ( $N$  élevé), une goutte d'un liquide d'indice inconnu  $n < N$ . On éclaire l'une des faces verticales (BC) par un large faisceau de lumière monochromatique qui converge en I.



On visualise sur un écran placé de l'autre côté (AD) une zone d'ombre et une zone fortement éclairée.

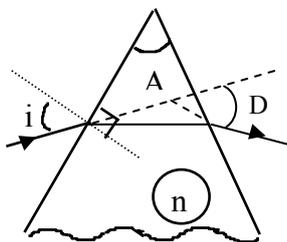
1) Expliquer ce phénomène.

2) Montrer que la connaissance de  $N$  et de l'angle  $\alpha$ , défini par la normale à la face AD et la ligne de séparation entre la région éclairée et celle qui ne l'est pas, permet d'en déduire l'indice  $n$  du liquide; donner la formule reliant ces grandeurs.

3) A.N. : Sachant que  $N = 1,626$ , quel est le domaine d'utilisation de cet appareil pour la mesure de l'indice des liquides ?

1.05) On considère une **lame à faces parallèles** d'épaisseur  $e$  et d'indice  $n$ . Montrer qu'un rayon incident quelconque donne un rayon émergent qui lui est parallèle. Calculer la translation du rayon émergent dans la direction perpendiculaire au rayon incident.

1-06) Un **prisme** d'angle  $A = 60^\circ$  constitué par un verre d'indice  $n = 1,5$  ; il se trouve dans un milieu d'indice 1.



1) Trouver la condition d'émergence du rayon incident lorsque  $A$  et  $n$  sont fixés.

2) Calculer la déviation  $D$  du rayon émergent par rapport au rayon incident.

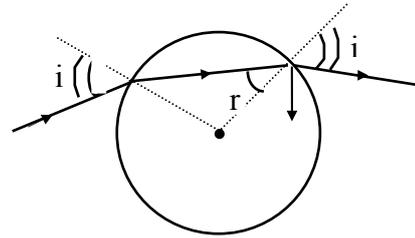
3) Montrer que cette déviation passe par un minimum  $D_m$  lorsque  $i$  varie. Exprimer  $D_m$  en fonction de  $i$  et de  $A$ .

4) Tracer la courbe  $D(i)$

### 1-07) L'arc-en-ciel

**A** - Un rayon de lumière monochromatique pénètre dans une sphère homogène d'indice  $n$  sous l'incidence  $i$ .

1°) Calculer la déviation  $D$  par rapport au rayon incident, du rayon émergent après  $p$  réflexions partielles à l'intérieur de la sphère.



2°) Montrer que cette déviation passe par un minimum  $D_m$  pour une valeur particulière  $i_m$  de l'angle d'incidence. Calculer  $\cos i_m$ .

3°) Tracer la courbe  $D(i)$  pour  $n = \frac{4}{3}$  et  $p = 1$ .

**B** - Un faisceau monochromatique de rayons parallèles frappe la sphère. Justifier sommairement que l'intensité de la lumière émergente est maximale au minimum de déviation. Dans le cas où  $p = 1$ , quelle est, dans l'espace, l'enveloppe de ces rayons émergents ? Quel est l'ensemble des positions que peut occuper la sphère si l'on veut observer cette lumière à partir d'un point  $\Omega$  ?

**C** - Que se passe-t-il si le faisceau de lumière parallèle est polychromatique ?

**D** - Lorsque le soleil éclaire un ensemble de gouttes d'eau sphériques dont l'indice varie en fonction de la longueur d'onde de la lumière, il se produit le phénomène d'arc-en-ciel ; on donne :

$$n_R = 1,3317 \text{ pour le rouge}$$

$$n_V = 1,3448 \text{ pour le violet.}$$

1°) Calculer  $i_m$  et la déviation correspondante  $D_m$  pour ces deux radiations dans les cas où  $p = 1$  (arc du 1er ordre) et  $p = 2$  (arc du 2ème ordre).

2°) Expliquer les couleurs de l'arc-en-ciel et justifier leur ordre dans les cas  $p = 1$ ,  $p = 2$ .

3°) Montrer que le phénomène est de révolution autour de la droite définie par le centre  $S$  du soleil et le centre optique  $\Omega$  de l'œil de l'observateur. En déduire les conditions d'observation de l'arc-en-ciel.

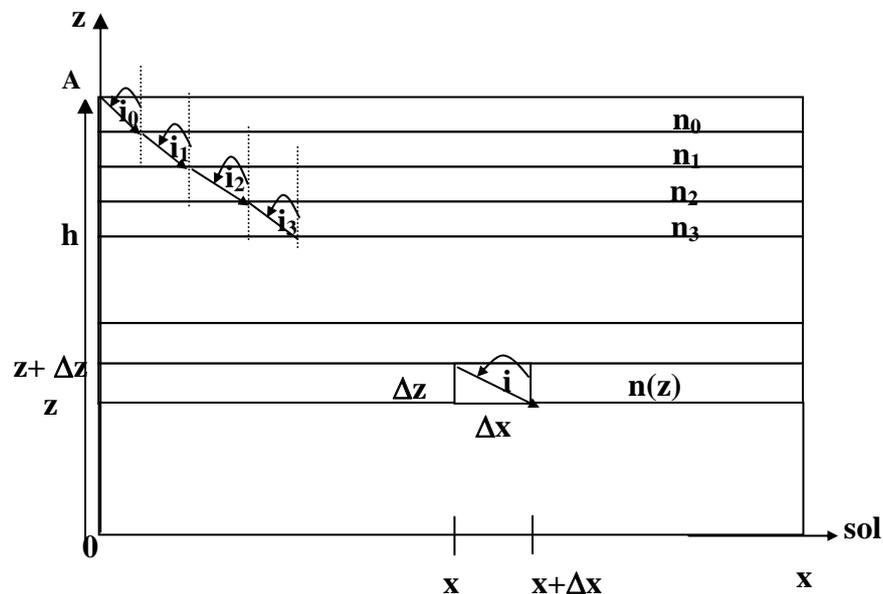
### 1-08) Le phénomène des mirages dans un milieu non homogène

A la fin d'une journée estivale fortement ensoleillée et sans vent, lorsque le sol surchauffé se refroidit moins vite que l'air, il apparaît un gradient de température dans les couches d'air les plus basses. A ce gradient de température correspond un gradient de densité (l'air le plus chaud est le plus léger) et donc un gradient d'indice (l'indice diminue avec la densité).

On se propose d'étudier la trajectoire d'un rayon lumineux provenant d'un point A situé à l'altitude  $h$  (indice  $n_0$ ) et faisant un angle  $i_0$  avec la normale au sol, en admettant qu'au voisinage du sol l'indice  $n$  de l'air croît avec l'altitude  $z$  suivant la loi :

$$n = n_s (1 + \alpha z)^{1/2} \quad \text{où } n_s \text{ et } \alpha \text{ sont des constantes.}$$

Pour cela, on assimile l'atmosphère à une succession de couches homogènes infiniment minces d'indices respectifs  $n_0, n_1, n_2, \dots$

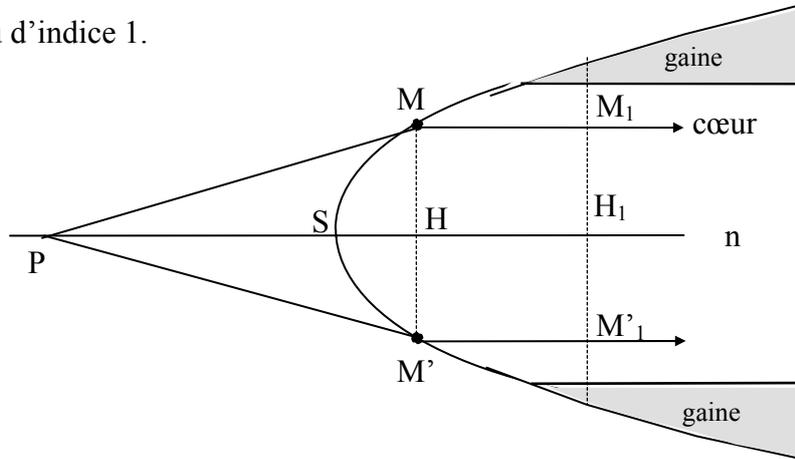


1. Montrer que pour tout rayon pénétrant sous l'angle  $i$  dans une tranche d'indice  $n$  à l'altitude  $z$ , le produit  $n \cdot \sin i$  reste constant
2. En considérant qu'à la traversée d'une tranche d'air d'épaisseur  $\Delta z$ , le rayon qui pénètre sous un angle  $i$ , s'écarte de  $\Delta x$  par rapport à la normale, trouver l'expression qui lie  $\Delta z$ ,  $\Delta x$  et  $i$  ; l'écrire sous la forme d'une équation différentielle du type:  $dz = f(z) dx$  en faisant tendre les variations  $\Delta z$  et  $\Delta x$  vers les infiniments petits  $dz$  et  $dx$  (différentielles) et en éliminant la variable  $i$ .
3. Résoudre l'équation différentielle et en déduire la trajectoire du rayon lumineux
4. Justifier le phénomène de mirage à l'aide de la figure « mirage inférieur 1.fig ».

**NB :** On peut appliquer la même description pour expliquer les mirages « supérieurs » observés par la réfraction de la lumière sur les couches supérieures inhomogènes de l'atmosphère : les rayons lumineux émis par le soleil (ou une étoile) sont alors courbés.

### 1-09) Optimisation du couplage entre une source lumineuse et une fibre optique

On se propose de trouver le profil d'extrémité de fibre qui transforme le faisceau de rayons divergents émis par une source ponctuelle P (diode laser par exemple) située à la distance  $\overline{PS} = f$  de la fibre en un faisceau de rayons parallèles à l'axe de la fibre. P est situé dans le milieu d'indice 1.



On considère que la fibre a un indice de cœur n (fibre à saut d'indice) et que les ondes qui s'y propagent sont assimilées à des ondes planes.

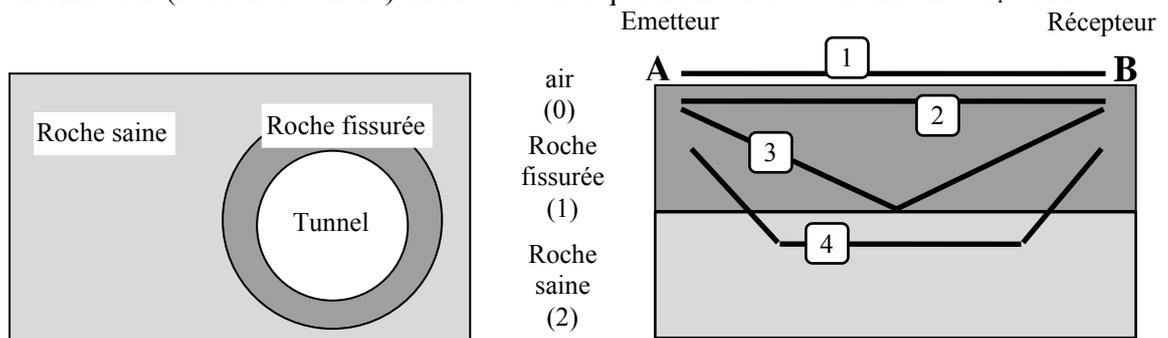
- 1) Quelle est la propriété commune à l'ensemble des points situés à l'intérieur de la fibre dans un plan perpendiculaire à son axe ?
- 2) Calculer les chemins optiques S(PM) et S(PH) en posant  $HM = r$  et  $SH = x$
- 3) En déduire l'équation du dioptre air-fibre optique qui réalise le couplage souhaité.

L'écrire sous la forme  $\frac{(x + a)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1$ , en précisant les valeurs des constantes a et b en

fonction des données du problème. Quel est le nom de cette surface ?

- 1-10)** La vitesse de propagation des **ondes acoustiques** dans les solides dépend de la nature du matériau, mais aussi de son degré d'altération et de fissuration.

On se propose d'appliquer cette propriété à la détermination de l'épaisseur de la roche microfissurée lors du percement d'un tunnel. Pour ce faire on place sur la paroi du tunnel, un émetteur (la source sonore) en A et des récepteurs B; situés à la distance  $d_i$  de A.



Parmi les ondes émises par la source et qui se propagent dans toutes les directions, seules peuvent être détectées par les récepteurs (cf. figure ci-dessus où les ondes sont représentées par leur direction de propagation) :

- les ondes qui se propagent directement soit dans l'air (1), soit dans la roche fissurée (2)
- les ondes (3) réfléchies à l'interface roche fissurée-roche saine
- les ondes (4) qui pénètrent dans la roche saine sous incidence limite, se propagent dans la roche saine parallèlement à l'interface et sont réfractées vers B.

1) Sachant que les vitesses de propagation de l'onde sont respectivement  $v_0$  dans l'air ( $v_0 \approx 330 \text{ m.s}^{-1}$ ),  $v_1$  dans la roche fissurée et  $v_2$  dans la roche saine et que  $v_0 < v_1 < v_2$ , calculer les temps mis par l'onde pour parcourir les quatre trajets AB définis ci-dessus. Quel est le plus rapide des trajets (1), (2), (3) ?

2) Expérimentalement, on mesure le temps de parcours de la première onde qui est reçue par les différents récepteurs ; les résultats suivants sont ainsi obtenus :

$d_{(m)}$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10	12	14	16	18	20
$t_{(ms)}$	0,25	0,50	0,80	1,05	1,27	1,55	1,90	2,25	2,55	2,85	3,15	3,50	3,80

a) Tracer la courbe expérimentale  $t = f(d)$  et en déduire les équations des deux demi-droites qui composent cette courbe.

b) Quelle est la première onde reçue par les récepteurs :

$\alpha$ ) lorsqu'ils sont placés à proximité de la source ?

$\beta$ ) lorsqu'ils sont très éloignés de la source ?

Pour quelle distance  $d_M$  ces deux trajets sont-ils équivalents ?

c) Déterminer à partir du graphe les vitesses de l'onde dans la zone fissurée ( $v_1$ ) et dans la zone non fissurée ( $v_2$ ).

d) Exprimer l'épaisseur  $h$  de la zone fissurée en fonction de  $d_M$ ,  $v_1$  et  $v_2$ .

**A.N.** : Déterminer graphiquement  $d_M$  et en déduire  $h$ .

## 2 - MIROIRS

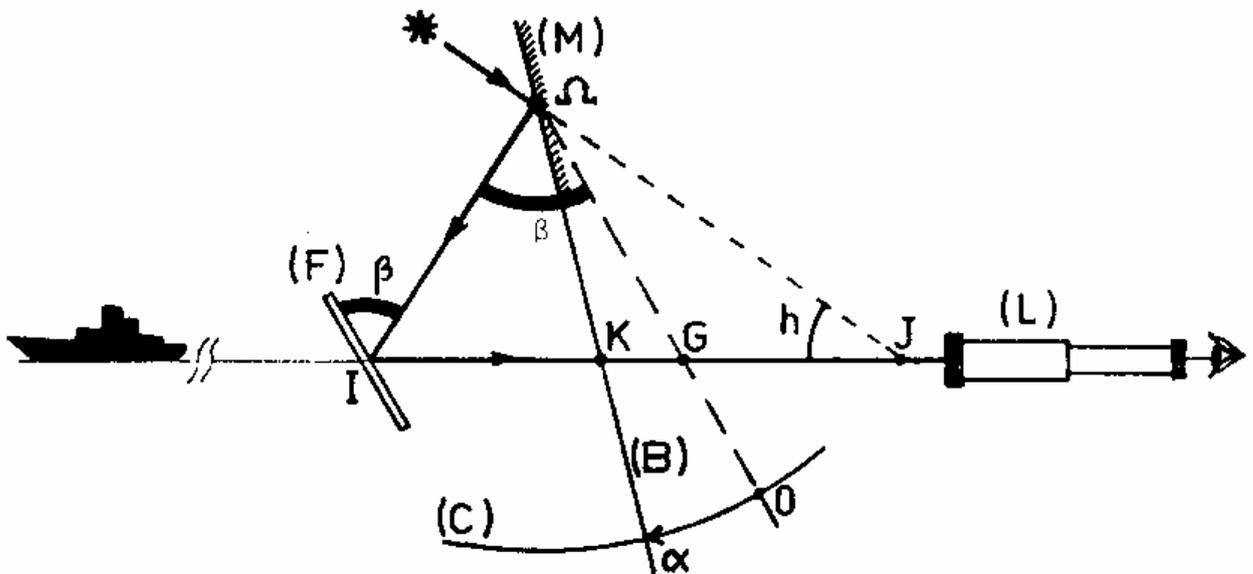
2-01) Quel est le déplacement de l'image d'un point :

- au cours d'une translation d'un miroir plan ?
- au cours d'une rotation d'un miroir plan ?

### 2-02) Sextant

Le sextant est un instrument destiné à mesurer la hauteur angulaire  $h$  des étoiles au-dessus de l'horizon.

Il comporte deux miroirs, l'un fixe semi-transparent (F), l'autre mobile parfaitement réfléchissant (M), tournant autour d'un axe  $\Omega$  perpendiculaire au plan de figure ci-dessous, plan supposé vertical.



Le miroir (M) est entraîné par un bras (B) dont l'écart angulaire  $\alpha$  est mesuré sur un arc de cercle (C) à compter de la position correspondant au parallélisme des deux miroirs (repère 0).

En orientant convenablement le miroir (M), un observateur peut, au travers de la lunette (L), superposer à l'image d'un point éloigné sur l'horizon celle de l'étoile qui l'intéresse.

Exprimer l'angle  $h$  en fonction de l'angle  $\alpha$ .

### 2-03) Miroir tournant

Une source laser de direction horizontale, émet en O un pinceau de lumière parallèle qui atteint périodiquement un satellite S, après réflexion sur un miroir plan M, disposé au sol et animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe passant par M et perpendiculaire au plan OMS.

Ce satellite est équipé d'un dispositif catadioptrique capable de renvoyer vers le miroir la lumière reçue de lui.

Au retour, le pinceau lumineux, après avoir subi une nouvelle réflexion sur ce même miroir, est reçu dans une direction écartée de  $36^\circ$  par rapport à la direction de la lumière incidente.

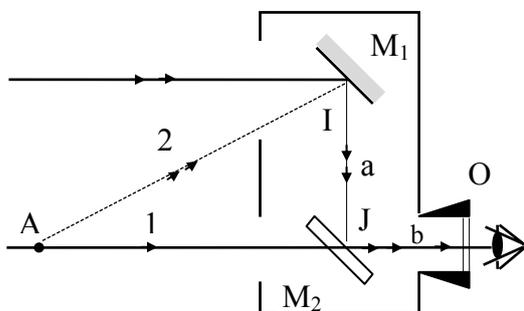
Sachant que le miroir tourne avec une vitesse angulaire de 12 tours par minute, calculer la distance (MS) du satellite, exprimée en kilomètres. On négligera (OM) devant (MS).

Rappel : vitesse de la lumière dans le vide,  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

### 2-04) Télémètre

Le télémètre est un instrument d'optique destiné à mesurer des distances. Le modèle le plus simple (télémètre pour appareil photographique par exemple) peut être schématisé (cf. ci-dessous) par deux miroirs plans  $M_1$  et  $M_2$  et un système de visée. Le miroir  $M_1$  est orientable ;  $M_2$  est fixe, incliné à  $45^\circ$  et semi-transparent. Par construction, le rayon indirect (2) qui passe par le centre d'observation O, ne peut subir que deux réflexions (une sur  $M_1$  et une sur  $M_2$ ).

On donne :  $a = IJ = 9,0 \text{ cm}$  ;  $JO = b = 1,0 \text{ cm}$ .



1)  $M_1$  et  $M_2$  sont d'abord parallèles.  
Montrer que l'observateur voit deux images des points A situés dans la direction OJ et qui ne sont pas à l'infini.  
Trouver l'expression de l'écart angulaire  $\alpha$  des deux images d'un point A situé

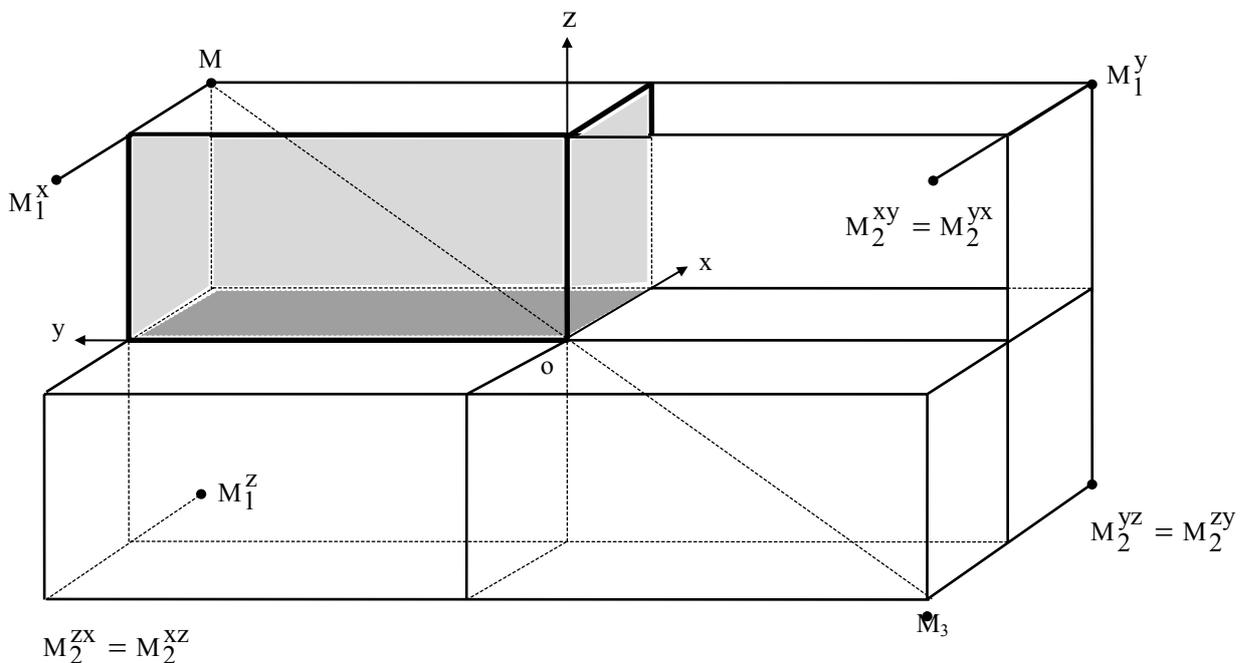
Calculer  $\alpha$  pour  $D = 1, 5, 10$  et  $100$  mètres.

2°) Pour évaluer  $D$ , on amène en coïncidence angulaire les deux images du point  $A$  en faisant tourner le miroir  $M_1$  d'un angle  $\beta$ , autour d'un axe situé dans son plan passant par  $I$  et perpendiculaire au plan de symétrie. Trouver la relation entre  $\beta$ ,  $D$  et les autres données. Supposant que l'acuité visuelle de l'observateur permette d'assurer la coïncidence à 1 minute près, évaluer l'erreur possible sur la valeur de  $D$  et la calculer numériquement pour les distances  $D = 1, 5, 10$  et  $100$  mètres.

3°) On vise un objet  $AB$ , de hauteur  $h$ , perpendiculaire à  $OJ$  ; montrer que la coïncidence réalisée rigoureusement pour le point  $A$  ne l'est pas pour les autres points du plan objet ; évaluer la valeur limite de  $h$  pour laquelle le défaut de coïncidence reste inférieur à l'acuité visuelle de l'observateur pour les distances  $D$  égales à  $5$  m et à  $1$  m.

**2-05)** On dispose **trois miroirs plans** suivant les faces d'un trièdre trirectangle avec les faces réfléchissantes à l'intérieur du trièdre. Construire toutes les images d'un point lumineux dans ce système. En déduire la direction finale d'un rayon lumineux qui s'est réfléchi sur trois faces. (Application : le « cataphote ». La lumière émise par les phares d'une voiture est renvoyée vers elle, quelle que soit sa position).

Miroirs  $(xOy)$ ,  $(yOz)$ ,  $(zOx)$ , réfléchissants côté  $M$



**2-06)** Un **miroir** dont le sommet O est situé à l'origine des axes (x, y) est tangent à l'axe Oy en O et il a pour foyer le point F situé sur l'axe Ox à la distance  $\overline{OF} = f$ .

En utilisant le principe de Fermat, déterminer la forme que doit avoir ce miroir pour que tous les rayons provenant de l'infini, parallèlement à l'axe Ox, convergent en F.

**NB :** Applications : antennes radars, fours solaires, miroirs astronomiques...

**2-07)** Un **miroir sphérique** concave a un rayon  $R = 0,50$  m. Quelles sont la position, la grandeur et la nature de l'image d'un objet réel de hauteur  $h = 1,0$  cm placé normalement à l'axe à la distance x du sommet du miroir.

**A.N. :**  $x = -0,70$  m ;  $-0,50$  m ;  $-0,40$  m ;  $-0,25$  m ;  $-0,10$  m.

Même question pour un objet virtuel placé à  $+0,30$  m du sommet du miroir.

**2-08)** Une « **cavité confocale symétrique** » équipant un laser est constituée par deux miroirs sphériques concaves de même rayon et de foyers confondus en F, au centre de la cavité.

La distance entre les sommets  $S_1$  et  $S_2$  des miroirs  $M_1$  et  $M_2$  est voisine de 15 cm. (Nous écrirons  $\overline{FS_2} = -\overline{FS_1} = f$ ).

Un point B situé à 3,0 cm de l'axe et dont la projection A sur celui-ci se trouve à la distance  $\overline{FA} = -4,5$  cm, envoie, vers le miroir  $M_2$ , un pinceau lumineux dans la direction de l'axe optique. Après une première réflexion, la lumière converge en  $B_1$  ; elle subit ensuite une seconde réflexion sur le miroir  $M_1$  pour converger en  $B_2$  ; une troisième sur le miroir  $M_2$  avec pour image  $B_3$  ; une quatrième sur le miroir  $M_1$  avec pour image  $B_4$ .

1) Déterminer la position des quatre points  $B_1, B_2, B_3, B_4$ .

2) La propriété remarquable qui apparaît est-elle liée à la position particulière choisie pour

A ou est-elle indépendante de  $\overline{FA}$  ?

**N.B. :** Dans un laser le miroir  $M_1$  est un réflecteur parfait tandis que le miroir  $M_2$  est semi-transparent de manière à laisser échapper un faisceau d'intensité convenable.

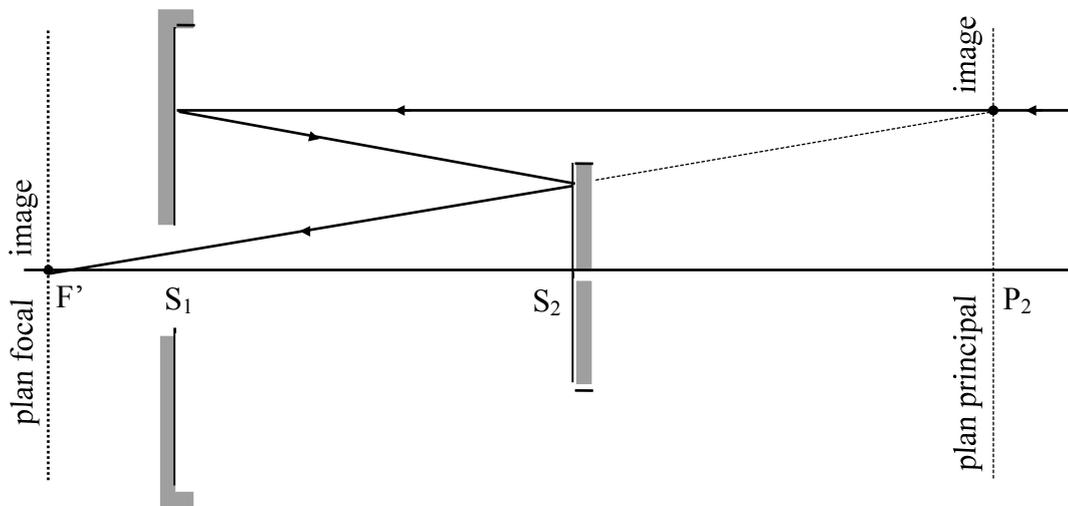
## 2-09) Télescope de Cassegrain

Un **miroir sphérique concave** reçoit des rayons en provenance d'une source située à l'infini. Les rayons réfléchis par ce miroir tombent sur un miroir sphérique convexe qui les renvoie dans le plan focal résultant (normal, en  $F'$ ) à travers une ouverture percée dans le miroir concave.

Calculer la position de ce plan focal résultant, et la distance focale résultante du système (distance entre le foyer  $F'$  et le plan qui contient l'intersection entre un rayon incident parallèle à l'axe optique et le prolongement du rayon émergent qui lui correspond).

On donne : Rayon de courbure du miroir concave = 200 cm  
Rayon de courbure du miroir convexe = 50 cm  
Distance des sommets des miroirs = 80 cm

Quelle devrait être la forme réelle des surfaces du miroir équivalent pour que le système soit rigoureusement stigmatique pour un point situé sur l'axe à l'infini et le foyer ?



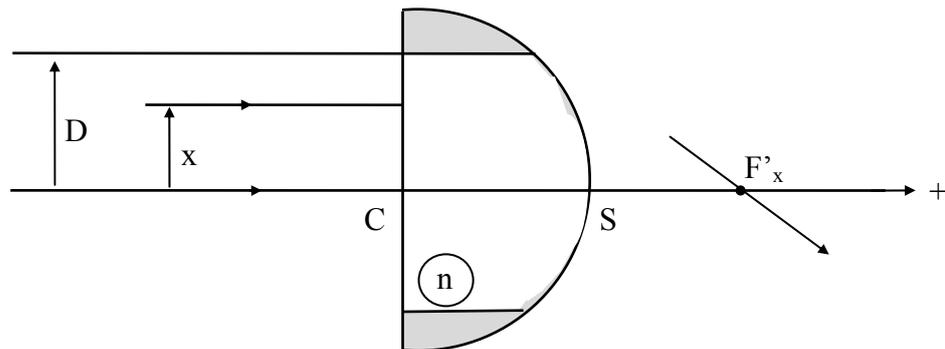
### 3 – DIOPTRES ET SYSTEMES CENTRES DIOPTRIQUES

**3-01)** Un **dioptre sphérique** de centre C et de sommet S a un rayon  $R = 5,0$  cm. Un petit objet  $\overline{AB} = 1,0$  cm, perpendiculaire à l'axe  $\overline{CS}$  se trouve à la distance  $\overline{CA} = 2 \overline{CS}$  du centre C. Le dioptre sépare deux milieux d'indice  $n$  et  $n'$  ; il donne de l'objet  $\overline{AB}$  situé dans le milieu  $n$  deux images, l'une par réflexion, l'autre par réfraction. Déterminer la position et la grandeur de ces images dans le cas où  $n = 1$  et  $n' = 1,5$ .

**3-02)** Un **bâton rectiligne** AB est à demi-plongé dans l'eau avec une inclinaison  $\alpha$  par rapport à la verticale. Quelle est l'inclinaison  $\alpha'$  de l'image de la partie immergée vue par un observateur placé dans l'air ?

**3-03)** Déterminer la position, la grandeur et la nature de l'image d'un objet de 2,0 mm de hauteur placé dans l'air à 5,0 cm de la face plane d'une **lentille demi-boule**. Le rayon de la sphère est 7,5 cm ; l'indice de la lentille est égal à 1,5.

**3-04)** Une lentille **demi-boule**, en verre d'indice  $n$  de centre C et de rayon  $\overline{CS} = R$ , disposée dans l'air, est éclairée sur toute sa face plane par un faisceau de lumière parallèle à son axe optique.

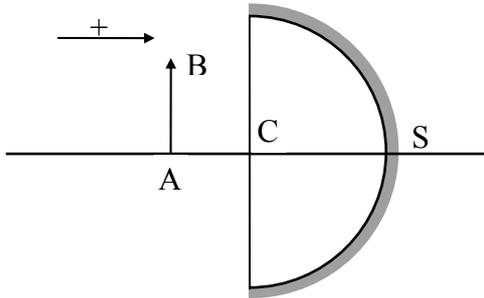


1) Expliquer pourquoi le faisceau émergent n'est pas modifié lorsque le verre situé à une distance de l'axe supérieure à une valeur  $D$  (partie grisée sur la figure), est éliminé tout autour de l'axe. Déterminer  $D$  et l'exprimer en fonction de  $n$  et  $R$ .

2) Déterminer pour les rayons dont la distance à l'axe est  $x \in [0, D]$ , la position  $\overline{CF}'_x$  du foyer image correspondant. Définir l'intervalle de variation de  $\overline{CF}'_x$  ; quelle est la borne qui correspond aux conditions d'approximation de Gauss ?

Application numérique pour  $n = 1,5$ ;  $R = 3,0$  cm.

**3-05)** La face sphérique d'une **lentille demi-boule**, en verre ( $n = 1,5$ ) de rayon 10 cm est argentée. La lumière pénètre par l'autre face (voir figure).

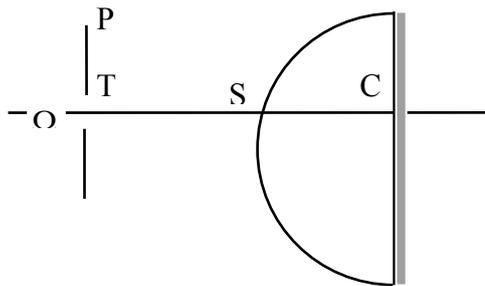


1) Déterminer la position et la grandeur de l'image, à travers ce système, d'un objet  $\overline{AB}$  situé à 5,0 cm en avant de la lentille.

Tracer la marche des rayons lumineux.

2) Où se trouvent le centre et le sommet du miroir équivalent à ce système catadioptrique ?

**3-06)** Un système catadioptrique est constitué par une **lentille demi-boule**, dont la face plane est argentée. On veut connaître l'indice du verre qui compose cette lentille. Pour cela, on éclaire la lentille à l'aide d'un trou- source T.



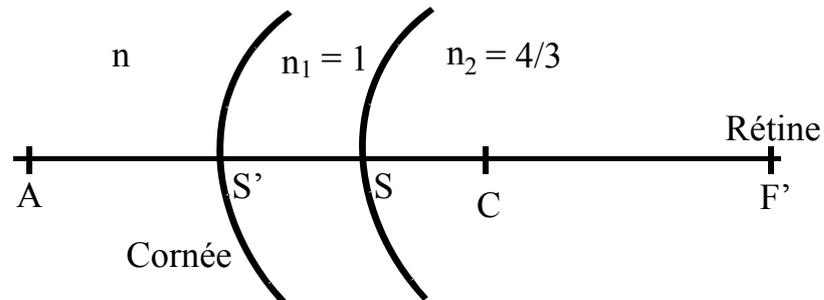
L'image de retour du trou T se forme nette dans le plan P pendant qu'on déplace la lentille sur une distance de 5,0 mm sur l'axe. On la fixe au milieu de cet intervalle et on mesure  $\overline{TS} = 94$  mm à  $\pm 2,5$  mm près. On mesure aussi le rayon de la face sphérique :

$$\overline{SC} = (50,0 \pm 0,1) \text{ mm.}$$

Quel est l'indice du verre ? Quelle incertitude a-t-on sur sa mesure ?

### 3-07) Combinaison de dioptrés simulant un œil

On peut assimiler l'œil à un dioptré sphérique séparant deux milieux d'indice  $n_1 = 1$  et  $n_2 = 4/3$  et de rayon  $\overline{SC} = 6,0$  mm (cf. figure ci-dessous). Ce dioptré est situé à 2,0 mm en arrière de la cornée de rayon  $\overline{S'C} = 8,0$  mm.



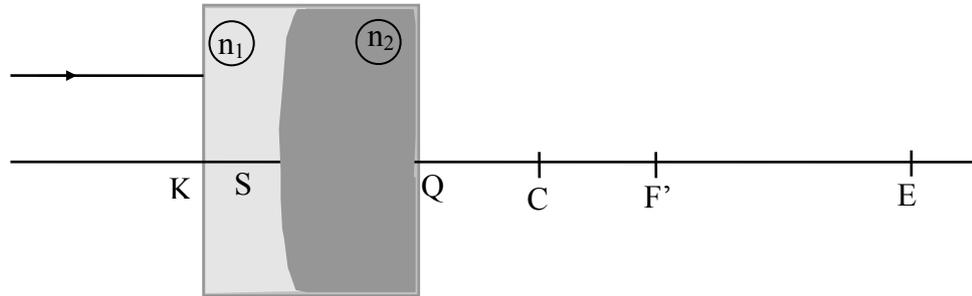
- 1) La rétine se trouve au foyer-image  $F'$  de cet ensemble lorsque le milieu précédant la cornée est l'air ( $n=1$ ), calculer dans ce cas  $\overline{SF'}$ .
- 2) Déterminer la position des foyers de chacun des dioptrés si le milieu en avant de la cornée est d'indice  $n= 4/3$ .

*Dans la suite de l'exercice, on considérera la distance  $\overline{CA}$  très grande devant les dimensions du système optique*

- 3) L'observateur regarde sous l'eau ( $n = 4/3$ ) à l'œil nu un objet A tel que  $\overline{AC} = 1,0$  m. Où se forme l'image de A : A est-il vu nettement ?

L'observateur est muni maintenant d'un masque de plongée. Le dioptré plan séparant l'eau de l'air enfermé dans le masque est à quelques cm en avant de la cornée. Où se forme maintenant l'image de A : A est-il vu nettement ?

**3-08)** Une **lentille plan-concave** d'indice  $n_1 = 1,5$  et une lentille plan-convexe d'indice  $n_2 = 1,6$  de même rayon de courbure  $\overline{SC} = R = 20$  cm, sont accolées comme schématisé ci-après :



$E'$  est le foyer image du dioptre sphérique de sommet S

$F'$  est le foyer image résultant.

- 1) Dessiner la trajectoire complète du rayon incident parallèle à l'axe optique représenté sur la figure.
- 2) Calculer, dans les conditions de Gauss, la distance focale résultante  $\overline{P_2F'}$  et vérifier qu'elle est indépendante de l'épaisseur (KS) et (SQ) des lentilles.
- 2) Déterminer la position des foyers et des plans principaux : on donne  $\overline{SQ} = 3,2$  cm et  $\overline{KS} = 1,8$  cm.

**Rappel :** La matrice de franchissement du dioptre sphérique est :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{R} & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de passage à travers les dioptres plans peut être retrouvée à partir de celle-ci.

## 4 – LENTILLES MINCES

**4-01)** Un objet de hauteur  $AB = 1,0$  cm est placé devant une lentille, perpendiculairement à l'axe optique. A est sur l'axe à 10 cm du centre optique.

1) La lentille est convergente, de distance focale  $f' = 5,0$  cm

a) Construire l'image  $A'B'$  de  $AB$  donnée par la lentille.

b) Déterminer la nature, la taille, le sens et la position de l'image.

2) Répondre aux mêmes questions, la lentille étant divergente et sa distance focale étant égale à  $-2,5$  cm.

### 4-02) Doublet

#### A) Système à une lentille

On considère une lentille mince convergente  $L$ , de centre optique  $O$ , de foyers objet  $F$  et image  $F'$  avec  $|f| = |f'| = 2,0$  cm.

1) Rappeler sans les démontrer les formules de conjugaison et de grandissement  $\gamma$  avec origine au centre optique.

2) Soit un petit objet  $AB = 1,0$  cm perpendiculaire à l'axe optique situé entre  $-\infty$  et le foyer objet  $F$  tel que  $\overline{OA} = -5,0$  cm.

a) Construire l'image  $A'B'$  de l'objet  $AB$  donnée par la lentille. Expliquer votre construction. En déduire la nature, la taille, le sens, la position de l'image ainsi que le grandissement  $\gamma$ .

b) Retrouver par le calcul les résultats précédents.

#### B) Système à deux lentilles

Pour améliorer la qualité des images données par une lentille, on est le plus souvent conduit à l'associer à une ou plusieurs lentilles. Un doublet est formé de deux lentilles minces  $L_1$  et  $L_2$ , de distances focales images  $f_1'$  et  $f_2'$  et dont les centres  $O_1$  et  $O_2$  sont séparés par une épaisseur  $e$  dans l'air. Un doublet est caractérisé par trois nombres entiers

$(n, m, p)$  tels que :

$$\frac{f_1'}{n} = \frac{e}{m} = \frac{f_2'}{p}$$

Dans cet exercice, on se propose d'étudier l'oculaire d'un instrument d'optique constituant un doublet du type (4,3,2) formé par deux lentilles minces  $L_1$  et  $L_2$  **convergentes** taillées dans le même verre, de centres optiques  $O_1$  et  $O_2$ . Le doublet ainsi réalisé possède une distance focale résultante  $f' = 40$  mm. La lumière se propage dans le sens  $O_1O_2$ .

1) La vergence  $V$  d'un doublet d'épaisseur  $e$  s'exprime en fonction des vergences  $V_1$  et  $V_2$  des lentilles  $L_1$  et  $L_2$  placées dans l'air selon la relation de Gullstrand :

$$V = \frac{1}{f'} = V_1 + V_2 - eV_1V_2$$

A partir de cette relation, déterminer les distances focales  $f_1'$  et  $f_2'$  de  $L_1$  et  $L_2$  ainsi que leur écartement  $e = O_1O_2$ .

2) a) En introduisant l'intervalle optique du doublet  $\Delta = \overline{F_1'F_2}$ , montrer que les positions des foyers principaux résultants  $F$  et  $F'$  du doublet sont données par :

$$\overline{F_1F} = -f_1'^2/\Delta \quad \text{et} \quad \overline{F_2'F'} = f_2'^2/\Delta$$

Rappel : relations de Newton avec origine aux foyers  $F$  et  $F'$   $\overline{FA} \overline{F'A'} = -f'^2$

b) Exprimer  $\overline{F_1F}$  et  $\overline{F_2'F'}$  en fonction de  $f_1'$ ,  $f_2'$  et  $e$ .

c) En déduire les positions des foyers principaux résultants  $F$  et  $F'$  de cet oculaire (on exprimera les quantités  $\overline{O_1F}$  et  $\overline{O_2F'}$ ).

3) a) On note  $P$  le point principal objet et  $P'$  le point principal image du doublet. Rappeler la définition des quantités  $\overline{PF}$  et  $\overline{P'F'}$ .

b) Exprimer les positions  $\overline{PF_1'}$  et  $\overline{P'F_2}$  en fonction de  $f_1'$ ,  $f_2'$  et  $e$ . En déduire que pour tout doublet vérifiant la relation  $f_1' + f_2' = 2e$ , les plans principaux occupent des positions particulières.

4) On se propose de vérifier la validité des calculs menés précédemment par une construction géométrique. Sur une feuille de papier millimétré :

- placer les foyers objet et image  $F_1$  et  $F_1'$  de la lentille mince  $L_1$  de centre  $O_1$  et de distance focale image  $f_1'$ . Positionner les plans focaux correspondants.

- placer la lentille mince  $L_2$  de centre  $O_2$  et de distance focale image  $f_2'$ . Positionner également les foyers objet et image  $F_2$  et  $F_2'$  ainsi que les plans focaux de cette lentille.

- déterminer en traçant la marche réelle des rayons lumineux la position du foyer objet principal  $F$ , du foyer image principal  $F'$ , du plan principal objet ( $\Pi$ ) et du plan principal image ( $\Pi'$ ) du doublet. En déduire la position des points principaux  $P$  et  $P'$  du doublet. Expliquer la construction. Vérifier que les résultats issus de la construction graphique sont en adéquation avec ceux calculés au 3). Quelle valeur de  $f'$  retrouvez vous graphiquement ?

## 5 – OEIL

**5-01)** Le cristallin d'un œil étant assimilé à une lentille mince placée à 15 mm de la rétine. L'indice externe au cristallin est l'air de valeur  $n_e = 1$ , la rétine est située dans le milieu interne à l'œil dont l'indice vaut  $n_s = 1,336$ .

- 1- Entre quelles limites varie sa distance focale si l'œil peut voir entre 20 cm et 2,0 m ?
- 2- Donner dans ces conditions le rayon de courbure du dioptre d'entrée de l'œil.

**5-02)** Un œil complètement presbyte (c'est-à-dire dont la faculté d'accommodation a fortement diminué) ne peut voir nettement que les objets situés à plus de 4,0 m de son centre optique. Quelle est la nature et la vergence du verre qu'il faut utiliser pour que cet œil puisse voir nettement à 25 cm (on suppose que les centres optiques de l'œil et du verre sont confondus) ?

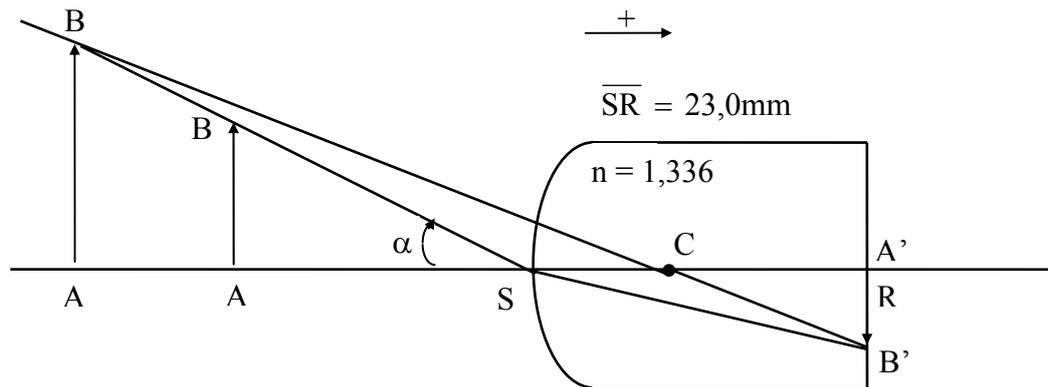
**5-03)** Un myope ne voit que les objets situés entre 12 cm et 80 cm du centre optique de son l'œil. Il achète des verres divergents de 1,25 dioptries. Muni de ses lunettes, entre quelles limites verra-t-il (on suppose que les centres optiques de l'œil et du verre sont confondus) ?

**5-04)** Le P.P. et le P.R. d'un œil sont situés respectivement à 5 cm et 17 cm de son centre optique. Quelle doit être la nature et la vergence des verres correcteurs pour qu'il puisse voir des objets à l'infini ? A quelle distance se situe alors son P.P. ? On suppose que les verres sont positionnés à 2,0 cm du centre optique de l'œil.

### 5-05) L'œil, modèle de Listing

Un œil normal possède une vision nette entre la distance  $\Delta$  (punctum proximum) et l'infini (punctum remotum). Cet œil peut être représenté par un dioptre sphérique de rayon de courbure variable (cristallin) et d'un écran (la rétine) situé, dans un milieu d'indice  $n=1,336$ , à la distance de 23 mm du sommet du dioptre (modèle de Listing).

De tous les objets  $\overline{AB}$  dont la lumière issue du point B atteint le sommet S de la cornée de l'œil sous un angle  $\alpha$ , le cristallin donne, après accommodation, une même image nette  $\overline{A'B'}$  sur la rétine, lorsque cette accommodation est possible.



**1-a)** Calculer le rayon de courbure  $\overline{SC}$  du dioptre de Listing pour un œil normal au repos.

**1-b)** Calculer la position d'un objet  $\overline{SA} = x$  dans l'air qui donne une image nette sur la rétine en fonction du rayon de courbure du dioptre  $\overline{SC} = R$ . Montrer que la position de l'objet change de signe pour une valeur particulière  $\overline{SC}_{PR} = R_{PR}$ .

**2)** Un œil affecté d'un défaut possède un cristallin qui, passant du repos à son état de contraction maximale, fait déplacer le centre C de la position  $\overline{SC}_1 = 6,40$  mm à la position  $\overline{SC}_2 = 5,68$  mm.

**a)** Calculer les positions  $\overline{SA} = x$  vues par cet œil dans l'intervalle  $[\overline{SC}_2, \overline{SC}_{PR}]$  et  $[\overline{SC}_{PR}, \overline{SC}_1]$ .

**b)** Quelles sont les limites d'observation pour cet œil ? Préciser le nom de ce défaut.

**c)** Une lentille mince correctrice est appliquée en contact avec la cornée S. Quelles sont la nature et la distance focale de cette lentille, le calcul étant effectué cristallin supposé au repos ?

**3)** Une lentille mince convergente, de distance focale  $f' = 194$  mm est positionnée à 15,0 mm en avant de la cornée S de cet œil. Déterminer, dans la position de repos de celui-ci, c'est-à-dire lorsque  $\overline{SC} = \overline{SC}_1 = 6,40$  mm, le foyer résultant  $F'$  et la distance focale résultante  $\overline{P_2F'}$  de cet ensemble « lentille mince - dioptre ».

Rappeler la définition du point  $P_2$ .

## 6 – INSTRUMENTS D’OPTIQUE

### 6-01) La loupe

Un observateur dont la vue est normale veut examiner un objet AB de petites dimensions. Sa distance minimale de vision distincte ou punctum proximum (PP) est  $\Delta$  et sa distance maximale ou punctum remotum (PR) est infinie (fig.1).

fig.1

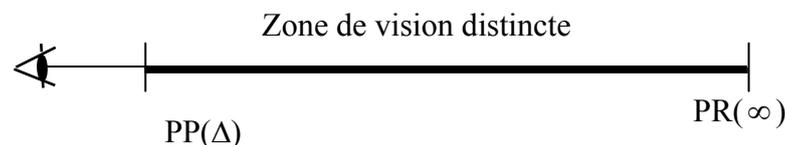
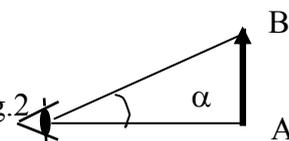
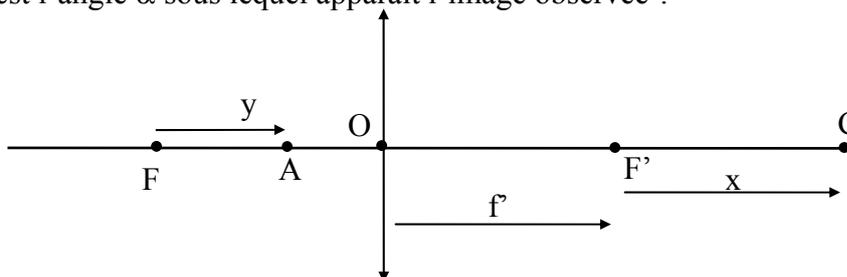


fig.2



- 1) Quel est l'angle maximal  $\alpha_0$  sous lequel il peut examiner un objet AB à l'œil nu (fig.2)?
- 2) L'observateur utilise une lentille mince convergente de distance focale  $f'$  pour obtenir une image virtuelle plus grande que l'objet. Il dispose son œil C à la distance  $x = \overline{F'C}$  du foyer image de cette loupe. Il place l'objet à la distance  $y = \overline{FA}$  du foyer objet.

Quel est l'angle  $\alpha$  sous lequel apparaît l'image observée ?



- 3) Exprimer le grossissement de la loupe  $G = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha_0}$  en fonction de  $f'$ ,  $\Delta$ ,  $x$  et  $y$ .

Quelle est la valeur de celui-ci dans les conditions idéales d'observation (l'œil est au repos lorsqu'il observe à l'infini) ?

**A.N. :**  $\Delta = 25 \text{ cm}$  ;  $f' = 5,0 \text{ cm}$ . Calculer la valeur de  $G$  pour une observation au punctum remotum de l'œil et tracer la courbe  $G(x)$  pour une observation au punctum proximum. Quelles sont dans ce dernier cas les valeurs limites de  $x$  qui donnent  $G \geq 1$  ?

- 4) L'œil étant positionné de sorte que  $f' + x \leq \Delta$ , trouver la profondeur de champ, c'est-à-dire la distance sur laquelle on peut déplacer l'objet pour que l'image se fasse dans le champ de vision de l'observateur. La calculer quand  $x = 0$ .

- 5) La pupille, de rayon  $r = 3 \text{ mm}$  est centrée en  $x = f'$ . Dessiner à l'échelle le faisceau lumineux qui part du point B lorsque A est au foyer F,  $f' = 5,0 \text{ cm}$  et  $\overline{AB} = 6 \text{ mm}$ . Justifier la construction.

**6-02) Un microscope** est assimilé à deux lentilles minces convergentes ayant les caractéristiques suivantes :

- distance focale de l'objectif :  $f_1 = 0,50 \text{ cm}$
- distance focale de l'oculaire :  $f_2 = 2,0 \text{ cm}$
- distance des centres optiques de l'objectif et de l'oculaire :  $16 \text{ cm}$ .

1) Construire l'image définitive A'B' donnée par cet instrument, d'un objet AB situé à une distance  $\overline{OA}$  de l'objectif supérieure à sa distance focale.

2) Quelle doit-être la position de l'objet pour que la vision de l'image A'B' se fasse à l'infini ? Calculer dans ces conditions :

a) le grandissement transversal de l'objectif

b) la puissance  $P_i$  (intrinsèque) du microscope en dioptries sachant que  $P_i = \frac{\tan \alpha}{AB}$

( $\alpha$  désignant l'angle sous lequel on voit l'image A'B' à travers l'instrument ; AB étant exprimé en mètre)

c) le grossissement commercial  $G_c = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha_0}$ , où  $\alpha_0$  représente l'angle sous lequel est

vu l'objet à l'œil nu à la distance minimale de vision distincte normalisée  $\Delta = 25 \text{ cm}$ .

3) Calculer la latitude de mise au point (ou profondeur de champ) pour un œil normal dont le champ de vision est compris entre 25 cm et l'infini, dont la pupille est placée au foyer principal image de l'oculaire.

**6-03) La lunette astronomique** : On regarde la lune avec une lunette astronomique afocale qu'on assimile à deux lentilles minces convergentes : un objectif et un oculaire de distances focales respectives 4,0 m et 10 cm. Le diamètre utile de l'objectif, défini par son diaphragme d'ouverture, est  $\phi = 0,50 \text{ m}$ .

1) Dessiner la marche d'un faisceau lumineux issu d'un point situé à l'infini.

2) Exprimer et calculer le grossissement de la lunette.

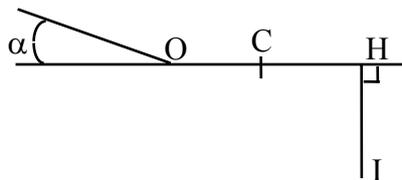
3) Calculer le diamètre du cercle oculaire (image du diaphragme d'ouverture à travers l'oculaire).

4) L'observation de la lune donne une image dont le diamètre angulaire est  $21,1^\circ$ . Quelle est la hauteur angulaire réelle de la lune ? Quel est son diamètre si la distance Terre-Lune est  $3,8 \cdot 10^5 \text{ km}$  ?

**6-04)** On constitue un **téléobjectif** en associant une lentille infiniment mince convergente  $O_1$  de distance focale  $f_1$  et une lentille infiniment mince divergente  $O_2$  de distance focale  $f_2$  qu'on place à une distance  $d$  l'une de l'autre. La plaque photographique  $P$  est placée derrière la lentille  $O_2$  à une distance  $\ell$  de la lentille  $O_1$ , dans le plan focal image du téléobjectif.

- 1) Déterminer la distance focale  $f_2$  de la lentille divergente en fonction de  $f_1$ ,  $d$  et  $\ell$ .  
**A.N.** :  $f_1 = 15 \text{ cm}$  ;  $d = 10 \text{ cm}$  ;  $\ell = 25 \text{ cm}$ .
- 2) Calculer la distance focale résultante  $f'$  de ce téléobjectif.
- 3) Quelle est la dimension de l'image d'un objet très éloigné vu sous un angle de 1 minute:
  - a) lorsqu'on utilise le téléobjectif ?
  - b) si on remplace le téléobjectif par une seule lentille  $O'_1$  en gardant  $\ell$  constante.

**6-05)** Un objet très éloigné est vu à l'œil nu sous un angle  $\alpha = 34' 23''$ . Son image (HI) à travers un dispositif optique est obtenue sur un écran. On désire que la hauteur de celle-ci soit égale à 1,0 cm.



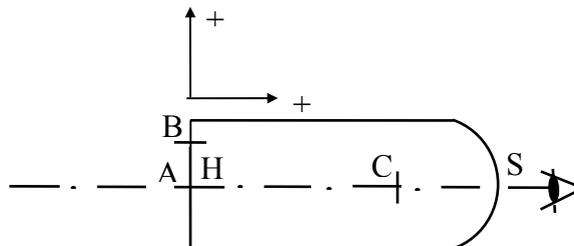
**1) 1er dispositif**

On utilise une seule lentille mince de centre O. Quels sont : la nature de la lentille, sa distance focale et l'encombrement (OH) de l'appareil ?

**2) 2ème dispositif**

On dispose au point O une lentille convergente (distance focale : 20,0 cm) suivie au point C d'une lentille divergente (distance focale : 5,0 cm) et de l'écran. Calculer la position du point C et le nouvel encombrement (OH) de l'appareil.

**6-06)** Une **loupe de STANHOPE** est un cylindre de verre (indice  $n = 1,5$ ) dont la face d'entrée est plane et dont la face de sortie est sphérique (rayon  $\overline{CS} = R = 1,0 \text{ cm}$ ), convexe vers l'air. Elle permet l'observation à l'infini d'un microfilm  $\overline{AB}$  plaqué contre la face plane.

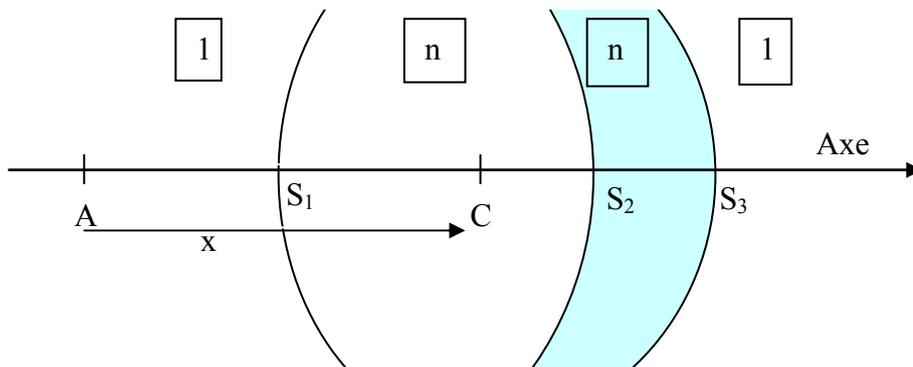


- 1) Exprimer l'épaisseur  $\overline{HS}$  de cette loupe en fonction de  $n$  et  $R$ . Application numérique.
- 2) Quel est l'angle  $\alpha$  sous lequel est vu l'objet  $\overline{AB}$  examiné à travers la loupe ? Quel est l'angle  $\alpha_0$  sous lequel le même objet est vu à l'oeil nu, à la distance minimale de vision distincte ( $\Delta = 25$  cm). Calculer le grossissement  $G = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha_0}$ .
- 3) On déplace l'objet  $\overline{AB}$  parallèlement à lui-même de telle sorte que  $\overline{HA} = x$ . On repère par  $\overline{SA''}$  la position de l'image  $\overline{A''B''}$  de l'objet  $\overline{AB}$  à travers la loupe et on désigne par  $\gamma$  le grandissement obtenu.
  - a) Exprimer  $\overline{SA''}$  et  $\gamma$  en fonction de  $x$  et de coefficients numériques.
  - b) Tracer le graphe  $\overline{SA''}(x)$  et en tirer une conclusion sur la latitude de mise au point pour l'observation du microfilm.

### 6- 07) Lentille achromat

Un système centré est constitué de trois dioptrés sphériques de même centre C.

- Le dioptré 1 sépare le milieu d'indice 1 du milieu d'indice  $n_1$  :  $\overline{CS_1} = -R$  ;  $R > 0$
- Le dioptré 2 sépare le milieu d'indice  $n_1$  du milieu d'indice  $n_2$  :  $\overline{CS_2} = aR$  ; ( $0 < a < 1$ )
- Le dioptré 3 sépare le milieu d'indice  $n_2$  du milieu de sortie d'indice 1 :  $\overline{CS_3} = R$ .



Un point objet situé dans le milieu d'entrée d'indice 1 est repéré par sa position par rapport au centre  $\overline{CA} = -xR$  ( $x > 1$ ).

- 1) a. Trouver la position d'un point image  $\overline{CA_1}$  obtenue à partir de l'objet  $\overline{CA} = -xR$  par le dioptré sphérique 1. On la donnera sous la forme :

$$\frac{R}{\overline{CA_1}} = f_1(n_1, x)$$

- b. Donner l'image  $A_2$  de l'objet  $A_1$  précédent par le dioptré 2 sous la forme :

$$\frac{R}{CA_2} = f_2 (n_1, n_2, x, a).$$

c. Donner la position de l'image finale A' de l'objet A<sub>2</sub> par le dioptre 3 de sortie,

sous la forme : 
$$\frac{R}{CA'} = f_3 (n_1, n_2, x, a).$$

2) a. Donner en utilisant le résultat précédent, la position  $\overline{CF'}$  du foyer image du système sous la forme : 
$$\frac{R}{\overline{CF'}} = f (n_1, n_2, a)$$

b. Montrer que si on veut que la position  $\overline{CF'}$  soit indépendante des indices n<sub>1</sub> et n<sub>2</sub>, alors on doit avoir la relation suivante :

$$a = \frac{1 - \frac{n_2}{n_1}}{1 + \frac{n_2}{n_1}}$$

et que dans ce cas, on trouve la relation : 
$$\frac{R}{\overline{CF'}} = 2.$$

3) Dans l'hypothèse où la position de  $\overline{CF'}$  est indépendante des indices, montrer en utilisant le résultat démontré à la question 2b, que la relation de conjugaison devient :

$$A(1) \xrightarrow{\text{système centré}(S_1, S_2, S_3)} A'(1) \quad \boxed{\frac{1}{CA'} - \frac{1}{CA} = \frac{2}{CS_3}}$$

Remarque : Ce dispositif permet de réaliser un système optique achromatique (la position de l'image est indépendante de la longueur d'onde).

## REPONSES AUX EXERCICES

### 1 – Applications des lois de Snell-Descartes

- 1-03) Fibre optique  $A = 0,4671$  ;  $\theta_L = 27,85^\circ$
- 1-04) Réfractomètre  $1,282 \leq n \leq 1,626$
- 1-07) Arc en ciel D) 1)  $p = 1 \Rightarrow \begin{cases} i_{mR} = 59,49^\circ \text{ et } D_{mR} = 137,74^\circ \\ i_{mV} = 58,73^\circ \text{ et } D_{mV} = 139,62^\circ \end{cases}$
- $p = 2 \Rightarrow \begin{cases} i_{mR} = 71,88^\circ \text{ et } D_{mR} = 230,52^\circ \\ i_{mR} = 71,46^\circ \text{ et } D_{mV} = 233,93^\circ \end{cases}$
- 1-10) Ondes acoustiques 1) trajet (2)  
2) c)  $v_1 = 3,9 \text{ km/s}$  ;  $v_2 = 6,5 \text{ km/s}$   
d)  $h = 1,7 \text{ m}$

### 2 – Miroirs

- 2-02) Sextant  $h = 2 \alpha$
- 2-03) Miroir tournant  $MS = 3,75 \cdot 10^7 \text{ m}$
- 2-09) Cassegrain  $\overline{S_2 F'} = 100 \text{ cm}$  ;  $f' = 500 \text{ cm}$

### 3 – Dioptries

- 3-01) Réflexion  $\overline{SA'} = 1,7 \text{ cm}$  ;  $\overline{A'B'} = 0,33 \text{ cm}$   
Réfraction  $\overline{SA'} = -15 \text{ cm}$  ;  $\overline{A'B'} = 2,0 \text{ cm}$
- 3-03) demi-boule  $\overline{SA'} = -30 \text{ cm}$  ;  $\overline{A''B''} = 6,0 \text{ mm}$
- 3-04) demi-boule 2)  $\overline{CF'_x} \in [4,0 \text{ cm} ; 9,0 \text{ cm}]$
- 3-05) demi-boule 1)  $\overline{CA'} = 2,0 \text{ cm}$  ;  $\gamma = -0,4$
- 3-06) demi-boule  $n = 1,53 \pm 0,02$
- 3-07) combinaison 1)  $\overline{SF'} = 24 \text{ mm}$   
2)  $\overline{S'F'_1} = -24 \text{ mm}$  ;  $\overline{S'F'_1} = 32 \text{ mm}$   
 $\overline{SF'_2} = 24 \text{ mm}$  ;  $\overline{S F_2} = -18 \text{ mm}$   
3)  $\overline{CA'} = -32 \text{ mm}$  ;  $\overline{SA''} = 78 \text{ mm}$
- 3-08) Plan concave et matrices 2)  $\overline{P_2 F'} = 2,0 \text{ m}$

#### 4 – Lentilles minces

- 4-01) Lentille mince 1) b)  $\overline{OA'} = 10 \text{ cm}$  ;  $\gamma = -1$   
2)  $\overline{OA'} = -2 \text{ cm}$  ;  $\gamma = 0,2$
- 4-02) Doublet A) 2)  $\overline{OA'} = 3,3 \text{ cm}$  ;  $\gamma = -0,66$   
B) 1)  $f'_1 = 60 \text{ mm}$  ;  $f'_2 = 30 \text{ mm}$  ;  $e = 45 \text{ mm}$   
2) c)  $\overline{F_1F} = 80 \text{ mm}$  ;  $\overline{F'_2F'} = -20 \text{ mm}$  ;  $\overline{O_1F} = 20 \text{ mm}$  ;  $\overline{O_2F'} = 10 \text{ mm}$

#### 5 – Œil

- 5-01) œil assimilé à lentille mince 1,40 à 1,49 cm
- 5-02) œil presbyte  $V = 3,75 \delta$
- 5-03) œil myope 14,1 cm et l'infini
- 5-04) œil corrigé  $V = -6,67 \delta$  ; 5,75 cm
- 5-05) Modèle Listing 1)  $\overline{SC} = 5,78 \text{ mm}$   
3)  $\overline{SF'} = 23,0 \text{ mm}$  ;  $\overline{P_2F'} = 24,9 \text{ mm}$

#### 6 – Instruments d'optiques

- 6-01) Loupe 3)  $G = 5,0$
- 6-02) Microscope 2)  $\overline{OA} = -0,52 \text{ cm}$  ;  $\gamma_{\text{obj}} = -27$  ;  $P_i = 1350 \delta$  ;  $G_c = 337,5$   
2)  $2 \mu\text{m}$
- 6-03) Lunette astronomique 2)  $G = 40$   
3)  $1,3 \text{ cm}$   
3)  $3,7 \cdot 10^3 \text{ km}$
- 6-04) Téléobjectif 1)  $f'_2 = -7,5 \text{ cm}$   
2)  $f' = 45 \text{ cm}$   
3) a)  $\overline{A'B'} = -130 \mu\text{m}$   
b)  $\overline{A'B'} = -73 \mu\text{m}$
- 6-05) Objet très éloigné vu à la lentille 1)  $\overline{OF'} = 1,0 \text{ m}$  ;  $\overline{OH} = 1,0 \text{ m}$   
2)  $\overline{OC} = 16 \text{ cm}$  ;  $\overline{OH} = 36 \text{ cm}$
- 6-06) Loupe de Stanhope 1)  $\overline{HS} = 3,0 \text{ cm}$   
2)  $C = 13$