

Exercices : 05 - Optique géométrique.

A. Lois de Snell-Descartes

1. Principe de l'arc-en-ciel

Un faisceau parallèle de lumière monochromatique éclaire une sphère (cf. figure 1) homogène de rayon R et d'indice optique $n \simeq 1,33$ relativement à l'air dans lequel elle est située. Un rayon quelconque, pénétrant dans la sphère sous l'incidence i , entre dans la sphère sous l'angle r par rapport à la même normale, et finit par en ressortir après avoir suivi p réflexions internes. Le rayon émergent fait l'angle α avec le rayon incident.

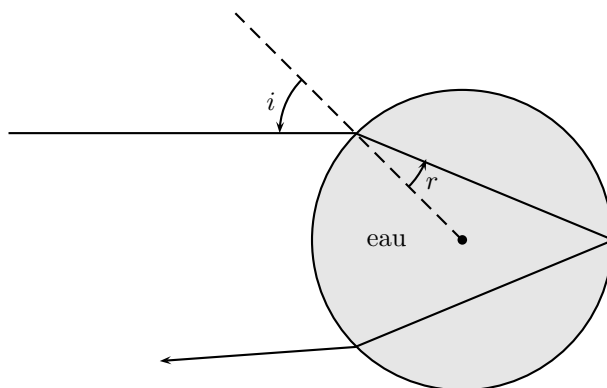


FIGURE 1 – Principe de l'arc-en-ciel

1. La sphère est uniformément éclairée. Si on appelle $d\Phi$ le flux lumineux envoyé entre les angles i et $i + di$, relier $d\Phi$ à i , au flux total Φ éclairant la sphère, et à di .
2. Exprimer $\frac{d\Phi}{d\alpha}$ en fonction de p , n , i et r .
3. À quelle condition $\frac{d\Phi}{d\alpha}$ admet-il un extremum ? Expliquer pourquoi on peut alors parler d'arc-en-ciel.
4. On s'intéresse à la première valeur de p fournissant un arc-en-ciel (arc primaire). Quelle est la position du sommet de cet arc-en-ciel au-dessus de l'horizon lorsque le soleil est lui-même à 25° au-dessus de celui-ci ?
5. L'indice optique de l'eau varie en fait tout au long du spectre visible avec $\frac{dn}{d\lambda} = -35\,000\text{ m}^{-1}$. Évaluer la largeur angulaire de cet arc-en-ciel et l'ordre de disposition des couleurs.

2. Prisme à réflexion totale

Un prisme de verre (figure 2) a pour section droite un triangle ABC rectangle en A . Il est éclairé par un faisceau parallèle de lumière monochromatique à la longueur d'onde λ_0 pour laquelle l'indice optique du verre relativement à l'air vaut n .

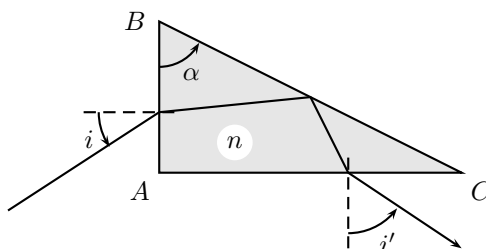


FIGURE 2 – Prisme à réflexion totale

On étudie la marche de ce faisceau qui entre sur la face AB sous l'angle d'incidence i . Après réflexion totale sur la face BC , le faisceau sort du prisme par la face AC . On appelle α l'angle dièdre du prisme en B .

1. Définir et calculer la déviation D par le prisme en fonction seulement de i et de l'angle d'émergence du faisceau i' par la face AC .
2. Est-il possible d'obtenir un faisceau émergent perpendiculaire au faisceau incident ? Dans ce cas, montrer que n doit vérifier une inégalité que l'on précisera.
Cette situation est-elle compatible avec une incidence normale ? une incidence rasante ?

3. On considère maintenant le cas où $n = 1,5$ et $\alpha = 60^\circ$. Déterminer l'angle d'incidence i_0 correspondant à un faisceau émergent perpendiculaire au faisceau incident. Déterminer la variation dD de la déviation D lorsque i_0 varie de di_0 .

3. Théorème de Bouguer

On étudie un milieu à symétrie sphérique : l'indice n ne dépend que de la distance r au centre de symétrie O . Un rayon lumineux aborde ce milieu dans un plan contenant O . Dans un milieu d'indice variable, on peut montrer que le rayon lumineux suit une trajectoire donnée par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d(n\vec{u})}{ds} = \vec{\text{grad}} n$$

où n est l'indice locale, \vec{u} un vecteur unitaire tangent à la trajectoire du rayon lumineux et s l'abscisse curviligne.

1. Montrer que, dans le cadre du problème proposé à symétrie sphérique, la quantité $\vec{r} \wedge n\vec{u}$ est conservée par rapport à l'abscisse curviligne s . Le rayon vecteur est $\vec{r} = r\vec{e}_r$.
2. Montrer alors que $n(r)r \sin i(r) = \text{constante}$, où i est l'angle formé par le rayon lumineux avec la radiale locale $\vec{r} = \overrightarrow{OM}$; c'est le théorème de BOUGUER.
3. Il s'agit en fait d'un modèle pour l'atmosphère terrestre, dans laquelle l'indice optique varie depuis la valeur $n_0 = 1,0003$ au niveau du sol ($r = R = 6400 \text{ km}$) jusqu'à la valeur exacte 1 au sommet de l'atmosphère, à l'altitude $h = 64 \text{ km}$. Proposer l'expression approchée la plus simple possible pour $n(r)$.

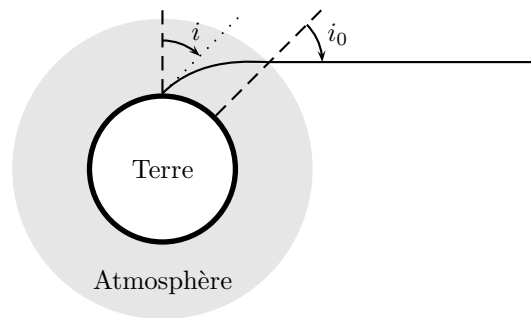


FIGURE 3 – Théorème de BOUGUER

4. Du fait de la variation progressive de l'indice optique, un rayon lumineux provenant de l'espace verra sa trajectoire incurvée vers le sol au cours de la descente vers l'observateur au sol (cf. figure 3). Lors d'une descente de r à $r + dr$ ($dr < 0$), évaluer le signe et la valeur de la déviation $d\Delta$ subie par le rayon lumineux. On appellera i_0 l'angle d'incidence du rayon lumineux sur la couche supérieure de l'atmosphère.
5. Calculer la déviation totale Δ pour $i_0 = 60^\circ$, ainsi que l'angle d'incidence au sol i .

4. Propagation dans une fibre optique

On considère une fibre optique constituée d'un cylindre de révolution d'indice n_f entouré par une enveloppe d'indice $n_e < n_f$.

1. Montrer que tout rayon situé dans un plan méridien de la fibre et faisant un angle θ avec l'axe reste prisonnier de la fibre si $\theta < \Lambda_0$ où Λ_0 est une grandeur que l'on exprimera en fonction de n_e et n_f .
2. On considère maintenant une fibre dont l'indice n dépend de la distance r à l'axe suivant une loi de la forme $n^2(r) = n_0^2(1 - \alpha^2 r^2)$ où α est une constante. Déterminer la trajectoire d'un rayon issu d'un point O de l'axe Oz de la fibre et faisant en O l'angle θ_0 avec cet axe.

On rappelle qu'une primitive de la fonction $f(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ est la fonction $\arcsin(x)$.

5. Lentille plate de Veselago

En 1968, le physicien russe VICTOR VESELAGO a conduit des études théoriques dans le cadre d'une optique de DESCARTES où les milieux pourraient être d'indice négatif. Il a montré qu'avec de tels milieux, il était possible de réaliser une lentille convergente parfaitement plate. En 2000, le premier matériau possédant un indice négatif a été créé, on parle de *métamatériau*. Ce matériau est un diélectrique classique (verre de silice) dans lequel on a inséré des fils conducteurs selon une structure périodique, voir la photographie de la figure 4. Ce matériau s'est montré efficace pour des longueurs d'onde $\lambda \simeq 1 \text{ cm}$. Son indice de réfraction a été mesuré à $n = -2,7$.

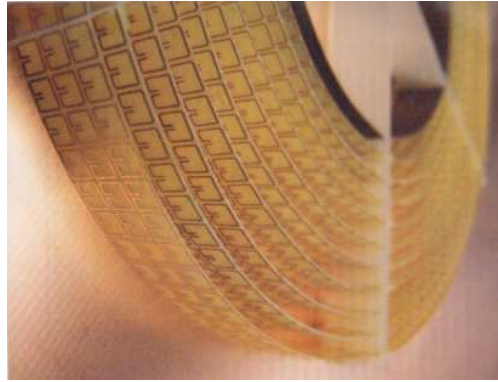


FIGURE 4 – Métamatériau

À l'heure actuelle, aucun métamatériau n'a été réalisé pour le domaine visible $\lambda \simeq 0,5 \mu\text{m}$. Seul un matériau d'indice $n = -0,3$ a été obtenu pour $\lambda \simeq 2 \mu\text{m}$.

On considère le schéma de la figure 5 où un objet AB est placé à la distance d d'une lame à face parallèles d'épaisseur e , d'indice $n < 0$ avec $|n| > 1$. La lame de métamatériau possède une hauteur très grande devant son épaisseur. On considère un rayon lumineux qui aborde ce milieu depuis A sous l'angle d'incidence i_1 .

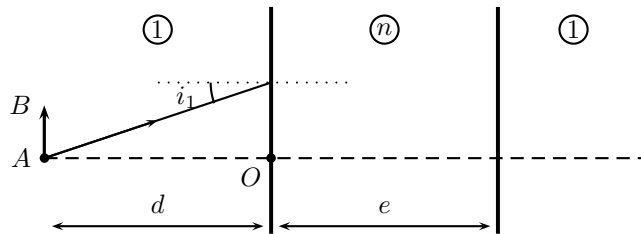


FIGURE 5 – Lentille plate de VESELAGO

1. La loi de la réfraction étant de DESCARTES étant toujours valable, quelle est la particularité du rayon réfracté par le dioptré plan $\mathcal{P}_{1,n}$ lorsque le milieu est d'indice négatif?
2. On suppose que l'image A' de A par le dioptré plan $\mathcal{P}_{1,n}$ est située dans le milieu d'indice $n < 0$. Déterminer la distance OA' en fonction de d , n et i_1 . En déduire que le dioptré plan $\mathcal{P}_{1,n}$ n'est pas stigmatique.
3. Montrer qu'en se plaçant dans les conditions le GAUSS, le stigmatisme est assuré. Que vaut alors la distance OA' ? Où se situe l'image B' de B ? Quelle propriété présente donc le dioptré plan $\mathcal{P}_{1,n}$?

Dans la suite, on se place dans les conditions de GAUSS.

4. À quelle condition sur l'épaisseur e de la lentille de VESELAGO, l'image $A'B'$ se situe-t-elle dans le métamatériau? On suppose pour la suite que cette condition est aussi réalisée aussi pour un objet A_1B_1 situé à la distance $d_1 > d$ en arrière de AB par conséquent. Où se situe l'image de A_1B_1 par rapport à $A'B'$? On considère maintenant un objet constitué par A_1B_1AB . Que peut-on dire de son image dans le métamatériau?
5. Pour une épaisseur e respectant la condition vue à la question précédente, déterminer la position de l'image définitive $A''B''$ de AB par la lentille de VESELAGO. A-t-on bien réalisé l'équivalent d'une lentille convergente traditionnelle?

6. Lentille plate de Fresnel

Pour le moment, on ne considère qu'un prisme (Δ) en verre d'indice n et d'angle au sommet A , plongé dans l'air d'indice unité. Un rayon arrive avec un angle d'incidence i sur le dioptré d'entrée puis traverse le prisme (voir figure 6 où les angles d'incidence, de réfraction et A sont orientés dans le sens trigonométrique). La déviation globale en valeur absolue du rayon par le prisme, qui se fait vers sa base, est notée D .

1. Obtenir l'expression de A en fonction de r et r' et démontrer que $D = i + i' - A$.

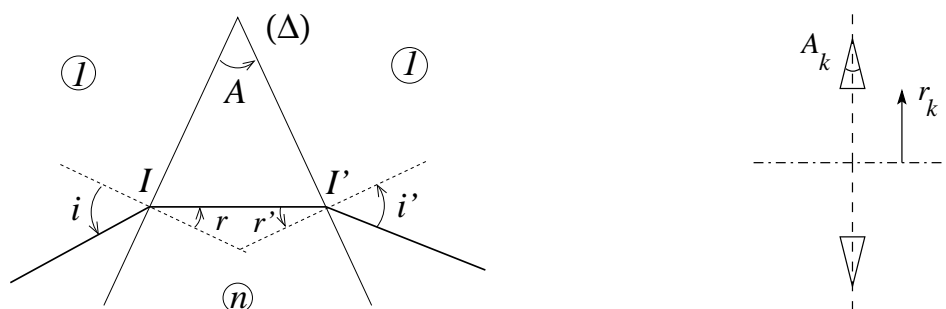


FIGURE 6 – Prismes

2. Le prisme possède un angle au sommet $A \ll 1$ et est utilisé sous incidence quasi-normale ($i \ll 1$). Déterminer la déviation D approchée en fonction de n et A .

Des petits prismes du type précédent sont répartis, dans un même plan, de part et d'autre de l'axe Ox (sur la figure 6, seuls deux prismes sont représentés mais il y en a aussi d'autres sur la ligne en pointillés). Les prismes sont régulièrement espacés, le k^e étant à la distance r_k de l'axe. Ils sont orientés de façon à rabattre vers l'axe un faisceau parallèle. On désigne par A_k l'angle au sommet du k^e prisme et $A_k \ll 1$.

3. Que doit valoir A_k pour qu'un faisceau parallèle à Ox vienne converger en un même point F' défini par $\overline{OF'} = f'$?
4. Que se passerait-il alors pour un faisceau issu d'un point P de l'axe défini par $\overline{OP} = x$ et pas trop près des prismes ?

7. Images de deux miroirs plans

Deux miroirs ($M1$) et ($M2$) forment entre eux un angle de $\alpha = 20^\circ$. Un objet est placé en O , sur la bissectrice formée par l'angle entre les deux miroirs. Combien d'images de O peuvent-elles être vues en tout (incluant le point O lui-même) ? On fait l'hypothèse que l'œil peut être placé entre les miroirs et peut observer les réflexions. Voir le schéma de la figure 7.

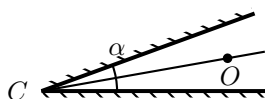


FIGURE 7 – Dièdre de deux miroirs

Proposition de réponses :

- a) 36 b) 18 c) 1 d) 9

B. Tracés optiques

8. Tracés de rayons

Compléter la marche des rayons lumineux incidents ou émergents des lentilles de la figure 8.

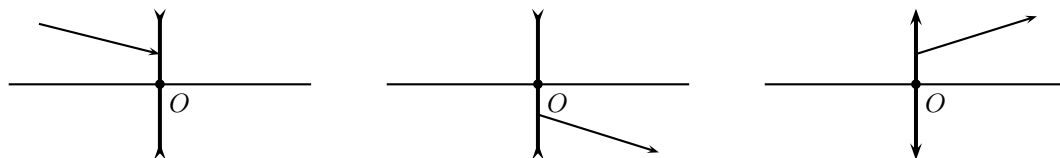


FIGURE 8 – Lentilles

9. Constructions Image - Objet

Dans chaque cas, construire l'objet qui possède l'image obtenue sur la figure 9.

10. Constructions avec une lentille divergente

Pour les 4 schémas proposés à la figure 10, tracer l'image ou l'objet en fonction de ce qui est proposé. AB est un objet, $A'B'$ une image. Lorsque l'objet ou l'image sont réels, ils sont représentés en trait plein. Dans le cas où ils sont virtuels, on utilise les pointillés.

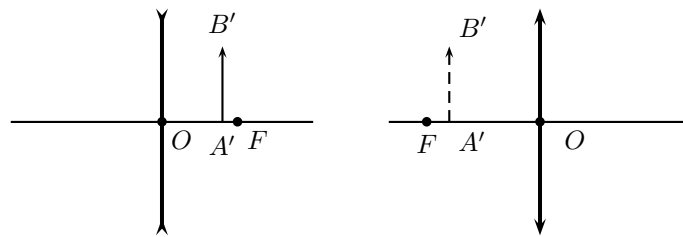


FIGURE 9 – Constructions

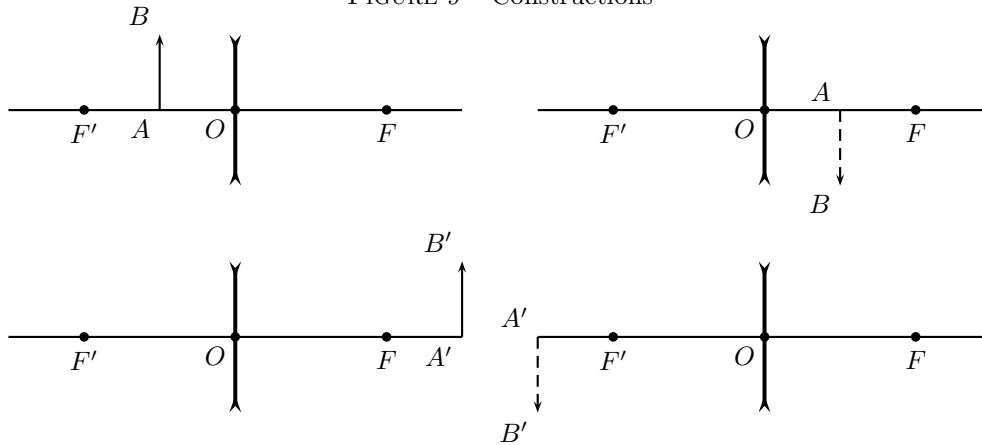


FIGURE 10 – Constructions pour une lentille divergente

11. Constructions avec deux lentilles

Pour les 4 schémas proposés à la figure 11, tracer l'image de l'objet réel proposé en entrée du système optique.

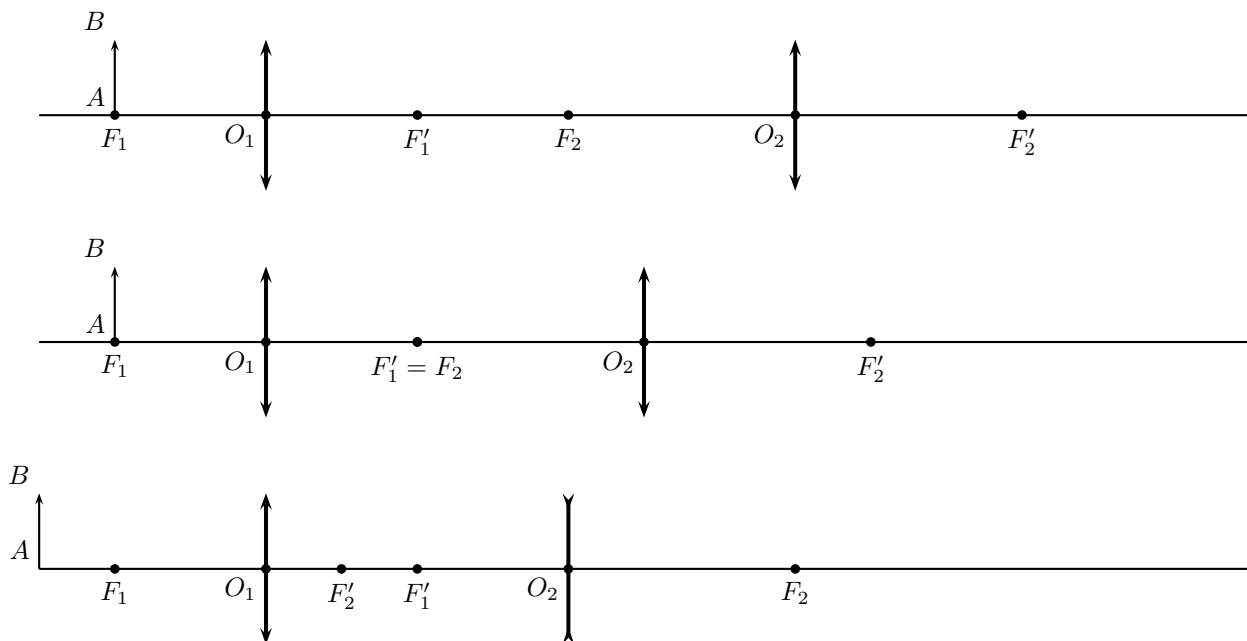


FIGURE 11 – Constructions d'une image pour un système de deux lentilles

C. Relations de conjugaison

12. Appareil photo

On utilise un appareil photographique numérique constitué d'un objectif assimilé à une lentille mince convergente. L'appareil est réglé préalablement de telle sorte que l'image d'un paysage lointain soit nette sur le capteur. La distance entre la lentille et le capteur est alors de 8 cm. On veut utiliser ce même appareil pour photographier une carte, située à 72 cm de la lentille. De quelle distance faut-il déplacer la lentille par rapport au capteur ?

Proposition de réponses :

- a) 1 cm en la rapprochant du capteur b) 1 cm en l'éloignant du capteur

- c) 5 cm en la rapprochant du capteur d) 5 cm en l'éloignant du capteur

13. Focométrie

On considère le système optique présenté sur la figure 12.

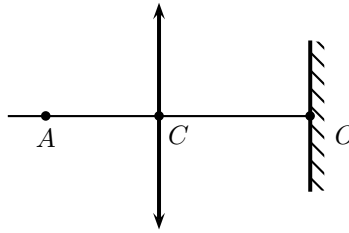


FIGURE 12 – Focométrie

Un point objet A réel est placé sur l'axe Cx . En O , il y a un miroir plan. On note $d = 60$ cm la distance CO . On constate qu'il existe deux positions de cet objet pour lesquelles le point image A' fourni par le système se confond avec A . Ces deux positions sont séparées par une distance $D = 10$ cm. En déduire l'expression, puis la valeur de la distance focale f de la lentille.

14. Grandissement et focométrie

Un système optique centré (S) donne d'un objet réel AB une image réelle $A'B'$ située sur un écran perpendiculaire à l'axe du système. On intercale une lentille entre (S) et l'écran. On obtient une image deux fois plus grande (et de même sens) sur l'écran qu'il a fallu reculer de $d = 20$ cm. Déterminer la nature de la lentille ajoutée, sa position et sa distance focale.

15. Succession de lentilles identiques

On considère une succession de lentilles convergentes minces identiques de même axe optique Oz , de distance focale $f' > 0$, équidistantes de a avec $a \ll f'$. On se limite ici à des rayons se propageant dans un plan méridien (plan contenant l'axe Oz) et on suppose valable l'approximation de GAUSS. Un rayon qui vient traverser la lentille de rang n est parfaitement déterminé par sa distance algébrique y_n à l'axe à la sortie de la lentille et par l'angle orienté α_n qu'il fait avec Oz , voir le schéma de la figure 13.

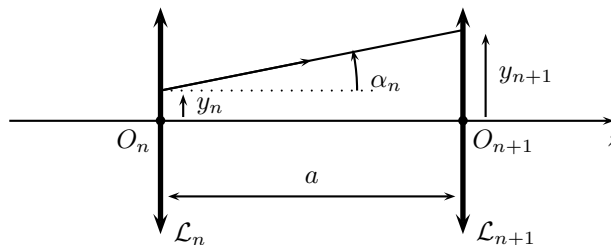


FIGURE 13 – Succession de lentilles identiques

1. Trouver une relation de récurrence pour la suite y_n faisant intervenir a et f' .
2. En déduire l'équation différentielle donnant accès à l'équation des rayons lumineux dans le système. La résoudre.
3. Quel peut être l'intérêt d'un tel dispositif?

D. Instruments d'optique

16. Presbytie

Un patient souffre d'un problème de vision. Il ne voit pas les objets nets au-delà de 26 cm, ni en-dessous de 13,5 cm.

1. Établir le diagnostic quant à la vision de ce patient. Est-il myope ou hypermétrope?
2. Proposer une correction adaptée, tout d'abord avec une paire de lunettes qu'il portera à 2 cm de ses yeux puis avec des lentilles de contact.
3. Avec l'âge, le patient devient presbyte. Il ne peut plus lire de près. Comment peut-on lui rendre une vision normale?

17. Lentilles correctrices

On considère un œil myope tel que le *punctum remotum* est situé à 10 cm de la face avant de l'œil et la distance entre le cristallin et la rétine est $D = 22$ mm. Quelle est la focale f' des lentilles de contact qu'il doit choisir ?

Proposition de réponses :

- a) $f' = -0,1$ m b) $f' = +0,1$ m c) $f' = -0,01$ m d) $f' = +0,01$ m

18. Photographie et pouvoir de résolution

L'angle de vision humain moyen pour la vision stéréoscopique en couleurs est de l'ordre de 40° .

- Déterminer la distance focale d'un objectif photographique, assimilé à une lentille sphérique mince convergente unique, qui donne le même angle de vision lorsque la largeur de la pellicule est de 36 mm.
- Un objectif de ce type, de distance focale $f' = 50$ mm, est réglé sur l'infini si la distance entre le plan de la pellicule P et le centre O de la lentille est égale à f' . Pour mettre au point (obtenir une image nette) sur un objet situé à distance finie D de O , on doit écarter l'objectif de cette position d'une distance t (tirage). Calculer t .
- Lorsque la mise au point ci-dessus est réalisée, on constate en pratique que l'image formée reste nette de part et d'autre de la mise au point théorique (c'est la profondeur de champ), car on peut qualifier d'image nette toute tache de dimension inférieure au diamètre δ des grains photosensibles (AgBr). Si la mise au point est faite sur 18 m, on constate en particulier que l'image est nette si l'objet est situé entre 9 m de l'objectif et l'infini pour un certain diamètre $d = f'/N$ d'ouverture de l'objectif, avec $N = 5,6$. Évaluer δ .
- Déterminer la profondeur de champ pour $N = 2,8$ puis $N = 16$. Quel autre facteur influe sur le choix du diaphragme N ?

19. Étude d'un viseur

Un viseur est constitué d'un objectif L_1 (assimilé à une lentille mince convergente de distance focale $f'_1 = 10$ cm), et d'un oculaire L_2 (assimilé à une lentille mince convergente de distance focale $f'_2 = 2,0$ cm). La distance D entre L_1 et L_2 est réglable.

- Déterminer D pour que le système soit afocal (réglage pour la vision à l'infini). Dessiner la marche d'un pinceau lumineux venant d'un point à l'infini dans la direction formant un angle α avec l'axe du viseur. Calculer le grandissement angulaire $G = \alpha'/\alpha$ de l'appareil (α' est l'angle que font les rayons émergents avec l'axe).
- On règle maintenant le viseur pour que l'œil d'un observateur, regardant à travers l'oculaire, voie nettement, sans accommoder, un objet AB situé à 20 cm en avant de la face d'entrée de l'objectif. Déterminer la nouvelle valeur de D .
- L'observateur voit alors l'image de AB sous un angle α' . Calculer, en dioptries, la quantité $P = \alpha'/AB$.
- En accommodant, l'œil peut voir des objets situés au-delà d'une distance minimale $d_m = 20$ cm. L'œil de l'observateur ayant sa pupille dans le plan de l'image de L_1 donnée par L_2 , quelle région de l'espace objet peut-être vue nettement par l'observateur regardant à travers le viseur ?

20. Téléobjectif

Un objectif photographique est constitué d'une lentille convergente L_1 de centre O_1 , de distance focale $f'_1 = 75$ mm. La pellicule Π est placée dans le plan focal image de l'objectif. On ajoute à cet objectif deux lentilles additionnelles : une lentille L_2 divergente, de centre O_2 et de focale $f'_2 = -25$ mm, que l'on accole à L_1 (on a ainsi $O_1 = O_2$) et une lentille L_3 convergente, de centre O_3 et de focale $f'_3 = 100$ mm, que l'on fixe devant le système $L_1 - L_2$. La distance O_3O_1 est réglée de manière à ce que l'image d'un objet éloigné soit nette sur la pellicule.

- Faire un schéma représentant les lentilles avec les positions relatives des centres et des foyers. Compléter ce schéma par un tracé de rayons définissant la position du foyer image F' du téléobjectif constitué par les trois lentilles.
- Calculer l'encombrement de cet appareil, c'est à dire la distance du centre O_3 à la pellicule Π .
- Calculer la grandeur $A'B'$ d'une tour AB de 60 m de hauteur, située à une distance $d = 3$ km de l'objectif.
- Calculer l'encombrement d'un appareil qui aurait comme objectif, une seule lentille donnant une image de même grandeur. Conclusion.

21. Microscope

Un microscope est constitué par association de deux lentilles convergentes jouant respectivement les rôles d'objectif et d'oculaire. L'objectif est de focale $f'_1 = 5 \text{ mm}$ et l'oculaire de focale $f'_2 = 25 \text{ mm}$. Le foyer image F'_1 de l'objectif et le foyer objet F_2 de l'oculaire sont écartés de $l = 25 \text{ cm}$.

1. Un observateur, l'œil placé au foyer image de l'oculaire, étudie un petit objet AB disposé dans un plan de front, le point A étant situé sur l'axe optique. Où doit être A pour que l'œil effectue l'observation sans accommoder ?
2. Représenter la marche d'un pinceau lumineux étroit issu du point B .
3. Soient α' l'angle sous lequel l'œil voit l'image définitive de AB à travers le microscope et α l'angle sous lequel il apercevrait AB sans instrument. Calculer le grossissement $G = \alpha'/\alpha$.
4. En accommodant, l'œil peut observer nettement un objet situé à une distance comprise entre 25 cm (Punctum Proximum) et l'infini (Punctum Remotum). De combien peut-on modifier la distance entre l'objectif et l'oculaire si l'on veut toujours pouvoir observer nettement l'objet AB (cette distance s'appelle la latitude de mise au point) ?

22. Lunette astronomique - QCM

Une lunette astronomique est un système centré qui se compose d'un objectif assimilable à une lentille mince convergente L_1 de focale $f_{ob} = 100 \text{ cm}$, de centre optique O_1 , de diamètre $D = 10 \text{ cm}$ ainsi que d'un oculaire que l'on peut assimiler à une lentille mince convergente L_2 de focale $f_{oc} = 5 \text{ cm}$, de centre optique O_2 et de diamètre $d = 1,5 \text{ cm}$.

1. Calculer la distance $e = \overline{O_1O_2}$ entre les centres optiques des lentilles pour que le système soit afocal :
a) $e = 95 \text{ cm}$ b) $e = 20 \text{ cm}$ c) $e = 105 \text{ cm}$ d) $e = 55 \text{ cm}$
2. Un objet situé à l'infini présente un diamètre angulaire θ lorsqu'il est observé sans instrument par un œil normal et un diamètre angulaire θ' lorsqu'il est observé à travers l'instrument. Calculer le grossissement $G = \theta'/\theta$ de la lunette :

$$a) G = -f_{ob}/f_{oc} \quad b) G = f_{ob}/f_{oc} \quad c) G = -(f_{ob} + f_{oc})/f_{oc} \quad d) G = (f_{ob} + f_{oc})/f_{oc}$$

3. On observe un objet ponctuel à l'infini sur l'axe optique de la lunette. Quelle devrait être la valeur minimale du diamètre d_m de la monture de l'oculaire pour que tous les rayons qui traversent la monture de l'objectif ressortent de l'instrument ? On s'aidera avantageusement d'un schéma :

$$a) d_m = 2,5 \text{ mm} \quad b) d_m = 3,5 \text{ mm} \quad c) d_m = 1,5 \text{ mm} \quad d) d_m = 5,0 \text{ mm}$$

4. On appelle diaphragme d'ouverture, le diaphragme qui limite le faisceau de rayons qui traverse l'instrument pour la formation de l'image. Donner son diamètre d_0 :

$$a) d_0 = 1,5 \text{ cm} \quad b) d_0 = 10 \text{ cm} \quad c) d_0 = 0,5 \text{ cm} \quad d) d_0 = 11,5 \text{ cm}$$

5. On appelle pupille de sortie, le conjugué du diaphragme d'ouverture par rapport à la lunette. Calculer la position $\overline{O_2P}$ du centre P de la pupille de sortie par rapport au centre optique O_2 de la lentille oculaire :

$$a) \overline{O_2P} = 1,2 \text{ cm} \quad b) \overline{O_2P} = 3,75 \text{ cm} \quad c) \overline{O_2P} = 1,75 \text{ cm} \quad d) \overline{O_2P} = 5,25 \text{ cm}$$

6. Déterminer son diamètre d_p :

$$a) d_p = 5 \text{ mm} \quad b) d_p = 3,5 \text{ mm} \quad c) d_p = 2,5 \text{ mm} \quad d) d_p = 1,5 \text{ mm}$$

7. La lunette étudiée précédemment donne une image renversée de l'objet visé. Pour observer des objets terrestres, on redresse cette image en insérant entre les deux lentilles minces convergentes, une lentille mince convergente L_3 , de centre optique O_3 et de focale $f_3 = 2 \text{ cm}$. L'oculaire L_2 est alors déplacé pour que la lunette terrestre reste afocale. Déterminer la position de la lentille L_3 , par rapport à la lentille L_1 , pour qu'elle donne de l'image $\overline{A_1B_1}$ fournie par l'objectif L_1 d'un objet à l'infini, une image $\overline{A_3B_3}$ réelle, renversée et trois fois plus grande que $\overline{A_1B_1}$:

$$a) \overline{O_1O_3} = 63,32 \text{ cm} \quad b) \overline{O_1O_3} = 102,67 \text{ cm} \quad c) \overline{O_1O_3} = 47,25 \text{ cm} \quad d) \overline{O_1O_3} = 75,12 \text{ cm}$$

8. En déduire la nouvelle longueur e' de la lunette :

$$a) e' = 132,75 \text{ cm} \quad b) e' = 165,25 \text{ cm} \quad c) e' = 152,12 \text{ cm} \quad d) e' = 115,67 \text{ cm}$$

9. Calculer le nouveau grossissement G' de la lunette :

$$a) G' = 60 \quad b) G' = 100 \quad c) G' = 50 \quad d) G' = 95$$