

I - Propagation de la lumière

I-1. Spectre des ondes électromagnétiques

On peut décrire la lumière comme une onde électromagnétique. La lumière visible correspond aux longueurs d'onde situées entre 400 nm et 800 nm (environ). Le domaine du visible constitue une très petite partie du spectre électromagnétique, mais il est privilégié puisqu'il s'agit du domaine associé à notre récepteur biologique : l'œil. D'autres capteurs peuvent fonctionner à d'autres longueurs d'onde (caméra infra-rouge par exemple).

Les sources lumineuses peuvent être de plusieurs natures. On peut citer

- lampes à incandescence (spectre continu, lumière blanche)
- tubes fluorescents (spectre discontinu)
- LED (spectre discontinu)
- lampe spectrale (spectre discontinu)
- LASER (quasiment une seule longueur d'onde)

I-2. Source ponctuelle monochromatique

Une source est dite ponctuelle lorsqu'elle est de petite taille devant la distance d'observation.

Une source ponctuelle monochromatique émet une radiation lumineuse sinusoïdale de la forme $s(M, t) = \frac{\alpha}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi)$.

I-3. MHTI

On considère un milieu

- Homogène (propriétés physiques identiques en tout point de l'espace)
- Transparent (pas de phénomène d'absorption dans le domaine du visible)

- Isotrope (propriétés identiques dans toutes les directions de l'espace)

On caractérise un tel MHTI par son *indice de réfraction* n défini par $n = \frac{c}{v}$, avec v la vitesse de propagation de l'onde plane progressive monochromatique dans le milieu et c sa vitesse de propagation dans le vide.

On a $n > 1$. Plus n est grand, plus le milieu est dit *réfringent*.

La longueur d'onde est modifiée dans le milieu $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$, où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide.

Dans la plupart des milieux, la vitesse v est fonction de la fréquence de l'onde : il y a *dispersion*.

MHTI	air	eau	verre crown	verre flint
n	1,00029	1,33	1,52	1,67

I-4. Approximation de l'optique géométrique

Si on essaye de réduire le rayon d'un faisceau lumineux cylindrique en le diaphragmant, le phénomène de diffraction finit par réouvrir le faisceau qu'on cherche à isoler : on ne peut pas isoler un rayon lumineux.

L'objet de l'optique géométrique est l'étude des rayons lumineux, qui sont en réalité un modèle pour décrire un pinceau lumineux de faible extension spatiale, mais suffisamment large pour pouvoir ignorer la diffraction ($r \gg \lambda$). Ceci constitue *l'approximation de l'optique géométrique*.

Les rayons lumineux ainsi définis ont les propriétés suivantes :

- **propagation rectiligne**
- **indépendance des rayons lumineux** (deux rayons lumineux issus de deux sources se croisent sans interagir)
- **principe de moindre temps** (de Fermat) : le chemin effectivement suivi par la lumière est celui qui minimise le temps de parcours (et pas nécessairement la distance parcourue)

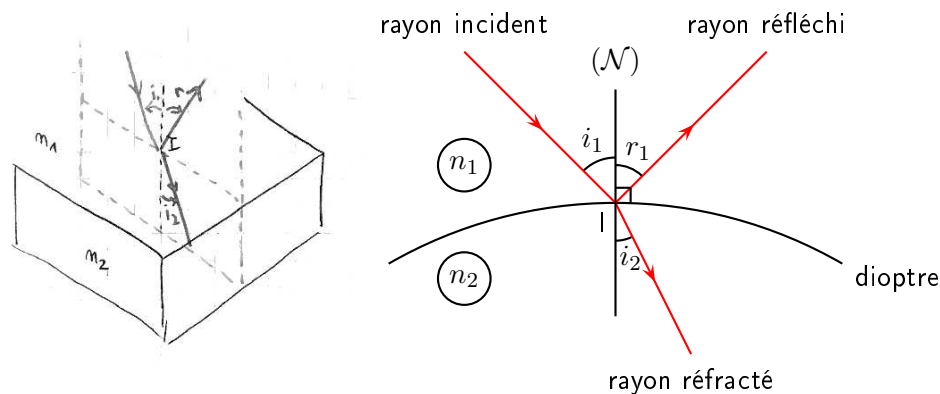
- **principe de retour inverse** : le chemin de la lumière pour aller de A à B est le même que pour aller de B à A.

II - Lois de Snell-Descartes

II -1. Lois de la réflexion et de la réfraction

On considère un rayon lumineux arrivant en I à la surface d'un dioptre, c'est-à-dire d'une interface entre deux MHTI d'indices différents.

Une partie de l'énergie lumineuse est transmise dans l'autre milieu, et une partie de l'énergie est réfléchi. Les lois de Snell-Descartes décrivent la direction des rayons réfracté et réfléchi :



Lois de Snell-Descartes :

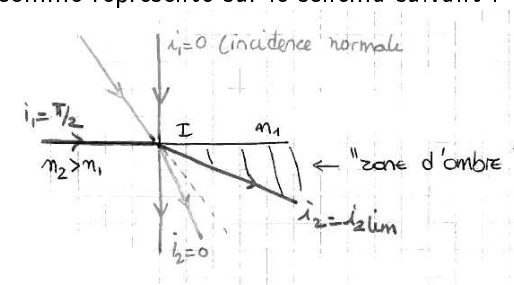
- Les rayons réfracté et réfléchi sont tous deux dans le **plan d'incidence** défini par le rayon incident et la normale au dioptre.
- **réflexion** : $r_1 = i_1$ (ou $r_1 = -i_1$ avec les angles orientés)
- **réfraction** : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

Exercice 1 : Principe de Fermat

II -2. Réfraction limite - Réflexion totale

Quand on passe dans un milieu **plus réfringent** ($n_1 < n_2$), le rayon réfracté **se rapproche** de la normale. Si i_1 décrit l'intervalle $[0, \frac{\pi}{2}]$, i_2 quand à lui décrit

l'intervalle $[0, i_{2,lim}]$, avec $i_{2,lim} = \arcsin \frac{n_1}{n_2}$. Il y a une zone non atteinte par le rayon réfracté, comme représenté sur le schéma suivant :



Réciproquement, quand la lumière passe dans un milieu **moins réfringent** ($n_1 > n_2$), le rayon réfracté **s'écarte** de la normale. Pour des incidences trop grandes, c'est-à-dire pour $i_1 > i_{1,c}$ avec $i_{1,c} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$, il n'existe pas de rayon réfracté, toute l'énergie lumineuse est réfléchi, on parle de **réflexion totale**.

Exercice 2 : Détection de la pluie sur un pare-brise

III - Formation des images

III -1. Nature des objets et des images

★ Par définition, pour un système optique donné, le point de concours des rayons incidents sur le système est nommé **objet**. On le notera généralement A .

Il peut être *primaire* (s'il émet de la lumière) ou *secondaire* (s'il se contente d'en diffuser), *ponctuel* (si ses dimensions sont faibles devant la distance d'observation) ou *étendu*, et enfin *réel* (s'il est placé avant la face d'entrée du système optique) ou *virtuel* (s'il est placé après la face d'entrée).

★ Par définition, le point où se croisent les rayons qui émergent du système optique est nommé **image**. On le notera généralement A' .

Elle peut être *réelle* (si elle est placée après la face de sortie du système optique) ou *virtuelle* (si elle est placée avant la face de sortie), *ponctuelle* (la zone dans laquelle se croisent les rayons émergents est de petite dimension devant la taille du capteur) ou *étendue*.

III -2. Qualité des images

a) Stigmatisme

Pour pouvoir observer des images nettes, il faut qu'un objet ponctuel ait une image ponctuelle (de dimensions suffisamment faibles). Le point image est alors dit **conjugué** de l'objet ponctuel.

Si tous les rayons issus du point objet A se croisent en A' après traversée du système optique, alors celui-ci est dit **stigmatique** pour le couple (A, A') .

Ce stigmatisme peut être *rigoureux* comme dans le cas du miroir plan, ou seulement *approché* dans le cas des systèmes usuels, sous certaines conditions d'utilisation. La nature granulaire des récepteurs (cellules de la rétine, pixel de capteur numérique, grain de pellicule argentique) nous permet de nous contenter d'un stigmatisme approché.

Les conditions pour obtenir un tel *stigmatisme approché* pour un système dit **centré** (présentant un axe de révolution commun à tous les dioptries et catadioptries qui le constituent, appelé *axe optique*) sont les **conditions de Gauss**, qui consistent à se limiter aux **rayons paraxiaux**.

Rayons paraxiaux :

- proches de l'axe optique
- faiblement inclinés sur l'axe optique

Pour obtenir de tels rayons, les instruments d'optique usuels comportent généralement un ou plusieurs diaphragmes qui limitent l'inclinaison des rayons incidents.

b) Aplanétisme

Lorsqu'on cherche à faire l'image d'un objet étendu, constitué d'un ensemble d'objets ponctuels, le stigmatisme doit se conserver pour tous les points de l'objet. La propriété d'**aplanétisme** caractérise la conservation du stigmatisme dans un plan transverse : l'image $A'B'$ d'un objet étendu transverse AB (perpendiculaire à l'axe optique) est également transverse.

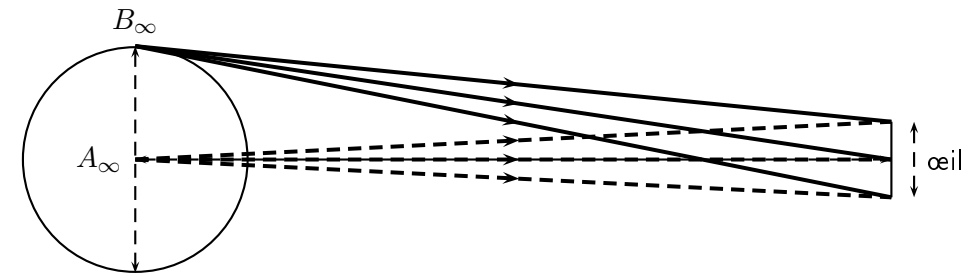
Pour les systèmes centrés utilisés dans les conditions de Gauss, le stigmatisme approché s'accompagne d'un aplanétisme approché, qui permet l'observation

d'images nettes, non déformées.

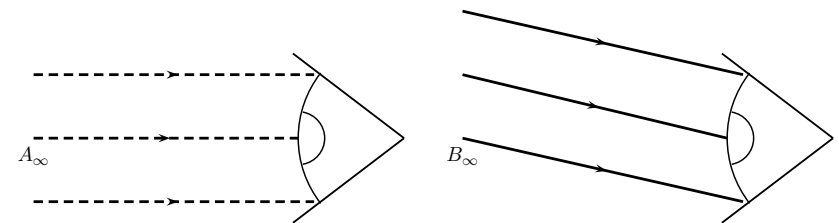
III -3. Foyers objet et image

a) Objet à l'infini

Lorsqu'on observe la Lune à l'œil nu, elle constitue un objet étendu pour le système optique "œil", situé à l'infini. La figure suivante (non à l'échelle) représente le trajet de rayons lumineux issus du centre de la Lune (ligne de visée, axe optique) et ceux issus de l'extrémité d'un diamètre.



Du point de vue de l'œil, on observe des rayons parallèles entre eux. Les rayons provenant de A_∞ sont parallèles à l'axe optique (direction de visée) et les rayons provenant de B_∞ présentent tous la même inclinaison par rapport à l'axe optique :



b) Foyer principal image, plan focal image

Le **foyer principal image** d'un système optique centré est l'image d'un objet à l'infini sur l'axe optique, on le note F' :

$$A_\infty \xrightarrow{\text{système optique centré}} F'$$

Le système étant stigmatique, **tout rayon parallèle à l'axe optique émerge en passant par F'** . Ce foyer image peut être *réel*, *virtuel* ou ne pas exister, le système étant alors dit *afocal*.

Si le système centré est aplanétique (au moins de façon approchée), alors tout point du plan de l'infini (plan transverse contenant A) a son image dans le plan transverse contenant F' . Ce plan est appelé **plan focal image**. L'image d'un point B_∞ hors de l'axe est dans le plan focal image, en Φ' , appelé *foyer secondaire image*.

c) Foyer principal objet, plan focal objet

D'après le principe du retour inverse de la lumière, il existe un point de l'axe optique dont l'image est renvoyée à l'infini, il s'agit du **foyer principal objet**, noté F .

$$F \xrightarrow{\text{système optique centré}} A'_\infty$$

Tout rayon passant par F émerge du système optique centré parallèlement à l'axe optique.

Là encore, tous les points du plan transverse passant par F ont leur image renvoyée à l'infini (par aplanétisme), on les appelle des *foyers secondaires objets*. Attention, malgré les notations, F' n'est pas l'image de F !

IV – Lentilles minces

IV -1. Vergence - Distance focale image

On définit la **distance focale image** d'une lentille mince par la distance entre le centre optique de la lentille et le foyer principal image : $f' = \overline{OF'}$. Attention, en optique géométrique, les distances sont généralement algébrisées, et on oriente positivement dans le sens de la lumière incidente.

Notons que les deux foyers F et F' sont symétriques l'un de l'autre par rapport au centre optique de la lentille.

La **vergence** est l'inverse de la distance focale image $V = \frac{1}{f'}$

On distingue deux sortes de lentilles minces :

- les lentilles **convergentes**, avec $f' > 0$, referment les faisceaux lumineux ; les foyers image et objet sont **réels**.
- les lentilles **divergentes**, avec $f' < 0$, ouvrent les faisceaux lumineux ; les foyers image et objet sont **virtuels**.

IV -2. Construction : les 3 rayons fondamentaux

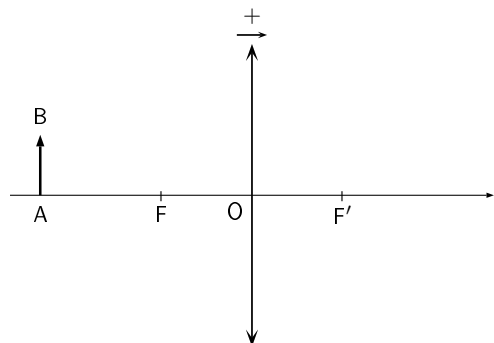
Certains rayons lumineux se propagent de façon particulière à la traversée d'une lentille, on s'appuie sur ces rayons fondamentaux pour construire l'image d'un objet quelconque par exemple.

- ① Un rayon incident *passant par le centre optique O* émerge de la lentille sans être dévié.
- ② Un rayon incident *parallèle à l'axe optique* émerge de la lentille en passant par le foyer image F' .
- ③ Un rayon incident *passant par le foyer objet F* émerge de la lentille parallèlement à l'axe optique.

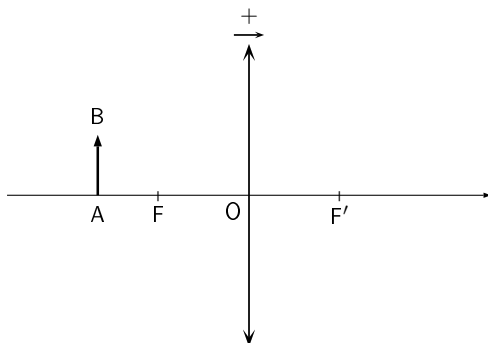
Pour tracer l'image $A'B'$ d'un objet transverse AB , avec A sur l'axe optique, on trace 2 des 3 rayons fondamentaux passant par le point B . L'intersection des rayons émergents donne l'image B' de B . Par aplanétisme, l'image A' de A en est le projeté orthogonal sur l'axe optique.

a) Cas des lentilles convergentes $f' > 0$

A avant $2F$

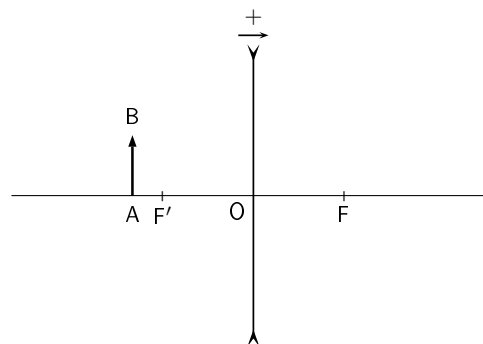


A entre $2F$ et F

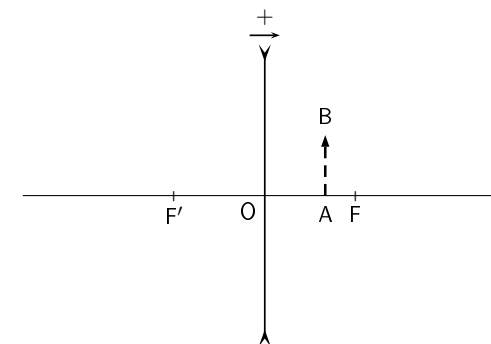


b) Cas des lentilles divergentes $f' < 0$

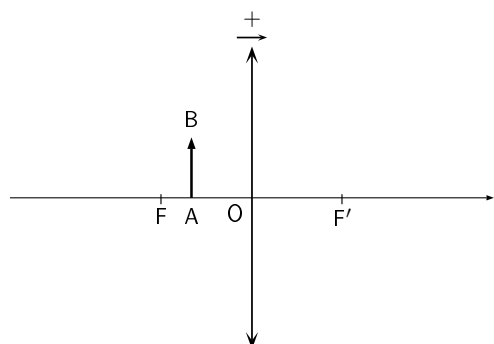
A avant O



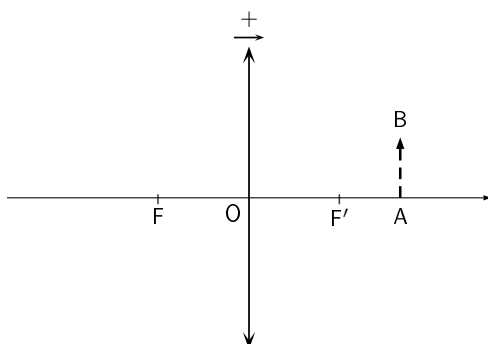
A entre O et F (objet virtuel)



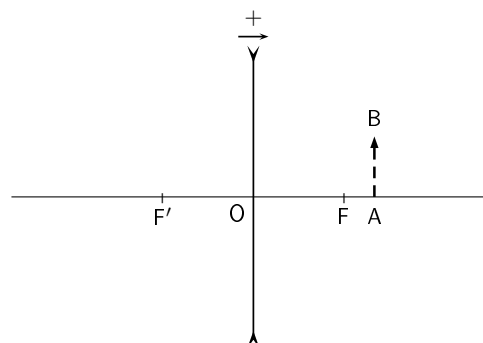
A entre F et O



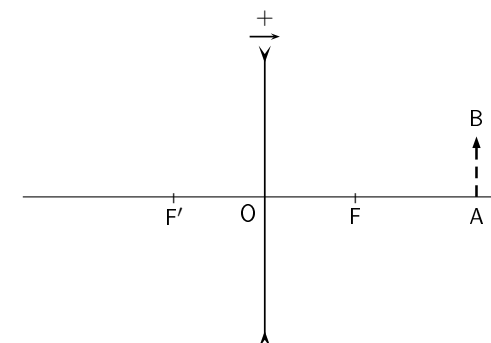
A après O (objet virtuel)



A entre F et $2F$ (objet virtuel)



A après F (objet virtuel)



Objet						
Position	à l' ∞	$\overline{OA} < 2f$	$2f < \overline{OA} < f$	$\overline{OA} = f$	$f < \overline{OA} < 0$	$\overline{OA} > 0$
Image						
Position						
γ						
Application						

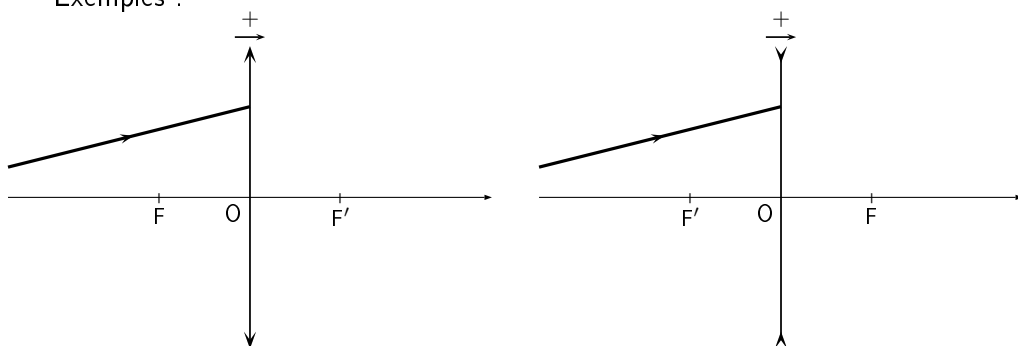
Objet						
Position	à l' ∞	$\overline{OA} < 0$	$0 < \overline{OA} < f$	$\overline{OA} = f$	$f < \overline{OA} < 2f$	$\overline{OA} > 2f$
Image						
Position						
γ						

IV -3. Construction : foyers secondaires, axes secondaires

Pour construire le rayon émergent correspondant à un rayon incident ① quelconque, on peut utiliser l'une des trois méthodes suivantes, qui reposent sur le stigmatisme et l'aplanétisme de la lentille mince :

- ① Le rayon ① est parallèle au rayon ② passant par O . Celui-ci n'est pas dévié et coupe le plan focal image en un foyer secondaire image Φ' . Le rayon émergent correspondant au rayon ① passe lui aussi par Φ' .
- ② Le rayon ① coupe le plan focal objet en un foyer secondaire objet Φ . Par ce point Φ passe également le rayon ② (ΦO) qui émerge de la lentille sans être dévié. Le rayon ① émerge de la lentille parallèlement à ce rayon ②.
- ③ On choisit un point B sur le rayon ①. On trace son image B' en utilisant 2 des 3 rayons fondamentaux. Le rayon émergent doit passer par B' .

Exemples :



IV -4. Relations de conjugaison

Soit A' l'image de A par une lentille mince : $A \xrightarrow{\mathcal{L}} A'$. Il existe des relations de conjugaison qui donnent la position et la taille de l'image en fonction de la position et la taille de l'objet. On les établit, dans les conditions de Gauss, à partir d'une construction géométrique.

a) Relation de conjugaison de Newton

L'objet est repéré par rapport au foyer principal objet F .

L'image est repérée par rapport au foyer principal image F' .

Relations de Newton

Position	$\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = f f' = -f'^2$
Grandissement	$\gamma \triangleq \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{\overline{F'A'}}{f'} = -\frac{f}{\overline{FA}}$

b) Relation de conjugaison de Descartes

L'objet et l'image sont tous les deux repérés par rapport au centre optique O de la lentille.

Relations de Descartes

Position	$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$
Grandissement	$\gamma \triangleq \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

☞ Exercice 3 : Méthode d'autocollimation

IV -5. Condition de projection

Lorsqu'on veut projeter une image réelle d'un objet réel sur un écran, il faut remplir la condition $D \geq 4f'$, où D est la distance entre l'objet et l'image et f' la distance focale image de la lentille convergente utilisée pour la projection. On peut montrer qu'il existe deux positions de la lentille qui donnent une image nette sur l'écran, l'une avec un grandissement γ_1 , et l'autre avec un grandissement $\gamma_2 = \frac{1}{\gamma_1}$. On choisit naturellement celle avec un grandissement tel que $|\gamma| > 1$ si on souhaite une image agrandie, cela correspond à placer la lentille du côté de l'objet.

☞ Exercice 4 : Méthode de Bessel

IV -6. Lentilles accolées

Considérons le cas de lentilles minces de vergences respectives $V_1 = \frac{1}{f_1'}$ et $V_2 = \frac{1}{f_2'}$, de même axe optique, que l'on accole de façon à pouvoir assimiler leurs centres optiques : $O_1 = O_2 = O$.

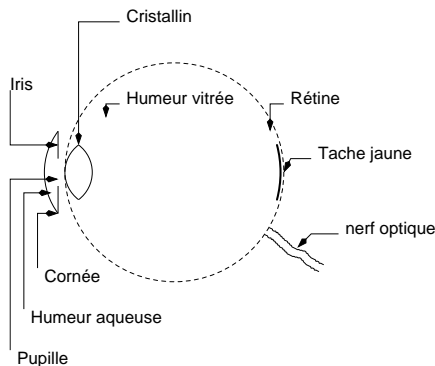
Ce système est équivalent à une lentille unique de vergence $V_{12} = V_1 + V_2$ donc de distance focale $f_{12}' = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2'}$.

V - Systèmes optiques usuels

V -1. Modèle optique de l'œil

a) Description sommaire de l'œil

L'œil possède une forme pratiquement sphérique de rayon voisin de 15 mm avec une courbure plus prononcée vers l'avant, au niveau de la cornée (de rayon 8 mm). Il se comporte comme un appareil photographique pour l'observation d'objets lumineux.



Élément optique	Fonction	Caractéristiques
Objectif : dioptre sphérique (cornée) et lentille mince biconvexe (cristallin)	Formation de l'image	Système convergent de vergence +20 δ donnant une image inversée. Le cristallin sépare l'humeur aqueuse de l'humeur vitrée
Diaphragme : pupille	Réglage de la quantité de lumière pénétrant dans l'œil	La pupille est entourée par l'iris, celui-ci agissant (réflexes inconscients) sur la pupille par des muscles circulaires et longitudinaux
Obturbateur : paupière	Réglage de la durée d'admission de la lumière	L'ouverture et la fermeture de la paupière sont déclenchées par un réflexe
Récepteur de la lumière : rétine	Impression de l'image au niveau de la tache jaune	Elle est constituée de cellules (μm) sensibles à la lumière
Nerf optique	Perception de l'image	Il transmet l'information à l'aire optique du cerveau qui la décode

b) Phénomène d'accommodation

★ punctum remotum et punctum proximum de l'œil normal

Le point objet A_0 à l'infini appelé punctum remotum et noté PR est vu nettement par l'œil normal au repos, l'image correspondante étant formée au foyer F'_O du cristallin : la rétine.

Afin que l'image d'un objet AB à distance finie se trouve également sur la rétine,

l'œil doit déplacer son foyer. Il doit diminuer la distance focale du cristallin, en bombant la face antérieure de la lentille biconvexe associée. Il s'agit du phénomène d'accommodation, notamment ressenti physiologiquement lorsqu'on fait un effort pour lire de très près.

Le punctum proximum ou PP est le point objet, vu nettement par l'œil avec une accommodation maximale. Ce point limite caractérise la distance minimale de vision distincte : d_m .

La faculté d'accommodation, liée à une action musculaire de l'œil, décroît avec l'âge.

La convention pour les instruments commerciaux, est de considérer que

$$d_m = 25 \text{ cm} = \frac{1}{4} \text{ m}$$

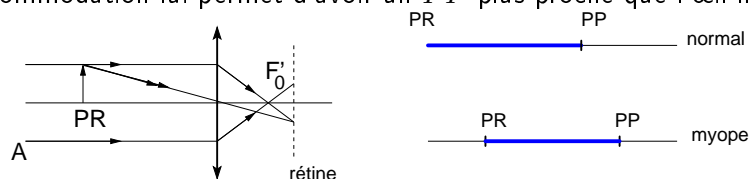
Âge (ans)	10	30	40	50
d_m (cm)	10	15	25	50 puis presbyte

☆ Les défauts de l'œil

L'œil normal, où emmétrope, a un champ de vision qui s'étend de $d_m \simeq 25 \text{ cm}$ à D_m infini, l'effort d'accommodation diminuant lorsque la distance augmente.

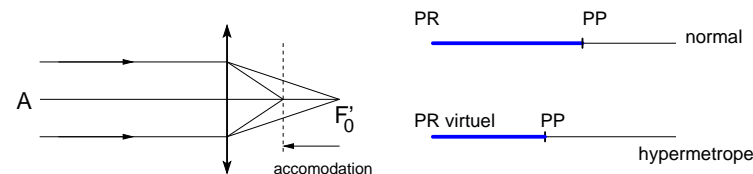
• Myopie

Le cristallin est trop convergent. Pour la vision à l'infini, l'image est en avant de la rétine, donc le myope ne voit pas de loin. Pour le PR , le myope n'accommode pas et obtient une image nette sur la rétine. Sa faculté d'accommodation lui permet d'avoir un PP plus proche que l'œil normal.



• Hypermétropie

Le cristallin n'est pas assez convergent. L'hypermétrope doit accommoder même à l'infini, et son PP est plus éloigné que l'œil normal.



• Presbytie

L'œil perd sa faculté d'accommodation et ne voit plus qu'au voisinage de son PR , c'est-à-dire de loin.

• Astigmatisme

L'œil présente des défauts de symétrie de révolution sphérique, ce qui se traduit par des aberrations géométriques.

V-2. Lunette de visée

Dans la vie de tous les jours, l'observation des objets ou des images se fait à l'œil nu, ce qui limite fortement la précision et le pouvoir de résolution. On peut améliorer les performances à l'aide d'outils usuels de laboratoire.

a) Objet secondaire et condenseur

Une source lumineuse constitue un objet primaire. Par contre, un objet secondaire a besoin d'être éclairé pour diffuser de la lumière. On utilise à cet effet un condenseur, dont le rôle est de concentrer la lumière d'une source vers l'objet.

Un condenseur est constitué de deux lentilles plan-convexes accolées, et il est positionné de telle sorte que les rayons ne convergent pas sur l'objet (sinon, l'image de la source jouerait le rôle d'objet virtuel superposé à l'objet étudié) mais éclairent la totalité de l'objet.

b) Objet à l'infini : collimateur

Pour obtenir un objet à l'infini (nécessaire pour la mise au point de nombreux instruments), on utilise un collimateur. Il comprend :

- une source d'éclairage

- un réticule (deux fils en croix)
- une lentille, dite objectif du collimateur (L_c).

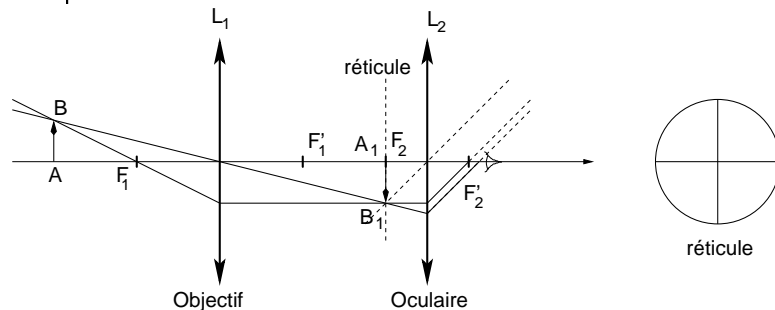
Le réglage du collimateur consiste à amener le réticule au foyer objet F_c grâce à une molette :

$$\text{Réticule en } F_c \xrightarrow{L_c} A'_\infty.$$

L'image réelle A'_∞ joue alors le rôle d'objet virtuel à l'infini.

c) Principe d'une lunette

Une lunette peut être schématisée ainsi



- un objectif (lentille convergente L_1 du côté de l'objet) donnant de l'objet étudié AB une image intermédiaire A_1B_1 .
- un oculaire (lentille convergente L_2 du côté de l'œil) jouant le rôle de loupe pour l'observation de A_1B_1 . Si A_1B_1 est placée en F_2 , l'image finale $A'B'$ se forme alors à l'infini (vision sans accommodation pour l'œil normal).
- un réticule (deux fils croisés à angle droit) que l'on superpose à l'image $A'B'$ en le plaçant lui aussi en F_2 .

REMARQUE : Un oculaire est lui-même constitué par un doublet de lentilles convergentes non accolées, mais la modélisation précédente est suffisante pour comprendre les propriétés et réglages d'une lunette.

d) Lunette de visée à l'infini

En pratique la lunette est constituée de trois tubes, l'un contenant l'objectif, l'autre le réticule et le troisième l'oculaire. Il existe deux molettes de réglage dans une lunette :

- **réglage (1)** de la distance oculaire - réticule : on place l'œil devant la lunette soit au foyer F'_2 de l'oculaire, et on déplace le réticule de façon à le voir net et sans accommodation (réticule au foyer objet F_2)
- **réglage (2)** de la distance objectif - réticule pour une visée à l'infini : il suffit de pointer un objet très éloigné. Son image A_1B_1 se forme alors au foyer image F'_1 et on l'amène à coïncider avec F_2 . En pratique, on tourne la molette de manière à superposer image finale et réticule.

Il faut cependant faire attention aux erreurs de parallaxe (plans proches mais différents dus à l'accommodation de l'œil : déplacer la tête pour vérifier une parfaite superposition)

Réglage à l'infini :

$$A_\infty \xrightarrow{L_1} F'_1 = F_2 \xrightarrow{L_2} A'_\infty.$$

système afocal

REMARQUE 1 : Le réglage d'une lunette de visée à l'infini est fait pour l'œil emmétrope (normal). Si un myope utilise cette lunette, il ne touche pas à la molette de réglage de l'objectif (l'image se superpose au réticule) mais il doit en revanche jouer sur la molette de réglage de l'oculaire pour amener l'image finale $A'B'$ à son propre PR pour pouvoir observer l'image sans accommodation.

REMARQUE 2 : Le dispositif d'éclairage du réticule n'est pas évoqué ici, même s'il est nécessaire.

e) Viseur à frontale fixe

Il s'agit d'une lunette observant un objet à distance finie. Désormais, le système n'est plus afocal ($F'_1 \neq F_2$) et l'objet étudié est en fait placé au foyer objet F du

système $\{L_1, L_2\}$.

$$AB \text{ en } F \xrightarrow{L_1} A_1B_1 \text{ en } F_2 \xrightarrow{L_2} A'_\infty B'_\infty (\text{œil}).$$

Transformer une lunette de visée à l'infini en viseur revient à augmenter la distance objectif - réticule (réglage (2)) puis à la bloquer. En revanche, pour l'œil emmétré, le réglage (1) est inchangé, le réticule est toujours en F_2 . Une fois cette position choisie, on déplace le viseur sur le banc optique pour réaliser des pointés longitudinaux. Tout objet réel ou virtuel est repéré en superposant le réticule à l'image intermédiaire A_1B_1 .

Comme la distance objet-objectif reste fixe pour toute visée nette (objet au foyer F de $\{L_1, L_2\}$), de l'ordre de 10 cm à 30 cm selon le viseur, un tel système est dit viseur à frontale fixe.

Pour déterminer la distance de deux points (objets ou images virtuels d'un autre instrument par exemple), on les vise successivement et on mesure sur le banc optique le déplacement de l'objectif du viseur. Cette technique peut être utilisée en focométrie pour la méthode des points conjugués en cas d'image virtuelle par exemple, puisqu'on ne peut matérialiser ces dernières sur un écran.

V -3. Lunette astronomique

• Description - construction de l'image

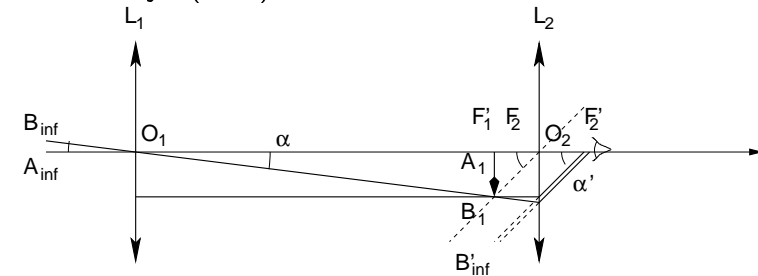
Une lunette astronomique correspond à une lunette de visée à l'infini, mais avec des performances bien supérieures, dues à un objectif convergent de grande distance focale. L'objectif est en effet assimilable à une lentille convergente de distance focale f'_1 de 1 à 20 m et l'oculaire étant une lentille convergente de distance focale f'_2 de l'ordre du cm.

L'objet étudié (astre) étant à l'infini et l'image devant se former à l'infini (pour une observation sans accommodation par un œil normal), le système doit être **afocal**. L'intervalle optique Δ défini comme la distance entre le foyer image F'_1 de l'objectif et le foyer objet F_2 de l'oculaire est alors nulle :

$$\Delta = \overline{F'_1 F_2} = 0$$

$$A_\infty \xrightarrow{L_1} F'_1 = F_2 \xrightarrow{L_2} A'_\infty (\text{œil}).$$

La qualité essentielle d'une lunette est d'augmenter fortement le diamètre angulaire de l'objet (astre) observé.



• Latitude de mise au point

L'astre étant toujours à l'infini, l'image intermédiaire est toujours au foyer objet de l'oculaire ($F'_1 = F_2$). La latitude de mise au point est donc celle de l'oculaire, soit celle d'une loupe. La profondeur de champ est donc $\ell = \frac{f'^2_2}{d_m}$, de l'ordre de 0,4 mm si $f'_2 = 1$ cm et $d_m = 25$ cm.

• Grossissement

La puissance n'a plus d'intérêt puisque l'objet est caractérisé par son diamètre apparent α et non par sa taille AB . Par définition, $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$. Comme le montre la figure précédente, on a immédiatement :

$$\alpha \simeq \tan \alpha = \frac{A_1 B_1}{f'_1} \quad \text{et} \quad \alpha' \simeq \tan \alpha' = \frac{A_1 B_1}{f'_2}$$

$$\boxed{G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f'_1}{f'_2}}$$

• Pouvoir séparateur

Il est comme précédemment limité par l'œil et la nature ondulatoire de la lumière (effets de diffraction), auxquels il faut ajouter les perturbations atmosphériques (variations de l'indice de l'air). On atteint couramment des valeurs α_m de 10^{-6} à 10^{-7} radians.

• Quelques variantes

LE TÉLÉSCOPE : l'objectif est remplacé par un miroir sphérique

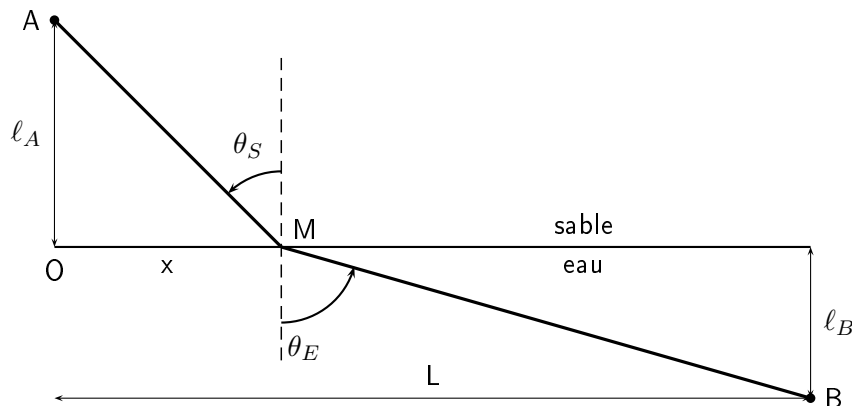
LA LUNETTE DE GALILÉE (jumelles) : l'oculaire est désormais constitué par une lentille divergente, ce qui permet de raccourcir la distance entre l'objectif et l'oculaire (car $F'_1 = F_2$ est alors après la lentille L_2).

Exercice 5 : Lunette de Galilée

Exercices

1 - Principe de Fermat

Intéressons-nous à un problème rencontré par les surveillants de plage. Un surveillant de plage se trouve au point A sur le sable, situé à une distance ℓ_A de la mer. Un nageur inexpérimenté se trouve quand à lui en un point B , dans l'eau, à une distance ℓ_B de la plage. Les projetés orthogonaux de A et B sur le bord de la mer sont distants de L .

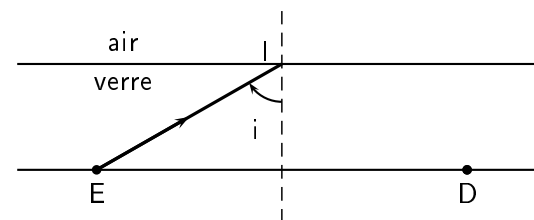


Lorsqu'il court sur une piste d'athlétisme, le surveillant de plage a une vitesse de pointe que l'on notera v_0 . Sur le sable, cette vitesse est divisée par un facteur n_S supérieur à 1. Dans l'eau, il nage à une vitesse encore moindre, sa vitesse de pointe v_0 étant désormais divisée par un facteur n_E supérieur à n_S .

1. Le chemin le plus court est-il a priori le plus rapide ?
2. Exprimer la durée t du trajet en fonction de l'abscisse x du point M d'entrée dans l'eau (on se reportera au schéma pour les notations)
3. Donner une condition sur x pour que la durée du parcours soit minimale (attention, on ne cherchera pas à exprimer directement x).
4. Exprimer la condition qui minimise la durée de parcours en fonction des angles θ_S et θ_E définis sur le schéma. Que reconnaît-on ?

2 - Détection de la pluie sur un pare-brise

On modélise un pare-brise par une lame de verre à faces parallèles, d'épaisseur $e = 5 \text{ mm}$, d'indice $n_v = 1,5$. Un fin pinceau lumineux issu d'un émetteur situé en E arrive de l'intérieur du verre sur le dioptre verre/air en I avec un angle d'incidence $i = 60^\circ$.



1. Montrer que le flux lumineux revient intégralement sur le détecteur situé en D et déterminer la distance ED .
2. Lorsqu'il pleut, une lame d'eau d'indice $n_e = 1,33$ et d'épaisseur $e' = 1 \text{ mm}$ se dépose sur le pare-brise. Représenter le rayon lumineux dans ce cas. À quelle distance du détecteur arrive-t-il ?

3 - Méthode d'autocollimation

1. On place un objet réel AB devant une lentille convergente, exactement dans le plan focal objet. Le point A est sur l'axe optique et le point B est hors de l'axe. Où est située l'image de AB ?

- On ajoute un miroir plan derrière la lentille, de manière à ce que la lumière issue de l'objet, et qui a traversé la lentille change de sens grâce au miroir, et traverse la lentille une seconde fois.

- Faire un dessin permettant de déterminer l'image de AB .
- Où est située l'image définitive ? Est-elle droite, renversée, agrandie ?
- Que se passe-t-il si on déplace le miroir le long de l'axe optique ?
- Quel peut être l'intérêt d'un tel montage ?

4 - Méthode de Bessel

Soit un objet A dont on souhaite obtenir l'image A' sur un écran par une lentille convergente de distance focale image f' . Pendant toute l'expérience, la distance D entre l'objet et l'écran est fixée, et seule la lentille peut se déplacer. On note $x = \overline{AO}$, avec O le centre optique de la lentille.

- Dans le cas où $D > 4f'$, montrer qu'il existe deux positions x_1 et x_2 de la lentille telles que A et A' soient conjugués; en déduire que la mesure de la distance $d = |x_2 - x_1|$ entre ces deux positions permet de déterminer la distance focale f' de la lentille (méthode de BESSEL) par la relation

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$$

- Dans le cas particulier où $D = 4f'$, montrer qu'il n'existe plus qu'une seule position de la lentille telle que l'image A' de A soit située à l'écran, et que le grandissement est alors égal à -1 (méthode de SILBERMAN).

5 - Lunette de Galilée

Une lunette de Galilée est constituée d'un objectif, assimilable à une lentille mince convergente L_1 , de centre O_1 et de distance focale $f'_1 = 50$ cm et d'un oculaire, assimilable à une lentille mince divergente L_2 , de centre O_2 et de distance focale $f_2 = 5,0$ cm.

- La lunette est réglée à l'infini. Quelles sont alors les positions relatives des deux lentilles ?
- On considère un objet AB situé à 75 cm de l'objectif. L'image $A'B'$ de AB est-elle réelle ou virtuelle ? Calculer le grandissement transversal de l'ensemble. Dépend-il de la position de AB ?
- On considère désormais un objet à l'infini, hors de l'axe optique.
 - Tracer la marche d'un faisceau lumineux parallèle incident faisant avec l'axe optique un angle α .
 - Déterminer le grossissement angulaire de la lunette.
 - On observe un phare de hauteur $h = 10$ m situé à une distance $d = 2,0$ km. Sous quel angle le voit-on à travers la lunette ?
 - L'observateur retourne la lunette sans modifier les réglages, et regarde à nouveau le phare. Sous quel angle le voit-il désormais ?

Éléments de réponse

- $t = n_S \frac{\sqrt{x^2 + \ell_A^2}}{v_0} + n_E \frac{\sqrt{(L-x)^2 + \ell_B^2}}{v_0}$
- $ED = 2e \tan i = 1,7$ cm
- 2.(b) renversée, de même taille et dans le plan de l'objet.
- x_1 et x_2 sont solutions de $x^2 - Dx + Df' = 0$
- $\overline{O_1O_2} = 45$ cm ; $\overline{O_2A'} = f'_2 + \left(\frac{f'_2}{f'_1}\right)^2 (f'_1 + \overline{O_1A}) = -5,25$ cm ; $\gamma = \frac{f_2}{f'_1} = 0,1$.
 $G = \frac{f'_1}{f_2} = 10$; $\alpha' = \frac{f'_1}{f_2} \times \frac{h}{d} = 5,0 \cdot 10^{-2}$ rad = $2^\circ 52'$