Optique géométrique

C. Lacpatia

Aug 13, 2024

CONTENTS

Dans une approche classique de la physique, la lumière est une onde, c'est-à-dire la propagation (réversible) d'une perturbation dans un milieu. Les grandeurs perturbées - qui varient - au passage de l'onde lumineuse sont le champ électrique et le champ magnétique. Il n'est pas nécessaire de saisir le sens physique de ces grandeurs.

CHAPTER

ONE

BASES DE L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

1.1: Compétences

- Relier la longueur d'onde dans le vide à la longueur d'onde dans le milieu.
- Définir le modèle de l'optique géométrique et indiquer ses limites.
- Utiliser les loi des Descartes pour prévoir qualitativement et quantitativement le trajet d'un rayon lumineux.
- Établir la condition de réflexion totale

1.1 Connaître le contexte

De manière générale dans les cours, ces parties présentent :

- le contexte d'étude (but, ordre de grandeur, postulat d'étude…)
- les éléments importants **à connaître par coeur** (définitions, propriétés, principes et lois, théorèmes…)
- quelques démonstrations **à connaître par coeur**

1.1.1 La lumière est une onde

1.1.1.1 Célérité et indice de réfraction

Une onde se propage à une vitesse - une célérité - donnée qui dépend du milieu dans lequel elle se déplace.

Important 1.1

On définit l'indice de réfraction n d'un milieu par : $n = \frac{c}{c_{milieu}}$.

- n est toujours supérieur ou égale à 1 et $c = 3 \times 10^8 m.s^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide.
- Un milieu est dit **dispersif** si son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde.

1.1.1.2 Relation entre célérité et longueur d'onde

Important 1.2

On rappelle que pour une onde monochromatique de fréquence ν, de longueur d'onde λ et de célérité c_0, on la relation :

$$\lambda\nu = c_0$$

1.1.2 Approximation de l'optique géométrique

1.1.2.1 Source lumineuse

Important 1.3

Une **source lumineuse** est un objet qui émet de la lumière.

- On distingue les sources lumineuses *primaires* qui produisent leurs propres lumières et les sources lumineuses *secondaires* qui réémettent la lumière (ou une partie de la lumière) qu'ils reçoivent.
- Une **source lumineuse ponctuelle** est une source lumineuse assimilable à un point. Il s'agit d'un modèle théorique mais qu'on peut considérer acceptable pour des sources lointaines (étoiles) ou pour des sources rendues très petites par un diaphragme[1] très fin.
  - Une *source étendue* est constituée d'un ensemble de sources ponctuelles. La majorité des sources que nous utilisons sont des sources étendues (lampes, soleil, lune, source secondaire sur terre…).
- Une **source monochromatique** est une source qui n'émet qu'une seule longueur d'onde.

[1] Un diaphragme est un dispositif mécanique qui limitent l'étendue d'un faisceau lumineux. On peut le caractériser par sa forme et sa taille.

1.1.2.2 Faisceau lumineux et rayon lumineux

Important 1.4

Un **rayon lumineux** est défini comme la direction de propagation de l'onde électromagnétique.
Un **faisceau lumineux** est l'étendue de lumière issue d'un objet et - en général - passant par un diaphragme.

- Un faisceau lumineux est composé d'un ensemble de rayons lumineux.
- Outre le spectre de la lumière émise, un faisceau lumineux est caractérisé par son extension (sa forme et sa taille).

1.1.2.3 Rayon lumineux et diffraction

Important 1.5

Phénomène de diffraction
Lorsqu'on essaie d'isoler un rayon lumineux comme précédemment et qu'on atteint une taille de diaphragme de l'ordre du micromètre (pour le visible - c'est-à-dire qu'elle devient de **l'ordre de la longueur d'onde**), la tâche augmente et l'on voit apparaître des anneaux autour de la tâche. On parle de phénomène de **diffraction.**
Le phénomène de diffraction empêche de tendre rigoureusement vers un rayon lumineux isolé. Dans ces conditions, on ne peut même plus parler de rayon lumineux (il n'y a par exemple pas de correspondance entre un rayon

avant et après le diaphragme).

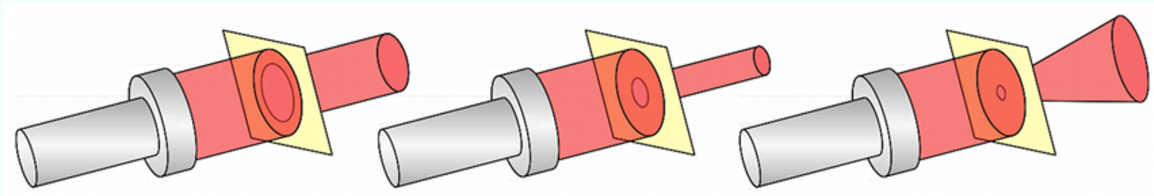


Fig. 1.1: Isoler un rayon lumineux

1.1.2.4 Approximation de l'optique géométrique

Important 1.6

On considère qu'on se place dans le cadre d'étude de **l'optique géométrique** si l'on peut traiter un faisceau lumineux comme un ensemble de rayons lumineux.
Dans ce cadre, les rayons lumineux dans un milieu homogène, transparent et isotrope sont des lignes droites.

Important 1.7

Approximation de l'optique géométrique (Admis)
On peut se placer dans le cadre de l'optique géométrique si les phénomènes de diffraction sont négligeable c'est-à-dire si **les caractéristiques du milieu (indice de réfraction) varient sur des distances grandes devant la longueur d'onde du milieu** (ou ne varient pas).

1.1.2.5 Propriétés dans le cadre de l'optique géométrique

Important 1.8

Propriétés des rayons

- Propagation rectiligne : On rappelle que dans un milieu homogène transparent et isotrope, les rayons lumineux se propagent en ligne droite.
- Indépendance des rayons : Les rayons lumineux sont indépendants, c'est-à-dire que la propagation de l'un n'influe pas sur la propagation l'autre, même quand ils se croisent.
- **Principe de retour inverse** : Si pour aller d'un point A à un point B, la lumière emprunte un chemin S. Alors pour aller du point B au point A, elle empruntera le chemin S en sens inverse.

1.1.3 Lois de Snell-Descartes

Les lois de Snell-Descartes permettent de traiter le cas où l'on passe brusquement d'un milieu d'indice de réfraction n_1 à un milieu d'indice n_2.

1.1.3.1 Lois de Snell-Descartes: Enoncé

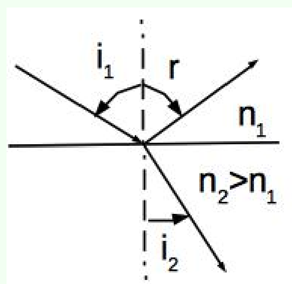
Important 1.9

Lois de Snell-Descartes (Admis)
Lorsqu'un rayon lumineux (appelé **rayon incident**) se propageant dans un milieu d'indice n_1 arrive sur un **dioptre**, ce rayon sépare énergétiquement en deux rayons **tous deux contenus dans le plan d'incidence**:

- l'un, appelé **rayon réfléchi**, continue à se propager dans le milieu d'indice n_1.
- l'autre, appelé **rayon réfracté**, se propage dans le milieu d'indice n_2.

On peut définir les angles **orientés** pour chaque rayon:

- **angle incident** i_1: de la normale vers le rayon incident.
- **angle réfléchi** r: de la normale vers le rayon réfléchi.
- **angle réfracté** i_2: de la normale vers le rayon réfracté.



On a alors les relations géométriques suivantes:

$$r = -i_1$$
$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

1.2 Maitriser les méthodes

De manière générale dans les cours, ces parties présentent (à traiter dans l'ordre):

- des exercices-types (Méthodes) montrant les méthodes d'applications des théorèmes et principes du cours. **Leur correction est en ligne.** Il faut les comprendre et savoir les refaire.
- des activités (Activités) montrant des applications des théorèmes (méthodes à savoir refaire) **avec des conclusions des exercices qui doivent être apprises et que vous devez savoir redémontrer.** (ici le tracé qualitatif des rayons et la réfraction totale).
- des exercices d'application (Application) : exercices de bases pouvant être faits dès le début travail du cours pour voir si l'on maitrise les méthodes de base.
  - Pour ce chapitre, les exercices d'applications sont accessible en ligne[2] *(connection nécessaire)*.
  - Vous trouverez aussi un questionnaire de cours[3] pour s'entraîner à répondre **rapidement** à ces questions

[2] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/quiz/view.php?id=114
[3] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/resource/view.php?id=113

(connection nécessaire).

- des exercices d'entrainement (Entrainement) : exercices plus évolués à apprendre à maitriser. *Certains éléments de corrections (pas la correction complète) peuvent être en ligne.*
- des approfondissement (Aller plus loin) : exercices plus complexes à ne traiter que si l'on a bien su faire les exercices précédents. *Ils ne sont en général présents que sur le site.*
  - Pour ce chapitre, ces exercices sont disponibles ici[4] *(connection nécessaire).*

1.2.1 Activité

1.2.1.1 Tracé qualitatif du rayon réfracté.

Le tracé du rayon réfléchi s'obtient par simple symétrie quel que soient les valeurs des indices. Nous allons plutôt ici voir comment on peut prévoir semi-qualitativement le tracé du rayon réfracté et nous obtiendrons plus informations très importantes. Nous travaillerons dans le plan d'incidence.

Vous pouvez utiliser la simulation Geogebra en ligne[5] pour visualiser les différents comportements. **Les conclusions obtenues ici sont à connaître autant qu'à savoir retrouver.**

Il est **vivement** conseillé de réfléchir aux exercices **avant** de regarder les réponses (en ligne).

1.2: Exercice

On considère le cas où $n_1 < n_2$.

1. Le rayon réfracté s'éloigne-t-il ou se rapproche-t-il de la normale?
2. Justifier que l'angle réfracté ne peut prendre qu'une gamme de valeur limitée dans le plan d'incidence.

Important 1.10

On retiendra que lors du passage d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent:

- le rayon réfracté **se rapproche de la normale** par rapport au rayon incident
- le rayon réfracté va avoir une gamme limitée de valeur. La valeur limite $i_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ est appelée **angle de réfraction limite.**

1.3: Exercice

On considère le cas où $n_2 < n_1$.

1. Le rayon réfracté s'éloigne-t-il ou se rapproche-t-il de la normale?
2. Justifier que l'angle réfracté va atteinte une réfraction rasante (égale à $\pm\pi/2$ pour un angle d'incidence strictement inférieure à $\pm\pi/2$. On notera i_0 la valeur limite de l'angle d'incidence.
3. Que se passe-t-il si l'angle d'incidence est supérieure à i_0 ?

Important 1.11

On retiendra que lors du passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent:

- le rayon réfracté **s'éloigne de la normale** par rapport au rayon incident
- si l'angle d'incidence devient trop grand, il y a phénomène de **réflexion totale**, c'est-à-dire que toute la lumière est réfléchie.

[4] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/resource/view.php?id=115
[5] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/resource/view.php?id=111

L'angle d'incidence limite permettant la réfraction se calcule en cherchant un angle réfracté de $\pm\pi/2$. On obtient:

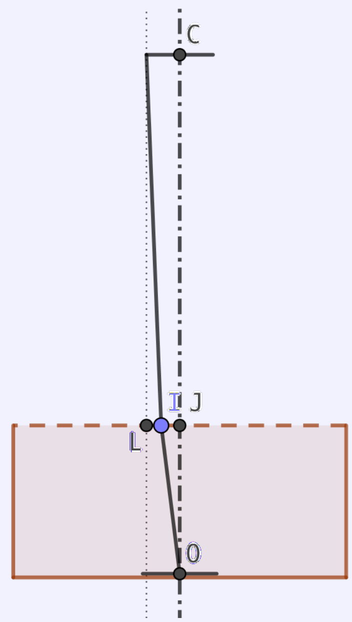
$$i_0 = \pm \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

1.2.2 Méthodes

1.2.2.1 Utilisation des lois de Snell-Descartes

La correction est en ligne.

1.4: Exercice



On considère une pièce de monnaie de rayon R_0 dont on négligera l'épaisseur posée au fond d'une casserole de hauteur H_0 remplie à ras bord d'eau.
L'oeil d'un observateur se trouve à la verticale de centre de la pièce à une hauteur H_1.

1. On appelle O le centre de la pièce. Déterminer l'équation que vérifie l'ouverture angulaire θ_0 du faisceau issu du point O et qui entre dans l'oeil en fonction du rayon de la pupille R_1.
2. **Faire l'application numérique pour $H_0 = H_1$ en choisissant des valeurs numériques plausibles. On sera amener à simplifier l'équation précédente AVANT de la résoudre en justifiant les simplifications réalisées par des ordres de grandeurs.

1.2.3 Application

1.5: Longueur d'onde et milieu

Soit λ_0 la longueur d'onde dans le vide, sachant que la fréquence d'une onde lumineuse ne varie pas d'un milieu à l'autre, montrer que la longueur d'onde correspondante dans un milieu d'indice de réfraction n est $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

Point utile pour cet exercice $\Longrightarrow$ Relation de dispersion *(page 4).*

On rappelle que d'autres exercices d'application sont en ligne.

1.2.4 Entrainement : Bases de l'optique

Ces exercices seront traités en classe.

1.2.4.1 Fibre optique à saut d'indice

Objectifs: Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.

Une fibre optique à saut d'indice est constituée d'un coeur en silice d'indice n_1 entouré d'une gaine d'indice n_2. Le tout est à symétrie cylindrique. Elle permet de transporter des informations par modulation d'amplitude d'un faisceau lumineux confiné à l'intérieur de la fibre par réflexion totale.

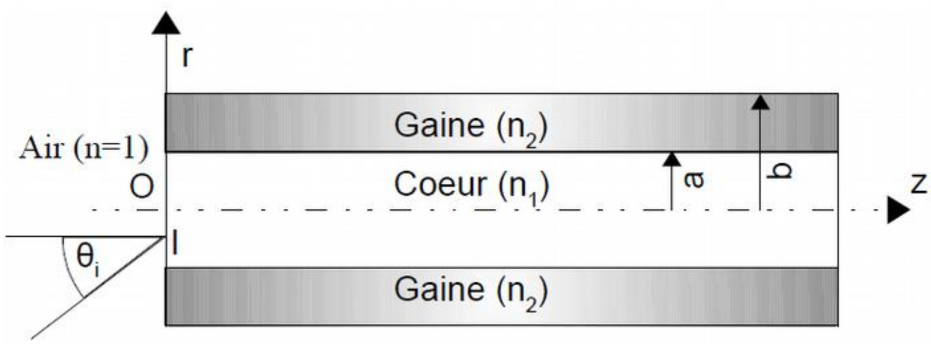


Fig. 1.2: Fibre optique

La perte en transmission (ou atténuation) X s'exprime par $X_{dB} = 10\log(\frac{P_2}{P_1})$ avec P_1 la puissance lumineuse à l'entrée de la fibre et P_2 la puissance lumineuse au bout d'un kilomètre dans la fibre. On l'exprime en dB.km^{-1}

1.6: Exercice

1. Quelle condition doit-on imposer à n_2 et n_1 pour pouvoir confiner la lumière dans la fibre (c'est-à-dire pour qu'il y ait réflexion totale) ?
2. Sachant qu'en 1970, l'atténuation était de -10dB.km^{-1} et qu'actuellement elle est de -0.005dB.km^{-1}, déterminer dans les deux cas les pertes en puissance en % au bout d'un km.
3. Un rayon lumineux arrive en I avec un angle θ_i. Montrer que si θ_i est inférieur à un angle θ_a, un rayon peut être guidé à travers le coeur. Pour une fibre cylindrique, justifier le terme de **cône d'acceptance.**
4. On appelle ouverture numérique (O.N.) la grandeur sin(θ_a). Donner l'expression de O.N. en fonction de n_1 et de $\Delta = \frac{n_1^2-n_2^2}{2n_1^2}$. A.N.: $\Delta = 10^{-2}, n_1 = 1,5$.

Une impulsion lumineuse (une information) arrive à t = 0 au point O sous la forme d'un faisceau conique de demi-angle au sommet (O) θ_i ($\theta_i < \theta_a$).

1. Pour une fibre de longueur l, calculer l'élargissement temporel (ou **dispersion intermodale**) Δt à la sortie de la fibre, c'est-à-dire le temps écoulé entre la sortie du premier rayon et celle du dernier. On l'exprimera en fonction de l, n_1, c et θ_i.
2. En déduire quelle quantité d'information cette fibre peut transmettre en une seconde. A.N.: $l = 10km, \theta_i = 8°, n_1 = 1,5$

Point utile pour cet exercice

- $\Longrightarrow$ Lois de Snell-Descartes *(page 6)*.
- $\Longrightarrow$ Réflexion totale *(page 7)*.

1.2.4.2 TD: Arc-en-ciel

On désire étudier le phénomène de l'arc-en-ciel au moyen d'un modèle simple. On suppose ici que les gouttes d'eau sont assimilables à des sphères de rayon R, de centre O et d'indice de réfraction homogène n = 1,3 baignant dans l'air.

La sphère est éclairée par un faisceau de lumière parallèle, dont un rayon atteint la sphère en A. Après réfraction, le rayon retouche le dioptre eau-air en B. Le rayon alors réfléchi recoupe la sphère en C où un rayon refracté ressort avec une angle $\hat{a}$ par rapport à l'axe Ox. On pose $\hat{i}$ l'angle incident au point A et $\hat{r}$ l'angle réfracté au même point A (c'est-à-dire l'angle $\widehat{OAB}$). On supposera que $\hat{a} \in [0; \pi/2]$.

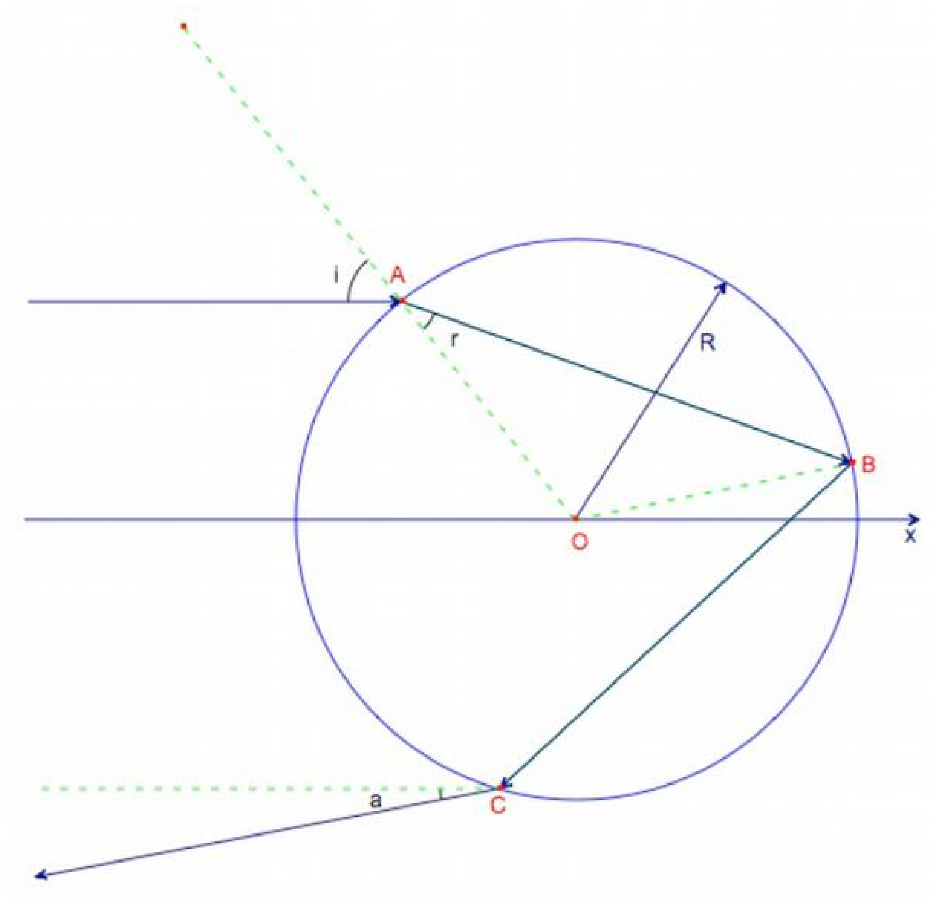


Fig. 1.3: Arc-en-ciel

1.7: Exercice

1. Pourquoi suppose-t-on que le faisceau incident est un faisceau de rayons parallèles ? Quelle est sa direction ?
2. Quelles sont alors les valeurs possibles de l'angle $\hat{i}$?
3. Peut-il y avoir réflexion totale en B?
4. Montrer que $\hat{a} = 4\hat{r} - 2\hat{i}$.
5. En déduire $\hat{a}$ en fonction de $\hat{i}$ seulement.
6. Calculer $\frac{d\hat{a}}{d\hat{i}}$
7. Montrer qu'il existe un angle i_{max} pour lequel $\hat{a}$ est maximal. Calculer i_{max} et a_{max}.
8. Montrer que si un observateur regarde haut dans le ciel avec un angle $\hat{a}$ qu'on précisera, il recevra un maximum de lumière (il y aura accumulation des rayons lumineux).

1.8: Exercice

1. Dans des conditions telles que le soleil soit à l'ouest, incliné de 10° au-dessus de l'horizon. De quel côté faut-il regarder pour observer un arc-en-ciel? Préciser la hauteur angulaire maximale α au-dessus de l'horizon et les circonstances météorologiques nécessaires à l'observation.

On explique le phénomène de l'arc-en-ciel par les propriétés dispersives de l'eau, c'est-à-dire que l'indice de réfraction de l'eau varie en fonction de la longueur d'onde de la lumière.

1. Déterminer les valeurs maximum de a pour le rouge (n=1,331) et pour le violet (n=1,337) et en déduire quelle couleur fera l'extérieur de l'arc-en-ciel (c'est-à-dire la partie la plus haute). Que vaut l'ouverture angulaire $\Delta\alpha$ de l'arc-en-ciel?

Point utile pour cet exercice

- $\Longrightarrow$ Lois de Snell-Descartes *(page 6)*.
- $\Longrightarrow$ Réflexion totale *(page 7)*.
- $\Longrightarrow$ *Trigonométrie*

1.2.4.3 La déviation par le prisme

Il s'agit d'une activité d'approfondissement permettant d'essayer de s'entraîner sur un exercice plus difficile. Certains points pourront être utiles plus tard en Travaux Pratiques.

Principe général: On considère un prisme triangulaire d'angle au sommet A dont la base est posée horizontalement sur un socle. On envoie un faisceau lumineux constitué de rayon parallèle sur une des face et on observe les rayons sortant par l'autre face (les deux faces constituant l'angle A). Ce seront les deux faces utiles du prisme. Le faisceau étant parallèle l'angle que font les rayons avec la première face du prisme est toujours la même, on note cet angle i. Il vient par les lois de Descartes que les angles formées par les différents rayons réfractés seront les mêmes quelques soit le rayon considéré. On va donc considérer un seul rayon pour l'étude.

But: On désire étudier la déviation du rayon lumineux D en fonction de l'angle d'incidence i. L'air extérieur est considéré comme un milieu d'indice 1.

1.9: Exercice

1. Etablir une relation entre i,r et n puis entre i', r' et n.
2. Montrer que $A = r + r'$ et $D = i + i' - A$.
3. Existence d'un rayon dévié.
   1. *Quelles sont les valeurs de i telles qu'on observe effectivement un rayon sortant du prisme? On ne tiendra pas compte des limitations géométriques du prisme. Déterminer cette gamme pour $n = 1,5$ et $A = 60^\circ$. On notera i_0, l'angle limite qui apparaî dans le raisonnement.

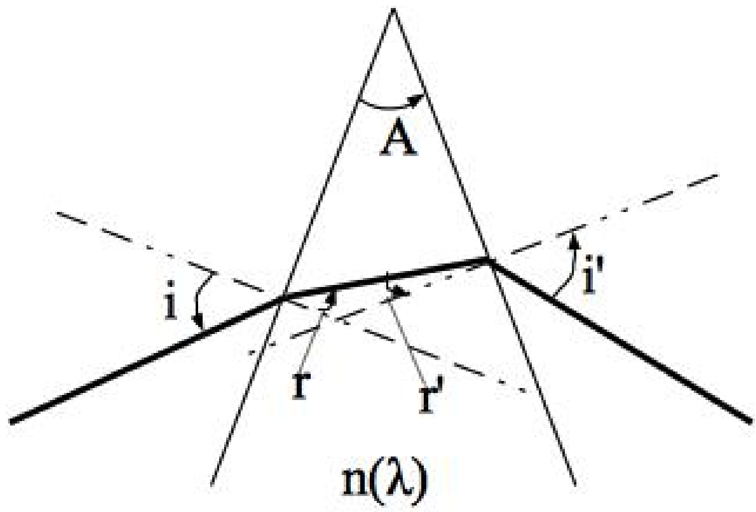


Fig. 1.4: Déviation par le prisme

2. Que se passe-t-il si l'angle du prisme est trop grand ($90°$ par exemple)?
3. Faire un tracé des rayons et déterminer l'angle de déviation D pour les cas $i = i_0$ et $i = \pi/2$. Commenter.

4. Déduire de la question précédente que la fonction $D(i)$ passe par au moins un extremum. L'expérience montre qu'il y en a qu'un seul et que c'est un minimum de déviation. On notera D_m le minimum de déviation.
5. *Retrouver le résultat de l'expérience par une étude mathématique de la fonction $D(i)$.
6. Quelle est la relation entre D_m, A et n?
7. En général, le prisme choisi est très dispersif c'est-à-dire que l'indice de réfraction n dépend fortement (tout est relatif) de la longueur d'onde du faisceau incident λ. Expliquer pourquoi un tel dispositif permet la réaliser d'un spectroscope, c'est-à-dire un appareil permettant de déterminer le spectre d'un signal lumineux.
8. (Recherche) Expliquez comment Newton a utiliser cette méthode pour montrer que la lumière blanche était composé d'un grand nombre de radiations "élémentaires". Commenter ce terme (et précisez le terme utilisé aujourd'hui).

Point utile pour cet exercice

- $\Longrightarrow$ Lois de Snell-Descartes *(page 6)*.
- $\Longrightarrow$ Réflexion totale *(page 7)*.
- $\Longrightarrow$ *Trigonométrie*

CHAPTER

TWO

SYSTÈMES CENTRÉS

2.1: Compétences

- Construire l'image d'un objet et identifier sa nature réelle ou virtuelle.
- Enoncer les conditions permettant un stigmatisme approché et les relier aux caractéristiques d'un détecteur.
- Connaître les définitions et les propriétés d'un système centré, du centre optique, des foyers principaux et secondaires.

2.1 Connaître le contexte

De manière générale dans les cours, ces parties présentent :

- le contexte d'étude (but, ordre de grandeur, postulat d'étude…)
- les éléments importants **à connaître par coeur** (définitions, propriétés, principes et lois, théorèmes…)
- quelques démonstrations **à connaître par coeur**

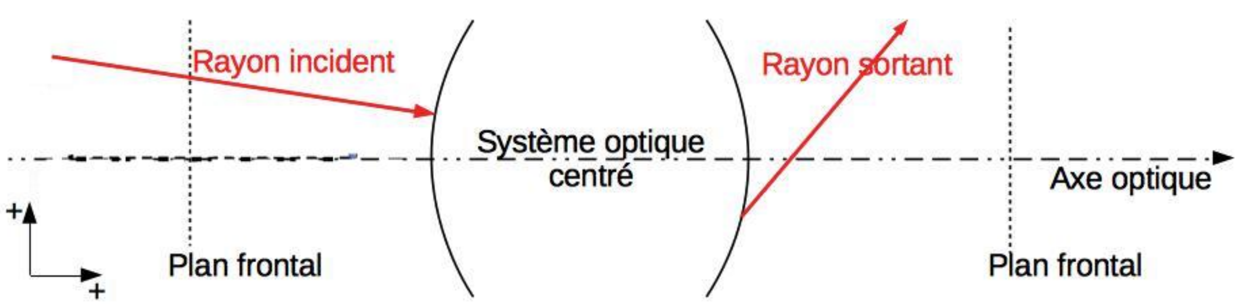
2.1.1 Présentation générale

2.1.1.1 Définition

Important 2.1

Un système centré est un système optique - c'est-à-dire une série de dioptre (et de surfaces réfléchissantes) - possédant un axe de révolution.

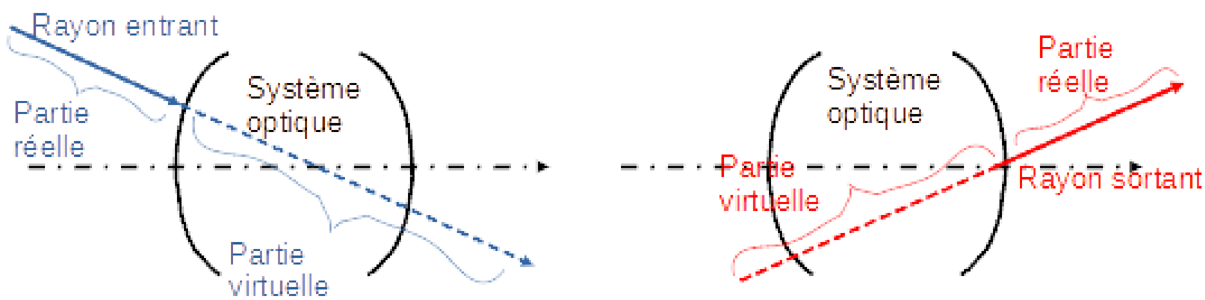
- L'axe de révolution d'un système optique centré est appelé **axe optique**.
- Tout plan perpendiculaire à l'axe optique est appelé **plan frontal.**



2.1.1.2 Rayons entrants et sortants

Important 2.2

- Les rayons qui arrivent sur le système optique sont appelés **rayons entrants ou rayons incidents**.
  - La portion réellement parcourue par le rayon est appelé **rayon réel**. Son prolongement est appelé **rayon virtuel**.
- Les rayons qui sortent du système optique sont appelés **rayons sortants ou rayons transmis**.
  - La portion réellement parcourue par le rayon est appelé **rayon réel**. Son prolongement est appelé **rayon virtuel**.

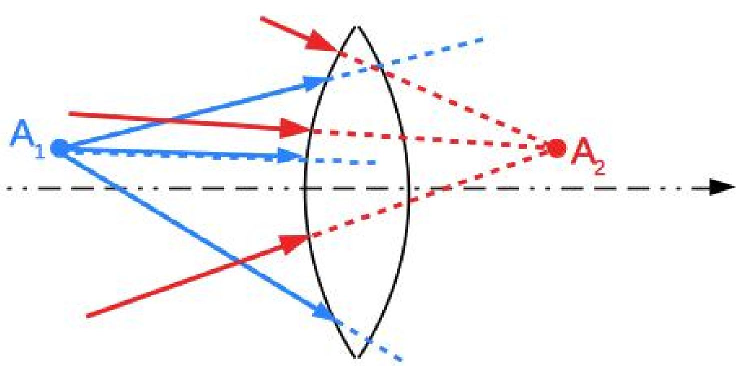


2.1.1.3 Objets réels et virtuels

Important 2.3

Définition : Objet ponctuel Lorsque les rayons entrants concourent en un point, on appelle ce point, **point objet (ou objet)**.

- Si le point objet est le concours des rayons réels, alors on dit que l'**objet est réel** (comme A_1 sur la figure ci-dessous).
- Si le point objet est le concours du prolongements des rayons réels (rayons virtuels), on dit que l'**objet est virtuel** (comme A_2). Un objet virtuel est nécessairement formé par un système optique en amont.



2.1.2 Stigmatisme rigoureux. Notion d'images.

Un système optique sert à modifier la position et la taille apparente de l'objet lumineux visé. Son correspondant - son conjugué - après le système optique (ce qu'on va voir à travers la jumelle, la lunette, la loupe…) est appelé **image** et celle-ci doit être vue nettement. C'est-à-dire qu'à un point de l'objet doit correspondre dans l'image… un point (et non une tâche). C'est ce qu'on appelle le **stigmatisme.**

Nous allons simplement présenter ici la définition du stigmatisme et dans le cadre où ce dernier est réalisé, préciser la notion d'image.

2.1.2.1 Stigmatisme rigoureux

Important 2.4

Un système optique est dit **rigoureusement stigmatique** pour deux points (A ;A') si l'ensemble des rayons lumineux issus du premier point A et traversant le système forment d'autres rayons lumineux dont les supports passent par le second point A'.
Le premier point A est appelé **point objet**, le second **point image A'**. On dit que les deux points A et A' sont **conjugués**.

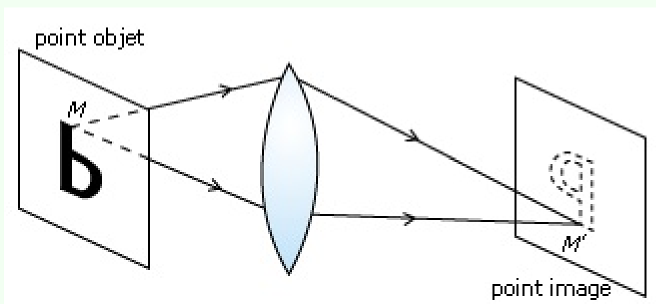
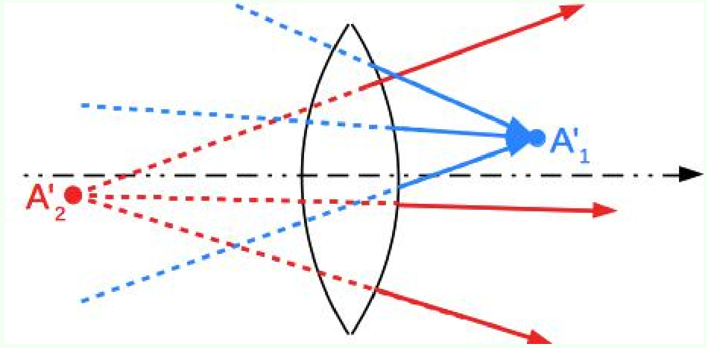


Fig. 2.1: Conjugaison d'un point objet et image

2.1.2.2 Images réelles et virtuelles

Important 2.5

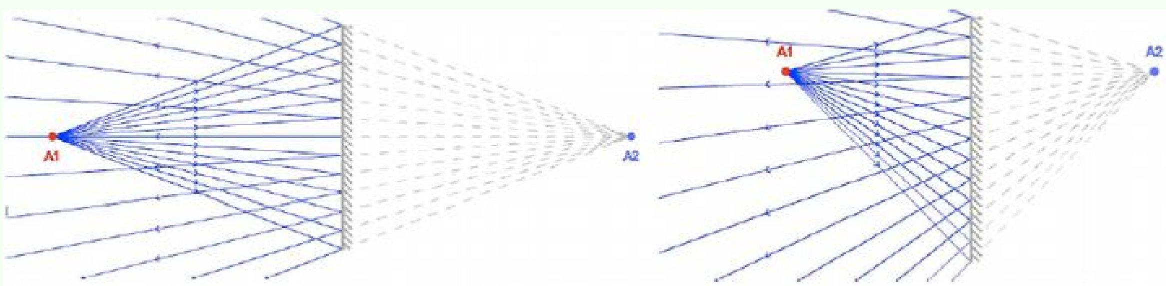
- Lorsque le point image est au concours des rayons réels, on dit que l'**image est réelle** (comme A_1' dans l'*image ci-après* (page **??**)). *En pratique, il s'agit d'une image formée en aval du système optique. On peut y placer un écran et observer l'image sur l'écran.*
- Lorsque le point image est au concours du prolongement virtuels des rayons sortants (rayons sortants dits virtuels), on dit que l'**image est virtuelle** (comme A_2' sur l'[image ci-après](image virtuelle) ou A_2, image de A_1 dans le cas du *miroir plan ci-dessus* (page **??**)). En pratique, il s'agit d'une image formée avant la sortie du système optique. On ne peut la matérialiser sur un écran *mais il suffit de placer son oeil derrière le système optique pour la voir*.



2.1.3 Miroir plan: Présentation et relation

Important 2.6

- *Un miroir plan est une surface plane parfaitement réfléchissante.*
- **Un miroir plan réalise un stigmatisme rigoureux.**
- Pour un point objet A conjugué à un point image A', on a **la relation de conjugaison** $\overline{HA} = -\overline{HA'}$ avec H le projeté de A (ou A') sur le plan du miroir.



2.1.4 Stigmatisme approché et condition de Gauss

Comme nous l'avons précisé précédemment, seul le miroir plan permet de réaliser un stigmatisme rigoureux. Mais on utilise pourtant des miroirs sphériques, des lentilles… Et l'on arrive à voir des images nettes.

Pour ce faire, on doit se placer dans un cadre moins "rigoureux" mais suffisant à cause des "imperfections" de notre oeil: le **stigmatisme approché**.

2.1.4.1 Stigmatisme approché

2.1.4.1.1 Absence de stigmatisme rigoureux (en ligne)

2.1.4.1.2 Stigmatisme approché: sélection des rayons

Important 2.7

On dit qu'un système réalise un **stigmatisme approché** pour un couple de points (A;A') si tous les rayons lumineux du faisceau issu du point A *et traversant le système optique* ressortent **au voisinage** du point A'.
A' sera considéré comme l'image de l'objet A par le système optique et on dira que A' et A sont conjugués.

2.1.4.2 Conditions de Gauss

2.1.4.2.1 Condition de Gauss: Simulation (en ligne)

On utilisera ici un miroir sphérique pour réaliser la simulation du tracé des rayons. On utilise un point objet à l'infini dans un premier temps puis une simulation sur un objet à distance finie sera produite.

2.1.4.2.2 Condition de Gauss: Présentation

Important 2.8

Les **conditions de Gauss** (ou condition des rayons paraxiaux) sont un cadre théorique et expérimental dans lequel on sélectionne uniquement les rayons qui sont satisfont aux deux conditions:

- ils ne doivent pas être trop inclinés par rapport à l'axe optique.
- ils doivent entrer dans le système optique en un point proche de l'axe optique.

Un système centré placé dans les conditions de Gauss réalise un stigmatisme approché.

2.1.4.2.3 Conditions de Gauss: Réalisation expérimentale

En pratique, on va réaliser les conditions de Gauss en:

- mettant un diaphragme en amont du système optique pour empêcher les rayons trop éloignés d'entrer.
- mettant un diaphragme en aval du système optique (ou à l'intérieur) pour couper le passage des rayons trop inclinés.

2.1.4.2.4 Condition de Gauss: Utilisation analytique

Important 2.9

Approximations aux petits angles Dans le cadre des conditions de Gauss, il vient que les angles avec l'axe optique sont petits. On utilisera alors l'approximation des petites angles sur les fonctions trigonométriques:

$$\begin{aligned}\sin i &\approx i\\ \tan i &\approx i\\ \cos i &\approx 1 \text{ ou } 1-\frac{i^2}{2} \text{ (si l'on a besoin de plus de précision.)}\end{aligned}$$

2.1.4.2.5 Condition de Gauss: Aberrations

Important 2.10

Si les conditions de Gauss ne sont pas respectées expérimentalement, cela donne lieu à des **aberrations géométriques**, c'est-à-dire que l'image sera déformée ou floue.

2.1.5 Eléments principaux des systèmes centrés

2.1.5.1 Eléments principaux: foyers

Important 2.11

Foyers principaux objets et images

- On définit le **foyer principal objet** comme le point où tout rayon *incident* passant par le foyer principal objet ressort du système optique (**rayon transmis**) en étant parallèle à l'axe optique.

Le foyer principal objet est donc l'antécédent du point à l'infini sur l'axe optique.

- On définit le foyer principal image comme le point tel que tout rayon **incident** parallèle à l'axe optique ressort du système optique (**rayon transmis)** en passant par le foyer principal image.

Le foyer principal image est donc l'image du point à l'infini sur l'axe optique.

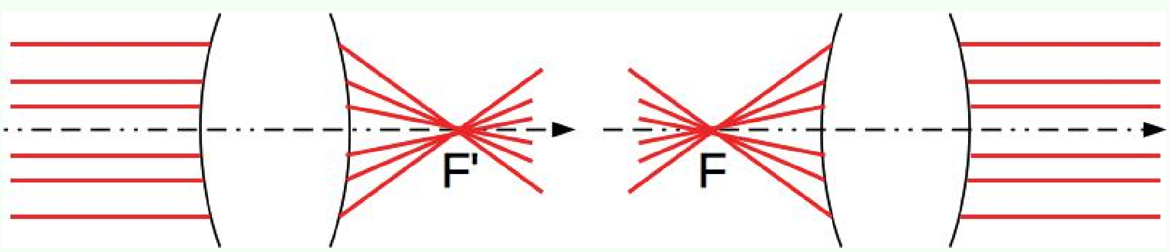


Fig. 2.2: Foyer principal image (gauche) et objet (droite)

- Les plans focaux objet et image sont respectivement les plans frontaux contenant les foyers principaux objet ou image.

Important 2.12

Foyers secondaires objets et images Les foyers *secondaires* objet et image sont les points respectivement du plan focal objet ou image n'étant pas sur l'axe optique.

- Un foyer secondaire objet a pour image un point à l'infini **hors de l'axe optique** (qu'on peut représenter par un faisceau sortant parallèle entre eux mais non parallèle à l'axe optique). *Une telle image est caractérisée par l'angle du faisceau ainsi formé.*

- Un foyer secondaire image a pour antécédent un point à l'infini **hors de l'axe optique** (qu'on peut représenter par un faisceau entrant parallèle entre eux mais non parallèle à l'axe optique). *Un tel objet est caractérisé par l'angle du faisceau ainsi formé.*

2.1.5.2 Eléments principaux: Centre optique et distance focale

Important 2.13

Centre optique Le **centre optique** est le point de l'axe optique où tout rayon incident pointant vers ce point ressort sans être dévié.

Important 2.14

Distance focale objet et image

- Lorsque le centre optique existe, on définit la distance focale objet f comme la distance **algébrique** entre le centre optique O et le foyer principal objet F: $f = \overline{OF}$
- Lorsque le centre optique existe, on définit la distance focale image f' comme la distance **algébrique** entre le centre optique O et le foyer principal image F': $f' = \overline{OF'}$
- On définit la vergence $V = 1/f'$ avec f' la distance focale image. Son unité est la **dioptrie** notée δ

2.2 Maitriser les méthodes

De manière générale dans les cours, ces parties présentent :

- des exercices-types (Méthodes) montrant les méthodes d'applications des théorèmes et principes du cours. **Leur correction est en ligne.** Il faut les comprendre et savoir les refaire.
- des activités (Activités) montrant des applications des théorèmes (méthodes à savoir refaire) **avec des conclusions des exercices qui doivent être apprises et que vous devez savoir redémontrer.** (pas dans ce cours)
- des exercices d'application (Application) : exercices de bases pouvant être faits juste après le travail du cours pour voir si l'on maitrise les méthodes de base.
  - Pour ce chapitre, les exercices d'applications sont accessible en ligne[6] *(connection nécessaire).*
- des exercices d'entrainement (Entrainement) : exercices plus évolués à apprendre à maitriser. *Certains éléments de corrections (pas la correction complète) peuvent être en ligne.*
- des approfondissement (Aller plus loin) : exercices plus complexes à ne traiter que si l'on a bien su faire les exercices précédents. *Ils ne sont en général présents que sur le site.* (pas dans ce cours)

[6] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/resource/view.php?id=113

2.2.1 Méthode : Recherche des éléments principaux

2.2.1.1 Foyer image d'un miroir sphérique.

2.2: Exercice

On considère une portion de sphère de rayon R dont l'intérieur est entièrement réfléchissant.

1. On considère un rayon incident parallèle à l'axe optique à une distance d de ce dernier. Représenter graphiquement le rayon réfléchi et l'intersection entre ce rayon et l'axe optique. Comment appellerait-on ce point ?
2. Déterminer la distance (algébrique) entre le centre de la sphère miroir et le point d'intersection précédent.
3. Simplifier l'expression précédente pour d >> R. Commenter le résultat.

La correction est en ligne.

2.2.2 Entrainement : Systèmes centrés

Ces exercices seront traités en classe.

2.2.2.1 Le sextant

Le sextant est un appareil qui était utilisé par les marins pour déterminer la latitude. Pour cela, il mesurait la hauteur d'un astre (Soleil,Lune…) au dessus de l'horizon. Le sextant est composé de deux miroirs plans M_1 et M_2 (ce dernier étant semi-réfléchissant) et d'une lunette de visée (que nous n'étudierons pas ici). La direction OC du plan du miroir pointe un repère sur l'arc de cercle gradué AB qui mesure 60°. Sur la figure, les proportions ne sont pas respectées.

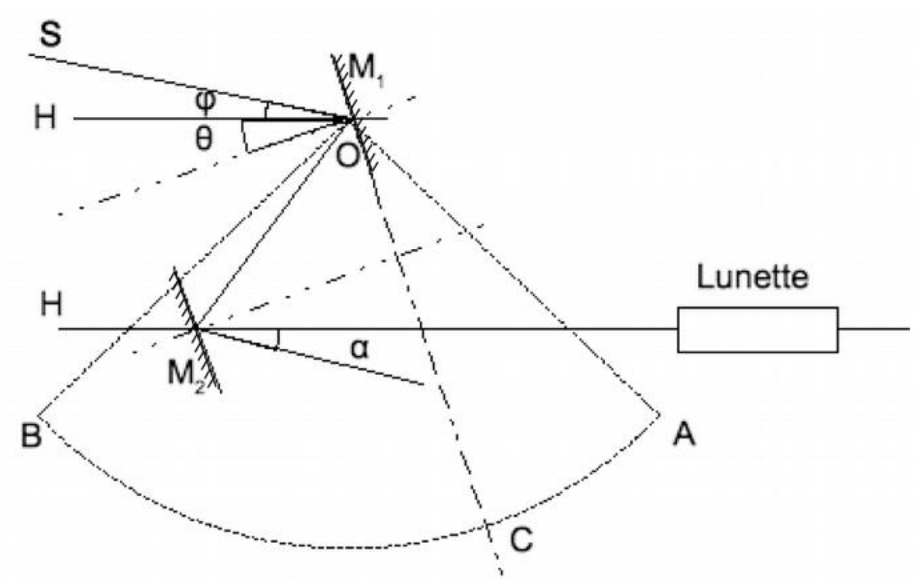


Fig. 2.3: Sextant

Avec la lunette, l'observateur vise l'horizon donc l'axe optique de la lunette a la direction horizontale. La normale au plan du miroir M_2 est fixe et fait un angle de 30°. Ce miroir est aussi parallèle à la direction OA où O est le point d'incidence des rayons de l'astre sur le miroir M_1 (qu'on peut assimiler au "centre" du miroir plan M_1). On note θ l'angle entre la normale à M_1 et l'horizontale et ϕ celui de la direction de l'astre par rapport à l'horizontale. On les considère positifs dans la configuration donnée sur le schéma.

2.3: Exercice

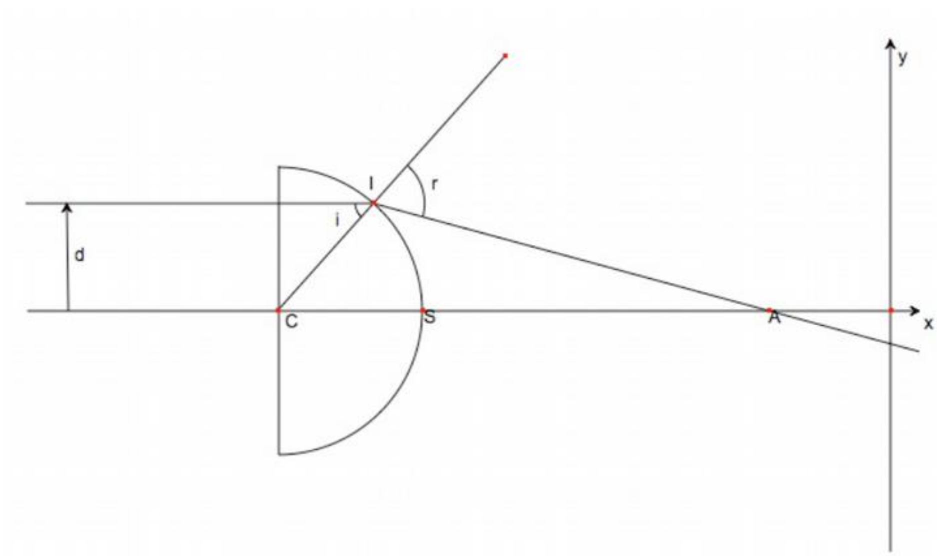
1. Déterminer en fonction de ϕ et θ, l'angle α que fait le rayon réfléchi sur M_2 avec l'horizontale.
2. Quel doit-être l'angle θ pour que le rayon réfléchi sur M_2 soit selon l'axe optique de la lunette?
3. Dans ces conditions, déterminer la relation entre l'angle AOC et l'angle SOH où S désigne la position de l'astre et H l'horizon.

Point utile pour cet exercice

- $\Longrightarrow$ Miroir plan *(page* **??***).*
- $\Longrightarrow$ *Trigonométrie*

2.2.2.2 Dioptre hémisphérique

On étudie un dioptre hémisphérique (une lentille) de rayon R et d'indice n plongé dans l'air d'indice 1. On s'intéresse aux phénomène d'aberration. Un faisceau cylindrique (de rayon d_{max}) de lumière monochromatique arrive sous incidence normale sur la lentille; ce faisceau est donc issu d'un point objet B situé à l'infini dans la direction de l'axe.



2.4: Exercice

1. On considère un rayon du faisceau de lumière à une distance d de l'axe optique. Établir la relation donnant CA en fonction de R = CS, et des angles i et r.
2. Montrer que quand on se place dans l'approximation de Gauss ($d \ll R$), on peut considérer que tous les rayons coupent l'axe optique en un même point F' dont on déterminer la distance à C. F' est donc l'image de B dans les conditions de Gauss.
3. Comment appelle-t-on F'?
4. On n'est plus dans les conditions de Gauss. Quelle est la valeur d_0 limite de d max du faisceau incident si l'on veut que tous les rayons du faisceau incident ressortent de la lentille?
5. Faire l'application numérique pour n = 1,5, R = 5cm.
6. *Faire un développement limité au second ordre en i de la distance CA. Conclure quant à la possibilité de réaliser l'approximation de Gauss.

Point utile pour cet exercice

- $\Longrightarrow$ Lois de Snell-Descartes *(page 6).*

- $\Longrightarrow$ Réflexion totale *(page 7)*.
- $\Longrightarrow$ Eléments principaux d'un système centré *(page 18)*.
- $\Longrightarrow$ Méthode : Recherche d'un foyer *(page 20)*.
- $\Longrightarrow$ *Trigonométrie*

CHAPTER

THREE

LENTILLES MINCES

3.1: Compétences

- Connaître les définitions et les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence.
- Construire l'image d'un objet situé à une distance finie ou infinie de rayons lumineux.
- Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal (Descartes, Newton)
- Choisir de façon pertinente dans un contexte donné la formulation (Descartes ou Newton) la plus adaptée.
- Établir et connaître la condition D > 4f' pour former l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente.
- Modéliser l'oeil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur fixe.
- Connaître les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation.

3.1 Connaître le contexte

De manière générale dans les cours, ces parties présentent :

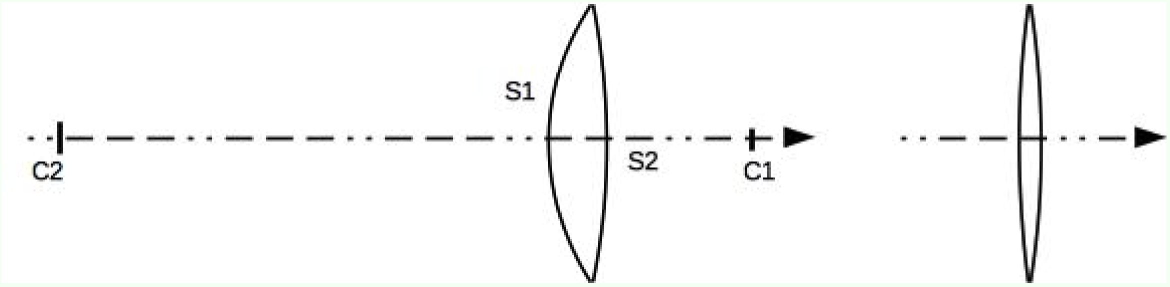
- le contexte d'étude (but, ordre de grandeur, postulat d'étude…)
- les éléments importants **à connaître par coeur** (définitions, propriétés, principes et lois, théorèmes…)
- quelques démonstrations **à connaître par coeur**

3.1.1 Lentilles minces: Présentation

3.1.1.1 Lentilles minces: définition

Important 3.1

Lentille sphérique mince
Une lentille sphérique est un système optique centré composé d'un milieu transparent taillé suivant deux dioptres sphériques. On a repéré ici les centres et sommets respectifs des deux faces: C_1, C_2, S_1 et S_2.



Soit e l'épaisseur de la lentille $e = \overline{S_1S_2}$, on dit que la lentille est mince si $e \ll C_1S_1; e \ll C_2S_2; e \ll C_1C_2$ Dans ces conditions, on peut confondre les sommets S_1 et S_2. Ce point sera, dans le cadre d'application des conditions de Gauss, le **centre optique** de la lentille.

3.1.1.2 Lentilles minces: typologie

Important 3.2

Lentilles divergente et convergente

- Si la distance focale image est positive, on dit que la lentille est **convergente**.
- Si la distance focale image est négative, on dit que la lentille est **divergente**.

3.1.1.3 Lentilles minces: Schématisation de Gauss

Important 3.3

Schématisation de Gauss d'une lentille convergente

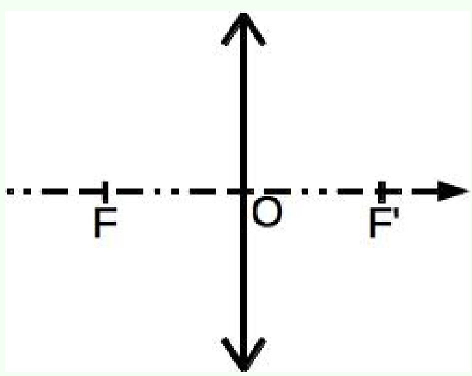


Fig. 3.1: Schématisation de Gauss (CV)

Dans le cadre des conditions de Gauss, on schématise une lentille mince convergente sous la forme ci-contre.

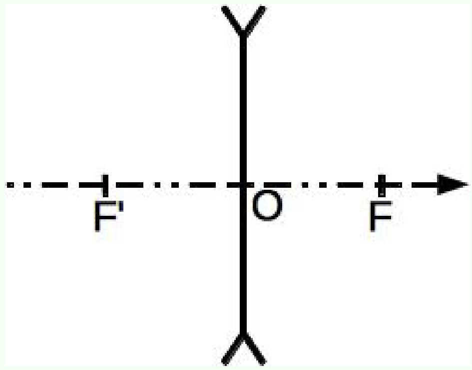


Fig. 3.2: Schématisation de Gauss (DV)

Dans le cadre des conditions de Gauss, on schématise une lentille mince divergente sous la forme ci-contre.

3.1.2 Lentilles minces: tracés des rayons

3.1.2.1 Rayons utiles

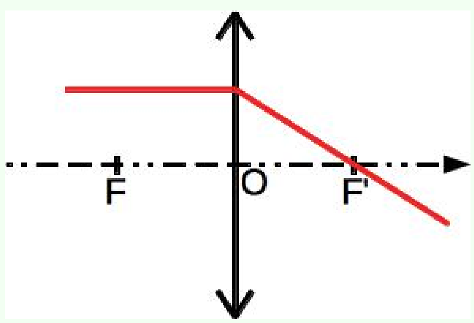
Nous allons présenter ici les 4 rayons (plutôt 3 rayons et une propriété particulière) qui peuvent être utiles pour les études présentées ci-dessus. Ils utilisent les éléments principaux de la lentille.

Important 3.4

Fondamental : Rayons utiles

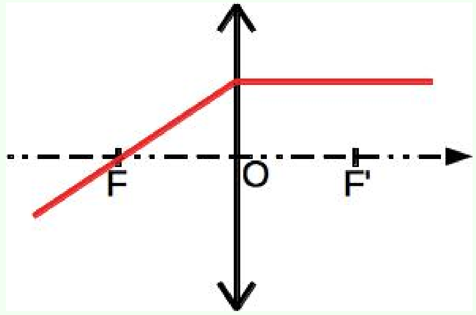
- Un rayon incident parallèle à l'axe optique ressort en passant par le foyer principal image.

A l'inverse, un rayon sortant passant par le foyer principal image a pour antécédent un rayon parallèle à l'axe optique.



- Un rayon entrant passant par le foyer principal objet ressort de la lentille parallèlement à l'axe optique.

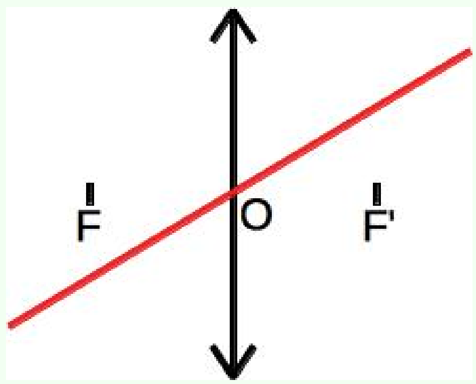
A l'inverse, un rayon sortant parallèle à l'axe optique a pour antécédent un rayon qui passe par le foyer principal objet.



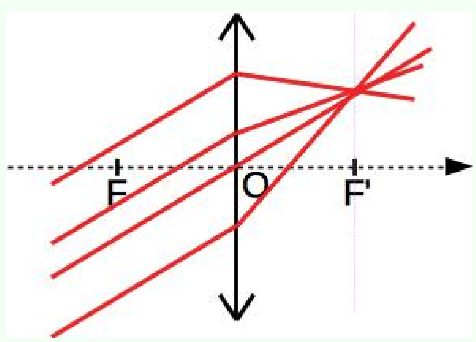
Important 3.5

Fondamental : Rayons utiles (2)

- Un rayon entrant passant par le centre optique ressort non dévié.



- Deux (ou plus) rayons incidents parallèles entre eux ressortent en se croisant en un foyer image (secondaire ou principal) donc dans le plan focal image.



- Deux (ou plus) rayons transmis parallèles entre eux ont pour antécédents des rayons qui se croisent en un foyer objet (secondaire ou principal) donc dans le plan focal objet.

3.1.3 Relations des lentilles minces

3.1.3.1 Lentilles minces: Relations de conjugaison

3.1.3.1.1 Lentilles minces: Relation de conjugaison (Enoncé)

Important 3.6

Soit une lentille mince de centre optique O, de foyer objet F, de foyer image F' et de distance focale image f'. Soit un point objet A sur l'axe optique conjugué avec un point image A'. On a les relations suivantes:

- Relation de Descartes:

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

- Relation de Newton:

$$\overline{FA} \times \overline{F'A'} = -f'^2$$

3.1.3.1.2 Lentilles minces: Relations de conjugaison (Démonstration)

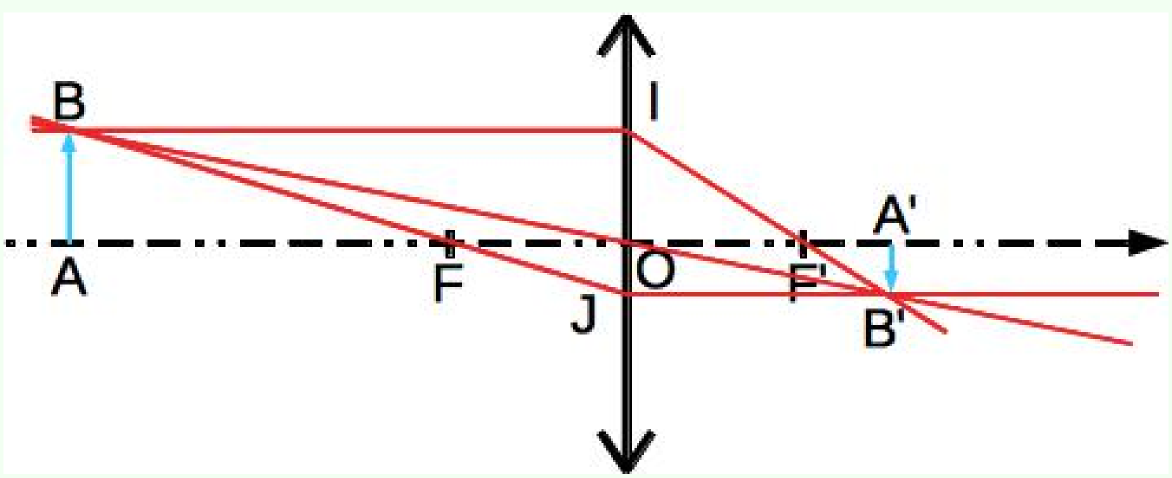
Important 3.7

Démonstration La démonstration passe par plusieurs étapes:

1. Réaliser un schéma clair avec des rayons utiles mettant en avant des triangles semblables
2. établir des relations entre les rapports des grandeurs en utilisant les triangles semblables
3. Isoler les rapports de grandissement $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$.
4. Déduire des équations obtenues les expressions voulues.

1. Nous allons le démontrer pour une lentille convergente. Il faut s'entraîner à le démontrer pour une lentille divergente. Le schéma de construction est donné ci-dessous. On utilise trois rayons entrants:

- celui passant par le centre optique qui ressort non dévié.
- celui passant par le foyer principal objet qui ressort parallèle à l'axe optique
- celui entrant parallèlement à l'axe optique et ressortant en passant par le foyer principal image.



2. On remarque que:

- les triangles OAB et OA'B'
- les triangles F'OI et F'A'B'

- les triangles FAB et FOJ

sont tous semblables deux à deux. On peut donc écrire l' égalité des rapports:

$$\frac{\overline{AB}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OA'}}$$
$$\frac{\overline{AB}}{\overline{FA}} = \frac{\overline{OJ}}{\overline{FO}}$$
$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{F'A'}} = \frac{\overline{OI}}{\overline{F'O}}$$

3. Soit les grandissements (en remarquant que $\overline{OI} = \overline{AB}$ et $\overline{OJ} = \overline{A'B'}$):

$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$
$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}}$$
$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}}$$

Important 3.8

Démonstration(suite)
4. En égalisant les deux dernières relations, il vient directement (avec $\overline{FO} = -\overline{F'O} = f'$):

$$\overline{FA} \times \overline{F'A'} = -f'^2$$

On peut aussi égaler les deux premières et utiliser la relation $\overline{FA} = \overline{FO} + \overline{OA}$:

$$\overline{OA'}\left(\overline{FO} + \overline{OA}\right) = \overline{FO} \times \overline{OA}$$
$$\Longrightarrow \overline{FO} \cdot \overline{OA} - \overline{OA'} \cdot \overline{FO} = \overline{OA'} \cdot \overline{OA}$$

En divisant par le produit $\overline{OA} \cdot \overline{OA'} \cdot \overline{FO}$, il vient bien la relation:

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

3.1.3.2 Lentilles minces: Relations de grandissement

Important 3.9

Soit une lentille mince de centre optique O, de foyer objet F, de foyer image F' et de distance focale image f'. Soit un objet AB dans un plan frontal conjugué avec une image A'B'. On a les relations dites de grandissement suivantes:

$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$
$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{FO}}{\overline{FA}}$$
$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}}$$

Ces relations ont été démontrées lors de l'établissement des relations de conjugaison.

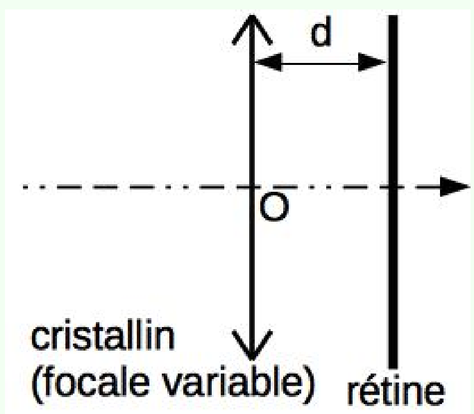
3.1.4 L'oeil et ses défauts

3.1.4.1 Modélisation

3.1.4.1.1 Eleménts et modélisation

Important 3.10

Du point de vue de l'optique géométrique, on peut modéliser l'oeil comme une lentille (le cristallin) diaphragmée (par la pupille) - celle-ci ne sera pas toujours représentée. La lentille est située en amont d'un écran (la rétine) situé à une distance d (en général $d \approx 2.5cm$) pour un oeil emmétrope - oeil normal).



3.1.4.1.2 Accomodation

Important 3.11

Lorsque l'oeil vise un objet, il doit adapter sa distance focale pour former nettement l'image de l'objet visé sur la rétine. On parle **d'accomodation.**
L'accomodation de l'oeil se fait grâce à des muscles qui vont déformer le cristallin et **changer sa distance focale**.

- L'oeil ne peut voir plus loin qu'un point appelé **Punctum Remotum**. Lorsqu'il vise ce point, les muscles de l'oeil sont relâché et ne se fatiguent pas. On dit que **l'oeil est au repos**.
- L'oeil ne peut voir plus près qu'un point appelé **Punctum Proximum** (car c'est la configuration où le cristallin est bombé au maximum).

3.2: Oeil emmétrope

L'oeil emmétrope ou oeil normal est considéré comme la norme lorsqu'il s'agit d'étudier un oeil (on parle aussi d'oeil sans défaut) ou de construire et d'évaluer un instrument d'optique (cf. suite). Ses caractéristiques sont les suivantes:

- Le punctum Remotum est à l'infini.
- Le punctum Proximum est à une distance $d \approx 25cm$

3.1.4.2 Les caractéristiques de l'oeil (en ligne)

Il est utile de comprendre ce que représentent physiquement ces grandeurs mais la connaissances des valeurs précises n'est pas à connaître.

3.2 Maitriser les méthodes

De manière générale dans les cours, ces parties présentent :

- des exercices-types (Méthodes) montrant les méthodes d'applications des théorèmes et principes du cours. **Leur correction est en ligne.** Il faut les comprendre et savoir les refaire.
- des activités (Activités) montrant des applications des théorèmes(méthodes à savoir refaire) **avec des conclusions des exercices qui doivent être apprises et que vous devez savoir redémontrer.**
  - Pour ce chapitre, trois méthodes sont à maitriser : l'étude des lentilles accolées, la condition de projection et les espaces conjugués.
- des exercices d'application (Application) : exercices de bases pouvant être faits dès le début travail du cours pour voir si l'on maitrise les méthodes de base.
  - Certains sont en dans le cours.
  - D'autres sont en ligne (interrogation rapide[7], auto-corrigés[8] - attention à travailler d'abord les méthodes sur la projection et les espaces conjugués avant de traiter cette dernière partie)
- des exercices d'entrainement (Entrainement) : exercices plus évolués à apprendre à maitriser. *Certains éléments de corrections (pas la correction complète) peuvent être en ligne.*
- des approfondissement (Aller plus loin) : exercices plus complexes à ne traiter que si l'on a bien su faire les exercices précédents. *Ils ne sont en général présents que sur le site:* exercices divers[9], exercice plus délicat sur les doublets[10]

3.2.1 Méthodes : Tracés graphiques

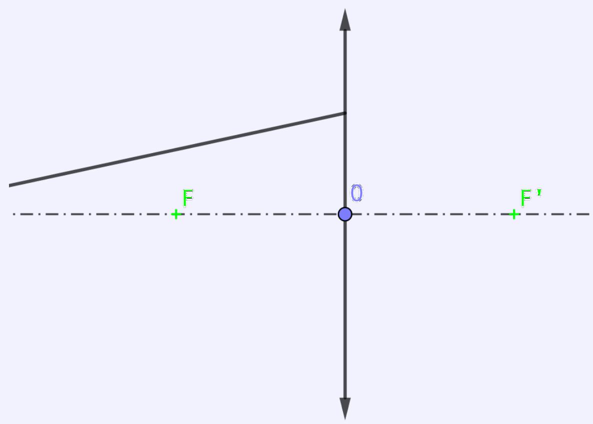
3.2.1.1 Tracé un rayon transmis quelconque.

Les corrections sont en ligne. **Il est important de s'entraîner à rédiger la description du tracé.** *Vous pouvez visualiser la méthode de tracé d'une image grâce à cette simulation Geogebra*[11].

[7] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/resource/view.php?id=121
[8] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/quiz/view.php?id=122
[9] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/resource/view.php?id=123
[10] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/resource/view.php?id=124
[11] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/resource/view.php?id=119

3.3: Exercice

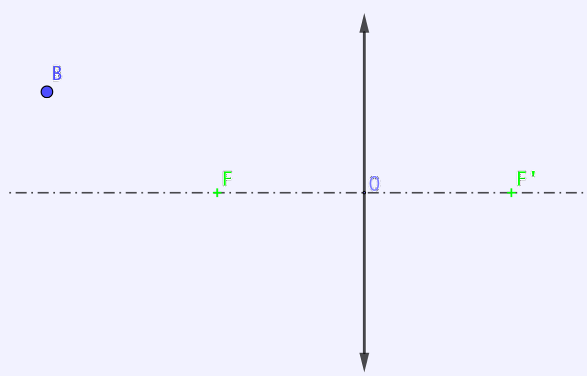
On considère un rayon arrivant sur la lentille ci-dessous. Représenter le rayon transmis.



3.2.1.2 Déterminer un point image.

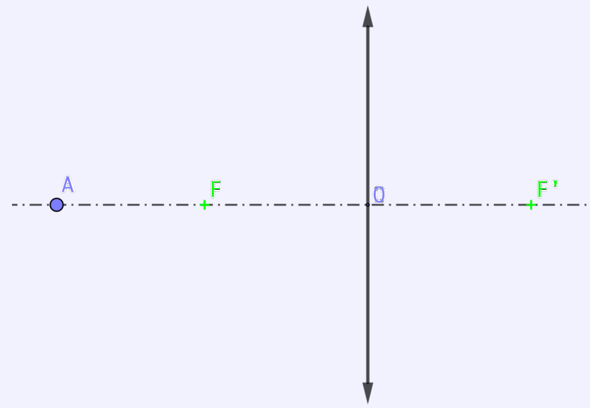
3.4: Exercice

On considère un point B hors de l'axe optique. Déterminer graphiquement son image B' par la lentille ci-dessous.



3.5: Exercice

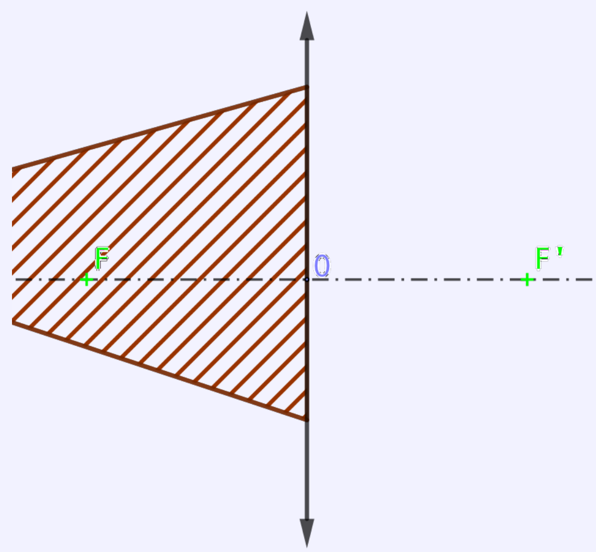
On considère un point A sur l'axe optique. Déterminer graphiquement son image A' par la lentille ci-dessous.



3.2.1.3 Tracé un faisceau transmis

3.6: Exercice

On considère le faisceau suivant arrivant sur une lentille convergente. Tracer le faisceau sortant correspondant.



3.2.2 Méthodes : Etudes qualitatives

La correction de ces exercices méthodes est en ligne.

3.7: Lentille convergente

1. On considère une lentille convergente de distance focale image f'. Déterminer le deux points sur l'axe optique H et H' tels qu'un objet dans le plan frontal de H a une image dans le plan frontal de H' et tel que le grandissement soit égale (algébriquement) à -1
2. Réaliser alors le tracé graphique.

3.8: Lentille divergente

On considère une lentille divergente de distance focale image f'= - 10cm et un objet AB de taille h = 2cm (A est sur l'axe optique) situé à d = 20cm en amont du foyer principal objet.
Déteminer graphiquement puis numériquement la position et la taille de l'image A'B' de AB par la lentille.

3.2.3 Activités

Il s'agit d'activités. Elle seront réalisés en classe sous forme de travaux dirigés **mais les conclusions importantes devront être retenues**.

3.2.3.1 Activités : Lentilles accolées

Nous allons étudier ici le cas de deux lentilles minces accolées, **c'est-à-dire de deux lentilles dont on peut considerer que les centres optiques sont confondus.**

3.9: Exercice

Montrer que **deux lentilles accolées** de vergence V_1 et V_2 sont équivalentes à une seule lentille dont le centre optique est placé au même endroit que ceux des lentilles accolées et dont la vergence est $V = V_1 + V_2$

Important 3.12

Bilan à retenir - Ce n'est PAS la correction On retiendra:
- la conclusion de l'exercice
- **que cette conclusion n'est pas QUE si les lentilles sont accolées**.

3.2.3.2 Activités : Zones d'espaces conjuguées

On veut ici relier des zones d'espaces dans lesquelles l'objet et l'image conjugué seront d'un type donnée : par exemple une zone où l'on aura toujours un objet réel donnant une image virtuelle (attention la zone de l'objet ne sera pas la même que la zone de l'image).

3.10: Exercice

On considère une lentille convergente. Déterminer les zones objets correspondant aux configuration suivantes:
1. l'objet est réel et l'image est virtuelle.
2. l'objet est réel et l'image est réelle.
3. l'objet est virtuel et l'image est virtuelle.

4. l'objet est virtuel et l'image est réelle.

Dans chaque configuration, on déterminera aussi:

- la zone image correspondante
- si l'image est droite ou renversée
- si l'image est grandit, rétrécie ou si elle peut-être les deux.

Reprendre le même exercice pour une lentille divergente.

Important 3.13

On retiendra que pour un lentille convergente, on peut obtenir les 3 configurations suivantes:

- objet réel avant le foyer objet et image réelle après le foyer image. L'image est alors renversée et elle peut être agrandie ou rétrécie.
- objet réel entre F et O et image virtuelle. L'image est droite et toujours plus grande que l'objet.
- objet virtuel et image réelle entre O et F'. L'image est droite et toujours plus petite que l'objet.

Important 3.14

On retiendra que pour un lentille divergente, on peut obtenir les 3 configurations suivantes:

- objet réel et image virtuelle entre F' et O. L'image est alors droite et elle est toujours plus petite que l'objet.
- objet virtuel entre O et F et image réelle. L'image est droite et toujours plus grande que l'objet.
- objet virtuel après F et image virtuelle avant F'. L'image est renversée et elle peut être agrandie ou rétrécie.

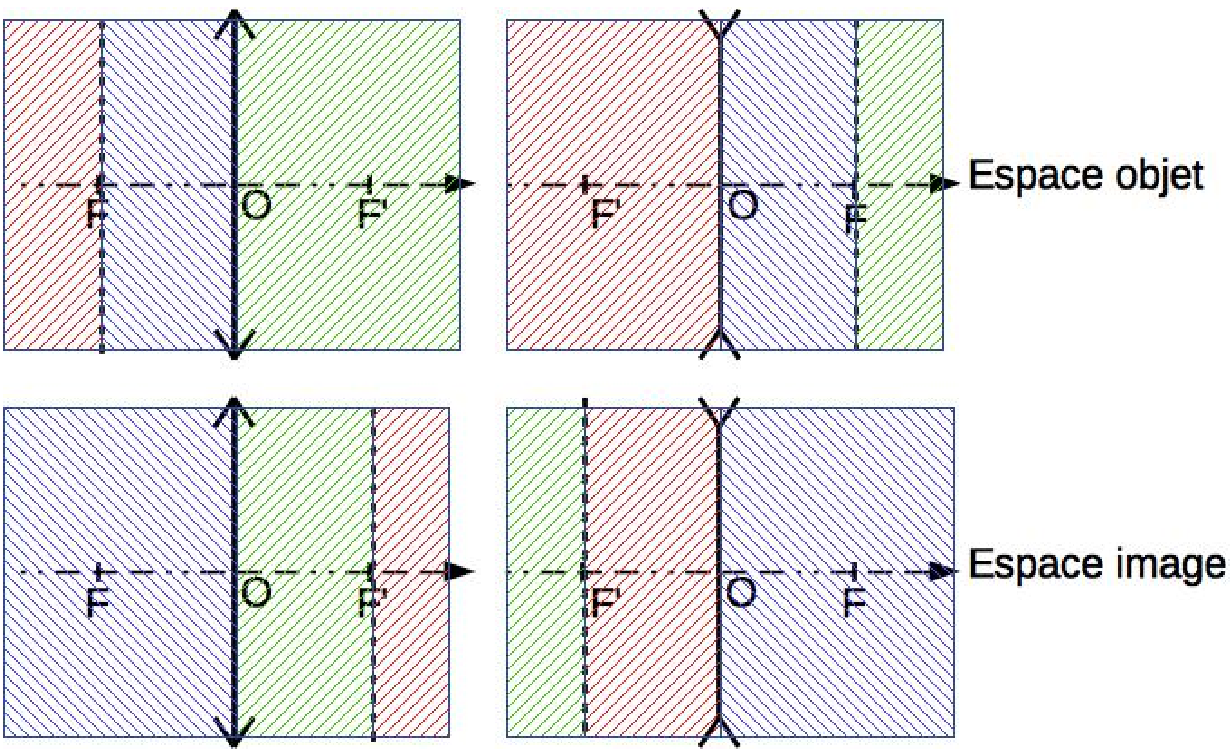


Fig. 3.3: Les couleurs donnent la correspondance entre les zones objets et images

3.2.3.3 Activité : Projection

Nous allons étudier ici les conditions de projection, c'est-à-dire les conditions permettant de projeter un objet sur un écran à une distance donnée. On retrouve évidemment ce principe dans tous les dispositifs… de projection comme un vidéo-projecteur.

On désire projeter un objet lumineux (exemple l'objet illumé par un vidéoprojecteur) sur un écran situé à une distance D (par exemple le tableau). On dispose pour celà de lentilles et on veut savoir quelles sont les lentilles qu'on peut choisir pour réaliser cette projection.

On s'impose que:

- Condition 1: l'image sur l'écran doit être nette (!)
- Condition 2: l'image sur l'écran doit être grandie.

3.11: Exercice

1. Analyse de la condition 1:
   1. Quel est la nature (réel/virtuel) de l'objet ? de l'image ? Quelle type de lentille faut-il choisir?
   2. Justifier que la distance focale f' de la lentille doit vérifier la **condition de projection** : $D > 4f'$
2. Analyse de la condition 2:
   1. La condition de projection étant réalisée, déterminer les distances $\overline{OA}$ entre la lentille et l'objet et $\overline{OA'}$ entre la lentille et l'écran en fonction de D et f'. Vous devez trouver deux possibilités.
   2. Laquelle de ces deux possibilités permet de satisfaire la condition 2?
   3. Exprimer dans ces conditions le grandissement.
   4. Estimer la distance focale de la lentille du vidéoprojecteur de la classe ainsi que le grandissement.
   5. Comment faut-il choisir la distance focale pour obtenir un grossissement important. Quel problème celà peut-il poser?

Important 3.15

Bilan à retenir - Ce n'est PAS la correction On retiendra que:

- pour pouvoir projeter un objet sur un écran situé à une distance D, il faut **une lentille convergente** dont la distance focale satisfait **la condition de projection** $D > 4f'$.
- pour grandir l'objet, la lentille doit se trouver plus proche de l'objet que de l'écran.

3.2.4 Application

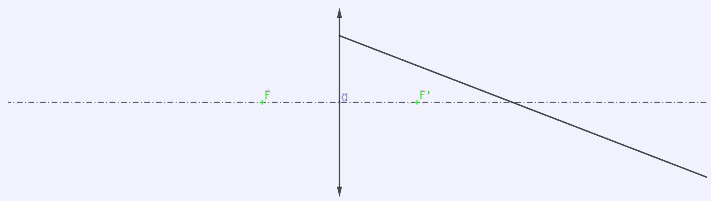
On rappelle que certains exercices sont disponibles en ligne[12]. Ces exercices d'application directe est à faire à la suite du cours pour vérifier votre compréhension des méthodes. Vous pourrez confronter votre travail avec celui de vos camarades et poser des questions sur cet exercice en classe mais il ne sera pas forcément donné de correction complète.

[12] https://moodlecpge.stanislas.fr/course/view.php?id=2%C2%A7ion=1

3.2.4.1 Tracés graphiques

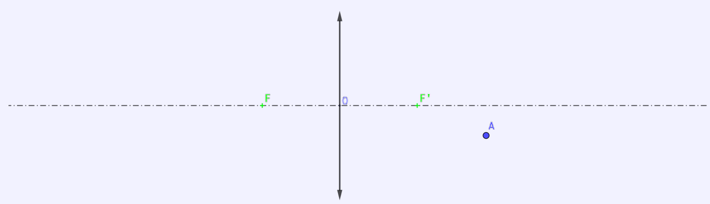
3.12: Exercice

On considère une lentille convergente et un rayon transmis. Déterminer le rayon incident correspondant.



3.13: Exercice

On considère une lentille convergente et un point **image** A. Déterminer l'antécédent de A.



Point utile pour cet exercice

- ⟹ Méthode : Tracés graphiques *(page 30).*

3.2.4.2 Utilisation des relations

3.14: Exercice

On considère une lentille divergente. Démontrer les relations de conjugaison.

3.15: Exercice

Estimer la distance entre la lentille et la matrice CCD d'un appareil photo numérique de distance focale 50mm lorsqu'il fait la mise au point sur un objet:

1. lointain
2. à 10m
3. à 3m
4. à 50cm. Commenter.

Point utile pour cet exercice

- $\Longrightarrow$ Méthode : Etude qualitative *(page 33)*.
- $\Longrightarrow$ Relations de conjugaison *(page 27)*.

3.2.4.3 Accomodation de l'oeil

3.16: Exercice

Déterminer la gamme de distance focale que peut prendre le cristallin d'un oeil emmétrope.

Point utile pour cet exercice

- $\Longrightarrow$ Méthode : Etude qualitative *(page 33)*.
- $\Longrightarrow$ Relations de conjugaison *(page 27)*.
- $\Longrightarrow$ L'oeil : Accomodation *(page 29)*.

3.2.5 Entrainement : Lentilles minces

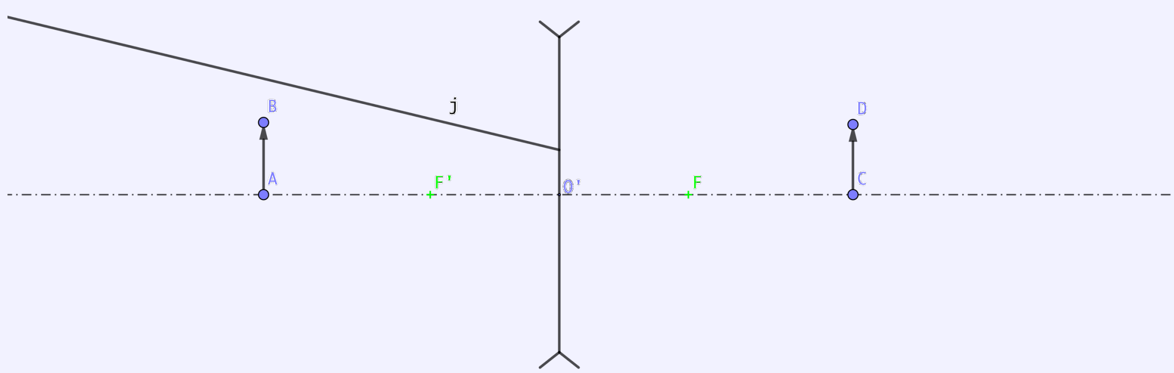
Ces exercices seront traités en classe, individuellement ou en groupe.

3.2.5.1 Etude graphique d'une lentille divergente

On considère une lentille divergente. Déterminer les images (il est conseillé de refaire des dessins à chaque fois pour des questions de clarté):

3.17: Exercice

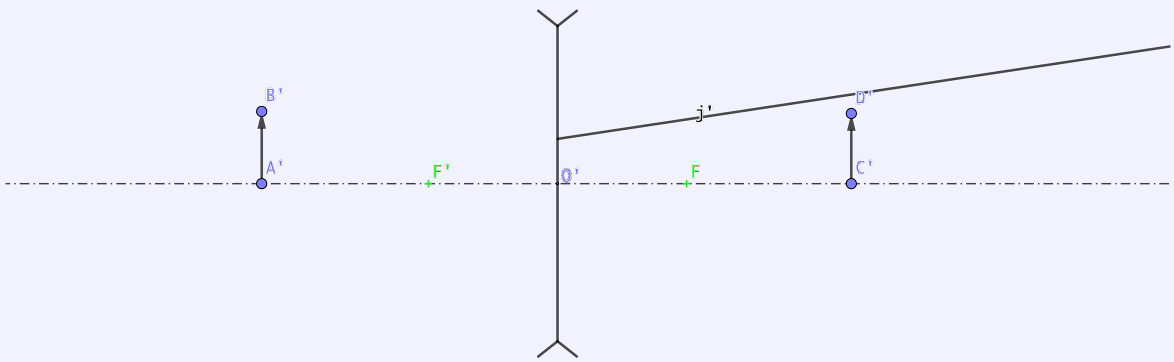
1. du rayon entrant **j**
2. de l'objet AB
3. de l'objet CD



On considère une lentille divergente. Déterminer les antécédents (il est conseillé de refaire des dessins à chaque fois pour des questions de clarté):

3.18: Exercice

1. du rayon sortant **j'**
2. de l'image A'B'
3. de l'image C'D'



Point utile pour cet exercice

- ⟹ Méthode : Tracés graphiques *(page 30).*

3.2.5.2 Etude d'un doublet

On considère un doublet de lentille, c'est-à-dire deux lentilles L_1 et L_2 de distance focale image respectives $f_1 = a$ et $f_2 = 3a$ et dont les centre optique (respectivement O_1 et O_2) sont distants de $\overline{O_1O_2} = 2a$.

3.19: Exercice

1. Déterminer graphiquement la position du foyer objet.
2. Déterminer graphiquement la position du foyer image.
3. Déterminer par le calcul la position du foyer objet. *Pensez à vérifier la cohérence de vos résultats.*
4. Déterminer par le calcul la position du foyer image. *Pensez à vérifier la cohérence de vos résultats.*

Point utile pour cet exercice

- ⟹ Méthode : Tracés graphiques *(page 30).*
- ⟹ Méthode : Etude qualitative *(page 33).*
- ⟹ Relations de conjugaison *(page 27).*
- ⟹ Eléments principaux d'un système centré *(page 18).*

3.2.5.3 L'oeil et ses défauts

On désire étudier l'oeil et l'un de ses défauts: la myopie. On modélise l'oeil par une lentille convergente représentant le cristallin (distance focale image f', centre optique O) qui doit former l'image de l'objet observé sur la rétine qu'on modélisera par un écran situé en A' à une distance $e = \overline{OA'} = 15\text{mm}$. L'oeil observe un objet situé en A à une distance $\overline{AO} = d$.

3.20: Exercice

- Rappeler la définition du Punctum Proximum (noté ici P_P) et du Punctum Remotum (noté ici P_R). On note $d_m = \overline{P_P O}$ et $D_m = \overline{P_R O}$ leur position respective (en valeur absolue) sur l'axe optique de l'oeil. Donner leur valeur pour un oeil normal (dit emmétrope), on note la valeur de d_m pour l'oeil emmétrope d_{m0}.
- On note V la vergence d'un cristallin pour un oeil emmétrope. V est une fonction de d. Déterminer $V(d)$. Montrer que la vergence augmente quand l'objet est de plus en plus proche.
- Déterminer $V(D_{m0})$ et $V(d_{m0})$. L'oeil est au repos quand il observe un objet dans le plan du Punctum Remotum, la valeur $V(D_{m0})$ est donc la vergence du cristallin quand l'oeil est au repos.

On suppose un oeil myope où le cristallin est trop convergent (cas de myopie assez rares). On note sa vergence V_m. Celle-ci peut varier entre deux valeurs extrêmes qui sont: $V(d_{m0}) + \delta V$ et $V(D_{m0}) + \delta V$ avec $\delta V > 0$ et constant quelque soit la position d de l'objet observé. On appelle δ_V le degré de myopie.

3.21: Exercice

- Un oeil myope et un oeil emmétrope observent tous deux un objet situé à une distance d (pour les deux yeux) de sorte que les deux yeux voient l'objet net. Quelle est la différence de vergence entre les deux cristallin?
- Déterminer en fonction de d_{m0} et δV, la position du P_P (notée d_{mm}) et du P_R (notée D_{mm}) pour un oeil myope. Justifier qu'on dise que le degré de myopie est l'inverse de la distance du Punctum Remotum.
- Calculer leur position pour $\delta V = 0.1\delta; \delta V = 4\delta; \delta V = 10\delta$. Commenter.
- On désire corriger un oeil myope grâce à une lentille de contact qu'on accole au cristallin (en première approximation). Quel est le type de lentille qu'on doit choisir et quelle est sa vergence?

On désire corriger un oeil myope grâce à un verre de lunette qu'on considère être une lentille de vergence V' dont le centre optique O' est situé à $d_L = \overline{O'O} = 2\text{cm}$

3.22: Exercice

- Déterminer la valeur de V' en fonction de δV et d_L pour que l'oeil myope puisse alors observer un objet à l'infini net tout en étant au repos. A.N. $\delta V = 4\delta$
- Par abus de langage, on appelle degré de myopie la vergence du verre correcteur (en valeur absolue) qu'il faut mettre devant un oeil pour corriger sa myopie. A quelle condition sur δV et d_L, cette abus est-il acceptable?
- Dans le cas où $\delta V = 4\delta$, calculer la nouvelle position du P_P, on notera cette distance (dans le sens positif) d_{mc}. Que devient cette distance dans le cas où $\delta V \ll 1/d_L$?

Point utile pour cet exercice

- $\Longrightarrow$ Méthode : Etude qualitative *(page 33)*.
- $\Longrightarrow$ Relations de conjugaison *(page 27)*.
- $\Longrightarrow$ L'oeil : Accomodation *(page 29)*.
- $\Longrightarrow$ Lentilles accolées *(page 33)*.

CHAPTER

FOUR

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

4.1: Compétences

- Modéliser à l'aide de plusieurs lentilles un dispositif optique d'utilisation courante.
- Connaître les positions relatives des éléments d'un système afocal à deux lentilles.
- Savoir calculer des éléments caractéristiques (grossissement, grossissement commercial, profondeur de champ) pour un instrument d'optique donné (leur définition étant donnée).

Ce chapitre étant un chapitre d'application, la mise en contexte ci-dessous est relativement courte. On y trouvera princpalement des exercices.

4.1 Types de systèmes

Important 4.1

Système afocal
Un système **afocal** est un système donnant d'un objet à l'infini une image finale à l'infini.

4.2 Caractéristiques générales: Champ, résolution et profondeur de champ (en ligne)

4.3 Le grossissement

Important 4.2

Grossissement
On définit le **grossissement** d'un instrument d'optique comme le rapport (en valeur absolue) de l'angle sous lequel on voit l'objet à travers l'instrument d'optique sur l'angle sous lequel on voit l'objet à l'oeil nu.

Important 4.3

Grossissement commercial
On définit le **grossissement commercial** d'un instrument d'optique comme le rapport (en valeur absolue) de l'angle sous lequel on voit l'objet à travers l'instrument d'optique **lorsque l'image finale est à l'infini** sur l'angle

sous lequel on voit l'objet à l'oeil nu **lorsque l'objet est placé au Punctum Proximum de l'oeil soit à** $d = 25\mathrm{cm}$ (soit l'angle maximal sous lequel on peut voir l'objet à l'oeil nu).

4.4 Méthode : la loupe

On va voir sur cet exemple comment cherches les caractéristiques d'un instrument d'optique. **La correction est en ligne. Ne passez pas trop de temps à traiter l'exercice sans regarder la correction, plusieurs méthodes sont nouvelles.**

4.4.1 La loupe: Principe

Une loupe sert à grossir les objets. Elles composée d'une lentille (convergente).

Les caractéristiques intéressantes de la loupe sont:

- son grossissement - plus précisément son **grossissement commercial**.
- sa latitude de mise au point: on recherchera l'intervalle de position d'objet pouvant être vue par l'oeil - on placera l'oeil au foyer image de la loupe de façon arbitraire.
- sa profondeur de champ et sa résolution angulaire (pour un oeil emmétrope). Nous ne calculerons ici que la résolution angulaire.

4.4.2 Caractéristiques d'une loupe

Vous pouvez essayer de faire l'exercice au moyen des définitions précédentes.

4.2: Exercice

On considère une loupe constituée d'une lentille convergente de distance focale imagef'. Pour les applications numériques, on prendra $f' = 10mm$

1. Déterminer l'intervalle de position de l'objet permettant à un oeil emmétrope (on donne la distance du PR: $d_{min} = 25\mathrm{mm}$) de voir l'image donnée par la loupe nette. On supposera que l'oeil est placé au foyer image de la loupe et que $d_{min} > f'$.
2. Déterminer le grossissement commercial de la loupe.
3. Déterminer la taille du plus petit objet distinguable par l'oeil dans les conditions d'utilisation optimales. On donne le pouvoir de résolution de l'oeil: $\theta = 3 \times 10^{-4}\mathrm{rad}$

4.5 Activités

Il s'agit d'activités. Elle seront réalisés en classe sous forme de travaux dirigés **mais les conclusions importantes devront être retenues**.

4.5.1 Etude d'un oculaire

Un oculaire est dispositif permettant de donner d'un objet proche une image grossie. Dans son utilisation optimale pour un oeil emmétrope, cette image doit être à l'infini. La version la plus simple d'un oculaire est donc la loupe. Nous allons ici étudier un oculaire plus complexe composé de deux lentilles.

Utiliser deux lentilles permet en général de mieux traiter les aberrations et d'augmenter le champ de l'oculaire.

On considère donc un doublet de lentille $\{L_1, L_2\}$ appelé doublet de Ramsden dont les distances focales images respectives sont $f_1 = f_2 = 3a$ et dont la distance entre les centre optiques respectifs O_1 et O_2 est $\overline{O_1O_2} = a$.

4.3: Exercice

1. Déterminer graphiquement puis par le calcul la position du foyer principal objet de l'ensemble des deux lentilles. Pourquoi est-ce important de savoir où il se trouve ? Commenter son caractère virtuel ou réel.
2. Déterminer le grossissement commercial de l'oculaire. Quelle focale faudrait-il à une loupe pour avoir le même grossissement commercial ?

Important 4.4

Bilan à retenir - Ce n'est PAS la correction. On retiendra que:

- pour des systèmes devant grossir des objets à distance finies (oculaire, loupe, microscope…), on va chercher - dans le cas d'oeil emmétrope - à placer l'objet sur le foyer principal objet de l'ensemble.
- La mesure du grossissement (commercial) passe en général par l'utilisation de l'image intermédiaire.

Point utile pour cet exercice

- ⟹ Méthode : Tracés graphiques *(page 30).*
- ⟹ Méthode : Etude qualitative *(page 33).*
- ⟹ Relations de conjugaison *(page 27).*
- ⟹ Eléments principaux d'un système centré *(page 18).*
- ⟹ Détermination d'un grossissement *(page 42).*

4.5.2 Etude d'une lunette afocale

On considère un lunette afocale, c'est-à-dire donnant une image à l'infini d'un objet à l'infini. Nous allons voir quelques caractéristiques et méthodes d'étude d'un tel dispositif.

On considère une lunette constituée de deux lentilles:

- l'objectif L_1 (de distance focale image f_1). Il sert à grandir un objet et recueillir un maximum de de lumière de l'objet
- l'oculaire L_2 (de distance focale image f_2). Il sert - comme on l'a vu précédemment - à grossir l'image intermédiaire donnée par l'objectif et à la renvoyer au Punctum Remotum de l'oeil pour limiter la fatigue oculaire.

*S'y ajoute en général un **réticule** entre l'objectif et l'oculaire où doit - lorsque la lunette est réglée - venir se former l'image intermédiaire. Il sert au réglage de la lunette et peut-être gradué pour réaliser des mesures sur l'objet (ou plus précisément l'image intermédiaire).*

Pour les constructions géométriques et les applications numériques, on prendra:

- $f_1 = 5\text{cm}$ et $f_2 = 2\text{cm}$.
- Distance entre les centre optique: $\overline{O_1O_2} = d > 0$.
- Diamètre l'objectif: $D_1 = 4\text{cm}$

- Diamètre l'oculaire: $D_2 = 2$cm

On notera les foyers objets et images respectivement F_1, F_2 et F_1', F_2'.

On notera A un objet à l'infini sur l'axe optique, A' son image par l'objectif (image intermédiaire) et A_1 son image finale

On notera B un objet à l'infini hors de l'axe optique, B' son image par l'objectif (image intermédiaire) et B_1 son image finale

4.4: Exercice - Généralités et grossissement

1. Une lunette est dite **afocale** si elle donne d'un objet à l'infini une image à l'infini. Pourquoi dit-on qu'elle est **afocale**?
2. En déduire une expression de d en fonction de f_1 et f_2. Calculer d avec les valeurs données dans le tableau. On gardera cette valeur pour d dans toute la suite de l'exercice.
3. Faire un schéma de la lunette astronomique (on prendra une échelle de 1:1 pour les dimensions longitudinales et transversales). Tracer le parcours de rayons arrivant d'un point B situé à l'infini hors de l'axe optique. On notera l'angle des rayons incidents avec l'axe optique θ.On notera l'angle des rayons transmis par le système avec l'axe θ'.
4. Définir le grossissement G de la lunette astronomique. Donner son expression en fonction des distances focales des lentilles. Calculer G.
5. Proposer deux façon d'augmenter le grossissement G. Quels sont les contraintes qui empêchent de l'augmenter indéfiniment?
6. L'image observée par l'oeil est-elle droite ou inversée?
7. Déterminer la taille de l'image intermédiaire $\overline{A'B'}$.

Important 4.5

Bilan à retenir - Ce n'est PAS la correction.

- Un dispositif **afocale** donne une image à l'infini d'un objet à l'infini. Les foyers sont alors renvoyés à l'infini (il n'y a pas de foyers).
- Pour le calcul du grossissement, il est crucial de passer par l'image intermédiaire. On ne calcule pas ici de grossissement commercial puisqu'on ne peut se rapprocher d'un objet à l'infini !

4.5: Exercice - Cercle oculaire

On appelle cercle oculaire l'image de la lentille L_1 par la lentille L_2.

1. Déterminer la position et la taille du cercle oculaire. Donner leur valeur numérique.
2. Justifier l'affirmation suivante "Tout rayon entrant dans la lunette (et en ressortant évidemment) passe à l'intérieur du cercle oculaire". En déduire que le cercle oculaire est l'endroit idéal pour placer son oeil.
3. Faire un schéma permettant de construire le cercle oculaire.

Important 4.6

Bilan à retenir - Ce n'est PAS la correction.

Le cercle oculaire - image de l'objectif par l'oculaire - est l'endroit où passe toute la lumière entrante dans un espace étroit. C'est le meilleur endroit où placer son oeil pour avoir un maximum de luminosité et de champ.

En général, les appareil sont construits de sorte que le cercle oculaire soit très proche de l'oculaire (ce qui revient à prendre une f_2 très petite.

4.6: Exercice - Limite de résolution

On suppose dans un premier temps que la résolution de la lunette est due au pouvoir séparateur de l'oeil. On rappelle que le pouvoir séparateur de l'oeil est $\theta_m' = 3.10^{-4}$rad.

1. Déterminer la résolution angulaire de la lunette étudiée ici.
2. Pour des étoiles lointaines quasi-ponctuelles, quel autre phénomène risque de gêner leur observation?

4.7: Exercice - Latitude de mise au point

1. L'oeil accommodant, l'objet visé peut ne pas être strictement à l'infini. Rappeler ce qu'est le processus d'accommodation.
2. Déterminer la position A_1 de l'image finale d'un objet réel visé situé en un point A qui n'est pas à l'infini. On exprimera la distance $\overline{F_2'A_1}$ en fonction de $\overline{F_1A}$.
3. L'observateur place son oeil sur le cercle oculaire. Déterminer la latitude de mise au point.

4.8: Exercice - Lunette réelle

Définitino : On appelle le champ (angulaire) de pleine lumière, l'angle maximal sous lequel un objet peut-être vu par la lunette et où le faisceau sortant est intégralement le faisceau entrant. Quand on observe le ciel, la faible luminosité empêche souvent de visualiser des objets qui ne sont pas dans le champ de pleine lumière (même si une partie de la lumière qui arrive jusqu'à la lunette en ressort).
On peut montrer que ce champ a pour expression: $\tan(\theta_{\text{max}}) = \frac{1}{2}\frac{D_2 f_1 - D_1 f_2}{f_1(f_1+f_2)}$.
On s'intéresse à une lunette réelle. Ses caractéristiques sont:

- Distance focale: 600 mm.
- Diamètre de l'objectif: 50 mm.
- Oculaires: 4 mm.
- Diamètre oculaires: 24,5 mm.
- Grossissement: $150\times$.

1. Vérifier le grossissement annoncé.
2. Déterminer le champ en pleine lumière pour cette lunette astronomique.
3. Observe-t-on la lune en entier?
4. Quelle est la taille du plus petit cratère lunaire qu'on peut observer avec une telle lunette.

4.9: Aller plus loin - Champ angulaire

1. Pour un objet situé à l'infini, quelle est le diamètre du faisceau incident?
2. Dans le cas d'un faisceau parallèle à l'axe optique, déterminer le diamètre du faisceau transmis. Faire un schéma représentant le faisceau et son passage à travers la lunette. Plus ce diamètre est grand, plus la lunette est lumineuse, c'est pourquoi, outre le grossissement, le diamètre de l'objectif est déterminant dans la qualité de la lunette.
3. Faire le même schéma pour un faisceau faisant un angle $\theta = 30°$ par rapport à l'axe optique. Que se passe-t-il? En déduire que le faisceau "utile" entrant, c'est-à-dire l'ensemble des rayons entrant dans la lunette qui ressortent effectivement dépend de l'angle. Quelle est la conséquence sur l'observation?
4. Déterminer graphiquement l'angle maximal pour lequel la section du faisceau "utile" est encore maximale (c'est-à-dire vaut la section déterminée pour le cas d'un faisceau parallèle à l'axe optique). On notera cette angle θ_{max}.

Point utile pour cet exercice

- $\Longrightarrow$ Méthode : Tracés graphiques *(page 30)*.
- $\Longrightarrow$ Méthode : Etude qualitative *(page 33)*.
- $\Longrightarrow$ Relations de conjugaison *(page 27)*.
- $\Longrightarrow$ Eléments principaux d'un système centré *(page 18)*.
- $\Longrightarrow$ Détermination d'un grossissement *(page 42)*.

4.6 Entrainement : Instruments d'optique

Pensez à travailler les questions de cours[13] et les raisonnements qualitatifs[14] (en ligne) aussi.

Il est vivement conseillé de s'entraîner aussi avec le devoir libre sur l'appareil photographique.

4.6.1 Le microscope

Un microscope optique permet d'observer des globules sanguins. Il est modélisable par deux lentilles minces convergentes L_1 pour l'objectif de distance focale f_1 et L_2 pour l'oculaire de distance focale f_2. Il est réglé pour donner une image à l'infini d'un objet réel AB perpendiculaire à l'axe optique (A étant sur l'axe optique) légèrement en avant du foyer objet de l'objectif. Cette image est observée par un oeil emmétrope (normal) placé au voisinage du foyer image de l'oculaire. On notera $A'B'$ l'image intermédiaire. Le microscope porte les indications suivantes:

- $\times 40$ pour l'objectif, ce qui signifie que la valeur absolue du grandissement de l'objet AB par l'objectif est de 40
- $\times 10$ pour l'oculaire, ce qui signifie que le grossissement commercial ou rapport entre l'angle sous lequel on voit l'image à l'infini d'un objet à travers l'oculaire seul et l'angle sous lequel on voit ce même objet à l'oeil nu lorsqu'il est situé à la distance minimale de vision distincte $\delta = -25\text{cm}$ vaut 10.
- $n \sin u = \omega_0 = 0,65$ pour l'ouverture numérique ou la valeur de $n \sin(u)$ avec n le milieu dans lequel se trouve l'objectif et u l'angle maximum des rayons issus de A arrivant sur l'objectif.
- $\Delta = 16\text{cm}$ pour l'intervalle optique ou distance entre le foyer image F_1' de l'objectif et le foyer objet F_2 de l'oculaire.

4.10: Exercice

1. Faire un schéma du dispositif (sans respecter les échelles) et tracer la marche de deux rayons lumineux issus du point B de l'objet AB, l'un émis parallèlement à l'axe optique et l'autre passant par le foyer objet de l'objectif.
2. En utilisant le grossissement commercial, déterminer la distance focale f_2 de l'oculaire.
3. Déterminer la distance focale f_1 de l'objectif. On pourra utiliser le grandissement de l'objectif.
4. Calculer la distance $\overline{O_1 A}$ permettant de positionner l'objet.
5. Déterminer la latitude de mise au point à savoir la variation de la distance O_1A compatible avec l'observation d'une image par l'oeil situé au foyer image de l'oculaire.
6. Calculer le grossissement commercial du microscope pour une image finale à l'infini.
7. Calculer l'angle u intervenant dans l'ouverture numérique pour un objectif placé dans l'air. Le microscope utilisé est-il utilisé dans les conditions de Gauss? Quel type d'aberrations doit-on corriger? Quel est l'ordre de grandeur du diamètre de la monture de l'objectif?
8. Déterminer la position et la taille du cercle oculaire défini comme l'image de la monture de l'objectif à travers l'oculaire. Quel est l'intérêt de placer l'oeil dans le plan du cercle oculaire?

Point utile pour cet exercice

- $\Longrightarrow$ Méthode : Tracés graphiques *(page 30).*
- $\Longrightarrow$ Méthode : Etude qualitative *(page 33).*
- $\Longrightarrow$ Relations de conjugaison *(page 27).*
- $\Longrightarrow$ Eléments principaux d'un système centré *(page 18).*
- $\Longrightarrow$ Détermination d'un grossissement *(page 42).*

[13] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/resource/view.php?id=127
[14] https://moodlecpge.stanislas.fr/mod/quiz/view.php?id=128

Correction partielle

Corrigé des dernières questions (7 et 8).

- Dans l'air $n \approx 1$ donc $u = \arcsin \omega_0 = 0.71\text{rad} = 41°$. Le microscope n'est donc pas utilisé dans les conditions de Gauss (en pratique, les lentilles sont taillées pour atténuer les aberrations géométriques et l'utilisation d'un ensemble de lentilles corrige aussi les aberratinos chromatiques). Il vient: $D = \overline{O_1 A} \tan \arcsin u =$ (remplacer $\overline{O_1 A}$ par l'expression trouvée précédemment).
- $\overline{F_2' O_c} = \frac{(\delta/G_c)^2}{\Delta + \Delta/\gamma}$ et $D_{Oc} = -D \times \frac{(\delta/G_c)}{\Delta + \Delta/\gamma}$ grâce à la relation de grandissement au foyer image (le diamètre est donné en valeur absolue ici).

4.7 Physique et informatique - Entrainement

Ces exercices proposent de s'entrainer à l'utilisation de Python en physique dans le cadre de l'optique. On n'utilisera pas ici de méthode numérique particulière, simplement le tracé graphique et l'utilisation de `numpy`.

4.7.1 Etude théorique

Cette partie est semblable à un exercice d'entrainement classique.

On considère un axe Ox et on supposera par la suite que *tous les axes optiques des systèmes centrées mis en jeu sont confondus avec Ox*. On repèrera donc la position longitudinale de tout objet, image ou lentille par une coordonnées x sur cet axe. **Attention, ces coordonnées ne sont PAS des distance algébriques comme dans les relations de conjugaison.**

On choisi un axe Oy orienté de sorte à ce que $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y)$ soit orienté dans le sens trigonométrique. La côté y d'un objet ou d'une image sur cet axe correspondra à sa taille.

4.11: Mise en équation

1. On considère une lentille placé à la coordonnée x_L, de distance focale f' et un objet lumineux situé à une coordonnée x_O et de taille y_O. Exprimer la position x_I et la taille y_I de l'image de cet objet par la lentille et montrer que :

$$\begin{cases} x_I &= x_L + \frac{f'(x_O - x_L)}{f' + x_O - x_L} \\ y_I &= \frac{f'}{f' + x_0 - x_L} y_O \end{cases}$$

On va considérer pour l'étude numérique un système à trois lentilles $(L_2), (L_3), L_4)$ telle que:

$$\begin{cases} f_2 = f_4 &= -6\text{cm} \\ f_3 &= 3.5\text{cm} \\ \overline{O_2 O_4} &= f_4 + \frac{f_2 f_3}{f_2 + f_3} \end{cases}$$

Les lentilles L_2 et L_4 sont fixes et la lentilles L_3 peut se déplacer entre les deux lentilles.

On rappelle que lorsque deux lentilles de distances focales f_A et f_B sont accolées, l'ensemble est équivalent à une seule lentille dont la distance focale est:

$$f_{eq} = \frac{f_A f_B}{f_B + f_B}$$

4.12: Cas extrêmes.

Justifier que lorsque L_3 est accolée à L_2 ou à L_4, alors le système est afocal.

4.7.2 Partie code

Vous allez maintenant vous entraîner à coder en Python. Lorsqu'on code des problèmes physiques, il est important de savoir sous quelle forme/type on va coder les objets physiques. Ici:

- Les objets et les images seront représentés par des listes de deux flottants `obj <- [xi, yi]` où `xi` et `yi` représentent les coordonnées de l'objet (position sur Ox et taille sur Oy).
- Les lentilles seront représentées par des listes de deux flottants `L1 <- [xL, f]` où `xL` représente la position sur Ox de la lentille et `f` la distance focale image de la lentille.

```
# Exemples
objet1 = [-3, 1] # Objet ou image en x=-3 de taille y=1
lentille1 = [2, -1] # Lentilles en x=2 de distance focale f=-1
print(objet1[0])  # Quelle valeur est affichee ? A quelle grandeur physique␣
↪correspond-elle ?
```

Lorsqu'on étudiera le système $L_2 + L_3 + L_4$, on supposera que la lentille L_2 est placée en O, soit $x_2 = 0$.

4.13: Codons

1. Ecrire une fonction `image(L:list, objet:list) --> list` qui prend comme argument:
   - `L`: une liste représentant une lentille
   - `objet`: une liste représentant un objetet qui renvoie une liste représentant l'image de l'objet par la lentille.
2. Se servir de la fonction image pour trouver la position de l'image finale donnée par le système $L_2 + L_3 + L_4$ lorsque L_3 est au milieu de L_2 et L_4 pour un objet situé 1m avant le système.
3. Ecrire une procédure `systeme(objet:list) --> list` qui prend comme argument un objet et qui renvoie la position finale après le système $L_2 + L_3 + L_4$.
4. Pour 100 positions équiréparties d'objet entre 100m et 1m, tous de taille 1, obtenir, sous forme de liste les positions des images correspondant. On devra pour cela:
   - Utiliser la fonction `numpy.linspace` pour créer un vecteur position d'objet équiréparties.
   - Utiliser une boucle pour obtenir et stocker les positions d'image obtenues dans une liste.
5. Modifier le programme précédent pour obtenir aussi dans une seconde liste, les tailles des images.
6. Tracer 2 graphiques représentant la position ou la taille de l'image en fonction de la position de l'objet.