

OPTIQUE GEOMETRIQUE

Objectifs du cours

L'objectif de cette Unité d'Enseignement est de présenter un cours aussi complet que possible de l'optique géométrique et de ses applications.

L'étudiant qui suivra ce cours sera en mesure :

- de connaître le développement de l'optique au cours des siècles depuis l'Antiquité à nos jours et d'acquérir ainsi une culture scientifique (Histoire de l'optique),
- d'assimiler les fondements de l'optique géométrique et d'avoir une idée précise sur la nature de la lumière et sur les milieux transparents;
- de comprendre la notion d'image d'un objet donnée par un système optique,
- de maîtriser la construction de la marche d'un rayon lumineux et de comprendre le phénomène de dispersion de la lumière;
- de déterminer les éléments caractéristiques des miroirs, des dioptries et des lentilles et de construire les images données par ces systèmes et par leur association;
- de comprendre le fonctionnement de l'œil en tant que instrument d'optique.

I. Introduction

Qu'est-ce que l'optique?

L'optique est une branche de la physique qui s'intéresse à l'étude des phénomènes lumineux et leurs applications. L'optique était initialement l'étude des phénomènes perçus par l'œil humain. Les termes « optique » et « lumière » doivent être généralisés à d'autres récepteurs tels la plaque photographique, la peau, les radiotélescopes... qui détectent aussi des rayonnements non visibles par l'œil : Infrarouge, Ultraviolet, radio.

Domaine très large:

- Perception du monde qui nous entoure (formation des images).
- Instruments d'optiques (jumelles, télescope, microscope).
- Propagation d'information via la lumière (fibre optique, CD, lecteur de code barre).
- Sources lumineuses (laser, lampe Sodium, ...).
- Détecteurs (télécommande infrarouge, Caméra IR, photo-détecteur).
- Formation des images à travers un système optique.
- L'étude d'un système optique bien connu : l'appareil photographique.
- Le laser a entraîné un renouveau complet de cette discipline
- Les technologies optiques sont partout, lunettes, télescope, imagerie par satellite,

II Historique

- Au 1er SIECLE les lois de la réflexion par un miroir étaient connues des Grecs :
 - HERO d'ALEXANDRIE affirmait qu'un rayon lumineux quittant un point S, puis se réfléchissant sur un miroir pour parvenir à un point M, parcourt dans l'espace le plus court chemin possible.
 - Au siège de Syracuse, ARCHIMEDE utilisait des miroirs paraboliques pour incendier les navires ennemis
- Au XVIIème siècle: Les lois de la réfraction (passage de la lumière à travers deux milieux transparents différents: air/eau, eau/verre ...).
- 1621 Découverte des lois par DESCARTES (qui ne les publie pas).

- 1637 SNELL retrouve indépendamment les mêmes lois et les publie.
- 1657 FERMAT retrouve ces lois
- 1665 HOOKE (la lumière est une vibration de haute fréquence). idée développée par HUYGENS mais contrariée par NEWTON qui défend une théorie CORPUSCULAIRE. Au début du XIXe SIECLE, YOUNG reprend la théorie ondulatoire pour étudier les phénomènes d'interférences.
- 1818 FRESNEL réalise la synthèse des idées de HUYGENS et de YOUNG explique la diffraction de la lumière
- 1880 MAXWELL après avoir construit la théorie électromagnétique conclut que la lumière est une onde électromagnétique caractérisée par une vibration dont la fréquence $\nu = 14$ Hertz et qui se propage dans le vide à une vitesse $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Il précise que l'onde est transversale, c'est-à-dire que les grandeurs physiques qui la caractérisent: le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{B} , sont perpendiculaires à la direction de propagation.



Enfin au XXe SIECLE :

- 1905 EINSTEIN fait subir une révolution à l'Optique en réintroduisant l'aspect corpusculaire. Pour expliquer l'effet photo émissif, il fait intervenir le photon. Dans cette logique est établie la théorie quantique de l'émission: les atomes excités par suite de collisions se désexcitent en émettant des photons.
- 1924 Louis de BROGLIE postule la dualité onde corpuscule et relie les aspects ONDULATOIRE et CORPUSCULAIRE en posant que l'énergie E du photon vaut:
 - $h\nu = 10^{-34} \text{ J}$,
 - $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ est la constante de PLANCK. L'énergie d'un photon pour la lumière visible vaut quelques électrons-volt puisque: $1\text{eV} = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ J}$.
 - La longueur d'onde de la lumière est :

$$\lambda = \frac{h}{p},$$
 avec P la quantité de mouvement des particules de la lumière (photons)

Exercice 1. La longueur d'onde de De Broglie associée à :

- a) Un grain de poussière de masse 10^{-15} kg et de vitesse 1 mm/s est :
 A) $6,626 \cdot 10^{-17} \text{ m}$ B) $6,62 \cdot 10^{-16} \text{ m}$ C) $66,26 \cdot 10^{-20} \text{ m}$ D) $6,78 \cdot 10^{-16} \text{ m}$
- b) Un électron accéléré sous une différence de potentiel $U = 100 \text{ V}$ est :
 A) $1,5 \text{ \AA}$ B) $1,23 \text{ \AA}$ C) $2,5 \text{ \AA}$ D) $12,3 \text{ \AA}$
- c) Un électron dans l'atome d'hélium ayant une énergie cinétique de $24,6 \text{ eV}$ correspondant à l'énergie d'ionisation de l'hélium.
 A) $3,5 \text{ \AA}$ B) $1,2 \text{ \AA}$ C) $2,5 \text{ \AA}$ D) $0,25 \text{ \AA}$
- d) Une particule α (noyau d'hélium) ayant une énergie cinétique de $7,7 \text{ MeV}$.
 A) $5,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}$ B) $0,55 \cdot 10^{-16} \text{ m}$ C) $3,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}$ D) $5,16 \cdot 10^{-16} \text{ m}$

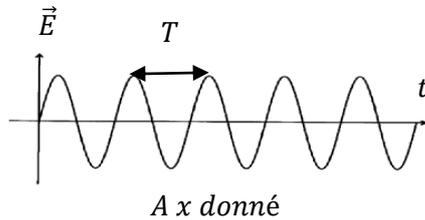
III Généralités sur la lumière :

III.1 Caractéristiques de l'onde lumineuse

Exemple d'ondes: Son, Houle.

Caractéristiques:

Amplitude,



- Fréquence ν . [s^{-1}],
- Vitesse C . [$m.s^{-1}$]
- Longueur d'onde $\lambda_0 = \frac{C}{\nu} = CT$: [m] dans le vide

T - Période

Particule associée : Photon

• Énergie E : $E = h\nu$ [J]

où h est la constante de Plank

Caractéristiques de l'onde lumineuse:

- Onde sans support.
- Propagation dans le vide à la vitesse C .
- $C = 299792456 \text{ m.s}^{-1}$ ($\approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

Remarque: La couleur d'une radiation dépend de sa fréquence.

Quelques repères

- 7 fois le tour de la terre en 1s.
- Distance terre-soleil en ≈ 8 min.

Ondes électromagnétiques.

- La lumière visible fait partie d'une grande famille de phénomènes de même nature: **les ondes électromagnétiques.**
- Variation d'un champ électrique et du champ magnétique, dans l'espace et dans le temps.
- La lumière naturelle est donc une superposition d'ondes électromagnétiques de différentes longueurs d'ondes (couleurs).

III.2 La lumière

2.1. Les différentes sources de lumière

Les sources de lumière sont très variées. Elles peuvent être **primaires** (celles qui produisent de la lumière par elles-mêmes) et **secondaires** (celles qui diffusent de la lumière après avoir été éclairées).

Les corps qui reçoivent lumière blanche:

- soit la réfléchissent sans filtrage et paraissent blancs,
- soit absorbent plus ou moins certaines longueurs d'ondes et sont vus avec la couleur des longueurs d'onde réfléchies,
- soit absorbent tout le spectre et apparaissent noirs.

Notre sens de la vue s'est développé dans une région spectrale (visible) qui correspond à des longueurs d'onde du rayonnement solaire peu absorbées par l'atmosphère. La superposition de toutes les radiations du domaine visible donne de la lumière blanche.

- Les U. V. interviennent dans la production de la vitamine D, sont à l'origine du bronzage, mais aussi du cancer de la peau.
- Les infrarouges se caractérisent par leurs effets calorifiques.

En réalité, les frontières indiquées entre les différentes régions du spectre ne sont pas nettes, sauf pour le domaine visible.

- Si λ est de l'ordre de grandeur ou plus grande que les obstacles (l'appareillage), on applique l'optique ondulatoire
- Si λ est extrêmement faible, comparable à l'échelle atomique ou moléculaire, on applique l'optique corpusculaire.

1.1 Les sources primaires

Le Soleil ou la plupart des **ampoules** que l'on utilise. En fait tous les corps portés à une certaine température émettent de la lumière. Lorsque la lumière est produite par tout autre moyen que le chauffage, on parle de luminescence : par exemple, les tubes néon ou les lampes fluorescentes. **Le laser** est un autre type de source lumineuse considérée comme quasi-parfaite. Ces diverses sources peuvent être caractérisées par différents paramètres : leur intensité, leur direction d'émission, leur rendement (puissance lumineuse émise sur puissance fournie) ou leur mode d'émission. Un autre paramètre important est la « couleur » du rayonnement émis par la source.

1.2 Les sources secondaires

Objets diffusants: une fois éclairés, ils renvoient la lumière.

1.3 Les différentes sortes de lumière

La lumière blanche : est la lumière émise par le soleil, les sources incandescentes et est celle qui contient toutes les radiations du domaine visible.

La lumière monochromatique: La lumière qui a une seule couleur.

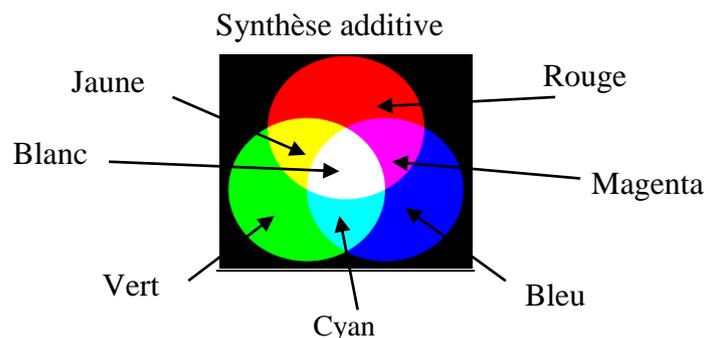
III.3 Couleur

La couleur est la perception visuelle de la répartition spectrale de la lumière visible. Cette sensation prend son origine dans la stimulation de cellules nerveuses spécialisées nommées cônes et situées sur la rétine.

Remarque:

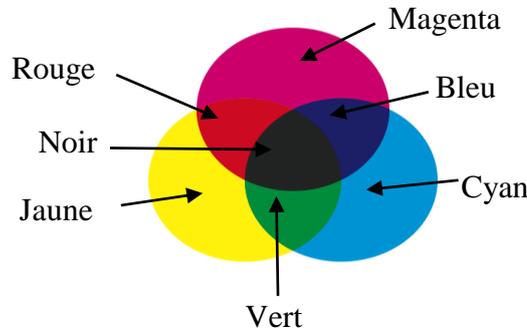
Ne jamais confondre la couleur, qui est une notion perceptive, avec la longueur d'onde, qui est une notion physique.

On peut créer n'importe quelle couleur en additionnant les trois couleurs de base (**rouge, vert, bleu**) appelées "couleurs fondamentales additives" (ou "couleurs primaires additives"). Cela s'appelle la "**synthèse additive**" des couleurs.



Exemple : L'association du rouge et du vert donne la couleur jaune. Celle du vert et du bleu donne le cyan.

La « **synthèse soustractive** » des couleurs consiste à enlever de la couleur à une couleur de base. C'est par exemple le cas de l'encre ou des filtres colorés.



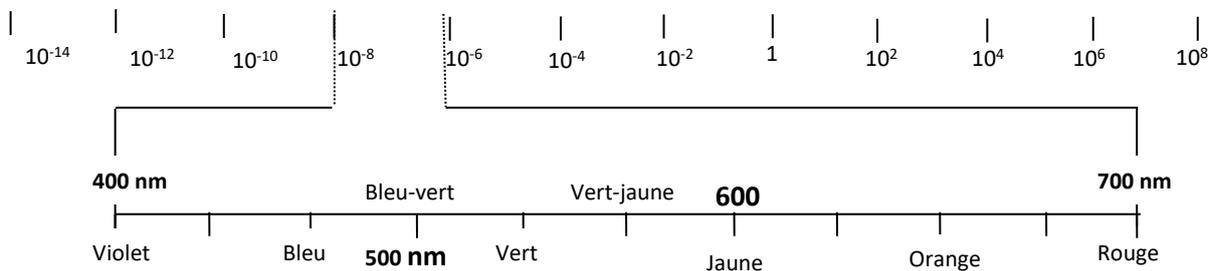
III.4 Domaines

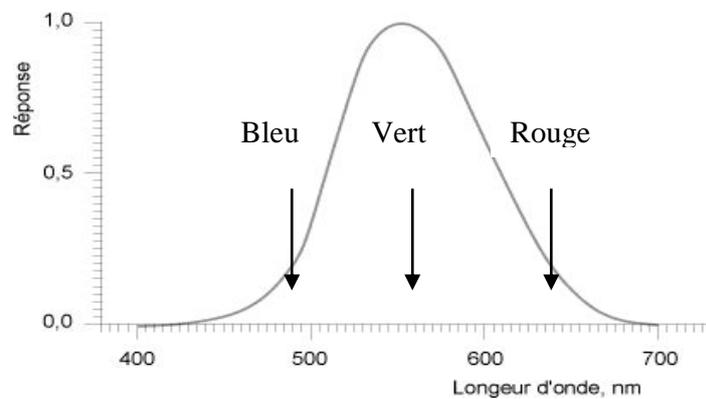
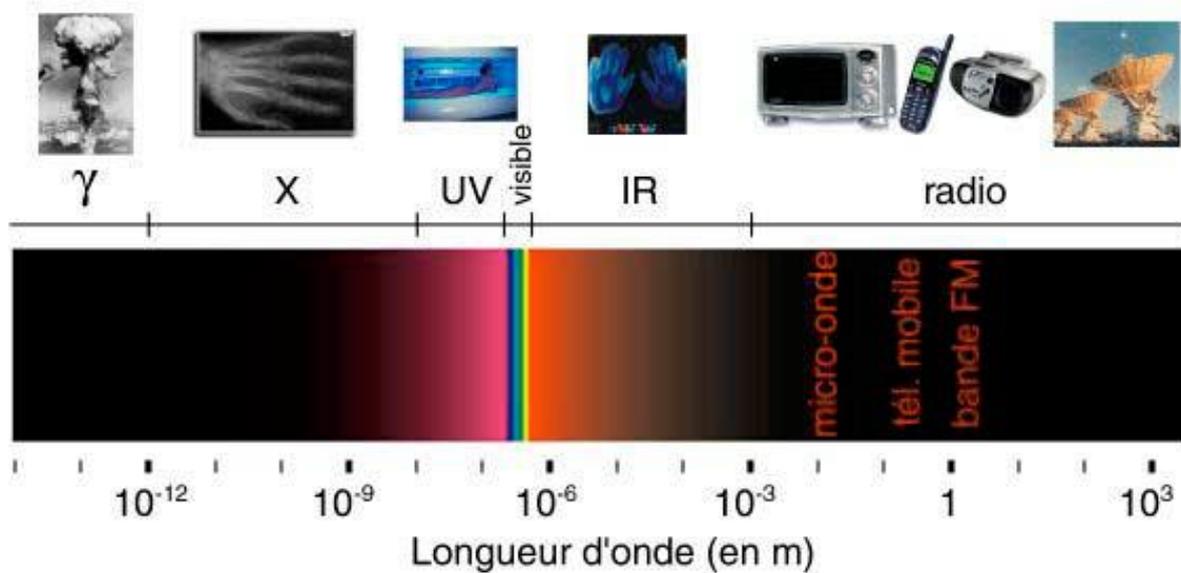
- **Domaine du visible** (spectre visible du violet au rouge),
- **Domaine de faibles longueurs d'onde** (Ultraviolet (UV), Rayon X, Rayon gamma),
- **Domaine de grandes longueurs d'onde** (Infrarouge, onde Radio, ...)

Les ondes électromagnétiques couvrent une très large gamme de fréquence : la lumière visible ne constitue qu'une infime partie des ondes électromagnétiques (voir théorie ondulatoire), parmi lesquelles on compte les ondes radio (et télé), les micro-ondes, l'infrarouge (responsable de la sensation de chaleur), l'ultraviolet (responsable entre autres du bronzage...), les rayons X et les rayons gamma. On classe les ondes en fonction de leur longueur d'onde dans le vide λ_0 (en mètres) ou de leur fréquence ν (en Hz).

Le visible ne correspond qu'à la partie du spectre correspondant à λ_0 compris entre 400 et 800 nm.

Rayon Gamma	Rayon X	Rayon U. V	Spectre visible	Rayon Infrarouge	Rayon Radar	Ondes Radioélectriques				Circuit en courant alternatif
						F M T. V	ONDE COURTE	ONDE MOYENN	ONDE GRANDE	





L'œil est sensible aux radiations lumineuses dont la longueur d'onde est comprise entre $0.380 \mu\text{m}$ et $0.780 \mu\text{m}$. L'œil est un photodétecteur ayant une bande passante particulière.

III.5 La théorie de la lumière

Il existe deux théories qui expliquent la nature de la lumière.

5.1. La théorie corpusculaire

Cette théorie conçoit la lumière comme un ensemble de particules (ou corpuscules) dont le mouvement est décrit dans un cadre proche de celui de la mécanique. Ces particules sont appelées photons et ont une énergie $E = h\nu$: où h est la constante de Planck ($h=6.63 \times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$) et ν la fréquence de l'onde lumineuse en Hz. Les trajectoires suivies par ces particules sont les rayons lumineux.

5.2. La théorie ondulatoire

La théorie ondulatoire conçoit la lumière comme une onde, dont la propagation est régie par les équations de Maxwell. Dans ce cas, le champ électromagnétique oscille perpendiculairement à un axe qui correspond au rayon lumineux.

Combinaison d'un **champ électrique** et d'un **champ magnétique** qui oscillent tout en se propageant. Ces champs varient périodiquement avec une certaine fréquence

Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?

On appelle onde le phénomène de propagation dans un milieu sans transport de matière :

- une onde se propage à partir d'une source dans toutes les directions de l'espace.
- la perturbation se transmet de proche en proche avec un transfert d'énergie sans transport de matière ;
- ce phénomène dépend du temps.
- la vitesse de propagation d'une onde est une propriété du milieu : la vitesse de la lumière dépend par exemple de l'indice du milieu qu'elle traverse.

Contrairement aux ondes mécaniques, les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide.

IV Principes de l'optique géométrique

IV.1 Indice de réfraction d'un milieu

Dans le vide, la lumière se propage en ligne droite selon toutes les directions de l'espace à la vitesse $c = 299792458 \text{ m.s}^{-1}$. C'est une vitesse limite que rien ne peut dépasser. Lorsque la lumière se propage dans un milieu transparent homogène et isotrope, elle se déplace à une vitesse v donnée par :

$$v = c/n \quad (1)$$

où n est l'indice de réfraction du milieu et c la vitesse de la lumière dans le vide. L'indice n est nécessairement supérieur à 1. L'indice dépend de plusieurs paramètres dont la nature du milieu et la longueur d'onde de la lumière considérée.

Quelques valeurs d'indice de réfraction courantes :

- Pour le vide $n = 1$
- Pour l'air $n = 1,00029$
- Pour l'eau $n = 1,33$
- Pour le verre en silice usuel $n = 1,5$

Un milieu est dit :

- **transparent** s'il laisse passer la lumière (par opposition à un milieu opaque) ;
- **homogène** si ses caractéristiques optiques sont indépendantes de l'espace ou si son indice de réfraction est le même en tout point.
- **isotrope** si ses caractéristiques optiques sont indépendantes de la direction selon laquelle se propage le rayon lumineux ou si son indice de réfraction ne dépend pas de la direction considérée. C'est le cas pour l'air ou l'eau mais c'est faux pour la plupart des cristaux où l'indice dépend du trajet suivi par la lumière. Dans un tel cas, le milieu est dit **anisotrope**.

Dans les milieux qui sont à la fois homogènes, transparents et isotropes (MHTI), on considère que les rayons lumineux se propagent en ligne droite. Dans tout ce qui suivra, sauf mention explicite, nous supposons que le milieu considéré est un milieu homogène, transparent et isotrope.

Dans un milieu matériel, si la vitesse de propagation v de l'onde dépend de la fréquence de l'onde (et donc de λ), on dit que le milieu est **dispersif**.

Le vide, pour lequel la célérité C est indépendante de la fréquence, est **non dispersif**.

L'indice de réfraction d'un milieu déterminé pour une certaine radiation monochromatique caractérise la vitesse de propagation de cette radiation dans ce milieu, v étant la vitesse de propagation de la radiation considérée dans le milieu étudié.

Plus précisément, l'indice de réfraction du milieu A par rapport au milieu B est le rapport des vitesses :

$$\frac{v_B}{v_A}, \quad (2)$$

Où v_A et v_B sont les vitesses de la même radiation simple dans les milieux A et B.

Si le milieu B est le vide, la vitesse v_B est égale à la constante $c = 299\,792\,458$ m/s (célérité de la lumière), et l'indice de réfraction est appelé indice absolu. Par définition, l'indice de réfraction absolu d'un milieu est :

$$n = \frac{c}{v}, \quad (3)$$

(n est un nombre sans unité). $v \leq c \Rightarrow n \geq 1$

Dans les milieux dispersifs, puisque v dépend de λ , n en dépend aussi. Pour de nombreux matériaux transparents, n suit la loi de Cauchy :

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2}, \quad (4)$$

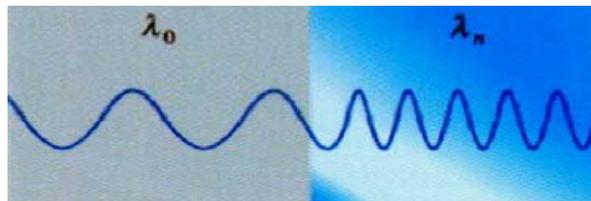
Où a et b sont des constantes.

L'indice augmente donc lorsque la longueur d'onde diminue. Dans le tableau ci-dessous, on donne quelques indices de différents milieux correspondants à une longueur d'onde moyenne du spectre visible ($\lambda = 0,6 \mu\text{m}$). L'indice dépend de plusieurs paramètres dont la nature du milieu et la longueur d'onde de la lumière considérée.

Remarque

Lorsqu'une onde se propage dans différents milieux, sa fréquence ν ne change pas, car elle caractérise la source. Par contre, comme la vitesse de propagation varie, sa longueur d'onde λ change :

$$\lambda = \nu T = \frac{v}{\nu} = \frac{c/n}{\nu} = \frac{c}{n \times \nu} = \frac{\lambda_0}{n} \quad (5)$$



Quelques valeurs d'indice de réfraction courantes :

Vide	1 (par définition)
Air	1,000293 (en général $n_{\text{air}} = n_{\text{vide}}$)
Eau	1,33
Verre ordinaire	1,50
diamant	2,40

Exercice 2. Un rayon lumineux se propage dans l'air. Il arrive sur un morceau de flint (le flint est un verre à base de plomb utilisé en optique) avec un angle d'incidence de 20° avec la normale à la surface de verre. L'indice de réfraction du flint est $n = 1,585$ pour une radiation de longueur d'onde $\lambda = 486$ nm.

Que deviennent les quantités suivantes :

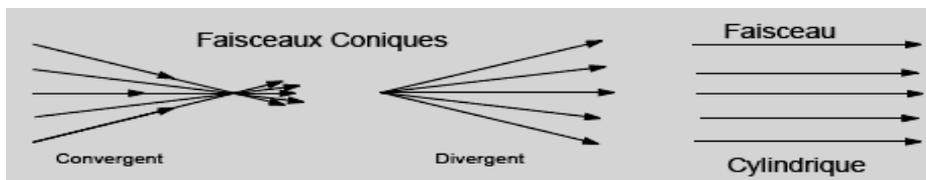
- 1) La fréquence,
- 2) La vitesse de l'onde
- 3) La longueur d'onde lorsque la lumière passe de l'air au flint (on assimile l'air au vide).

Faire les applications numériques dans les milieux 1 (l'air) et 2 (le flint).

Dans un milieu transparent les rayons lumineux issus d'une même source ou de plusieurs sources se propagent de façon indépendante.

2.3 Types de faisceaux lumineux

- * **Un faisceau lumineux:** L'ensemble des rayons lumineux contenus dans le cône défini par la source S.
- * **Un faisceau divergent:** La lumière se propage à partir de la source ponctuelle S.
- * **Un faisceau parallèle (cylindrique):** La source ponctuelle S est à l'infini (c'est-à-dire très éloignée comme le soleil), les rayons sont parallèles.
- * **Un faisceau convergent:** A l'aide d'une loupe il est possible de changer les directions de rayons issus d'une source S ponctuelle et de les faire concourir en un point S.
- * **Un pinceau lumineux:** Un faisceau lumineux très étroit



IV.3 Lois de Snell-Descartes

3. 1 Les lois de la réflexion.

La réflexion est un brusque changement de direction de la lumière qui, après avoir rencontré une surface réfléchissante, revient dans son milieu de propagation initial.

Première loi de la réflexion : Les rayons incidents et réfléchis sont contenus dans le plan, appelé plan d'incidence.

Deuxième loi de la réflexion : Le rayon réfléchi est le symétrique du rayon incident par rapport à la normale à la surface réfléchissante au point d'incidence.

$$r = -i_1 \text{ ou } |r| = |i_1| \quad (8)$$

Cette deuxième loi constitue la **deuxième loi de Snell-Descartes**

A_1I – Rayon incident, IR – Rayon réfléchi,

N_1N_2 – Normale à la surface réfléchissante M_1M_2

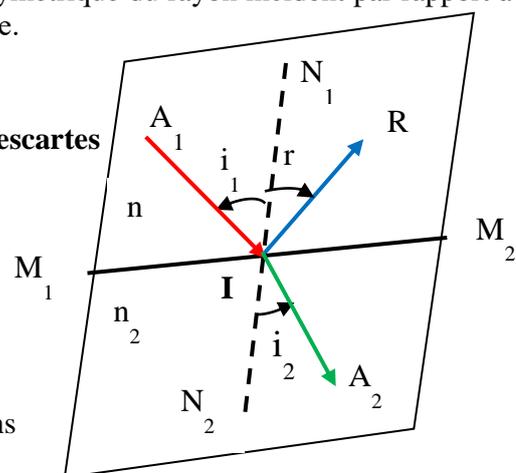
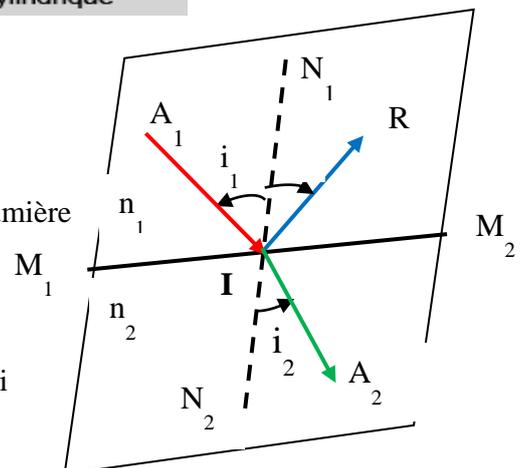
i_1 – angle d'incidence, i_2 – angle réfracté,

r – angle réfléchi

- Les angles sont comptés positivement dans le sens contraire des aiguilles d'une montre,

- Les angles sont comptés toujours de la normale au rayon considéré.

Principe.1. Il existe des rayons lumineux qui restent indépendants les uns des autres (pas d'interaction entre eux).



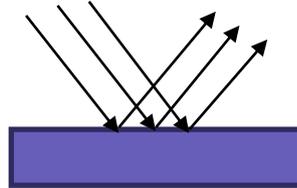
Principe.2. Dans un MTHI, les rayons lumineux sont des *lignes droites*.

Principe.3. A la surface de séparation de deux milieux, les rayons lumineux obéissent aux lois de **Snell-Descartes**.

Considérations générales

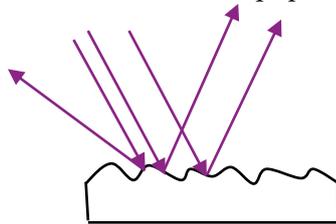
Les rayons lumineux peuvent être renvoyés de deux manières par un objet :

- **La réflexion régulière** sur les surfaces lisses. La lumière réfléchi se propage dans une direction bien définie.



Réflexion régulière, p. ex. sur un miroir, un film alu.

- **La réflexion diffuse ou la diffusion** sur les surfaces rugueuses. La lumière est renvoyée dans toutes les directions. D'un point de vue microscopique, chaque rayon lumineux subit cependant une réflexion régulière.



Réflexion diffuse, p. ex. sur du papier, des vêtements

Du fait de la diffusion sur les objets de tous les jours (tables, chaises,...), ces objets sont visibles depuis de nombreuses directions différentes.

3. 2 Les lois de la réfraction

Définition : La réfraction est un brusque changement de direction de la lumière qui, après avoir rencontré une surface réfractante, se propage dans un milieu différent de son milieu initial de propagation.

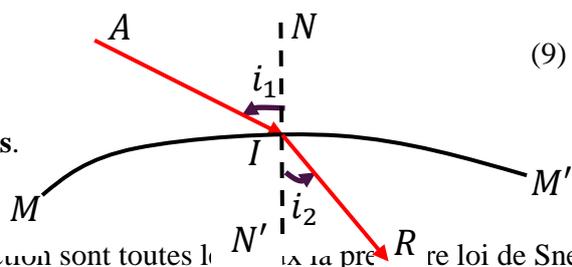
Généralement la surface réfractante est appelée dioptre ou surface dioptrique.

Première loi de la réfraction : Les rayons incident et réfracté sont contenus dans le même plan appelé plan d'incidence.

Deuxième loi de la réfraction : Le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction est égal au rapport des indices de réfraction des milieux de propagation de la lumière.

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} \Leftrightarrow n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \tag{9}$$

Cette loi constitue la 3^{ème} loi de Snell-Descartes.



La 1^{ère} loi de la réflexion et la 1^{ère} loi de la réfraction sont toutes les 3 lois de Snell-Descartes.

Résumé :

Première loi de Snell-Descartes : Les rayons incident, réfléchi et réfracté sont contenus dans le même plan appelé plan d'incidence.

Deuxième loi de Snell-Descartes : Le rayon réfléchi est le symétrique du rayon incident par rapport à la normale à la surface réfléchissante au point d'incidence.

$$r = -i_1 \text{ ou } |r| = |i_1|$$

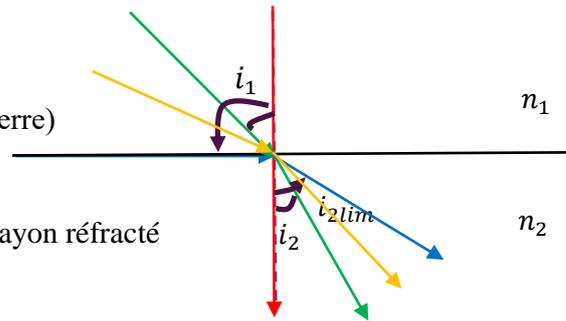
Troisième loi de Snell-Descartes : Le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction est égal au rapport des indices de réfraction des milieux de propagation de la lumière.

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} \Leftrightarrow n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

3. 3 Étude de la réfraction

Cas 1 : $n_2 > n_1$ (par. exemple. air \rightarrow eau ou eau \rightarrow verre)

- $i_1 = 0^\circ \Rightarrow i_2 = 0^\circ$ (rayon rouge)
- $i_1 < 90^\circ \Rightarrow i_2 < i_1$ (rayons vert et jaune) Le rayon réfracté se rapproche de la normale.

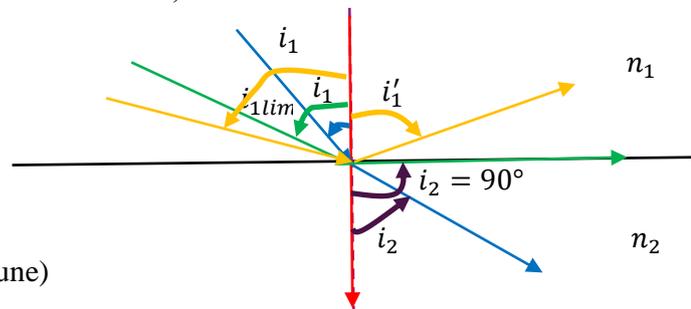


- $i_1 = 90^\circ \Rightarrow i_2 = i_{2lim}$ (rayon bleu) angle de réfraction maximale, angle limite i_{2lim}

Le milieu (2) est plus réfringent que le milieu (1)

Cas 2 : $n_1 > n_2$ (par exemple verre \rightarrow air ou eau \rightarrow air)

- $i_1 = 0^\circ \Rightarrow i_2 = 0^\circ$ (rayon rouge)
 - $i_1 < i_{1lim} \Rightarrow i_2 > i_1$ (rayon bleu)
- Le rayon réfracté s'écarte de la normale.
- $i_1 = i_{1lim} \Rightarrow i_2 = 90^\circ$ (rayon vert)
 - $i_1 > i_{1lim} \Rightarrow$ Réflexion totale (rayon jaune)



- Réflexion totale

Le rayon incident est complètement réfléchi à la surface de séparation entre les milieux; aucun rayon lumineux ne pénètre dans le milieu moins réfringent. Alors, la loi de la réflexion s'applique : $-i_1 = r$. L'angle limite i_{1lim} pour la réflexion totale a la même valeur que l'angle de réfraction maximal i_{2lim} pour le passage de la lumière dans le sens inverse (pour $n_2 > n_1$).

Détermination de l'angle limite:

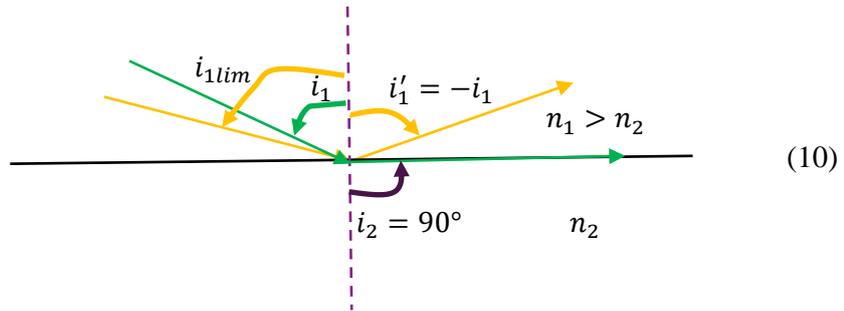
Loi de réfraction: $n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$

Dans le cas de l'angle limite, on a (voir schéma de la page 13): $i_1 = i_{1lim}$ (dans le milieu 1) et $i_2 = 90^\circ$ (dans le milieu 2) On obtient donc à partir de la loi de la réfraction:

$$n_1 \cdot \sin i_{1lim} = n_2 \cdot \sin 90^\circ$$

$$n_1 \cdot \sin i_{1lim} = n_2 \cdot 1$$

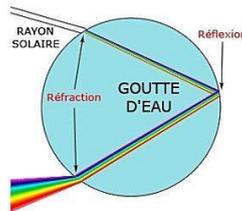
$$i_{1lim} = \text{Arcsin} \frac{n_2}{n_1}$$



(10)

3. 4 Illustrations de la réfraction et de la réflexion (Arc en ciel et mirage)

- L'arc en ciel

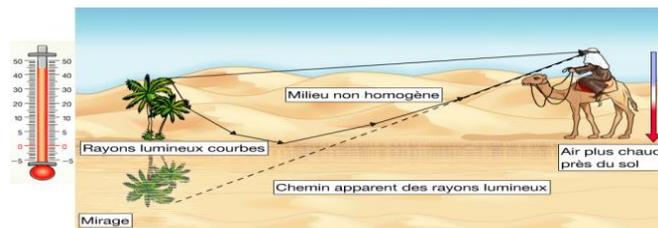


- Le mirage

Le **mirage** (du latin *miror*, *mirari* : s'étonner, voir avec étonnement) est un phénomène optique dû à la déviation des faisceaux lumineux par des superpositions de couches d'air de températures différentes.

• Mirage inférieur

Le mirage inférieur est un phénomène se produisant lorsque les rayons du soleil chauffent fortement le sol, réchauffant à son tour l'air situé juste au-dessus de lui. Une couche d'air infiniment mince se forme alors, et sa température diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sol. Le cerveau humain ne percevant la lumière qu'en ligne droite, l'œil qui reçoit les rayons lumineux courbés associe l'origine de ces rayons à un prolongement rectiligne, donnant l'illusion d'une image inversée.



- Mirage supérieur

Le mirage supérieur apparaît lorsque les couches d'air près du sol sont plus froides que les couches d'air supérieures. On le retrouve fréquemment dans les régions polaires ou en mer lorsque la température de l'eau est plus faible que celle de l'air. Comme la température près du sol est plus basse que celle plus haute dans l'atmosphère, l'air y est plus dense et l'indice de réfraction plus élevé.

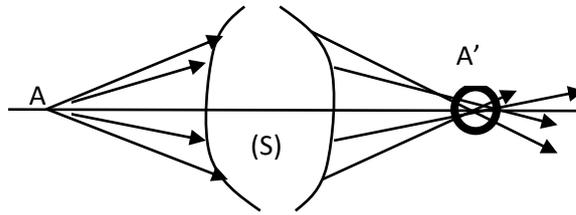
Exercice 5. L'apparition d'un arc en ciel est liée au phénomène de :

- A) Dispersion de la lumière
- B) Diffraction de la lumière par les petites gouttes d'eau en suspension dans l'air
- C) Diffusion de la lumière par les petites gouttes d'eau en suspension dans l'air

2.2 Stigmatisme approché

Définition:

On dit qu'un système optique est approximativement stigmatique pour le couple (A, A') quand l'image du point objet A à travers le système (S) est une tâche de dimension très petite centrée en A' .



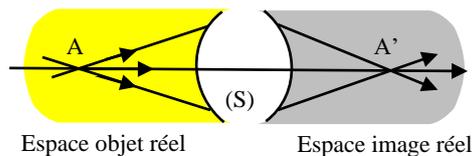
Condition d'approximation de Gauss

- * L'objet doit être plan, perpendiculaire à l'axe Δ et de petite dimension,
- * Cet objet ne doit envoyer sur le système que des rayons paraxiaux.

Ces conditions permettent d'obtenir une image de bonne qualité, plane et perpendiculaire à l'axe Δ .

2.3. Objets, images et espaces réels

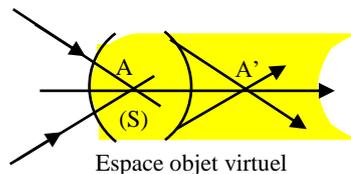
Lorsque les rayons incidents passent effectivement par A , on dit que A est un objet réel.



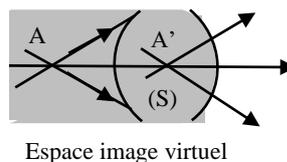
L'espace objet réel comprend tous les points situés en avant de la face d'entrée du système (S) , (partie en jaune): un objet se trouvant dans cet espace est donc réel. L'espace image réel est la région de l'espace située après la face de sortie de (S) (partie en gris) : une image se formant dans cet espace est donc réelle.

2.4. Objets, images et espaces virtuels

On dit que A est un objet virtuel pour le système (S) si ce sont les prolongements des rayons incidents qui passent par A .



Tous les points situés après la face d'entrée de (S) appartiennent à l'espace objet virtuel : un objet se trouvant dans cet espace est donc virtuel.



L'espace image virtuel contient tous les points situés avant la face de sortie de (S) : une image se trouvant dans cet espace est donc virtuelle.

V.2 Dioptrés

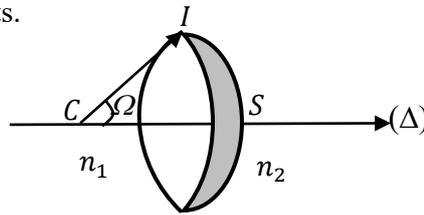
2.1 Dioptrés sphériques : Définition et convention

Un dioptré sphérique est une portion de surface sphérique réfringente séparant deux milieux homogènes et transparents d'indices différents.

CS – rayon de courbure

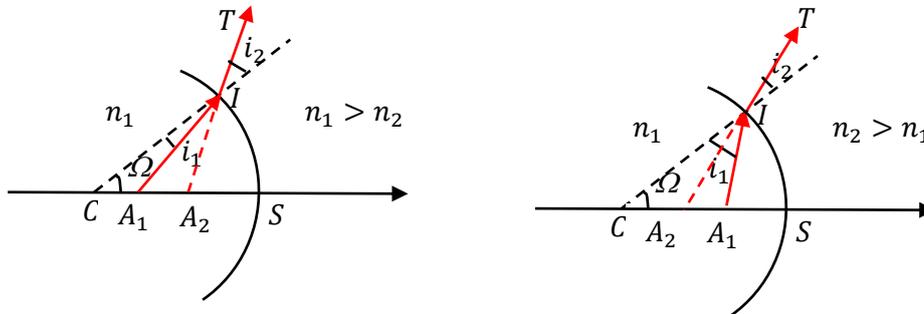
Ω - angle d'ouverture

Δ - axe du dioptré ou axe optique du dioptré



2.2. Invariant fondamental du dioptré

Soit un rayon lumineux incident A_1I issu d'un point objet A_1 situé sur l'axe. Selon que n_1 est supérieur ou inférieur à n_2 , il lui correspond un rayon réfracté IT qui se rapproche ou s'éloigne de la normale IC mais dont le support coupe toujours l'axe en un point A_2 .



Dans tous les cas de figures, les triangles CIA_1 et CIA_2 permettent d'écrire :

$$\frac{\overline{CA_1}}{\overline{IA_1}} \sin i_1 = \frac{\overline{CA_2}}{\overline{IA_2}} \sin i_2$$

et comme $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$, on aura :

$$\frac{\overline{CA_1}}{\overline{IA_1}} n_1 = \frac{\overline{CA_2}}{\overline{IA_2}} n_2 \tag{11}$$

Ce qui montre que la quantité $n \frac{\overline{CA}}{\overline{IA}}$ est invariante dans la traversée du dioptré sphérique : c'est un **invariant fondamental** qui est d'une grande importance dans l'étude des dioptrés sphériques.

Dans les conditions de l'approximation de Gauss ($I \equiv S$) avec des rayons para-axiaux, l'invariant fondamental s'écrit alors :

$$\frac{\overline{CA_1}}{\overline{SA_1}} n_1 = \frac{\overline{CA_2}}{\overline{SA_2}} n_2 \tag{12}$$

2.3. Relations de conjugaison.

3.1. Origine au centre C

En injectant le centre C dans la relation (12), puis divisant l'égalité par \overline{SC} et tenant compte de l'origine des valeurs algébriques nous obtenons :

$$\frac{n_1}{\overline{CA_2}} - \frac{n_2}{\overline{CA_1}} = \frac{n_1 - n_2}{\overline{CS}} \tag{13}$$

Formule de conjugaison avec origine au centre.

3.2. Origine au sommet S

En injectant le point S dans la relation (12), puis divisant l'égalité par \overline{SC} et tenant compte de l'origine des valeurs algébriques nous obtenons :

$$\frac{n_2}{\overline{SA_2}} - \frac{n_1}{\overline{SA_1}} = \frac{n_2 - n_1}{\overline{SC}} \quad (14)$$

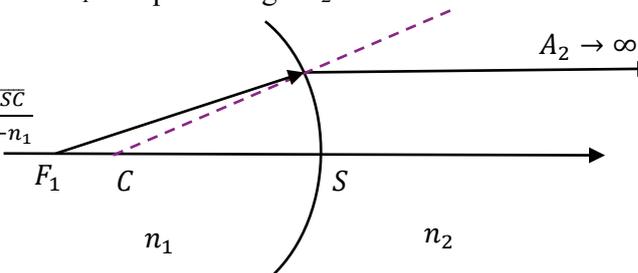
Formule de conjugaison avec origine au sommet.

2.4. Foyers. Distance focale. Vergence

Pour déterminer la position des foyers, il suffit de faire tendre dans l'expression (14) $\overline{SA_1}$ ou $\overline{SA_2}$ vers l'infini.

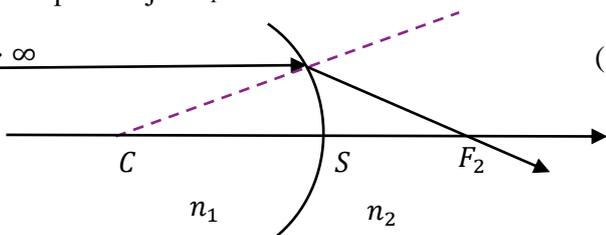
4.1. Foyer objet

Il correspond à la position F_1 du point A_1 lorsque l'image A_2 est à l'infini. On aura alors :

$$-\frac{n_1}{\overline{SF_1}} = \frac{n_2 - n_1}{\overline{SC}} \Rightarrow \overline{SF_1} = f_1 = -\frac{n_1 \overline{SC}}{n_2 - n_1} \quad (15)$$


4.2. Foyer image

Il correspond à la position F_2 de l'image A_2 lorsque l'objet A_1 est à l'infini. On a donc :

$$\frac{n_2}{\overline{SF_2}} = \frac{n_2 - n_1}{\overline{SC}} \Rightarrow \overline{SF_2} = f_2 = \frac{n_2 \overline{SC}}{n_2 - n_1} \quad (16)$$


On remarque que les deux expressions se déduisent l'une de l'autre par permutation des indices, ce qui est prévisible.

Comme $\overline{SF_2} = f_2 = \frac{n_2 \overline{SC}}{n_2 - n_1}$ et $\overline{SF_1} = f_1 = -\frac{n_1 \overline{SC}}{n_2 - n_1}$

on a :

$$\frac{\overline{SF_2}}{\overline{SF_1}} = \frac{f_2}{f_1} = -\frac{n_2}{n_1} \quad (16.a)$$

$$\text{et } f_2 + f_1 = \overline{SC} \quad (16.b)$$

- La première équation (16.a) montre que les foyers sont toujours situés de part et d'autre du sommet du dioptré. Ainsi, si F_1 est dans le milieu 1, F_1 est réel, F_2 est dans le milieu 2, donc F_2 est aussi réel ; par contre, si F_1 est dans le milieu 2, F_1 est virtuel, F_2 se trouve du côté du milieu 1, F_2 est aussi virtuel.

- La deuxième équation (16.b) montre, quant à elle, que le milieu du segment $[F_1, F_2]$ coïncide avec le milieu du segment $[S, C]$: les foyers sont donc symétriques par rapport au milieu de SC.

4.3. Distance focale et vergence

$$f_2 = \frac{n_2 \overline{SC}}{n_2 - n_1} ; \text{ distance focale image, } \quad f_1 = -\frac{n_1 \overline{SC}}{n_2 - n_1} ; \text{ distance focale objet,}$$

La vergence V est définie par :

$$V = \frac{n_2 - n_1}{\overline{SC}} = \frac{n_2}{f_2} = -\frac{n_1}{f_1} \quad (17)$$

4.4. Dioptrés convergents et dioptrés divergents

La vergence est une grandeur algébrique :

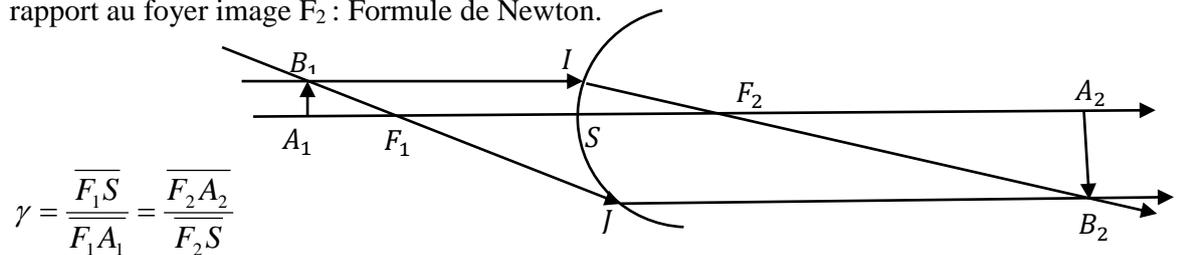
- si $n_2 - n_1$ et \overline{SC} sont de même signe, alors la vergence V est positive et le dioptré est dit convergent
- si $n_2 - n_1$ et \overline{SC} sont de signes contraires, alors la vergence V est négative et le dioptré est dit divergent. On remarquera que les dioptrés à foyers réels sont convergents et les dioptrés à foyers virtuels sont divergents.

Remarques

- Le centre d'un dioptré sphérique convergent est situé dans le milieu d'indice le plus élevé
- Le centre d'un dioptré divergent est situé dans le milieu d'indice le plus faible.
- $\overline{SF_2} > 0$ dioptré convergent,
- $\overline{SF_2} < 0$ dioptré divergent.

4.5. Relation de conjugaison avec origine aux foyers : Formule de Newton

La position de l'objet A_1 est obtenue par rapport au foyer objet F_1 et celle de l'image A_2 par rapport au foyer image F_2 : Formule de Newton.



$$\overline{F_1A_1} \times \overline{F_2A_2} = \overline{SF_1} \times \overline{SF_2} = f_1 \cdot f_2 \quad (18)$$

2.5. Construction de l'image d'un petit objet perpendiculaire à l'axe

Nous allons, pour effectuer cette construction, exploiter les propriétés du centre C , des foyers F_1 et F_2 , du sommet S et utiliser des rayons particuliers.

5.1. Rayons particuliers

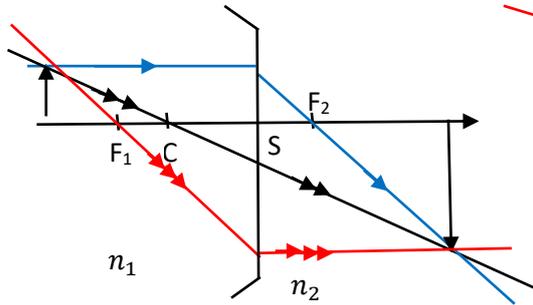
- Tout rayon incident passant par le centre C ne subit aucune déviation,
- Tout rayon incident parallèle à l'axe, se réfracte en passant par le foyer image F_2 ,
- Tout rayon incident passant par le foyer objet F_1 se réfracte parallèlement à l'axe.

L'image d'un objet A_1B_1 perpendiculaire à l'axe s'obtient donc en cherchant le conjugué B_2 de B_1 à partir de l'intersection de deux des rayons particuliers précédents issus de B_1 et en menant la perpendiculaire à l'axe pour trouver la position de l'image A_2 de A_1 .

5.2 Quelques constructions : Objet réel placé avant F_1

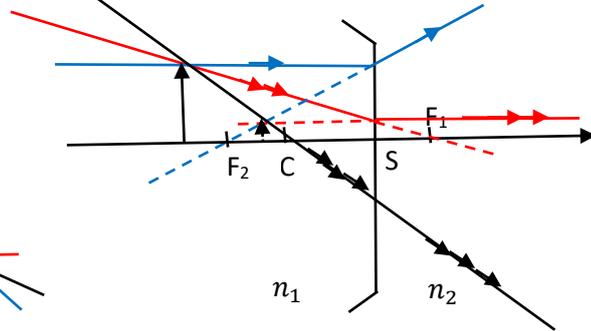
Dioptre concave convergent ($n_2 < n_1$)

Image est réelle et renversée



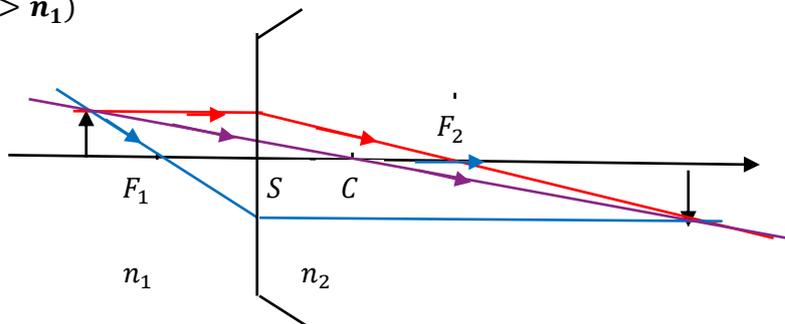
Dioptre concave divergent ($n_2 > n_1$)

Image est virtuelle et droite

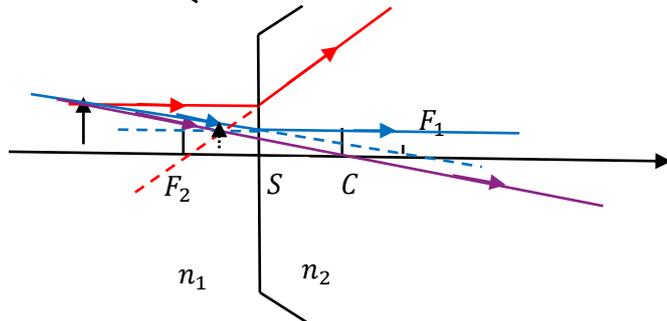


Dioptre convexe convergent ($n_2 > n_1$)

Image est réelle et renversée



Dioptre convexe divergent ($n_2 < n_1$)



On constate que l'objet et l'image se déplacent dans le même sens avec une discontinuité du déplacement de l'image au passage de l'objet par le foyer F_1 .

2.6. Grandissement linéaire ou transversal

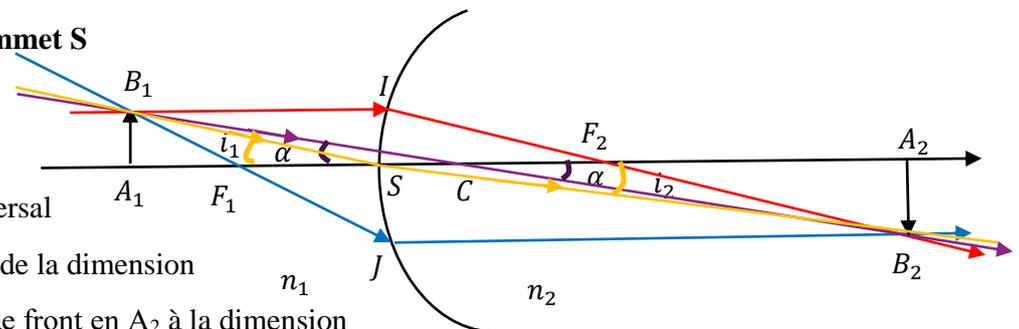
6.1. Avec origine au sommet S

Le grandissement transversal

ou linéaire est le rapport de la dimension de l'image dans le plan de front en A_2 à la dimension

correspondante de l'objet en A_1 : $\gamma = \frac{A_2 B_2}{A_1 B_1}$

Dans l'approximation de Gauss et en utilisant la troisième loi de Snell-Descartes pour la réfraction, on a :



$$\gamma = \frac{\overline{A_2B_2}}{\overline{A_1B_1}} = \frac{n_1 \overline{SA_2}}{n_2 \overline{SA_1}} \quad (19)$$

6.2. Avec origine au centre C

Dans la figure précédente et dans les triangles $\widehat{A_1CB_1}$ et $\widehat{A_2CB_2}$, on a : $\frac{\overline{A_2B_2}}{\overline{A_1B_1}} = \frac{\overline{CA_2}}{\overline{CA_1}}$, Soit $\gamma = \frac{\overline{CA_2}}{\overline{CA_1}}$

6.3. Avec origine aux foyers

Dans la figure précédente et dans les triangles $\widehat{F_1A_1B_1}$ et $\widehat{F_1SJ}$, on a : $\frac{\overline{SJ}}{\overline{A_1B_1}} = \frac{\overline{F_1S}}{\overline{F_1A_1}}$

De même, dans les triangles $\widehat{F_2A_2B_2}$ et $\widehat{F_2SI}$, on a : $\frac{\overline{A_2B_2}}{\overline{SI}} = \frac{\overline{F_2A_2}}{\overline{F_2S}}$

Comme $\overline{SJ} = \overline{A_2B_2}$ et $\overline{SI} = \overline{A_1B_1}$ on obtient :

$$\gamma = \frac{\overline{F_1S}}{\overline{F_1A_1}} = \frac{\overline{F_2A_2}}{\overline{F_2S}} \quad (20)$$

Exercice 11. Un dioptré sphérique concave de centre C, de sommet S, de rayon de courbure égal à -2 cm sépare l'air d'indice $n'=1$ (espace image) et un milieu d'indice $n=1,5$ (espace objet).

- 1) Trouver la position des foyers F et F' de ce dioptré.
- 2) un objet réel AB de 1 cm perpendiculaire à SC est placé à :
 - a) -4 cm; b) -1cm; c)-3 cm; d) +4 cm,

Tracer la marche de 3 rayons particuliers pour les questions a), b), c) et d)

Exercice 12. Un dioptré sphérique convexe de rayon de courbure égal à 2 cm sépare l'air d'indice $n=1$ (mil objet) et un milieu d'indice $n'=1,5$ (mil image).

- 1) Trouver la position des foyers F et F' de ce dioptré.
- 2) Un objet réel AB de 1cm perpendiculaire à SC est placé à :
 - a) -4 cm; b) -1cm; c) 3 cm; d) 7 cm,

Exercice 13. L'image d'un objet réel situé au foyer image est :

- A) A l'infini, B) Virtuelle, C) Réelle, D) Dans un plan focal image, E) Aucune réponse

Exercice 14. L'image d'un objet réel à travers un dioptré sphérique est toujours réelle.

- A) Vrai B) Faux

Exercice 15. Un dioptré sphérique est un système afocal.

- A) Vrai B) Faux

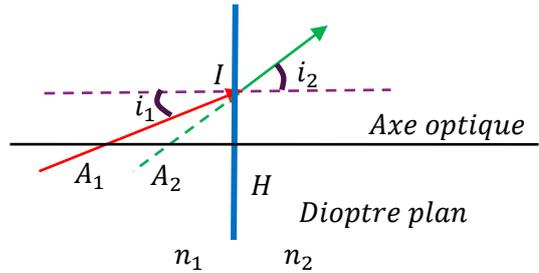
Exercice 16. Soit un dioptré sphérique de rayon 5 cm séparant 2 milieux d'indice $n_1 = 1,5$ (milieu objet) et $n_2 = 1$. (milieu image). Les positions des foyers image et objet sont :

- A) $\overline{SF} = 15cm$, $\overline{SF'} = 10cm$ B) $\overline{SF} = 15cm$, $\overline{SF'} = -10cm$, C) $\overline{SF} = -15cm$, $\overline{SF'} = 10cm$
 D) $\overline{SF} = -15cm$, $\overline{SF'} = -10cm$, E) Aucune réponse ne convient,

2.7 Dioptries Plans

7.1 Définition :

Le dioptre plan est un dioptre sphérique de rayon de courbure infini qui sépare deux milieux transparents, homogènes et isotropes d'indices n_1, n_2 différents.



A_1 – objet dans le milieu 1, réel et A_2 son image dans le même milieu 1, virtuelle

7.2 Position de A_2 connaissant celle de A_1

Considérons les triangles HIA_1 et HIA_2 . $\overline{HI} = \overline{HA_1} \tan i_1 = \overline{HA_2} \tan i_2 \Rightarrow \overline{HA_2} = \overline{HA_1} \frac{\tan i_1}{\tan i_2}$

Dans l'approximation de Gauss, on a: $\overline{HA_2} = \overline{HA_1} \frac{\tan i_1}{\tan i_2} = \overline{HA_1} \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \overline{HA_1} \frac{n_2}{n_1}$

Soit la formule de conjugaison des dioptres plans:

$$\frac{\overline{HA_1}}{n_1} = \frac{\overline{HA_2}}{n_2} \quad (21)$$

Si $\overline{HA_1} = 0 \Rightarrow \overline{HA_2} = 0$, un objet sur le dioptre donne une image sur le dioptre.

Si $\overline{HA_1} = \infty \Rightarrow \overline{HA_2} = \infty$, un objet à l'infini donne une image à l'infini.

7.3 Grandissement linéaire transversal

$$\gamma = \frac{\overline{A_2 B_2}}{\overline{A_1 B_1}} = \frac{\overline{CA_2}}{\overline{CA_1}} = \frac{n_1 \overline{SA_2}}{n_2 \overline{SA_1}}, \text{ pour un dioptre sphérique.}$$

$$\gamma = \frac{\overline{A_2 B_2}}{\overline{A_1 B_1}} = \frac{n_1 \overline{HA_2}}{n_2 \overline{HA_1}}, \text{ pour un dioptre plan}$$

$$\text{Or, } \frac{n_2}{n_1} = \frac{\overline{HA_2}}{\overline{HA_1}} \Rightarrow \gamma = 1,$$

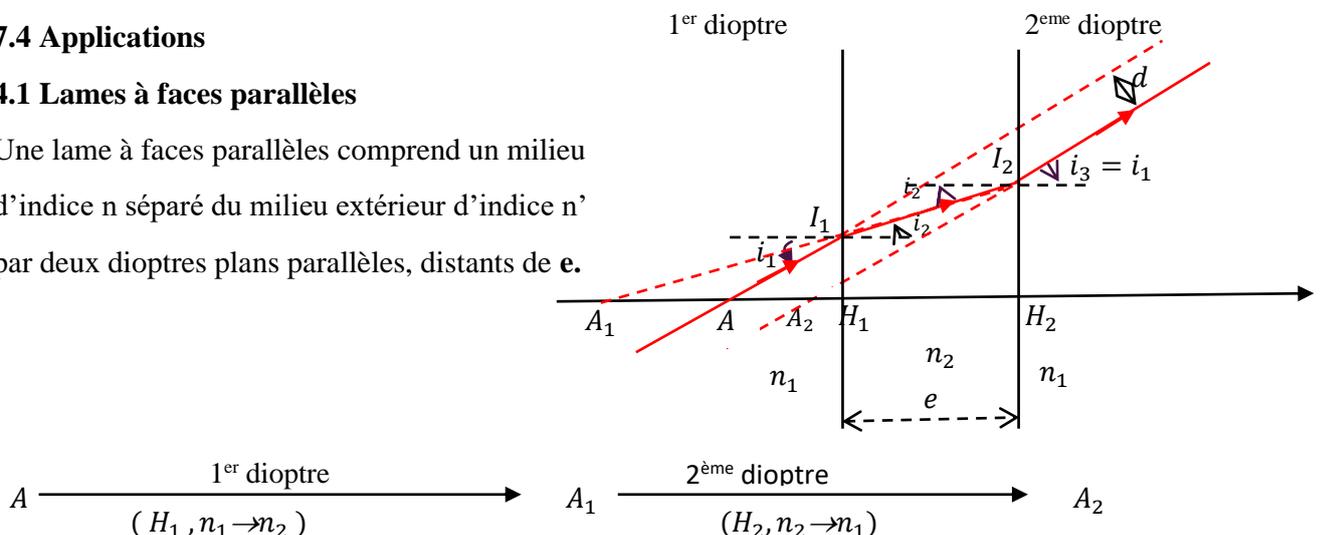
Le grandissement pour un dioptre plan est égal à l'unité.

L'image est donc de même grandeur que l'objet et de nature inverse ; c'est-à-dire à un objet réel correspond une image virtuelle et inversement.

7.4 Applications

4.1 Lames à faces parallèles

Une lame à faces parallèles comprend un milieu d'indice n séparé du milieu extérieur d'indice n' par deux dioptres plans parallèles, distants de e .



La formule de conjugaison du dioptre plan nous donne :

pour le premier dioptre : $\frac{\overline{H_1 A_1}}{\overline{H_1 A}} = \frac{n_2}{n_1}$; pour le deuxième dioptre : $\frac{\overline{H_2 A_2}}{\overline{H_2 A_1}} = \frac{n_1}{n_2}$

soit : $\overline{H_2 A_2} = \frac{n_1}{n_2} \overline{H_2 A_1} = \frac{n_1}{n_2} (\overline{H_2 H_1} + \overline{H_1 A_1}) = \frac{n_1}{n_2} \left(\overline{H_2 H_1} + \frac{n_2}{n_1} \overline{H_1 A} \right) = \frac{n_1}{n_2} (-e + \overline{H_1 A})$

$$\boxed{\overline{H_2 A_2} = \left(\overline{H_1 A} - \frac{n_1}{n_2} e \right)}$$

or : $\overline{AA_2} = \overline{AH_1} + \overline{H_1 A_2} = \overline{AH_1} + \overline{H_1 H_2} + \overline{H_2 A_2} \Rightarrow \overline{AA_2} = \overline{AH_1} + \overline{H_1 H_2} + \frac{n_1}{n_2} (-e) + \overline{H_1 A}$

donc : $\overline{AA_2} = \overline{H_1 H_2} - \frac{n_1}{n_2} e = e - \frac{n_1}{n_2} e,$

soit en définitif : $\overline{AA_2} = e \left(1 - \frac{n_1}{n_2} \right)$ (22)

qui rend compte de la distance qui sépare l'objet A de son image à travers la lame à faces parallèles. Finalement, lorsque la lame se trouve dans l'air, on a :

$\overline{AA_2} = e \cdot \left(1 - \frac{1}{n} \right)$ si $n_1 = 1$ et $n_2 = n$ (23)

Exercice 17. Un faisceau lumineux parallèle arrive sur l'une des faces d'une lame de verre ($n=1,5$)

à faces parallèles, d'épaisseur $e=0,5$ cm, sous une incidence de 45° .

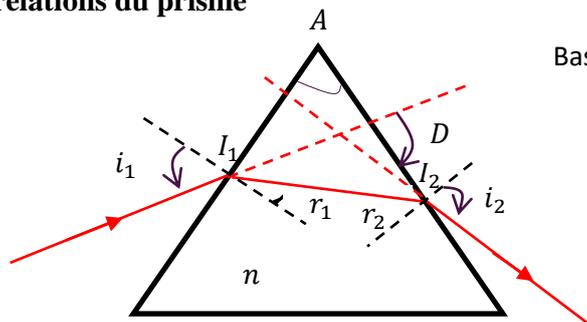
- 1) En négligeant la réflexion, tracer la marche d'un rayon lumineux à travers la lame et calculer l'angle de réfraction dans la lame de verre et les angles d'incidence et de réfraction sur la face de sortie.
- 2) Calculer le déplacement AA_2 subi par le rayon lors de son passage à travers la lame.

4.2 Le prisme

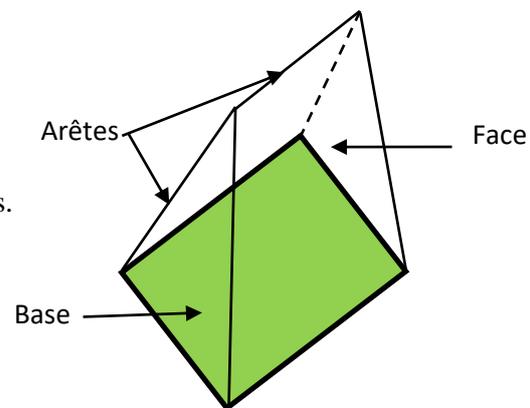
2.1 définition

Le prisme est un milieu transparent, homogène et isotrope limité par deux dioptries plans non parallèles.

2.2 Les relations du prisme



Au point I_1 de la face d'entrée nous avons :



$$\sin i_1 = n \cdot \sin r_1 \quad (24.a)$$

Au point I₂ de la face de sortie nous avons :

$$\sin i_2 = n \cdot \sin r_2 \quad (24.b)$$

La relation entre l'angle au sommet du prisme et les angles de réfractions est donnée par :

$$A = r_1 + r_2 \quad (24.c)$$

La relation entre l'angle de déviation et les angles d'incidence est donnée par :

$$D = i_1 + i_2 - A \quad (24.d)$$

Les formules (24.a), (24.b), (24.c) et (24.d) sont appelées les formules du prisme.

2.3 Condition d'émergence

* L'angle de réfraction à l'intérieur du prisme doit être inférieur à l'angle de réfraction limite r_{limite}

* L'émergence n'a lieu que si :

$$\frac{\pi}{2} > i > i_0 ; \sin i_0 = n \sin (A - r_{limite}). \quad (25)$$

i_0 est l'angle d'incidence limite.

2.4 Etude de la déviation

* La déviation dépend de A, n et i : $D = f(A, i, n)$.

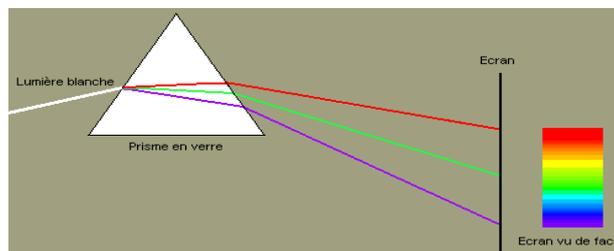
* D croît avec A et passe par un minimum quand i varie de i_0 à $\frac{\pi}{2}$.

* Au minimum de déviation :

$$i_1 = i_2 = i_m ; r_1 = r_2 = A/2 ; D_m = 2i_m - A ; n = \frac{\sin[(A+D_m)/2]}{\sin(A/2)} \quad (26)$$

D varie avec la longueur d'onde de la lumière incidente. L'indice d'un matériau varie avec λ selon la Loi de Cauchy : $n = a + \frac{b}{\lambda^2}$.

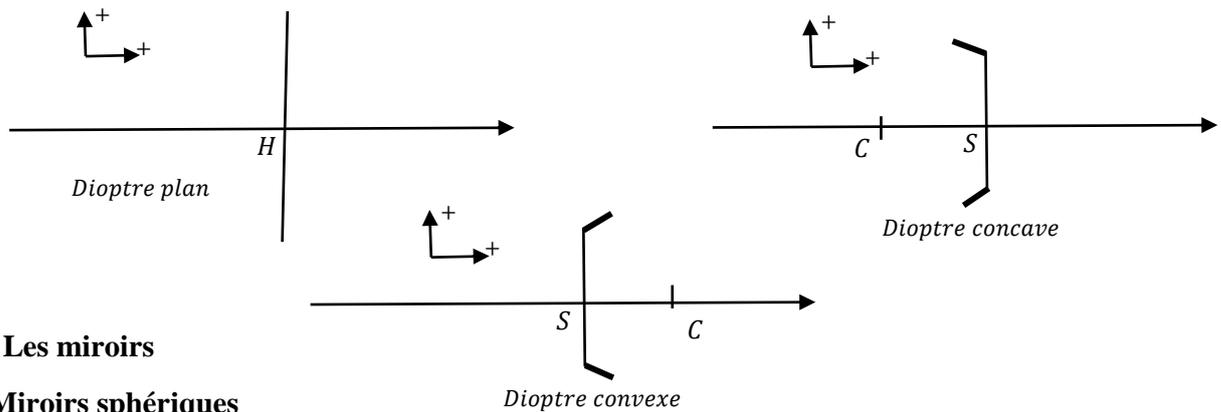
- La déviation diminue quand la longueur d'onde λ augmente



- Pour de faibles valeurs de l'angle d'incidence i on a :

$$D = (n - 1)A \quad (27)$$

4.3 Représentation des différents dioptries

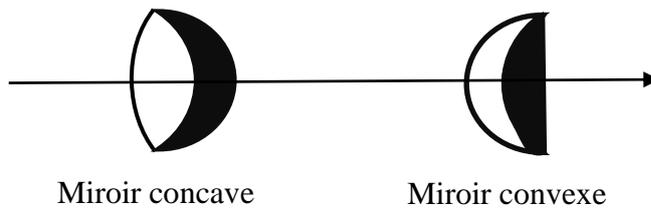


V. 3 Les miroirs

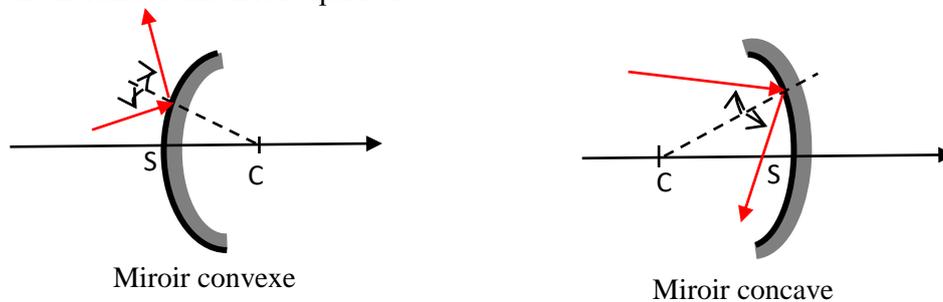
3.1 Miroirs sphériques

1.1 Définition

Un miroir sphérique est une portion de surface sphérique de centre C rendue réfléchissante par un dépôt métallique. C'est donc une calotte sphérique de sommet S et de rayon $R = \overline{SC}$. La droite (CS) représente l'axe principal du miroir.



Le miroir est dit concave lorsque la surface intérieure est réfléchissante et il est dit convexe lorsque c'est la surface extérieure qui l'est.



1.2 Relation de conjugaison et Grandissement (Origine au sommet)

Pour un dioptre sphérique avec origine au sommet la formule de conjugaison s'écrit :

$$\frac{n_2}{SA_2} - \frac{n_1}{SA_1} = \frac{n_2 - n_1}{SC}$$

Dans cette formule, si l'on pose $n_2 = -n_1$, car la lumière revient dans son milieu de départ, alors on aura:

$$\frac{1}{SA_2} + \frac{1}{SA_1} = \frac{2}{SC} \quad (28)$$

En utilisant aussi l'expression du grandissement pour les dioptries sphériques, $\gamma = \frac{A_2 B_2}{A_1 B_1} = \frac{n_1 SA_2}{n_2 SA_1}$

on obtient :

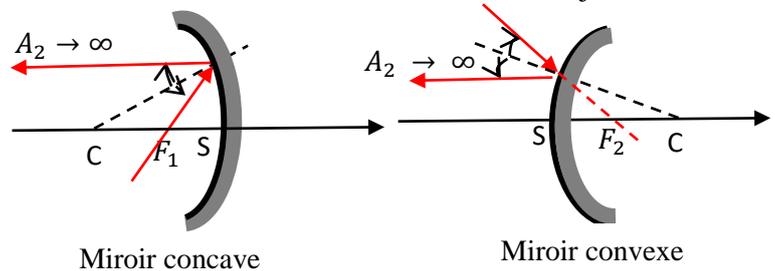
$$\gamma = \frac{A_2 B_2}{A_1 B_1} = -\frac{SA_2}{SA_1} \quad (29)$$

1.2 Position des foyers

2.1 Foyer objet

Dans la formule de conjugaison (25) le point image A_2 du point objet A_1 à travers le miroir est rejeté à l'infini ($\overline{SA_2} \rightarrow \infty, A_1 \equiv F_1$), nous avons alors la formule de distance focale objet :

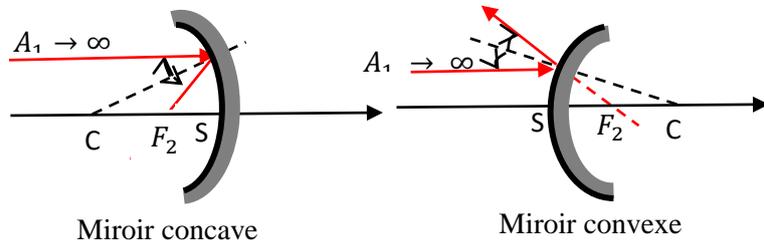
$$\frac{1}{\overline{SF_1}} = \frac{2}{\overline{SC}} \Rightarrow \overline{SF_1} = f_1 = \frac{\overline{SC}}{2}$$



2.2 Foyer image

Dans la formule de conjugaison (25) le point objet A_1 du point image A_2 à travers le miroir est éplac à l'infini ($\overline{SA_1} \rightarrow \infty, A_2 \equiv F_2$), nous avons alors la formule de distance focale image :

$$\frac{1}{\overline{SF_2}} = \frac{2}{\overline{SC}} \Rightarrow \overline{SF_2} = f_2 = \frac{\overline{SC}}{2}$$



Remarque :

$F_1=F_2=F$ et sont situés au milieu du segment $[SC]$. On parle dans ce cas de foyer principal du miroir.

3.2 Miroir Plan

2.1 Définition

Un miroir plan est un miroir sphérique de rayon de courbure infini ($\overline{SC} \rightarrow \infty$)

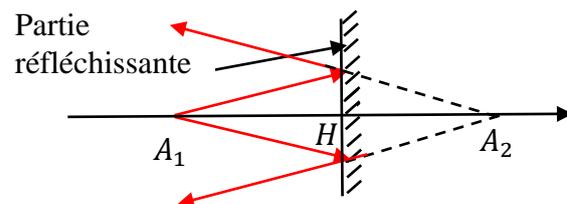
Dans la formule de conjugaison (25), en

remplaçant par ($\overline{SC} \rightarrow \infty$) on trouve :

$$\frac{1}{\overline{SA_2}} + \frac{1}{\overline{SA_1}} = 0 \Rightarrow \frac{1}{\overline{SA_2}} = -\frac{1}{\overline{SA_1}} \Rightarrow \overline{SA_2} = -\overline{SA_1}$$

En posant $S \equiv H \Rightarrow \overline{HA_2} = -\overline{HA_1}$

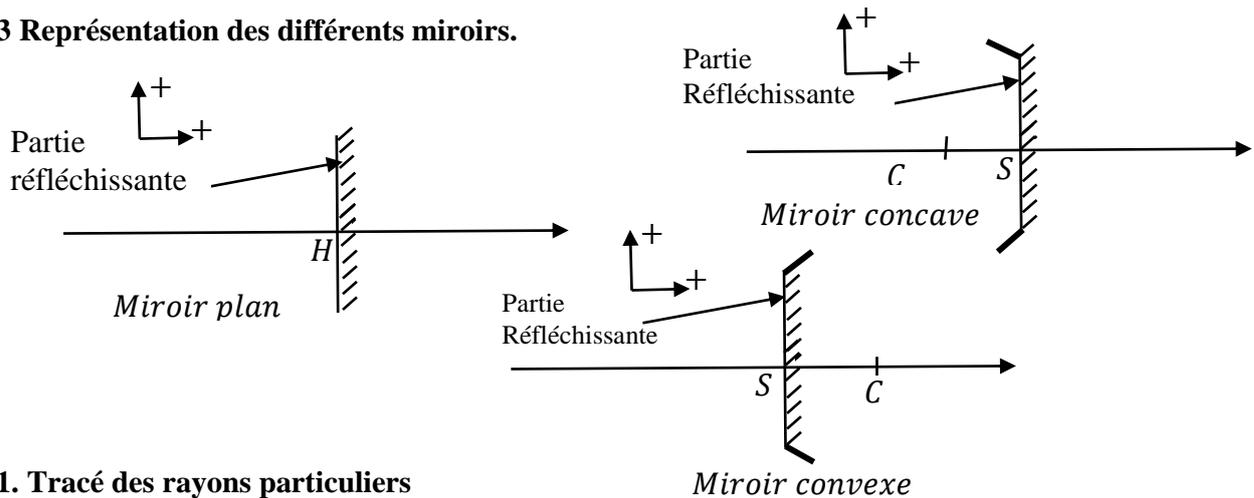
L'objet et son image sont à égale distance par rapport au miroir plan. L'image d'un objet réel est toujours virtuelle.



2.2 Grandissement transversal

$$\gamma = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{A_2B_2}} = -\frac{\overline{HA_2}}{\overline{HA_1}} = 1$$

3.3 Représentation des différents miroirs.



6.1. Tracé des rayons particuliers

- Tout rayon incident passant par le centre C ne subit aucune déviation,
- Tout rayon incident parallèle à l'axe, se réfléchit en passant par le foyer principal,
- Tout rayon incident passant par le foyer principal se réfléchit parallèlement à l'axe.

Exercice 18. La distance focale d'un miroir sphérique est : A) égale à son rayon ; B) le double de son rayon ; C) la moitié de son rayon

Exercice 19. On place un objet réel, sur l'axe optique, à une distance égale à 1,5 m du sommet d'un miroir concave de focale 1 m. L'image est:

A) virtuelle et située à 3 m du miroir ; B) réelle et située à 3 m du miroir ; C) réelle et située à 60 cm du miroir ; D) virtuelle et située à 60 cm du miroir

Exercice 20. Avec un miroir convexe, on peut obtenir une image réelle si

A) l'objet est réel ; B) l'objet est virtuel, peu importe sa place ; C) l'objet est virtuel, placé entre S et F ; D) l'objet est virtuel, placé entre F et C

Exercice 21. Il fait nuit dehors, je suis dans une pièce éclairée et je me vois à travers une vitre donnant vers l'extérieur. En effet,

A) Le noir nocturne réfléchit la lumière ; B) La vitre réfléchit une partie de la lumière
 C) La vitre n'est plus transparente la nuit ; D) La vitre ne laisse pas passer la lumière extérieure quand il fait nuit

Exercice 22. Soit un miroir convexe de centre C et de rayon $R = 3$ m.

Quelle est sa distance focale $\overline{SF'} = f'$? En déduire sa vergence V .

B) On place un objet virtuel à 3 cm de son sommet S . Calculer la position de l'image

C) Vérifier les résultats précédents à l'aide d'une construction géométrique.

VI. SYSTEMES CENTRÉS DIOPTRIQUES

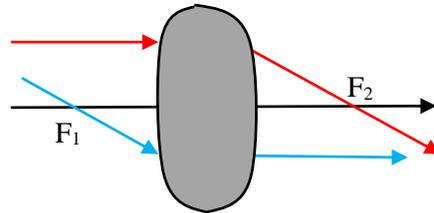
VI.1 Définition

Un système centré dioptrique est formé par une succession de surfaces planes ou sphériques séparant des milieux transparents: les centres des faces sont alignés sur un même axe qui constitue l'axe principal du système.

VI.2 Foyers et plans focaux

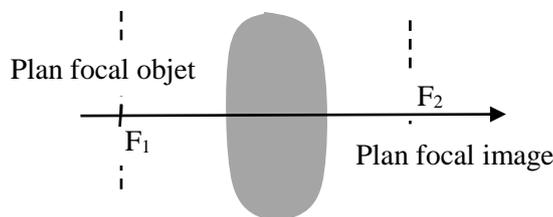
Si le point objet est à l'infini sur l'axe optique, son conjugué est le foyer image F_2 . Le point objet F_1 sur l'axe optique a pour conjugué le point image à l'infini sur l'axe optique.

Pour un système, le foyer principal image et le foyer principal objet sont uniques.



N.B. Les deux foyers ne sont pas les conjugués de l'un de l'autre.

Le plan focal image et le plan focal objet sont les plans perpendiculaires à l'axe optique du système respectivement en F_2 et en F_1



Le plan focal objet est le lieu des foyers secondaires par où passent les faisceaux émergents cylindriques.

Pour un système, le foyer principal image et le foyer principal objet sont uniques.

Si les foyers sont à l'infini le système est dit " AFOCAL ".

Méthode de détermination des foyers secondaires

- 1) Tracer le plan focal objet lorsque le rayon est incident, ou le plan focal image lorsque le rayon est émergent.
- 2) Trouver l'intersection entre le plan focal et le rayon incident (émergent) $\Rightarrow \phi_1 (\phi_2)$
- 3) Prendre un rayon fictif incident (émergent) // à l'axe et passant par $\phi_1 (\phi_2)$ il sort par F' foyer image [ou un rayon fictif passant par le centre]

Le rayon émergent (incident) recherché va lui être parallèle.

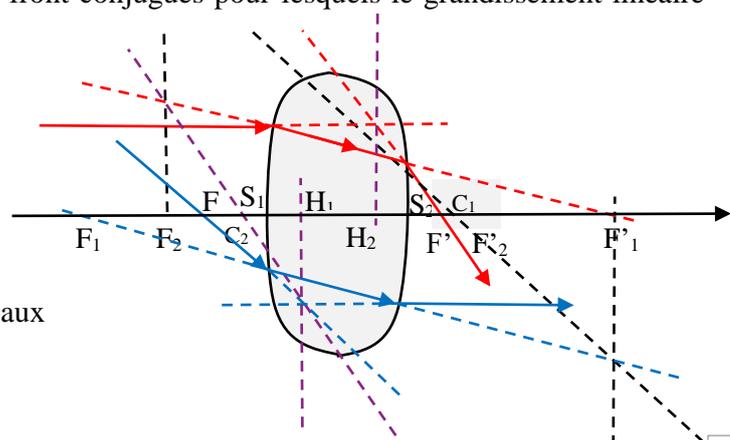
V.3 Plans principaux

Les plans principaux sont deux plans de front conjugués pour lesquels le grandissement linéaire est égal à l'unité.

H_1 – Le point principal objet,

H_2 – Le point principal image.

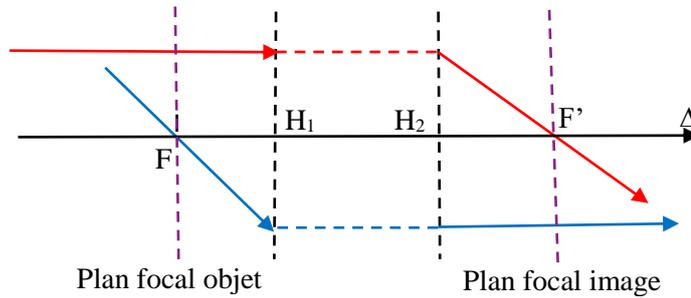
Les droites perpendiculaires à l'axe optique Δ et passant par les points principaux H_1 et H_2 sont les plans principaux objet et image.



H_1H_2 est l'interstice du système.

H_1 , H_2 et S sont confondus pour un dioptre sphérique

La représentation du système centré dioptrique équivalent est le suivant :



Le plan focal image et le plan focal objet sont les plans perpendiculaires à l'axe optique du système respectivement en F' et en F .

3.1 Les distances focales

La distance focale objet est par définition la mesure algébrique :

$$\overline{H_1F} = f \tag{30}$$

La distance focale image est par définition la mesure algébrique

$$\overline{H_2F'} = f' \tag{31}$$

Dans un système dioptrique, les distances focales sont toujours de signes contraires et leur rapport est celui des indices des milieux extrêmes changé de signe.

$$\frac{\overline{H_2F'}}{\overline{H_1F}} = -\frac{n_2}{n_1} \tag{32}$$

3.2 La vergence

Comme pour les dioptres sphériques on définit la vergence V du système par :

$$V = \frac{n_2}{\overline{H_2F'}} = -\frac{n_1}{\overline{H_1F}} \tag{33}$$

VI.4 Formules des systèmes centrés

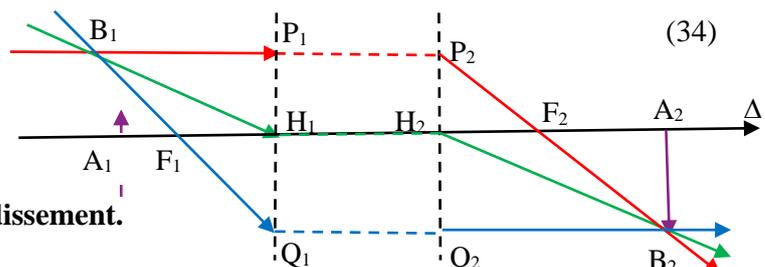
4.1 Formule de conjugaison

1.1 Origine aux points principaux

La position de l'objet A_1 est repérée par rapport au point principal objet H_1 et celle de l'image A_2 par rapport au plan principal image H_2 .

La relation de conjugaison dans le cas des systèmes centrés dioptriques est:

$$\frac{n_2}{\overline{H_2A_2}} - \frac{n_1}{\overline{H_1A_1}} = -\frac{n_1}{\overline{H_1F}} = \frac{n_2}{\overline{H_2F'}} \tag{34}$$



1.2 Origines aux foyers :

Formules de NEWTON et de grandissement.

Les positions des points objet A_1 (respectivement image A_2) sont repérées par $\overline{F_1A_1}$ (respectivement $\overline{F_2A_2}$). Les triangles $F_1\overline{A_1B_1}$ et $F_1\overline{H_1Q_1}$ d'une part et $F_2\overline{A_2B_2}$ et $F_2\overline{H_2P_2}$ d'autre part sont semblables. D'où les relations :

$$\frac{\overline{H_1Q_1}}{\overline{A_1B_1}} = \frac{\overline{F_1H_1}}{\overline{F_1A_1}} = \frac{\overline{A_2B_2}}{\overline{A_1B_1}} \quad ; \quad \frac{\overline{A_2B_2}}{\overline{H_2P_2}} = \frac{\overline{F_2A_2}}{\overline{F_2H_2}} = \frac{\overline{A_2B_2}}{\overline{A_1B_1}} \quad (35)$$

En comparant les deux formules (31) et (32) on obtient :

$$\gamma = \frac{\overline{F_1H_1}}{\overline{F_1A_1}} = \frac{\overline{F_2A_2}}{\overline{F_2H_2}} = -\frac{\overline{H_1F_1}}{\overline{F_1A_1}} = -\frac{\overline{F_2A_2}}{\overline{H_2F_2}} \quad (36)$$

Soit la formule de Newton : $\frac{\overline{H_1F_1}}{\overline{F_1A_1}} = \frac{\overline{F_2A_2}}{\overline{H_2F_2}} \Leftrightarrow \overline{F_1A_1} \cdot \overline{F_2A_2} = \overline{H_1F_1} \cdot \overline{H_2F_2} = f_1 \cdot f_2$ (37)

1.3 Cas particulier: milieux extrêmes identiques

Ce cas particulier est très important en pratique puisqu'il correspond à tous les systèmes optiques usuels (loupes, lentilles, lunettes, microscopes, lunettes astronomiques, ...) dont les faces d'entrée et de sortie baignent dans de l'air.

En posant : $\overline{H_1F_1} = f_1 = -\overline{H_2F_2} = -f_2$

on obtient les résultats suivants :

- Formule de conjugaison: $\frac{1}{\overline{H_2A_2}} - \frac{1}{\overline{H_1A_1}} = \frac{1}{f_2}$
- Formule de NEWTON : $\overline{H_1F_1} \cdot \overline{H_2F_2} = -f_2^2$
- Formule de grandissement : $\gamma = -\frac{f_1}{\overline{F_1A_1}} = -\frac{\overline{F_2A_2}}{f_2}$

4.2 Position des foyers

Le foyer objet F a pour image, à travers le système 1, le foyer objet du système 2. En appliquant la formule de Newton on obtient :

$$\overline{FF_1} \cdot \overline{F_2F_1'} = f_1 f_1' \Rightarrow \overline{FF_1} = \frac{f_1 f_1'}{F_2 F_1'} \quad (38)$$

Le foyer image F_1' (objet) a pour image, à travers le système 2, le foyer image F' . En appliquant la formule de Newton on obtient :

$$\overline{F'F_2'} \cdot \overline{F_1'F_2} = f_2 f_2' \Rightarrow \overline{F'F_2'} = \frac{f_2 f_2'}{F_1' F_2} \quad (39)$$

Définition: L'intervalle optique est la quantité définie par:

$$\Delta = \overline{F_1'F_2} = \overline{F_1'H_1} + \overline{H_1H_2} + \overline{H_2F_2} = f_1' + \overline{H_1H_2} + f_2 = f_1' + e + f_2 \quad (40)$$

Avec $e = \overline{H_1H_2}$

4.3 Calcul des distances focales

La distance focale image f' du système peut être déterminée par application de la formule :

$$\overline{H_2F'} = f' = \frac{f_1' f_2'}{F_2 F_1'} = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta} \quad (41)$$

De même on trouve pour f : $\overline{H_1F} = f = \frac{f_1 f_2}{F_1' F_2} = \frac{f_1' f_2'}{\Delta}$ (42)

4.4 Formule de GULLSTRAND

Le nouveau système a pour vergence :

$$V = \frac{n_2}{f} = -\frac{n_2 \overline{F_1'F_2}}{f_1'f_2'} \quad (43)$$

Dans cette expression, si on fait alors apparaître les vergences du dioptre (1) et du dioptre (2)

$$V_1 = \frac{n}{f_1'} = -\frac{n_1}{f_1'}; V_2 = \frac{n_2}{f_2'} = -\frac{n}{f_2'}$$

on aura: $V = V_1 + V_2 - e \frac{V_1 V_2}{n}$ (44)

La formule de Gullstrand

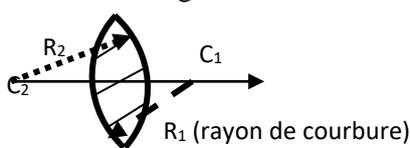
VI.5 Les Lentilles

5.1 Lentilles à bords épais et à bords minces

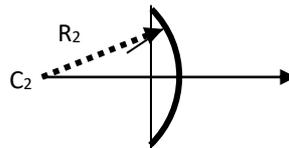
1.1 Définition

Une lentille est un système centré formé par un milieu transparent, homogène et isotrope limité par deux surfaces sphériques (de rayons R_1 et R_2) baignant dans un même milieu.

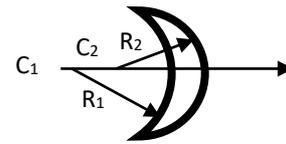
Les lentilles à bords minces (biconvexe, plan-convexe, ménisque à bords minces) sont des lentilles convergentes.



Lentille biconvexe

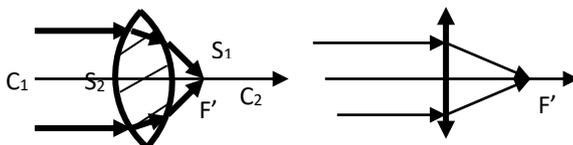


Lentille plan-convexe

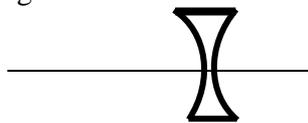


Ménisque convergent

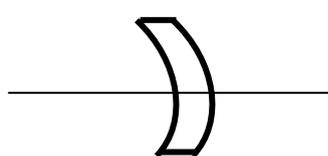
Les lentilles convergentes convergent un faisceau parallèle en un seul point.



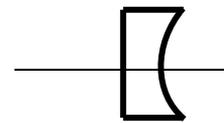
Les lentilles à bords épais (biconcave, plan-concave, ménisque à bords épais) sont des lentilles divergentes.



lentille biconcave

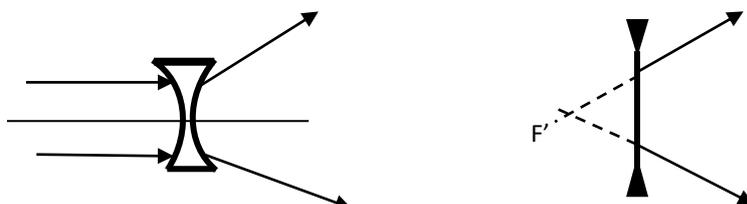


Ménisque divergent



Lentille plan-concave

Les lentilles divergentes divergent un faisceau parallèle à partir d'un point.



1.2 Calcul des distances focales de la lentille.

Pour effectuer les calculs il suffit de considérer que la lentille est formée par l'association de deux systèmes centrés :

Le dioptre d'entrée de rayon $\overline{S_1C_1} = R_1$

Avec, $n_1 = 1$ et $n_2 = n$, les points H_1 et H'_1 confondus avec S_1 .

Le dioptre de sortie de rayon $\overline{S_2C_2} = R_2$

Avec, $n_1 = n$ et $n_2 = 1$, les points H_2 et H'_2 confondus avec S_2 .

La vergence du dioptre d'entrée est : $V_1 = \frac{n-1}{\overline{S_1C_1}}$

La vergence du dioptre de sortie est : $V_2 = \frac{1-n}{\overline{S_2C_2}}$

En appliquant alors la formule de GULLSTRAND

$$V = \frac{n-1}{\overline{S_1C_1}} + \frac{1-n}{\overline{S_2C_2}} - e \frac{(n-1)^2}{n\overline{S_1C_1} \cdot \overline{S_2C_2}} \quad (45)$$

1.3 Position des foyers

On détermine la position du foyer objet F de la lentille en utilisant la formule :

$$\overline{F_1F} \cdot \overline{F'_1F_2} = f_1 \cdot f'_1 \quad (46)$$

On détermine la position du foyer image F' de la lentille en utilisant la formule :

$$\overline{F_2F'_1} \cdot \overline{F_2F'} = f_2 \cdot f'_2 \quad (47)$$

L'intervalle optique dans le cas des lentilles s'écrit:

$$\Delta = \overline{F'_1F_2} = \overline{F'_1S_1} + \overline{S_1S_2} + \overline{S_2F_2} = -f'_1 + e + f_2 \quad (48)$$

Soit

$$\Delta = \overline{F'_1F_2} = \overline{F'_1S_1} + \overline{S_1S_2} + \overline{S_2F_2} = e - (f'_2 + f'_1) \quad (49)$$

5.2 Lentilles minces

En optique, une lentille est dite mince si on peut confondre les sommets S_1 , S_2 et le centre optique O. Dans ce cas l'épaisseur e est négligée devant les rayons de courbure des faces :

$$e \ll R_1 \text{ et } e \ll R_2$$

La vergence de la lentille ne dépend pas de e et, est simplement exprimée par la relation:

$$\left. \begin{aligned} \frac{n_2}{\overline{SA_1}} - \frac{n_1}{\overline{SA}} &= \frac{n_2 - n_1}{\overline{SC_1}} \\ \frac{n_3}{\overline{SA'}} - \frac{n_2}{\overline{SA_1}} &= \frac{n_3 - n_2}{\overline{SC_2}} \end{aligned} \right\} + \left\{ \frac{n_3}{\overline{SA'}} - \frac{n_1}{\overline{SA}} = \frac{n_2 - n_1}{\overline{SC_1}} + \frac{n_3 - n_2}{\overline{SC_2}} \right.$$

supposons que $n_1 = n_3 = n_{ext}$ et $n_2 = n$;

$$\frac{1}{\overline{SA'}} - \frac{1}{\overline{SA}} = \left(1 - \frac{n}{n_{ext}}\right) \left[\frac{1}{\overline{SC_2}} - \frac{1}{\overline{SC_1}} \right] = \left(1 - \frac{n}{n_{ext}}\right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right)$$

Plonger dans l'air ($n_{ext} = 1$)

$$\frac{1}{SA'} - \frac{1}{SA} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (50)$$

La vergence d'une lentille mince est par définition:

$$V = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (51)$$

Une lentille mince est alors définie par la connaissance de la distance focale.

Les points principaux étant confondus avec le centre optique, on retrouve les formules des lentilles minces avec origine au centre optique.

- Formule de conjugaison $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{OF'} = \frac{1}{f'}$ (52)

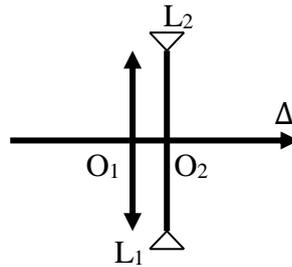
- Grandissement $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$ (53)

5.3 Association de Lentilles minces

3.1 Lentilles minces accolées

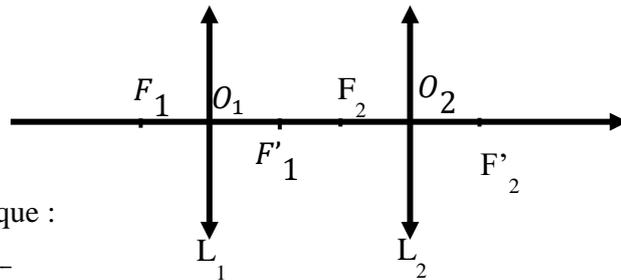
$$O_1 = O_2 = O$$

$$(AB) \xrightarrow{1^{ere} \text{ lentille}} (A_1B_1) \xrightarrow{2^{eme} \text{ lentille}} (A'B')$$



$$V = \frac{1}{f'} = \sum_i \frac{1}{f_i} = \sum_i V_i \quad \gamma = \prod_i \gamma_i$$

3.2 Lentilles minces non accolées



Un doublet est caractérisé par (p, q, r) tel que :

$$\frac{f'_1}{p} = \frac{d}{q} = \frac{f'_2}{r} = a. \text{ Avec } q > 0 \text{ et } d = \overline{O_1O_2}$$

Foyers du doublet

Lentilles convergentes : p et $r > 0$, Lentilles divergentes p et $r < 0$.

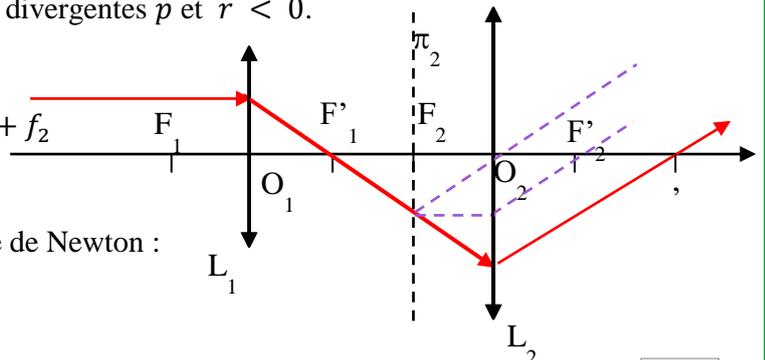
Intervalle optique :

$$\Delta = \overline{F'_1F_2} = \overline{F'_1O_1} + \overline{O_1O_2} + \overline{O_2F_2} = -f'_1 + d + f_2$$

Foyer image :

(F'_1, F') conjugués par rapport à $L_2 \Rightarrow$ formule de Newton :

$$\overline{F_2F'_1} \cdot \overline{F_2F'} = f_2 f'_2 = -f_2'^2 ;$$

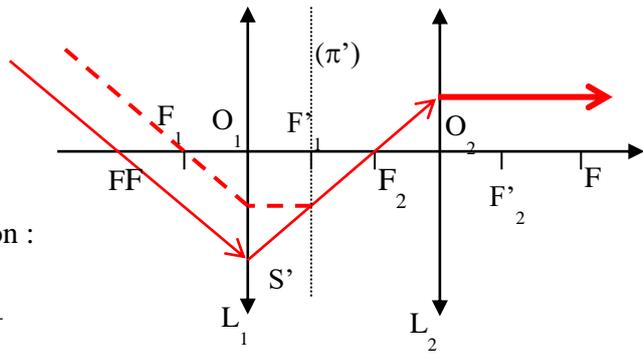


$$\overline{F_2'F'} = \frac{f_2'^2}{\Delta}$$

Foyer objet

(F, F_2) conjugués dans $L_1 \Rightarrow$ formule de Newton :

$$\overline{F_1F} \cdot \overline{F_1'F_2} = f_1 f_1' = -f_1'^2 \quad ; \quad \overline{F_1F} = -\frac{f_1'^2}{\Delta}$$



Distances focales

Distance focale image : $f' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta}$; Distance focale objet : $f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}$

Remarque : Nature du doublet

- Si F est avant la lentille L_1 et F' après la lentille L_2 alors le doublet est dit positif convergent ;
- Si F est après la lentille L_1 et F' avant la lentille L_2 nous avons un doublet négatif divergent

Exercice 23. Soient deux lentilles minces accolées ($V_1 = 3\delta, \gamma_1 = 5; V_2 = 5\delta, \gamma_2 = 10$). La vergence et le grandissement de l'ensemble sont :

- A) $V = 15\delta, \gamma = 50$; B) $V = 8\delta, \gamma = 50$; C) $V = 15\delta, \gamma = 15$; D) $V = 8 m^{-1}, \gamma = 50$;
 E) Aucune réponse ne convient

Exercice 24. Soient deux lentilles minces non accolées ($V_1 = -3\delta, \gamma_1 = 5; V_2 = 5\delta, \gamma_2 = -5$). La vergence et le grandissement de l'ensemble sont :

- A) $V = -15\delta, \gamma = -25$; B) $V = 2\delta, \gamma = -25$; C) $V = -15\delta, \gamma = 0$; D) $V = 2 m^{-1}, \gamma = -25$; E) Aucune réponse ne convient.

V. Instruments d'optique remarquables :

l'œil, la loupe, le microscope, la lunette astronomique et le télescope.

V.1 Généralités sur les instruments optiques

Deux types d'instrument optique:

- objectif : instrument qui produit des images réelles
- subjectif : instrument qui produit des images virtuelles

Caractéristiques remarquables :

- La clarté : caractérise la luminosité de l'image.
- Le grandissement transversal et angulaire
- Le champ : caractérise la portion de l'objet qui peut être observée.
- Le pouvoir de résolution ou pouvoir séparateur : caractérise la finesse des détails que l'instrument permet d'observer.

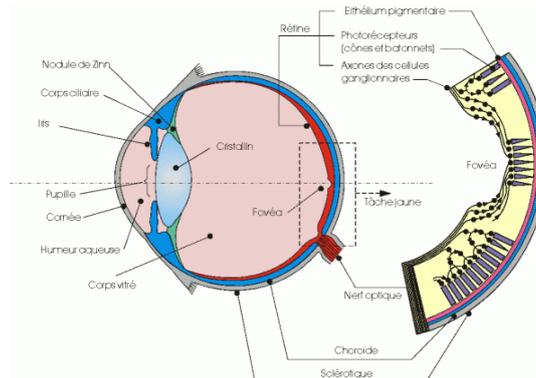
V.2 L'ŒIL

L'œil est l'organe de la vision. Il peut examiner directement des objets ou examiner des images de ces objets fournies par des instruments d'optique (loupes, microscopes, lunettes). Son rôle est fondamental dans l'étude de l'optique.

2. 1 Descriptions et propriétés de l'œil.

2.1.1. Description complète : l'œil physiologique

Le rayon de l'œil est d'environ 12mm. Le rayon de la cornée est d'environ 8mm. Le cristallin a une épaisseur d'environ 4mm; les rayons de courbure de ses faces sont respectivement égaux à 10 mm et 6 mm.



Les éléments principaux de l'œil :

- la cornée : agit comme un dioptre sphérique,
- l'iris : agit comme un diaphragme en contrôlant la quantité de lumière entrant,
- le cristallin : agit comme une lentille convergente de focale variable,
- la rétine : écran sur lequel des cellules photosensibles transforment la lumière en influx nerveux,
- la fovéa ou tache jaune : est une partie de la rétine qui permet d'analyser l'image de manière plus fine. Elle est constituée de cellules photosensibles de diamètre $\sim 4 \mu\text{m}$ s'étalant sur une surface de $\sim 1\text{mm}$,
- humeur vitrée : liquide transparent d'indice $n \sim 1.4$,

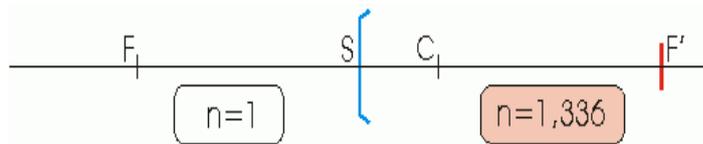
La distance moyenne entre le cristallin et la rétine est de 25mm,

L'œil est un milieu homogène : l'indice varie de 1,36 au bord à 1,42 sur l'axe. L'écran sur lequel se forme l'image observée est la rétine. Un point est vu nettement si son image se forme sur la fovéa. Pour la vision nette de points différents l'œil effectue des rotations rapides dans son orbite autour d'un point O qui est le centre du globe oculaire.

La lentille convergente de l'œil est une lentille épaisse d'une puissance totale d'un peu plus de 60 dioptries. Elle est composée de deux lentilles principales :

- La face antérieure de la cornée d'une puissance de 40 à 45 dioptries ;
- Le cristallin (une succession de transitions) d'une puissance d'environ 22 dioptries.

2.1.2 Œil simplifié



Les distances focales objet et image de l'œil de rayon de courbure $\overline{SC} = 6\text{mm}$ sont :

$$\overline{SF'} = f' = \frac{1,336 \times 6}{1,336 - 1} = 23,85\text{mm} \quad (50)$$

$$\overline{SF} = f = -\frac{1 \times 6}{1,336 - 1} = -17,85\text{mm} \quad (51)$$

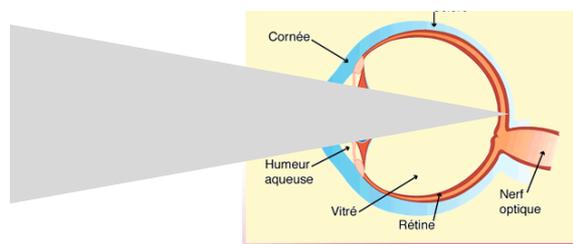
2.2. Champ de l'œil

2.2.1 Champ angulaire

Seuls sont vus nettement les points de l'espace dont l'image se forme sur la fovéa. Si l'œil est immobile et la tête fixe, le champ angulaire de l'œil est défini par le cône qui s'appuie sur les bords de la fovéa et dont le sommet O est le centre optique de l'œil. Son angle au sommet est d'environ 1° . Mais la rotation de l'œil accroît l'étendue du champ qui peut atteindre jusqu'à 40° .

2.2.2. Champ en profondeur

L'œil est dit normal quand l'image A' d'un objet A très éloigné se forme sur la rétine. Pour un œil normal au repos, le foyer image Fo' est donc sur la rétine, ou plus exactement au centre de la fovéa. Si on rapproche l'objet, l'œil étant toujours au repos, son image se déplace et se forme en arrière de la rétine.



2.3 Accommodation et défauts de l'œil

L'accommodation est l'aptitude des yeux à subir des changements pour voir des objets situés à distances différentes.

L'œil doit réaliser une image nette sur la rétine, c'est à dire à une distance fixe bien définie de la lentille équivalente de l'œil. Pour obtenir ces images nettes, d'objets situés à des distances variables de l'œil (p variable) et alors que l'image se trouve nécessairement sur la rétine ($p'=$ constante), la seule possibilité est de faire varier f' . Ce "réglage" de f' s'effectue par déformation du cristallin. On dit que l'œil **ACCOMMODE**.

2.3.1 Œil normal



Le point le plus éloigné, sur l'axe, qui donne une image rétinienne nette est le PUNCTUM REMOTUM (R). Pour un œil normal R est à l'infini. Le point le plus proche, sur l'axe, en deçà

duquel l'œil ne peut pas voir les objets est le PUNCTUM PROXIMUM (P). Pour un œil normal P est situé 20 à 30 cm en avant de la cornée.

2.3.2 Œil myope



L'œil est trop convergent. Le foyer image est naturellement en avant de la rétine. Le PUNCTUM REMOTUM R est à distance finie alors que le PUNCTUM PROXIMUM P est plus proche de la cornée.

L'image d'un objet ponctuel à l'infini ne se forme pas sur la rétine (pas de possibilité d'accommodation qui rendrait la lentille encore plus convergente !). Pour "soigner" cette œil on lui adjoint une lentille de correction---->lentilles "accolées". Les myopes portent donc des "lunettes divergentes", la distance focale des lentilles divergentes est telle qu'au repos, l'œil, comme l'œil normal, voit nettement les objets situés à l'infini.

2.3.3 Œil hypermétrope



L'œil n'est pas assez convergent. L'image d'un point objet (réel) sur la rétine est une tache. Le PUNCTUM REMOTUM R est virtuel tandis que le PUNCTUM PROXIMUM P est plus éloigné de la cornée. Pour soigner cet œil on lui adjoint une lentille correctrice convergente.

2.3.4 Presbytie.

Le cristallin ne se déforme plus ---> l'œil voit difficilement sinon pas du tout. Il n'est plus assez convergent pour la vision de près. Comme pour les hypermétropes, on adjoint à l'œil, pour la vision de près, des verres correcteurs convergents.

2.3.5 Astigmatisme .

L'œil comporte des défauts de constitution (il n'est pas de symétrie autour de son axe principale). Il ne donne pas, d'un objet ponctuel une image elle-même ponctuelle. On corrige l'œil en compensant ces défauts généralement selon des axes particuliers.

2.4. Limites

2.4.1 limite de perception

La limite de perception est le diamètre apparent minimal que doit avoir un objet pour être vu. Elle dépend de la forme de l'objet et des conditions d'éclairement. Quand ces dernières sont normales, l'expérience donne 2" d'arc.

2.4.2 Le pouvoir séparateur

En première approximation on peut assimiler l'œil à un instrument composé d'une lentille mince de focale variable (le cristallin) et un écran (la rétine). Le pouvoir séparateur correspond au plus petit détail que l'œil est capable de distinguer. Celui-ci peut être mesuré à l'aide d'une « mire de Foucaut » (voir Figure) constituée d'une trame de bandes parallèles noires et blanches équidistantes. Lorsque l'on éloigne progressivement la mire de l'œil, à une certaine distance d , l'œil cesse de distinguer les bandes noires des blanches et atteint une sensation de gris. Soit a la distances entre les bandes, le pouvoir séparateur s'écrit :

$$\varepsilon = \frac{a}{d} \quad (52)$$

Un ordre de grandeur : $\varepsilon \approx 4 \cdot 10^{-4}(\text{rad})$.

Au minimum de vision distincte (i.e. au punctum proximum $d_m \sim 25 \text{ cm}$), le pouvoir séparateur de l'œil correspond à des détails $\sim 0.01 \text{ mm}$. La loupe et le microscope permettent d'abaisser ces limites.

2.4.3 Limite de résolution ou acuité visuelle.

La limite de résolution de l'œil est la plus petite distance angulaire.

Remarque : la taille de l'image rétinienne correspondante est donnée par :

$$\overline{SF'} \cdot \frac{\varepsilon}{n} = 23 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3 \cdot 10^{-4}}{1,336} \approx 5,2 \mu m \quad (53)$$

Exercice 25. Comment l'œil humain arrive-t-il à former des images sur la rétine quelle que soit la distance de l'objet qu'il observe?

- A) Grace au cristallin, capable de modifier son propre rayon de courbure,
- B) A l'aide de la pupille qui se comporte comme une lentille divergente,
- C) A l'aide du cristallin dont le rayon de courbure ne varie pas,
- D) Par accommodation en modifiant le rayon de courbure du cristallin

Exercice 26. Comment l'œil humain contrôle-t-il la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil?

- A) En ajustant le diamètre du cristallin par la contraction,
- B) En modifiant l'indice de réfraction de l'humeur aqueuse,
- C) En ajustant le diamètre de la pupille par la contraction ou le relâchement de l'iris.

Exercice 27. Pourquoi les phares d'une voiture qu'on croise la nuit ont-ils tendance à nous éblouir, alors que les phares allumés de cette même voiture rencontrée le jour nous affectent très peu?

- A) L'iris laisse entrer plus de lumière dans l'œil lorsque la luminosité est faible,
- B) Le cristallin diminue et augmente son rayon de courbure
- C) La pupille laisse entrer plus de lumière dans l'œil lorsque la luminosité est faible,
- D) L'iris laisse entrer moins de lumière dans l'œil lorsque la luminosité est forte

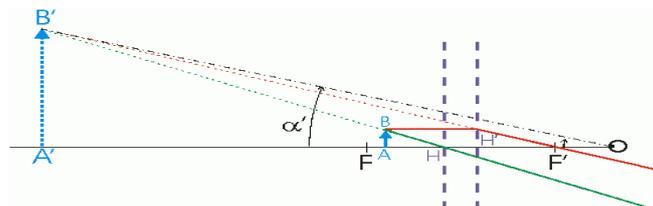
V.2 LOUPES, OCULAIRES, MICROSCOPES

Le but de ces instruments est de donner, d'un petit objet, une image virtuelle sous un diamètre apparent aussi grand que possible et située, au Punctum Remotum de l'observateur.

2.1 La Loupe

2.1.1 Principe de l'instrument.

La loupe est une lentille convergente destinée à observer des petits détails qui ne seraient pas décelables à l'œil nu (ou difficilement). Cette lentille convergente a une petite distance focale (2 à 5 cm). Elle doit donner une image virtuelle, droite et agrandie.



L'objet est donc placé entre la lentille et son foyer objet, très près de celui-ci avec l'œil placé près du foyer image de la loupe.

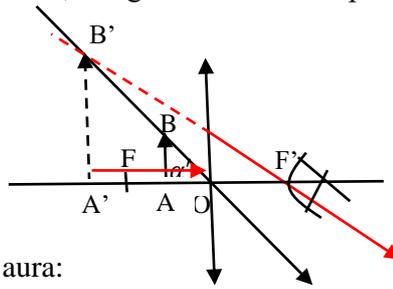
2.1.2 La puissance de la loupe

La puissance P d'un instrument d'optique est définie par le rapport du diamètre apparent α' de l'image à la taille AB de l'objet :

$$P = \frac{\alpha'}{AB} \quad (54)$$

Dans les conditions de l'approximation de GAUSS, l'angle α' reste assez petit de telle sorte que :

$$\alpha' \approx \tan \alpha' = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OA'}} \quad (55)$$



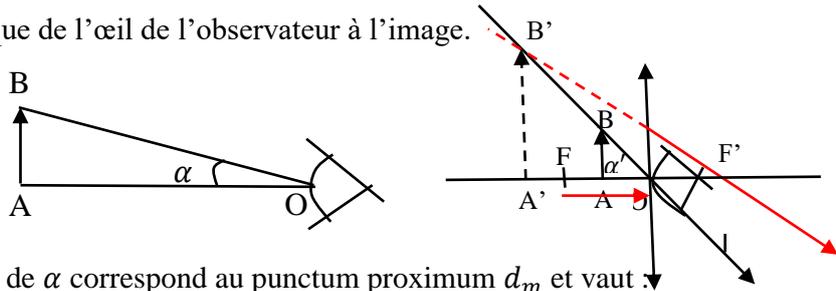
Posons $\chi = \overline{OA'}$ la distance de visée, alors on aura :

$$P = \frac{\alpha'}{AB} = \frac{\overline{A'B'} \overline{AB}}{\overline{AB} \overline{OA'}} = \frac{\overline{A'F'} \overline{AB}}{f' \overline{OA'}} = \frac{\overline{A'O} + \overline{OF'} \cdot 1}{f' \chi} = \frac{\chi - a}{f' \chi} = \frac{1}{f'} \left(1 - \frac{a}{\chi}\right) \quad (56)$$

$a = \overline{F'A'}$ - La mesure algébrique de l'œil de l'observateur à l'image.

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{\overline{AB}}{\overline{AO}} = \frac{\overline{AB}}{d}$$

d - Distance objet-œil



La plus grande valeur possible de α correspond au punctum proximum d_m et vaut :

$$\alpha_{pp} \approx \tan \alpha = \frac{\overline{AB}}{\overline{AO}} = \frac{\overline{AB}}{d_m} \quad (57)$$

En plaçant l'œil au foyer image de la lentille, l'objet AB a pour image $A'B'$ vu sous l'angle α' .

$$\alpha' \approx \tan \alpha' = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A'O}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{F'A'}}$$

Pour observer l'image $A'B'$ sans accommoder (autrement dit sans fatiguer l'œil), il faut que cette image soit placée à l'infini. Pour cela il suffit de placer l'objet au niveau du plan focal objet de la loupe, soit $\overline{OA} = f'$, d'où $\alpha' = \frac{\overline{AB}}{f'}$

de sorte que la puissance vaut alors :

$$P_i = \frac{1}{f'} \quad (58)$$

dite puissance intrinsèque. La puissance intrinsèque permet de comparer les instruments entre eux dans des conditions normalisées.

N B : On donne en général pour une loupe le grossissement commercial associé à l'œil normal observant à l'infini :

$$G_c = \frac{P_i}{4} = \frac{1}{4f'} \quad (59)$$

2.1.2 Grossissement

Par définition le grossissement est :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} \tag{60}$$

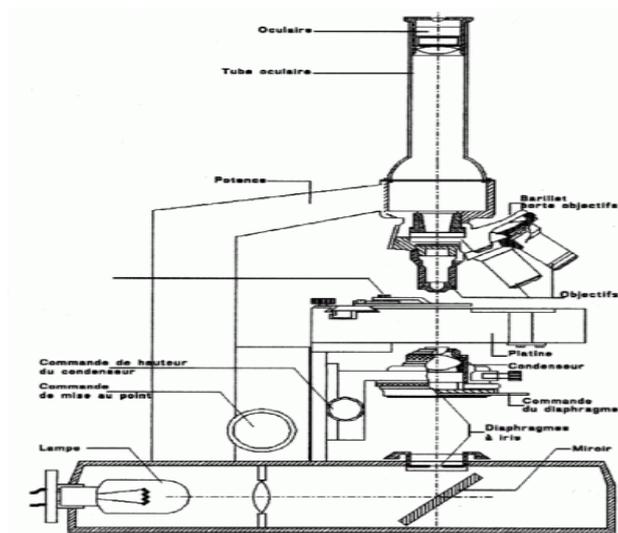
Le grossissement commercial (G_c) est la valeur particulière de G lorsque que l'on observe l'objet à l'œil nu en le plaçant au punctum proximum (d_m) et en le plaçant ensuite dans le plan objet de la loupe (autrement dit le grossissement commercial est le rapport entre l'angle sous lequel on voit $A'B'$, l'image de AB , placée à l'infini et l'angle sous lequel on voit l'objet à l'œil nu et à une distance d_m). On a alors :

$$G_c = \frac{d_m}{f'} \text{ ou } G_c = P_i d_m \tag{61}$$

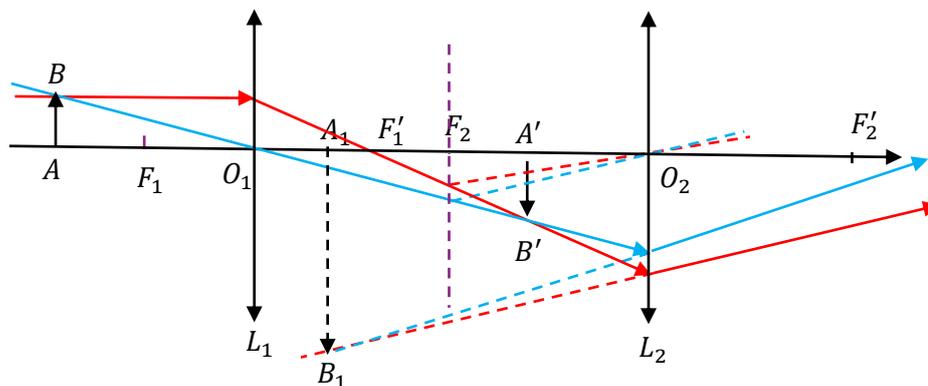
On voit donc bien que la loupe grossie d'autant plus que la distance focale est petite.

2.2 Le microscope

Le microscope (voir Figure)



est constitué de l'association de deux lentilles convergentes, L_1 et L_2 , la première étant appelée l'objectif et la deuxième l'oculaire. La distance entre F'_1 et F_2 est caractéristique de l'instrument ; elle sera notée Δ par la suite. La distance de L_1 à l'objet peut en revanche être réglée par un système à crémaillère. Soit $(A'B')$ l'image de (AB) à travers la lentille L_1 . L_2 donne de $(A'B')$ une image virtuelle (A_1B_1) . Pour observer l'image (A_1B_1) avec l'œil sans accommoder, il faut qu'elle soit placée à l'infini et donc placer $(A'B')$ sur le plan focale objet de L_2 (deuxième figure)

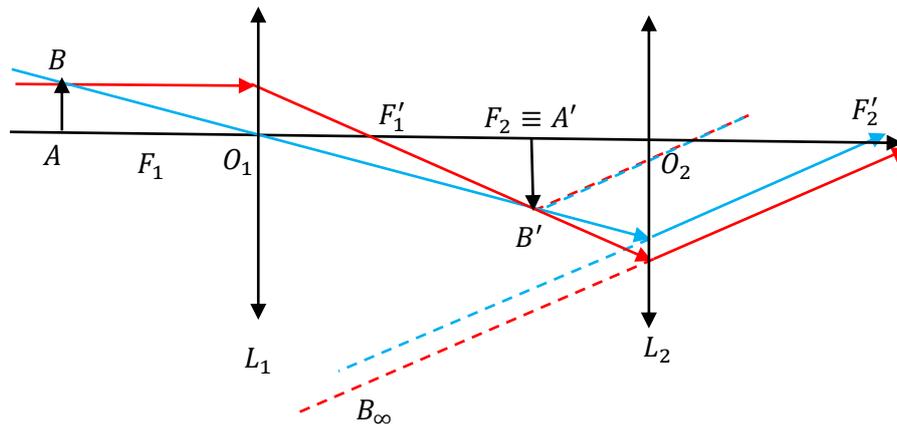


2.2.1 La puissance du microscope

La puissance peut s'écrire de manière générale comme :

$$P = \frac{\alpha'}{AB} = \frac{\overline{A'B'}}{AB} \frac{\alpha'}{A'B'} = |\gamma_1| P_2 \quad (62)$$

où P_2 est la puissance de l'oculaire et g_1 le grandissement de l'objectif. La puissance intrinsèque (P_i) correspond à la puissance obtenue lorsque l'image est à l'infini (i.e. lorsque $A' = F_2$). Par ailleurs le microscope est construit de manière à ce que $f_1' \ll \Delta$.



On établit alors les relations suivantes :

$$P_2 = \frac{1}{f_2}$$

$$\gamma_1 = \frac{\overline{A'B'}}{AB} = \frac{\overline{O_1A'}}{O_1A} = \frac{\overline{F_1'A'}}{f_1'} = -\frac{\Delta}{f_1'} \quad (63)$$

D'où

$$P_i = \frac{\Delta}{f_1' f_2'} \quad (64)$$

2.2.2 Le grossissement

Le grossissement commercial, G_c est le rapport entre l'angle α' lorsque l'image est placée à l'infini et l'angle α sous lequel on voit l'objet à l'œil nu à la distance d_m (i.e. au punctum proximum), soit

$$G_c = \frac{\alpha'_\infty}{4\alpha}$$

Or, $\alpha'_\infty = \frac{\overline{A'B'}}{f_2'} = \gamma_1 \frac{\overline{AB}}{f_2'}$; $\alpha_p = \frac{\overline{AB}}{d_m}$

$$\text{D'où } G_c = \frac{\alpha'_\infty}{4\alpha_p} = \frac{\Delta d_m}{4f_1' f_2'} \quad (65)$$

qui peut s'écrire aussi :

$$G_c = \frac{\alpha'_\infty}{4\alpha_p} = \frac{\Delta d_m}{4f_1' f_2'} = \frac{1}{4} \gamma_1 G_{c,2} \quad (66)$$

avec $G_{c,2}$ le grossissement commercial de l'oculaire. Le grossissement commercial est donc le produit du grandissement de l'objectif et du grossissement commercial de l'oculaire. On voit donc l'intérêt d'associer deux lentilles car on peut obtenir de forts grossissements tout en conservant l'ouverture de l'instrument ; en effet avec une loupe, pour obtenir un grossissement équivalent, on aurait dû utiliser une focale plus petite que l'objectif du microscope (L_1), donc une ouverture plus petite.

Références

- Reza Samadi. Cours d'Optique géométrique. Université Pierre et Marie Curie, Licence 1er année,

