Optique – chapitre 2

Base de l'optique géométrique

Sommaire

Capacités exigibles

- ▢ Définir le modèle de l'optique géométrique et indiquer ses limites.
- ▢ Énoncer les lois de Snell-Descartes.
- ▢ Définir une convention d'orientation des angles et travailler avec des angles orientés.
- ▢ Savoir que l'interprétation par le cerveau de la trajectoire des rayons lumineux joue un rôle dans certains phénomènes optiques.
- ▢ Connaître le vocabulaire des systèmes optiques.
- ▢ Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences.
- ▢ Établir les conditions de réflexion totale.
- ▢ Utiliser les lois de Snell-Descartes.
- ▢ Identifier la nature réelle ou virtuelle d'un objet ou d'une image.
- ▢ Dessiner des rayons lumineux à travers un système optique de manière cohérente avec les indices optiques.
- ▢ Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.

L'essentiel

Définitions

Notations

Propriétés

Démonstrations

Implications

Erreurs communes

I Propriétés générales

I/A Optique non géométrique : diffraction de la lumière

I/A) 1 Principe

La nature ondulatoire de la lumière apparaît clairement lors des expériences de diffraction : dans certains cas, la restriction d'un faisceau lumineux (par exemple un laser) par une fente, donne sur un écran placé loin derrière, un étalement de la lumière **plus large** que la largeur de la fente.

Ce phénomène survient quand l'extension spatiale d'une onde est limitée ; cela arrive également avec les vagues dans l'eau. En effet, pour des valeurs de largeur de fente $a \gg \lambda$, il n'y a bien qu'une coupure du faisceau. En revanche, quand $a \approx \lambda$, ce phénomène survient. On observe même que plus a est petit, plus la lumière s'étale sur l'écran.

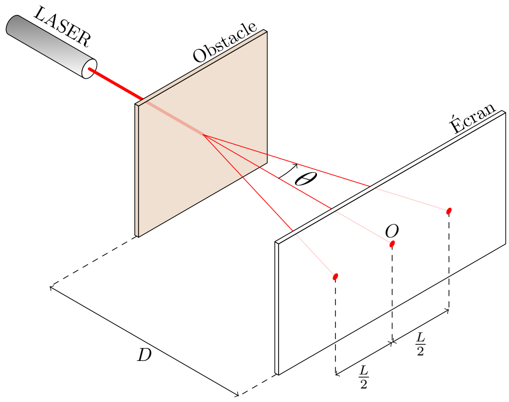

Figure 2.1 – Diffraction de Fraunhofer d'un faisceau laser par une fente fine.

I/A) 2 Loi de la diffraction

Propriété O2.1 : Diffraction par une fente simple

Un faisceau monochromatique de longueur d'onde λ dans le vide, limité spatialement par une fente de largeur $a \approx \lambda$, forme à grande distance sur un écran des tâches lumineuses dont le demi angle d'ouverture θ de la tâche centrale vérifie

$$\boxed{\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}}$$

I/B Approximation de l'optique géométrique

I/B) 1 Définition

Définition O2.1 : Approximation de l'optique géométrique

L'approximation de l'optique géométrique consiste à **négliger tout phénomène de diffraction** (et d'interférence, cf. chapitres plus avancés) pour ignorer le comportement ondulatoire de la lumière. Dans cette approche, la lumière est équivalente à un flux de particules *indépendantes*, sans interaction globale (propriété d'une onde) : c'est le modèle **corpusculaire**.

I/B) 2 Notion de rayon lumineux

Dans le cadre de l'optique géométrique, on décrit donc la lumière par la trajectoire des photons.

Définition O2.2 : Rayon et faisceau lumineux

Un rayon lumineux est une courbe orientée donnant la direction et le sens de propagation d'une onde lumineuse. Un faisceau est un ensemble de rayons.

Remarque O2.1 :

C'est un outil théorique : il est impossible d'isoler un rayon lumineux en pratique à cause de la diffraction.

I/B) 3 Propriétés d'un rayon lumineux

Propriété O2.2 : Propriétés d'un rayon lumineux

1) **Propagation rectiligne** : Dans un milieu TLHI, la lumière se propage en ligne droite.
2) **Indépendance des rayons** : Les rayons lumineux n'interfèrent pas entre eux. Notamment, un rayon ne peut pas en dévier un autre.
3) **Retour inverse** : Dans un milieu TLI, homogène ou non, si une source en A éclaire B, alors une source placée en B éclaire A.

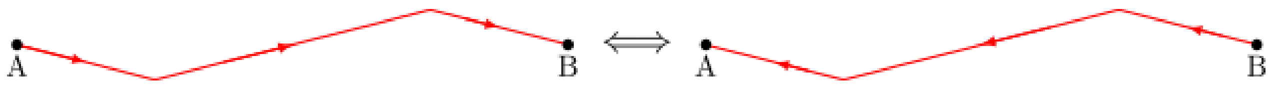

FIGURE 2.2 – Schématisation du principe de retour inverse de la lumière.

I/B) 4 Limites du modèle

- **Diffraction** : voir I/A ;
- **Phénomènes ondulatoires** : le modèle de rayon n'explique pas les interférences (voir plus tard dans l'année) ;
- **Polarisation** : en tant qu'oscillations des champs électrique et magnétique $\vec{E}$ et $\vec{B}$, elle est dotée d'une orientation et est à l'origine de nombreux phénomènes optiques (cinéma 3D par exemple) ;
- **Inhomogénéité** : dans un milieu inhomogène, la lumière ne se propage pas en ligne droite et donne lieux aux mirages.

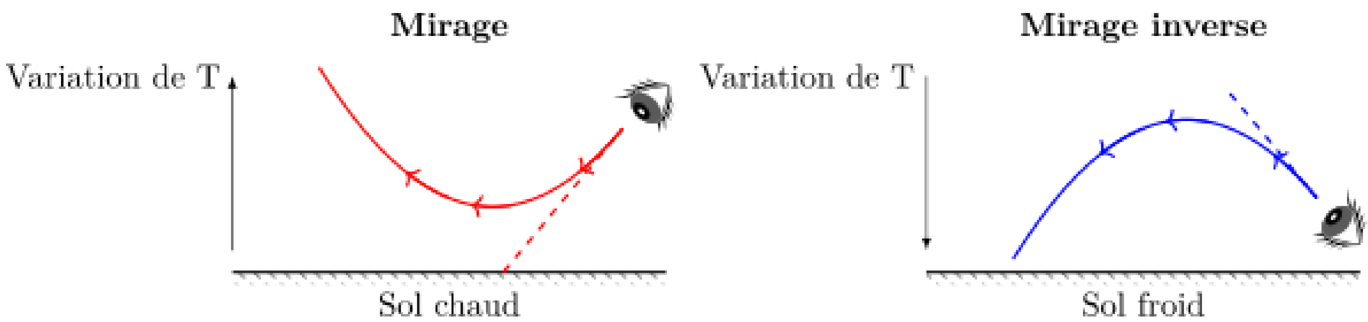

FIGURE 2.3 – Représentation d'un mirage chaud, où la lumière vient du ciel en regardant le sol, et d'un mirage froid, où c'est l'inverse.

II Lois de Snell-Descartes

II/A Changement de milieu

Définition O2.3 : Dioptre

On appelle « dioptre » la surface de séparation entre deux milieux transparents d'indices optiques différents.

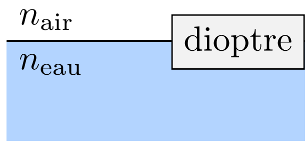

Figure 2.4 – Exemple de dioptre.

Propriété O2.3 : Réflexion, réfraction

Au niveau d'un dioptre, un rayon lumineux **incident** donne naissance à :

- un rayon réfracté (traversant le dioptre) ;
- un rayon réfléchi.

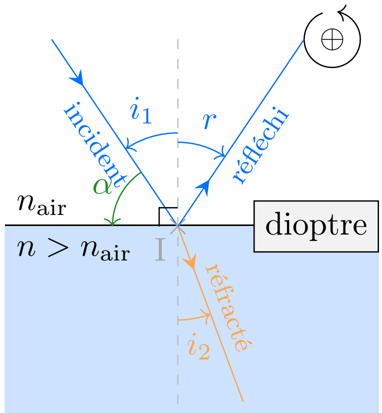

Figure 2.5 – Rayons incidents, réfléchis et réfractés sur un dioptre.

Notation O2.1 : Vocabulaire général

- **Point d'incidence** I : intersection du rayon incident avec le dioptre ;
- **Plan d'incidence** : contient le rayon incident et la normale au dioptre en I ;
- **Angle d'incidence** i_1 : angle entre la normale et le rayon incident ;
- **Angle de réflexion** r : angle entre la normale et le rayon réfléchi ;
- **Angle de réfraction** i_2 : angle entre la normale et le rayon réfracté.

Attention O2.1 : Calcul des angles

Les angles se calculent entre le rayon et la **normale** au dioptre. Le sens de comptage doit être indiqué sur la figure.

II/B Lois de Snell-Descartes

Propriété O2.4 : Lois de Snell-Descartes

Les rayons réfléchi et réfracté appartiennent au plan d'incidence, et respectent

$$\boxed{r = -i_1} \quad \text{et} \quad \boxed{n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)}$$

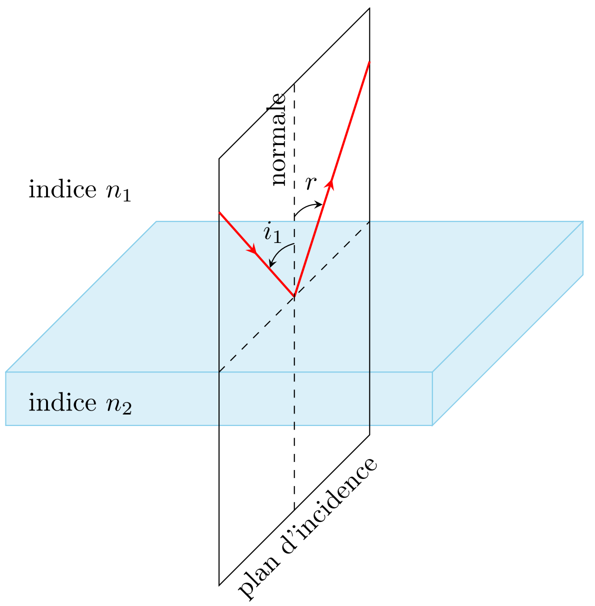

Figure 2.6 – Réflexion d'un rayon incident

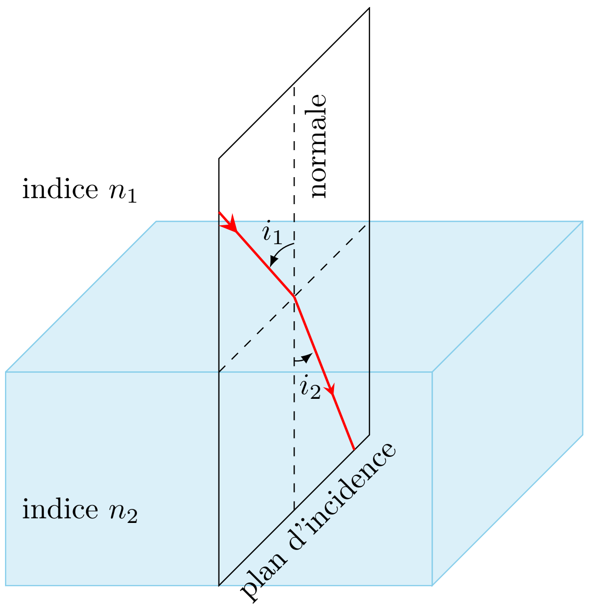

Figure 2.7 – Réfraction d'un rayon incident avec $n_2 > n_1$.

Implication O2.1 : Réfraction

On distingue 3 cas généraux pour la réfraction :

1) Si $\mathbf{i_1 = 0}$, alors $i_2 = 0$: en incidence dite « normale », il n'y a **pas de déviation** du rayon ;
2) Si $\mathbf{n_2 > n_1}$ [1], alors $|i_2| < |i_1|$: le rayon réfracté se **rapproche** de la normale ;
3) Si $\mathbf{n_2 < n_1}$ [2], alors $|i_2| > |i_1|$: le rayon réfracté **s'écarte** de la normale.

Par le principe du *retour inverse de la lumière*, le troisième point se déduit du deuxième.

II/C Phénomène de réflexion totale

À partir du moment où $n_2 > n_1$, le rayon réfracté se rapproche toujours de la normale, et existera toujours. En revanche, si $n_1 > n_2$, le rayon réfracté s'écarte de la normale. On considère qu'il existe uniquement s'il reste à l'intérieur du milieu n_2, soit par définition $|i_2| < \frac{\pi}{2}$rad.

1. On dit alors que le milieu 2 est *plus réfringent* que le milieu 1.
2. On dit alors que le milieu 2 est *moins réfringent* que le milieu 1.

Propriété O2.5 : Angle limite de réflexion totale

Lors du passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent ($n_1 > n_2$), il existe un angle incident limite i_{lim} au-delà duquel il n'y a pas de rayon réfracté : on parle de **réflexion totale**. On a

$$\boxed{|i_{\text{lim}}| = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)}$$

Démonstration O2.1 : Angle limite de réflexion totale

Soit i_{lim} l'angle d'incidence limite de réfraction, tel que $i_2 = \frac{\pi}{2}$. On a :

$$i_2 = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin(i_2) = 1$$

Or, $n_2 \sin(i_2) = n_1 \sin(i_{\text{lim}})$ d'après la loi de Snell-Descartes pour la réfraction. Ainsi,

$$\begin{aligned} n_2 \underbrace{\cancel{\sin(i_2)}}_{=1} &= n_1 \sin(i_{\text{lim}}) \\ \Leftrightarrow \frac{n_2}{n_1} &= \sin(i_{\text{lim}}) \\ \Rightarrow i_{\text{lim}} &= \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \end{aligned}$$

Exemple O2.1 : Réflexion totale

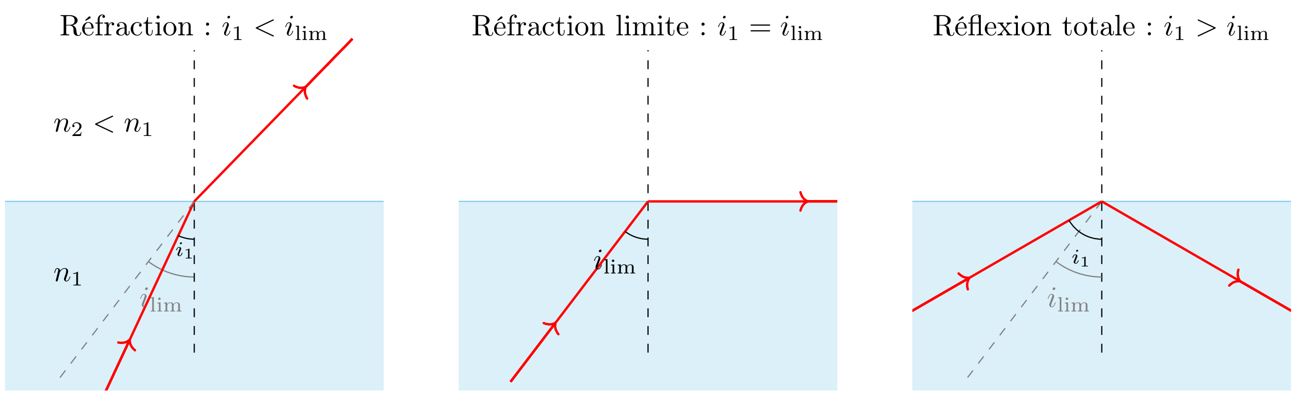

Figure 2.8 – Phénomène de réflexion totale

III Généralités sur les systèmes optiques

III/A Système, rayons, faisceaux.

Définition O2.4 : Système optique

On appelle **système optique** un ensemble de composants optiques (dioptres, miroirs) rencontrés successivement par les rayons lumineux.

Exemple

L'exemple le plus simple est le miroir plan.

♥ Définition O2.5 : Système centré, axe optique

C'est un système **invariant par rotation** autour d'un axe.

On l'appelle *axe optique*. **On l'oriente dans le sens de propagation de la lumière incidente**.

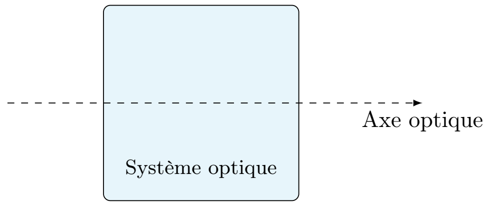

Figure 2.9 – Système optique centré.

Les distances sont considérées **algébriquement** (affectées d'un signe) : c'est une distance qui s'exprime en mètres, mais peut être négative selon l'orientation de l'axe optique et de la position relative des points.

Figure 2.10 – Distances algébriques.

♥ Définition O2.6 : Rayons incidents et émergents

- ◇ **Rayons incidents** : entrent par la face d'entrée.
- ◇ **Rayons émergents** : sortent par la face de sortie.

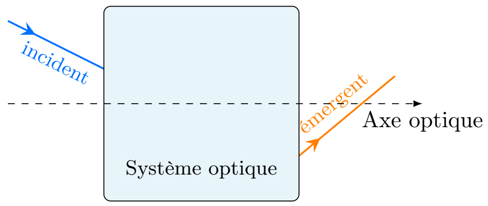

Figure 2.11 – Rayons incidents, émergents.

♥ Définition O2.7 : Nature d'un faisceau

- ◇ **Convergent** : intersection **dans le sens direct de propagation**.
- ◇ **Divergent** : intersection **dans le sens inverse de propagation**.
- ◇ **Parallèle** : pas d'intersection.

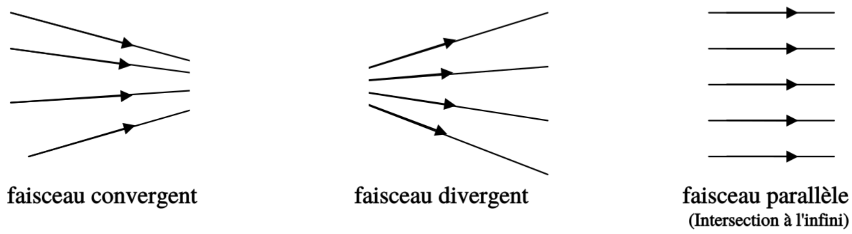

Figure 2.12 – Natures de faisceaux

III/B Objets et images

♥ Définition O2.8 : Objet et image

Point objet

Point d'intersection des rayons **incidents**.

Point image

Point d'intersection des rayons **émergents**.

Définition O2.9 : Réel et virtuel

Un point **objet** est **réel** s'il est placé **avant la face d'entrée** du système, et **virtuel sinon**.

Un point **image** est **réel** s'il est placé **après la face de sortie** du système, et **virtuel sinon**.

On trouve aussi les définitions suivantes, plus communément admises (mais plus verbeuses).

Définition O2.10 : Réel et virtuel, bis

Point objet

- **Réel** : faisceau incident **divergent**.
- **Virtuel** : faisceau incident **convergent**.

Point image

- **Réel** : faisceau émergent **convergent**.
- **Virtuel** : faisceau émergent **divergent**.

Exemple O2.2 : Objets et images réelles ou virtuelles

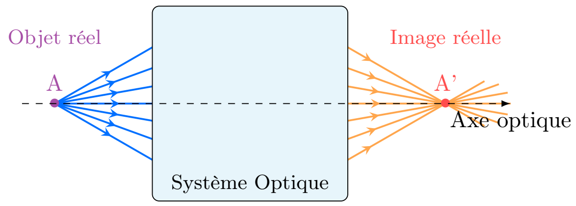

Figure 2.13 – Objet et image réelles.

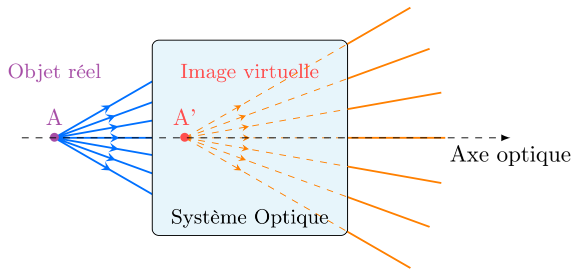

Figure 2.14 – Objet réel et image virtuelle.

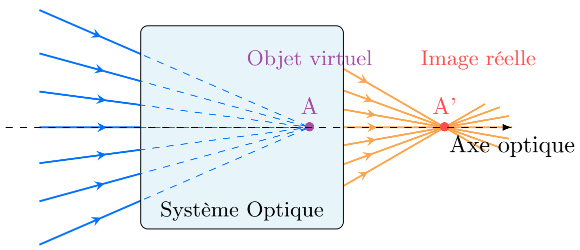

Figure 2.15 – Objet virtuel et image réelle.

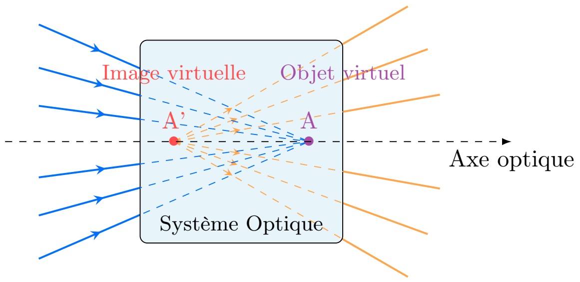

Figure 2.16 – Objet et image virtuelles.

Implication O2.2 : Espaces objet et image

Zones spatiales d'un système optique où un objet ou une image sera réel-le ou virtuel-le.

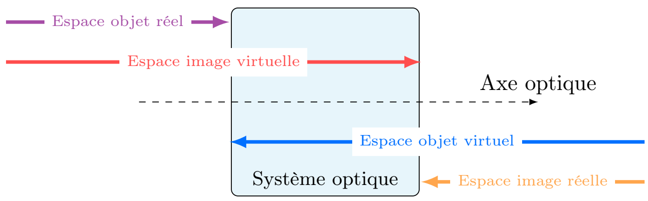

Figure 2.17 – Espaces objet et image.

Définition O2.11 : Conjugaison de 2 points

Un objet A et son image A' par un système S sont dits **conjugés**. On note :

$$\boxed{\mathrm{A} \xrightarrow{\mathrm{S}} \mathrm{A}'}$$

avec A un objet **pour S**, et A' est une image **pour S**.

Définition O2.12 : Objet étendu et angle apparent

- **Objet étendu** : ensemble de points objets continu, considéré comme une infinité de points objets
- **Angle apparent** d'un objet étendu : angle perçu (par un détecteur : œil, caméra...) entre les rayons émis par les extrémités de l'objet.

Définition O2.13 : Grandissement transversal

Soit $\overline{AB}$ un objet étendu avec A sur l'axe optique, passant par un système S donnant une image elle aussi étendue $\overline{A'B'}$. On appelle *grandissement transversal* et on le note γ le rapport

$$\boxed{\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}}$$

pour $AB \xrightarrow{S} A'B'$

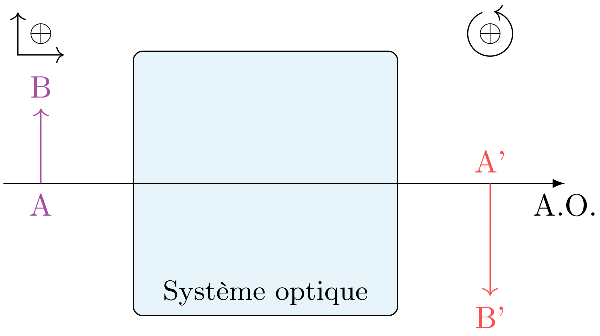

Figure 2.18 – Objet et image étendues.

III/C Foyers d'un système optique

Définition O2.14 : Foyers principaux image et objet

Foyer principal objet

Noté F, c'est le **point objet** dont **l'image est à l'infini** avec des rayons parallèles à l'axe optique.

Le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par F est appelé *plan focal objet*, π. On note

$$\boxed{F \xrightarrow{S} \underset{\text{sur l'axe optique}}{\infty}}$$

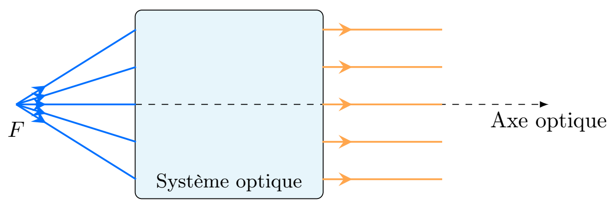

Figure 2.19 – Foyer principal objet.

Foyer principal image

Noté F', c'est le **point image** dont **l'objet est à l'infini** avec des rayons parallèles à l'axe optique.

Le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par F' est appelé *plan focal image*, π'. On note

$$\boxed{\underset{\text{sur l'axe optique}}{-\infty} \xrightarrow{S} F'}$$

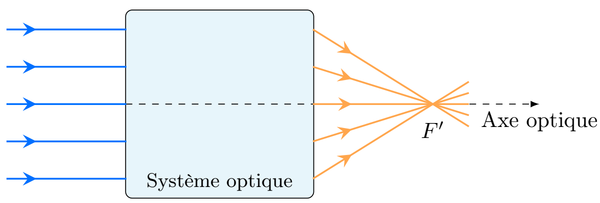

Figure 2.20 – Foyer principal image.

Remarque O2.2 : Retour inverse

Nous pouvons en quelque sorte déduire le fonctionnement du système optique dans le second cas en utilisant le principe du **retour inverse de la lumière**, en « remontant le film ».

Propriété O2.6 : Foyers principaux

- Rayons **incidents croisés en F** ⇒ **émergent parallèles** à l'axe optique ;
- Rayons **incidents parallèles à l'axe** ⇒ **émergent croisés en F'**.

Corollaire O2.1 : Foyers secondaires

- Rayons **incidents** $\parallel$ **entre eux** ⇒ émergent **croisés en** $\varphi' \in \pi'$;
- Rayons **incidents croisés en** $\varphi \in \pi$ ⇒ émergent **parallèles entre eux**.

IV Approximation de GAUSS

IV/A Stigmatisme, aplanétisme

Définition O2.15 : Stigmatisme

Stigmatique ⇔ rayons émis par un point objet A convergent en **un seul point** image A'. Inverse : l'image d'un point forme une **tâche**.

Définition O2.16 : Aplanétisme

Aplanétique ⇔ objet étendu $\overline{\mathrm{AB}}$ ⊥ à l'axe ⇒ une image $\overline{\mathrm{A'B'}}$ également ⊥ à l'axe.

IV/B Rigoureux ou approché ?

La plupart des systèmes optiques (lentilles, œil, appareil photo…) ne sont pas rigoureusement stigmatiques et aplanétiques : il arrive souvent qu'un point source forme une tâche sur un capteur (astigmatisme) ou qu'une droite soit vue courbée (non-aplanétisme). On peut cependant trouver des conditions dans lesquelles le stigmatisme et l'aplanétisme sont approchés, par exemple si la tâche formée par le système est plus petite que l'élément récepteur (pixel pour une caméra).

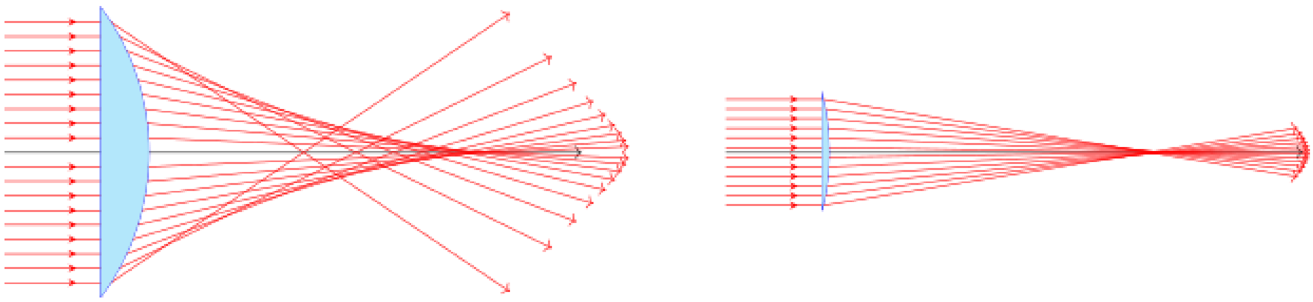

FIGURE 2.21 – Exemple d'un système astigmatique à gauche, stigmatique approché à droite.

IV/C Conditions de GAUSS

Définition O2.17 : Rayons paraxiaux

Des rayons sont **paraxiaux** s'ils sont :

1) peu éloignés de l'axe optique ;
2) peu inclinés par rapport à l'axe optique.

Propriété O2.7 : Approximation de GAUSS

Un système est dans les les conditions de GAUSS si les rayons sont paraxiaux. Dans ce cas, un système centré respecte les conditions de **stigmatisme et d'aplanétisme** *approchés*. On les **considérera** comme rigoureux tant dans les tracés que dans les calculs.