

Base de l'optique géométrique

Sommaire

I Propriétés générales	2
I/A Optique non géométrique : diffraction de la lumière	2
I/B Approximation de l'optique géométrique	2
II Changement de milieu	3
II/A Présentation	3
II/B Lois de SNELL-DESCARTES	4
II/C Phénomène de réflexion totale	4
III Généralités sur les systèmes optiques	5
III/A Système, rayons, faisceaux	5
III/B Objets et images	6
III/C Foyers d'un système optique	7
IV Stigmatisme et aplanétisme	8
IV/A Présentation	8
IV/B Conditions de GAUSS	8

Capacités exigibles

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ☐ 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. | <ul style="list-style-type: none"> ☐ 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

- ☐ O2.1 : Diffraction 2
- ☐ O2.2 : Approximation de l'optique géométrique 2
- ☐ O2.3 : Rayon et faisceau lumineux 2
- ☐ O2.4 : Dioptrie 3
- ☐ O2.5 : Système optique, centré, axe optique 5
- ☐ O2.6 : Rayons incidents et émergents 5
- ☐ O2.7 : Nature d'un faisceau 5
- ☐ O2.8 : Objet, image, réel et virtuel 6
- ☐ O2.9 : Conjugaison de 2 points, schéma synoptique 6
- ☐ O2.10 : Objet étendu et angle apparent 7
- ☐ O2.11 : Grandissement transversal 7
- ☐ O2.12 : Foyers principaux objet et image 7
- ☐ O2.13 : Stigmatisme et aplanétisme 8
- ☐ O2.14 : Rayons paraxiaux 8

Démonstrations

- ☐ O2.1 : Conditions de réflexion totale 5

Propriétés

- ☐ O2.1 : Diffraction par une fente simple 2
- ☐ O2.2 : Propriétés d'un rayon lumineux 2
- ☐ O2.3 : Réflexion, réfraction 3
- ☐ O2.4 : Lois de SNELL-DESCARTES 4
- ☐ O2.5 : Conditions de réflexion totale 4
- ☐ O2.6 : Foyers principaux et secondaires 7
- ☐ O2.7 : Approximation de GAUSS 8

Implications

- ☐ O2.1 : Réfraction 4
- ☐ O2.2 : Espaces objet et image 6

Erreurs communes

- ☐ O2.1 : Calcul des angles 3
- ☐ O2.2 : Fonction arcsin 5
- ☐ O2.3 : Distances algébriques 5

I Propriétés générales

I/A Optique non géométrique : diffraction de la lumière

Définition O2.1 : Diffraction

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 rien 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.

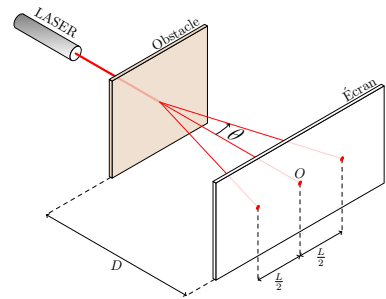


FIGURE O2.1 – Diffraction d'un laser par une fente fine.

Propriété O2.1 : Diffraction par une fente simple

Un faisceau monochromatique de longueur d'onde λ_0 dans le vide, limité spatialement par une fente de largeur $a \approx \lambda_0$, forme à grande distance sur un écran des tâches lumineuses dont le demi angle d'ouverture θ de la tâche centrale vérifie

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda_0}{a}$$

I/B Approximation de l'optique géométrique

Définition O2.2 : 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**.

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

Définition O2.3 : 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 : Limite du modèle

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

♥ Propriété O2.2 : Propriétés d'un rayon lumineux

- 1) **Indépendance des rayons** : Les rayons lumineux n'interfèrent pas entre eux. Notamment, un rayon ne peut pas en dévier un autre.
- 2) **Propagation rectiligne** : Dans un milieu TLHI, la lumière se propage en ligne droite.
- 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.

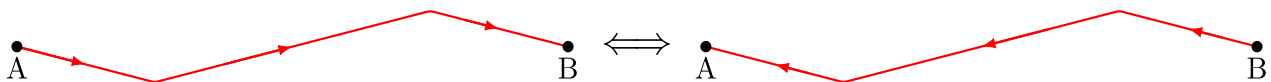


FIGURE O2.2 – Schématisation du principe de retour inverse de la lumière.

Remarque O2.2 : 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 lieu aux mirages.

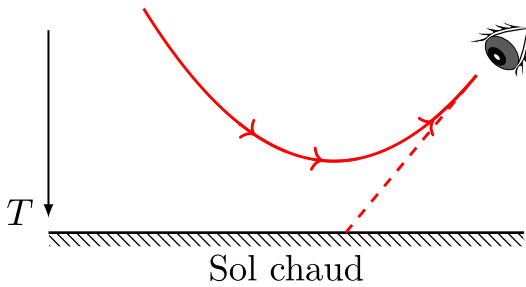
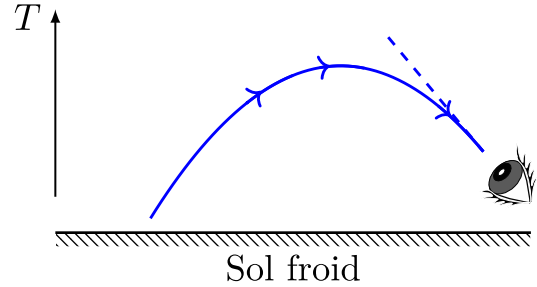
Mirage**Mirage inverse**

FIGURE O2.3 – Représentation de mirages.

II Changement de milieu**II/A Présentation****Définition O2.4 : Dioptré**

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

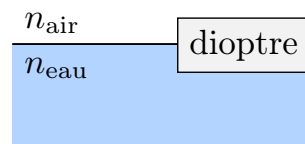


FIGURE O2.4 – Exemple de dioptré.

Propriété O2.3 : Réflexion, réfraction

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

- ◇ un rayon réfracté (traversant le dioptré) ;
- ◇ un rayon réfléchi.

On appelle :

- ◇ **Point d'incidence I** : intersection du rayon incident avec le dioptré ;
- ◇ **Normale** : droite perpendiculaire au dioptré en I ;
- ◇ **Plan d'incidence** : contient rayon incident et normale au dioptré en I ;
- ◇ **Angle d'incidence i_1** : angle orienté entre normale et incident ;
- ◇ **Angle de réflexion r** : angle orienté entre normale et réfléchi ;
- ◇ **Angle de réfraction i_2** : angle orienté entre normale et réfracté ;

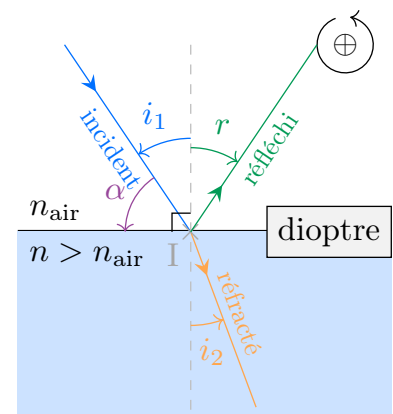


FIGURE O2.5 – Rayons.

Attention O2.1 : Calcul des angles

- 1) Les angles se calculent entre le rayon et la **normale** au dioptré.
- 2) Le sens de comptage doit être indiqué sur la figure.

II/B Lois de SNELL-DESCARTES

♥ Propriété O2.4 : Lois de SNELL-DESCARTES

- 1) Les rayons réfléchi et réfracté appartiennent au plan d'incidence
- 2) $r = -i_1$
- 3) $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$

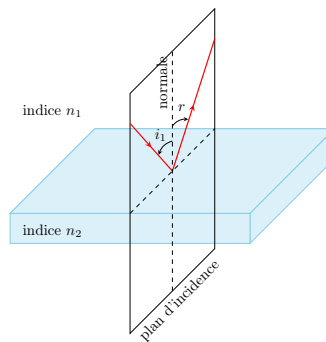


FIGURE O2.6 – Réflexion

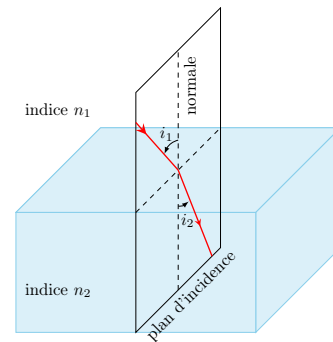


FIGURE O2.7 – Réfraction.

♥ Implication O2.1 : Réfraction

On distingue 3 cas généraux pour la réfraction :

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

Exemple O2.1 : Réflexion totale

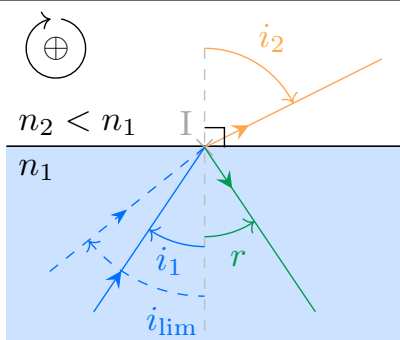
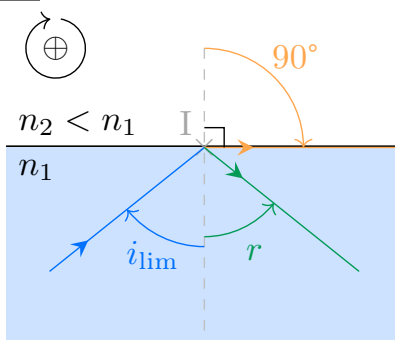
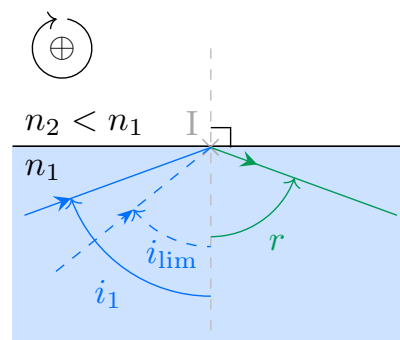
Réfraction : $i_1 < i_{\text{lim}}$ Réfraction limite : $i_1 = i_{\text{lim}}$ Réflexion totale : $i_1 > i_{\text{lim}}$

FIGURE O2.8 – Phénomène de réflexion totale.

♥ Propriété O2.5 : Conditions de réflexion totale

Pour avoir réflexion totale lors du passage d'un milieu n_1 à un milieu n_2 , il faut :

- ◇ $n_1 > n_2$: le milieu 1 est plus réfringent que le milieu 2 ;

◇ $i_1 \geq i_{\text{lim}}$ avec $|i_{\text{lim}}| = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$

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.

♥ Démonstration O2.1 : Conditions de réflexion totale

$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$ d'après la loi de SNELL-DESCARTES pour la réfraction. De plus, pour $i_1 = i_{\text{lim}}$, on a par définition $i_2 = 90^\circ$. Ainsi,

$$n_1 \sin(i_{\text{lim}}) = n_2 \underbrace{\sin(i_2)}_{=1} \Leftrightarrow \sin(i_{\text{lim}}) = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\Rightarrow i_{\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \blacksquare$$

♥ Attention O2.2 : Fonction arcsin

Ceci est possible **uniquement** pour $n_2 < n_1$: en effet, arcsin prend des valeurs de $x \in [-1 ; 1]$, correspondant à des valeurs possibles de $\sin(\theta)$.

Ainsi, si $n_2 \geq n_1$, il **n'existe pas d'angle limite** de réflexion totale. Cette analyse est à réaliser à chaque fois.

III Généralités sur les systèmes optiques

III/A Système, rayons, faisceaux.

Définition O2.5 : Système optique, centré, axe optique

- ◇ **Système optique** : ensemble de composants optiques rencontrés successivement par les rayons lumineux.
- ◇ **Système centré** : invariant par rotation autour d'un axe.
- ◇ **Axe optique** : axe de symétrie du système optique, **orienté** dans le sens de **propagation** de la lumière **incidente**.

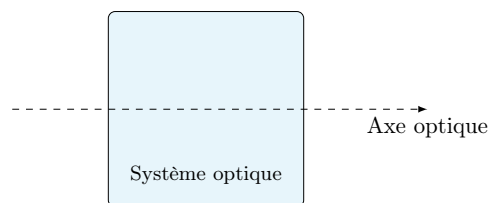


FIGURE O2.9 – Système optique centré.

Attention O2.3 : Distances algébriques

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 O2.10 – 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.

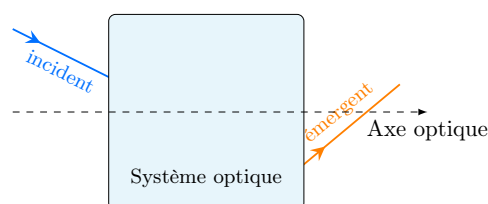


FIGURE O2.11 – Incidents, émergents.

Définition O2.7 : Nature d'un faisceau

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

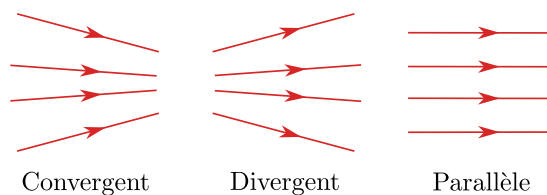


FIGURE O2.12 – Natures de faisceaux

III/B Objets et images

Définition O2.8 : Objet, image, réel et virtuel

Point objet

- ◇ Point d'intersection des rayons **incidents**.
- ◇ **Réel** :
 - ▷ placé **avant la face d'entrée** du système ;
 - ▷ faisceau incident **divergent**.
- ◇ **Virtuel** :
 - ▷ placé **après la face d'entrée** du système ;
 - ▷ faisceau incident **convergent**.

Point image

- ◇ Point d'intersection des rayons **émergents**.
- ◇ **Réel** :
 - ▷ placé **après la face de sortie** du système ;
 - ▷ faisceau émergent **convergent**.
- ◇ **Virtuel** :
 - ▷ placé **avant la face de sortie** du système ;
 - ▷ faisceau émergent **divergent**.

♥ Exemple O2.2 : Objets et images réelles ou virtuelles

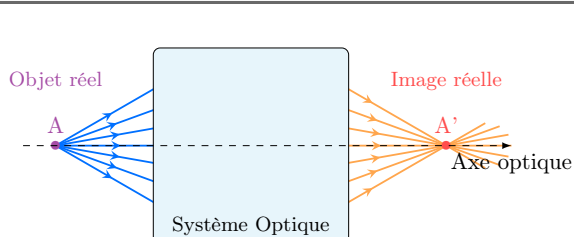


FIGURE O2.13 – Objet et image réelles.

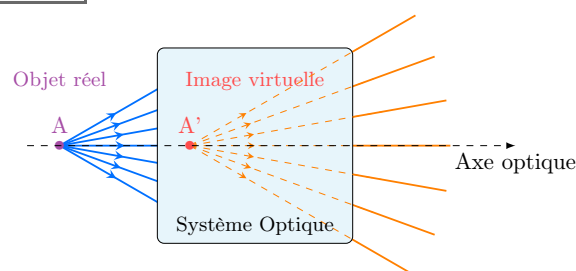


FIGURE O2.14 – Objet réel et image virtuelle.

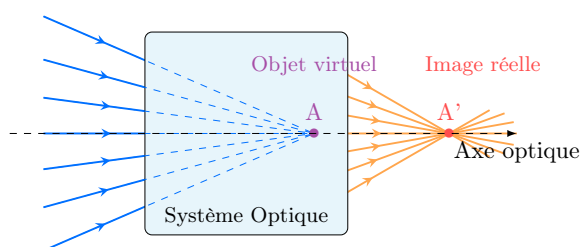


FIGURE O2.15 – Objet virtuel et image réelle.

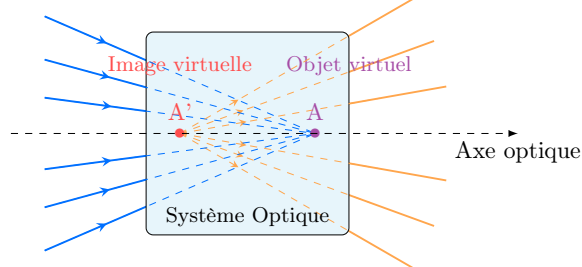


FIGURE O2.16 – Objet et image virtuelles.

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.

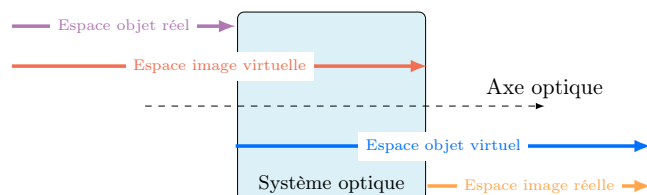


FIGURE O2.17 – Espaces objet et image.

♥ Définition O2.9 : Conjugaison de 2 points, schéma synoptique

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

$$A \xrightarrow{S} A' \quad \text{schéma synoptique}$$

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

Définition O2.10 : 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 O2.11 : Grandissement transversal

Soit $\overline{AB} \xrightarrow{S} \overline{A'B'}$. On appelle *grandissement transversal* et on le note γ le rapport

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

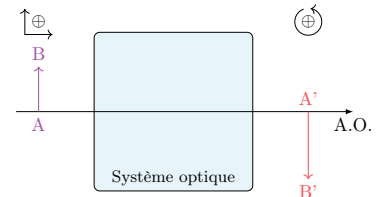


FIGURE O2.18 – Objet et image étendus.

III/C Foyers d'un système optique**♥ Définition O2.12 : Foyers principaux objet et image****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

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

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

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

♥ Propriété O2.6 : Foyers principaux et secondaires**Foyer principal objet**

Rayons incidents croisés en $F \Rightarrow$ émergent parallèles à l'axe optique ;

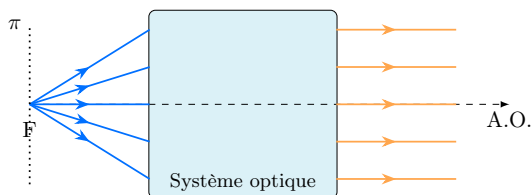


FIGURE O2.19 – Foyer principal objet.

Foyer principal image

Rayons incidents parallèles à l'axe $\Rightarrow$ émergent croisés en F' .

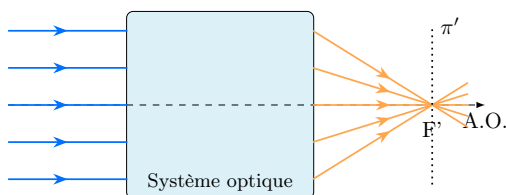


FIGURE O2.20 – Foyer principal image.

Foyer secondaire objet

Rayons incidents croisés en $\varphi \in \pi \Rightarrow$ émergent parallèles entre eux.

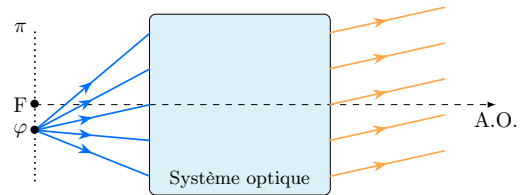


FIGURE O2.21 – Foyer secondaire objet.

Foyer secondaire image

Rayons incidents $\parallel$ entre eux $\Rightarrow$ émergent croisés en $\varphi' \in \pi'$;

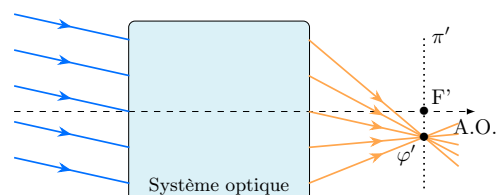


FIGURE O2.22 – Foyer secondaire image.

Remarque O2.3 : Retour inverse

Nous pouvons déduire le fonctionnement du système optique dans les cas secondaires en utilisant le principe du **retour inverse de la lumière**, en « remontant le film ». **Attention** à la position de F et F'.

IV Stigmatisme et aplanétisme**IV/A Présentation****Définition O2.13 : Stigmatisme et aplanétisme****Stigmatisme**

Un système est dit **stigmatique** si **tous les rayons** d'un point objet A **convergent en un seul point** image A'.

Inverse : l'image d'un point forme une **tâche**.

Aplanétisme

Un système est dit **aplanétique** si, pour $\overline{AB} \perp$ à l'A.O., son image $\overline{A'B'}$ est aussi $\perp$ à l'A.O.

Inverse : les droites sont courbées.

Remarque O2.4 : Dans la pratique

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).

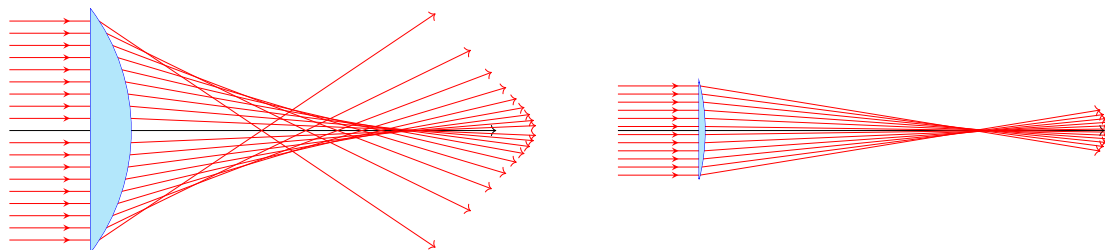
Exemple O2.3 : Stigmatisme approché et rigoureux

FIGURE O2.23 – Exemple d'un système astigmatique à gauche, stigmatique approché à droite.

IV/B Conditions de GAUSS**♥ Définition O2.14 : 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 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.

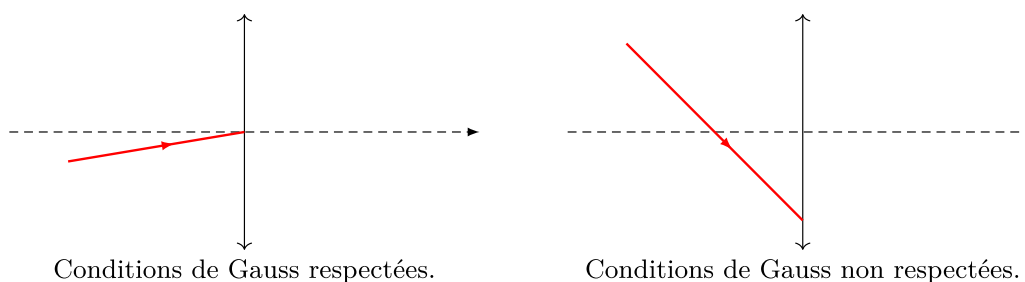


FIGURE O2.24 – Conditions de GAUSS.