Base de l'optique géométrique

Au programme

Savoirs

- ◇ Définir le modèle de l'optique géométrique.
- ◇ Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique.

Savoir-faire

- ◇

I Propriétés générales

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.

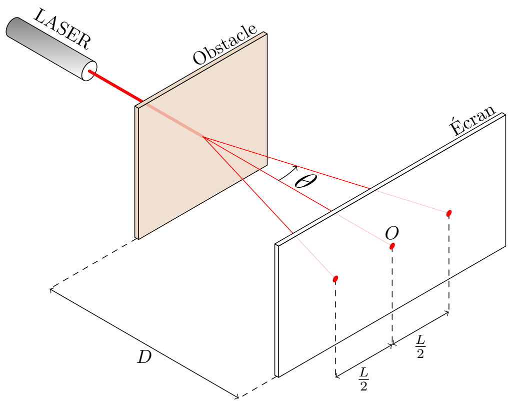

Figure 2.1 – Diffraction de Fraunhofer d'un faisceau laser par une fente fine.

I.A.2 Loi de la diffraction

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

B Approximation de l'optique géométrique

Approximation de l'optique géométrique

C Notion de rayon lumineux

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

Rayon et faisceau lumineux

On appelle « rayon lumineux » le chemin que semble suivre la lumière entre deux points lors d'une expérience de propagation. C'est une **courbe orientée** donnant la direction et le sens de propagation d'une onde lumineuse.

On appelle « faisceau lumineux » passant par un point l'ensemble des rayons lumineux passant par ce point.

Remarque

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

D Propagation rectiligne

Propagation rectiligne

Dans un milieu TLHI, la lumière se propage en ligne droite.

Contre-exemple

L'indice optique changeant avec la température, dans certaines conditions l'atmosphère n'est pas homogène : cela peut causer des mirages (trajectoire courbée de la lumière).

E Retour inverse de la lumière

Retour inverse

Dans un milieu TLI, homogène ou non, le trajet suivi par la lumière entre deux points situés sur un même rayon lumineux est indépendant du sens de propagation.

échange

Si on connaît le trajet dans un sens, on le connaît l'autre sens. On utilisera ce raisonnement à plusieurs reprises pour l'étude des systèmes optiques.

F Indépendance des rayons lumineux

Indépendance des rayons lumineux

Les rayons lumineux n'interfèrent pas entre eux. Notamment, un rayon ne peut pas en dévier un autre.

II Lois de Snell-Descartes

A Changement de milieu

Dioptre

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

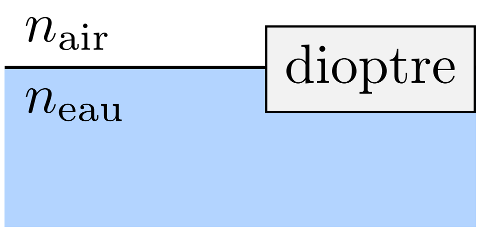

Figure 2.2 – Exemple de dioptre.

réflexion, réfraction

Au niveau d'un dioptre, un rayon lumineux incident donne naissance à un rayon réfracté (traversant le dioptre) et à un rayon réfléchi.

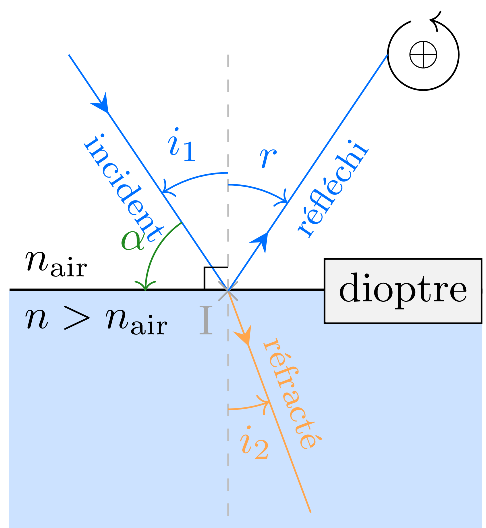

Figure 2.3 – Rayons incidents, réfléchis et réfractés sur un dioptre.

Vocabulaire général

- On appelle **point d'incidence** I le point d'intersection entre le rayon incident et le dioptre ;
- On appelle **plan d'incidence** le plan contenant le rayon incident et la normale au dioptre en I ;
- On appelle **angle d'incidence** i_1 l'angle entre la normale et le rayon incident ;
- On appelle **angle de réflexion** r l'angle entre la normale et le rayon réfléchi ;
- On appelle **angle de réfraction** i_2 l'angle entre la normale et le rayon réfracté.

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.

B Lois de Snell-Descartes

Lois de Snell-Descartes

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

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

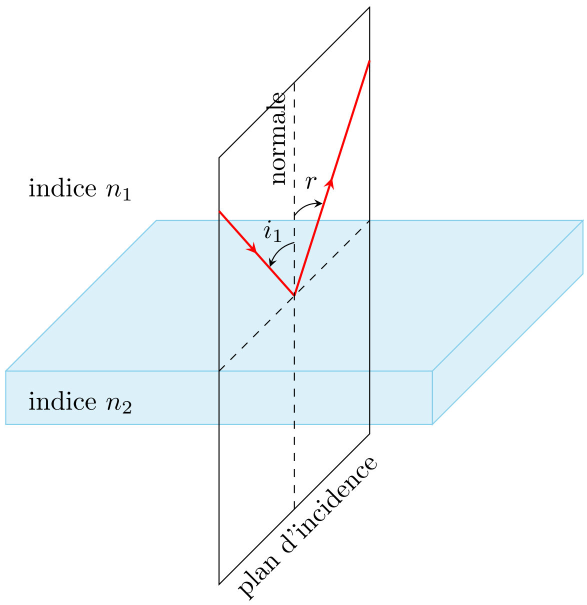

Figure 2.4 – Réflexion d'un rayon incident

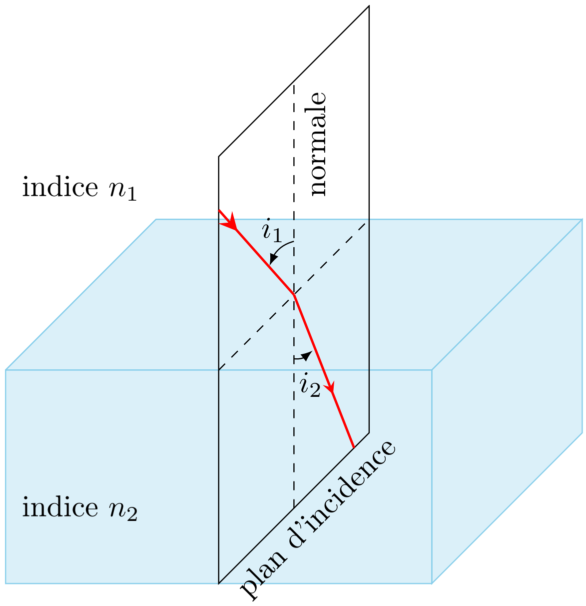

Figure 2.5 – Réfraction d'un rayon incident avec $n_2 > n_1$.

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 (1), le troisième point se déduit du deuxième.

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.

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 $n_2 < n_1$, 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.

Angle limite de réflexion totale

Lors du passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent ($n_2 < n_1$), 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

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

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,

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

Réflexion totale

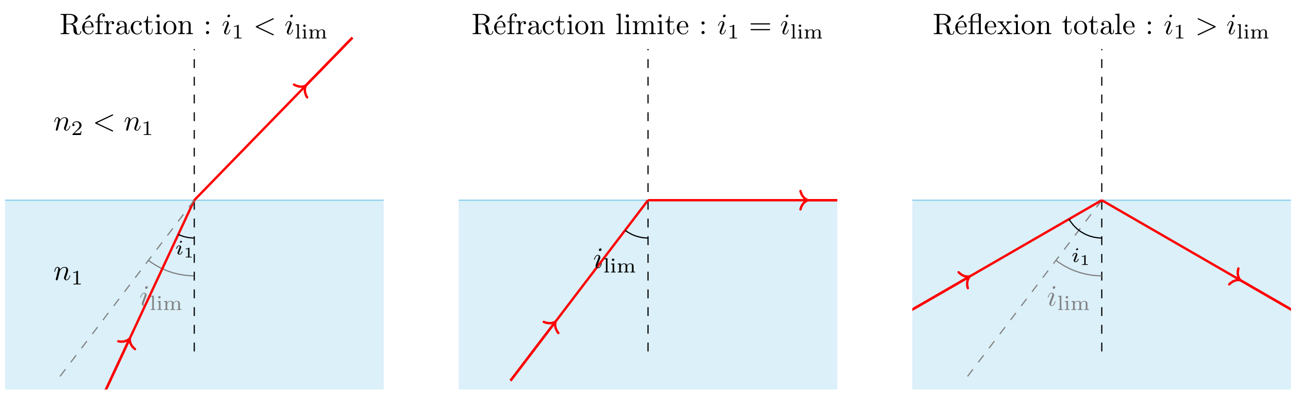

Figure 2.6 – Phénomène de réflexion totale

III Généralités sur les systèmes optiques

A Définition

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.

B Système centré

Systèmes centrés

On appelle système *centré* un système optique invariant par rotation autour d'un axe ; cet axe est alors appelé *axe optique*. **On l'oriente dans le sens de propagation de la lumière incidente**, et les distances sont considérées algébriquement (affectées d'un signe). On notera par exemple $\overline{AB} = -2\,\text{cm}$.

Schéma

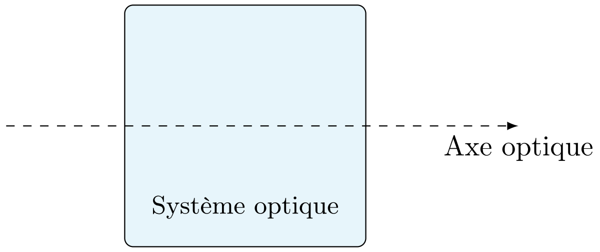

Figure 2.7 – Système optique centré.

C Rayons incidents, rayons émergents

Rayons incidents et émergents

On appelle **rayons incidents** les rayons entrant par la face d'entrée d'un système optique. On appelle **rayons émergents** les rayons sortant par la face de sortie d'un système optique.

Schéma

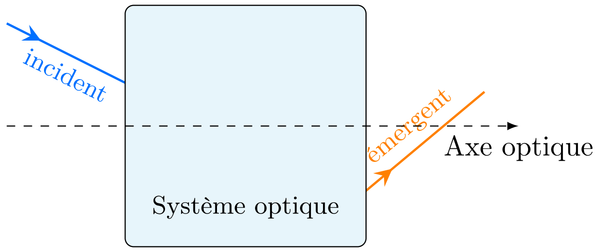

Figure 2.8 – Rayons incidents, émergents.

D Faisceaux lumineux

Faisceaux lumineux

On appelle *faisceau lumineux* un ensemble de rayons lumineux. Un faisceau peut être *convergent*, *divergent* ou *parallèle*.

Schéma

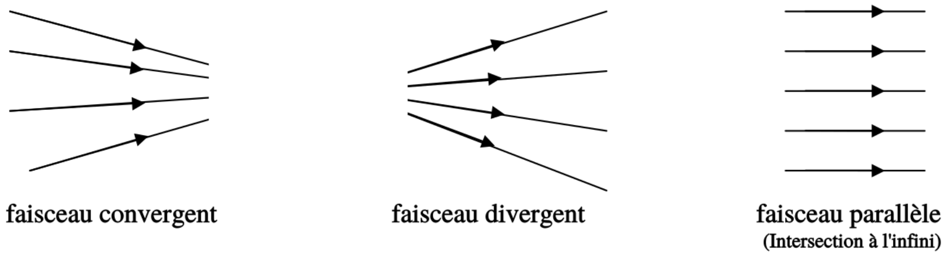

Figure 2.9 – Natures de faisceaux

E Objets et images réelles ou virtuelles

Objet et image

On appelle point **objet** d'un système optique le point d'intersection des rayons **incidents**.

On appelle point **image** d'un système optique le point d'intersection des rayons **émergents**.

Réel et virtuel

Un point objet est **réel** si le faisceau **incident** est **divergent**. Il est **virtuel** si le faisceau est **convergent**.

Un point image est **réel** si le faisceau **émergent** est **convergent**. Il est **virtuel** si le faisceau est **divergent**.

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

Réel et virtuel, bis

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**.

Objets et images réelles

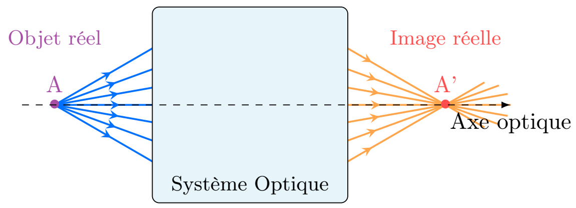

Figure 2.10 – Objet et image réelles.

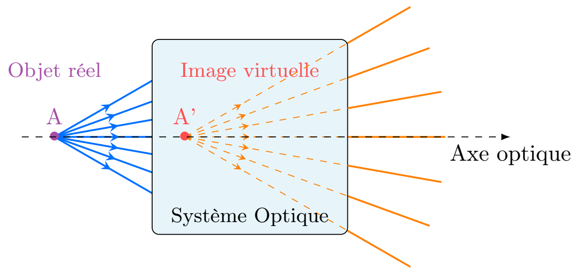

Figure 2.11 – Objet réel et image virtuelle.

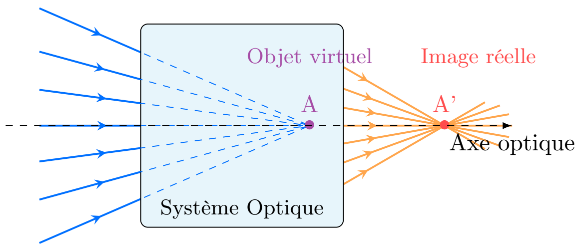

Figure 2.12 – Objet virtuel et image réelle.

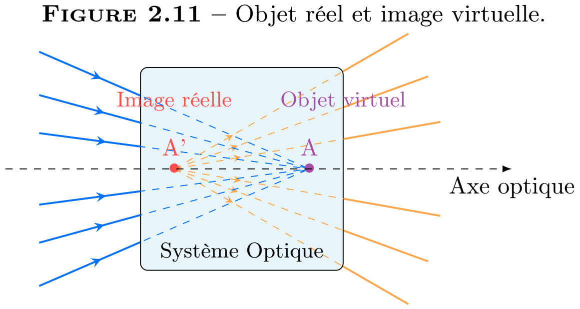

Figure 2.13 – Objet et image virtuelles.

Espaces objet et image

De par ces définitions, on peut définir les zones spatiales d'un système optique dans lesquelles un objet ou une image sera soit réel, soit virtuel.

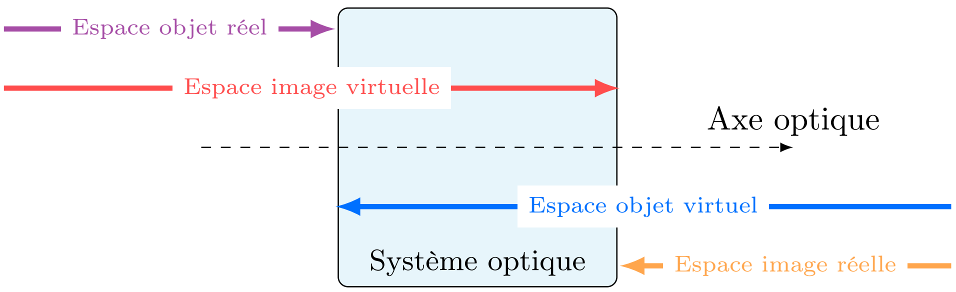

Figure 2.14 – Espaces objet et image.

Conjugaison de 2 points

Lorsqu'un point objet A passe par un système optique S pour former l'image A', on dit que A et A' sont *conjugués par le système*. Schématiquement, on note cette relation

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

Dans cette notation, A est un objet **pour** S, et A' est une image **pour** S. Nous serons amené-es à étudier des combinaisons de systèmes optiques dans lesquels un point sera à la fois image de l'un et objet du suivant.

F Objet étendu, grandissement transversal

Objet étendu et angle apparent

On appelle *objet étendu* un ensemble de points objets continu, considéré comme une infinité de points objets.

L'*angle apparent* d'un objet étendu est l'angle perçu (par un détecteur : œil, caméra…) entre les rayons émis par les extrémités de l'objet.

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

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

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

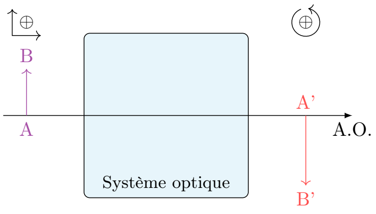

Figure 2.15 – Objet et image étendues.

G Foyers d'un système optique

Foyers principaux image et objet

Le foyer principal objet F est le **point objet** d'un système donnant une **image à l'infini** (rayons parallèles entre eux) avec des rayons parallèles à l'axe optique. Le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par F est appelé *plan focal objet*. On note

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

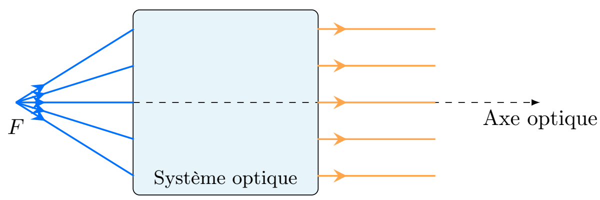

Figure 2.16 – Foyer principal objet.

Le foyer principal image F' est le **point image** d'un système d'un **objet situé à l'infini** (rayons parallèles entre eux) avec des rayons parallèles à l'axe optique. Le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par F' est appelé *plan focal image*. On note

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

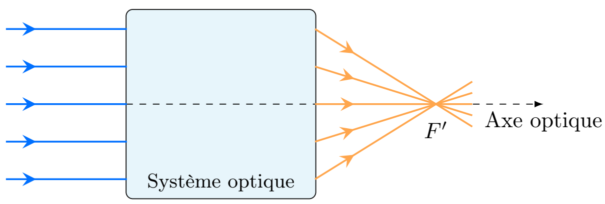

Figure 2.17 – Foyer principal image.

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 ».

Foyers principaux

En plus d'être une définition, c'est une propriété : **tous rayons incidents qui se croisent en F émergent parallèles à l'axe optique,** et **tous rayons incidents parallèles à l'axe optique émergent en se croisant en F'.**

Foyers secondaires

Tous rayons incidents **parallèles entre eux** émergent en se **croisant dans le plan focal image**[3], et tous rayons incidents se **croisant dans le plan focal objet**[4] émergent **parallèles entre eux**.

3. en un point appelé *foyer secondaire image* Φ'
4. en un point appelé *foyer secondaire objet* Φ

IV Approximation de Gauss

A Stigmatisme, aplanétisme

Stigmatisme

Un système optique est dit *stigmatique* si tous les rayons émis par un point objet A convergent en un seul point image A'. Il ne l'est pas si l'image d'un point forme une tâche.

Aplanétisme

Un système optique est dit *aplanétique* si un objet étendu $\overline{AB}$ perpendiculaire à l'axe optique donne une image $\overline{A'B'}$ également perpendiculaire à l'axe optique.

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).

C Conditions de Gauss

Rayons paraxiaux

Un système optique est utilisé dans les conditions de Gauss lorsqu'il est éclairé par des rayons **paraxiaux**, c'est-à-dire

1) peu éloignés de l'axe optique ;

2) peu inclinés par rapport à l'axe optique.

Approximation de Gauss

Dans les conditions de Gauss, 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.