Système optique

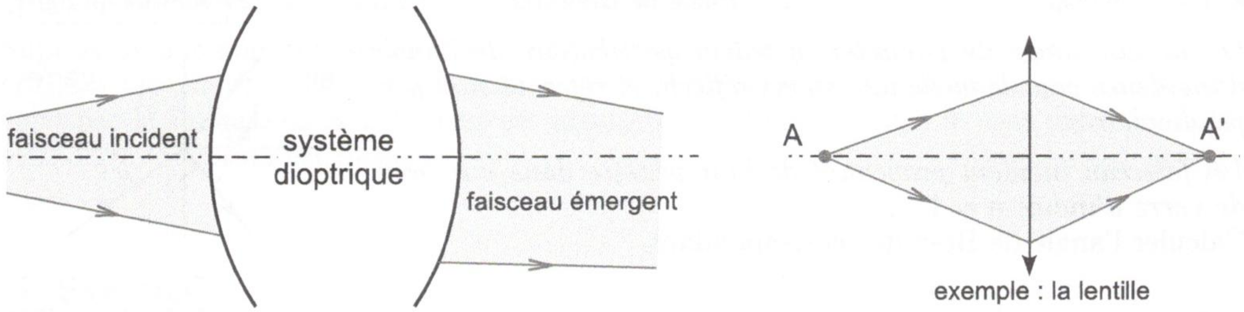
Un système optique est constitué d'un ou plusieurs milieux transparents ou réfléchissants.

La lumière traverse ces milieux en subissant des réfractions et (ou) des réflexions.

On distingue deux catégories de systèmes optiques :

les systèmes dioptriques

La lumière se déplace d'un bout à l'autre ; un système dioptrique possède donc une face d'entrée et une face de sortie. Ces systèmes comportent des éléments transparents et reposent essentiellement sur le phénomène de réfraction. Les nombreux montages optiques composés de l'association de plusieurs lentilles sont des exemples type de systèmes dioptriques.



les systèmes catadioptriques

La lumière y subit au moins une réflexion et ressort finalement par la face d'entrée. C'est le cas des systèmes réfléchissant comme les miroirs.

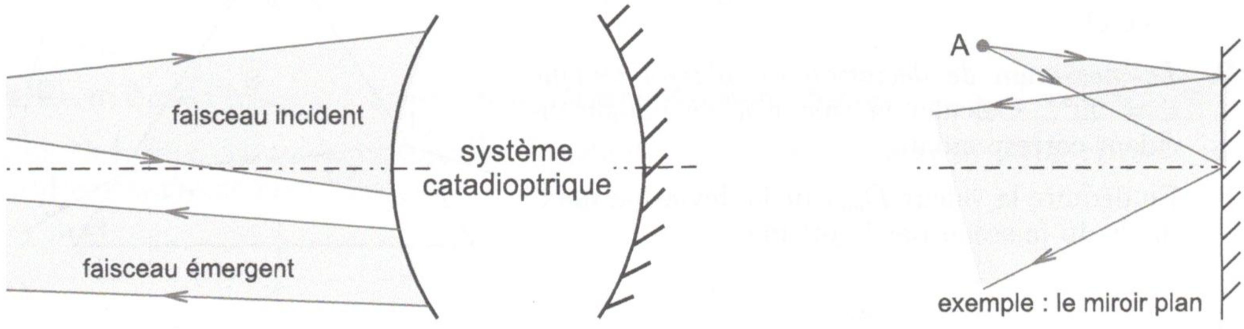


Image réelle et image virtuelle

On considère un point lumineux A et son image A’ donnée par le système optique.

Image réelle

L’image A’ est qualifiée d’**image réelle** si les rayons issus de A et transmis par le système optique convergent en A’.

Une image réelle est directement projetable sur un écran.

Image virtuelle

Dans certains cas, les rayons issus du système optique divergent.

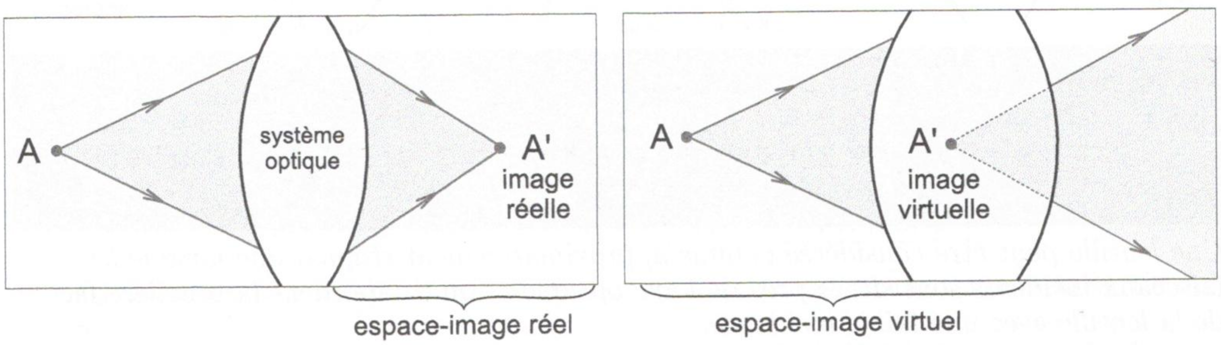
L’image A’ est qualifiée d’**image virtuelle** si les rayons ressortent du système optique en divergeant. Le point A’ est alors obtenu en prolongeant (en pointillé) ces rayons.

Une image virtuelle est observable directement par l’œil de l’observateur, mais elle n’est pas projetable sur un écran.

Espace-image réel et espace-image virtuel

L’**espace-image réel** est défini comme la zone de l’espace où se forment les images réelles (zone située derrière la face de sortie pour un système dioptrique).

L’**espace-image virtuel** est la portion de l’espace dans laquelle se forment les images virtuelles (zone située devant la face de sortie pour un système dioptrique).



Objet réel et objet virtuel

Objet réel

Un point lumineux A est qualifié d'**objet réel** si les rayons reçus par le système optique divergent à partir du point A.

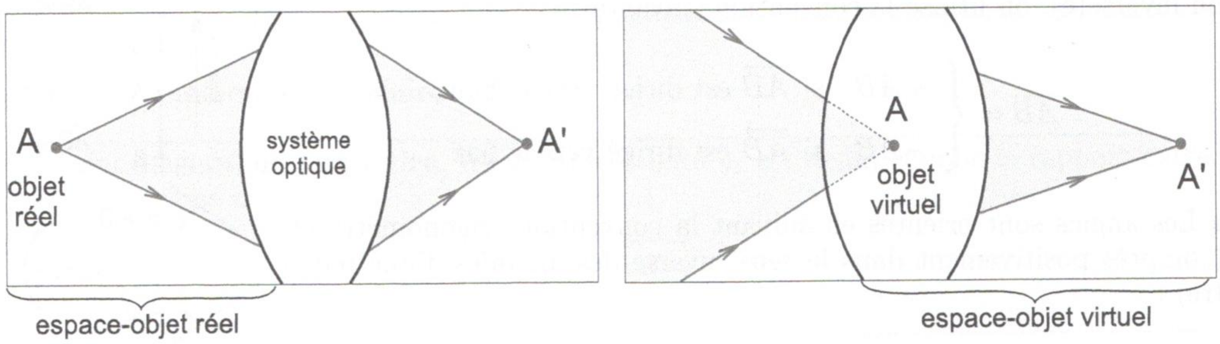
Objet virtuel

Dans certains cas les rayons qui éclairent le système optique convergent vers le point A. (le point A est obtenu en prolongeant ces rayons incidents).
Le point A est alors qualifié d'**objet virtuel**.

Espace-objet réel et espace-objet virtuel

L'**espace-objet réel** est défini comme la région qui contient les objets réels (zone située devant la face d'entrée pour un système dioptrique).

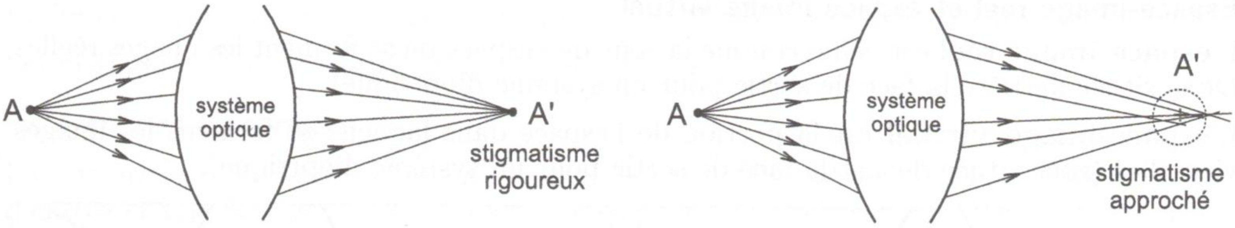
L'**espace-objet virtuel** désigne la région contenant les objets virtuels (zone située derrière la face d'entrée pour un système dioptrique).

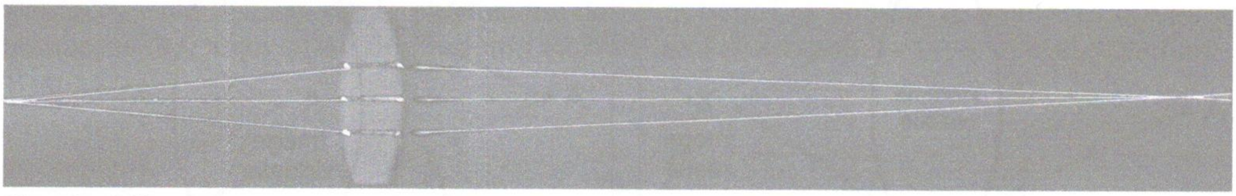


Stigmatisme rigoureux et stigmatisme approché

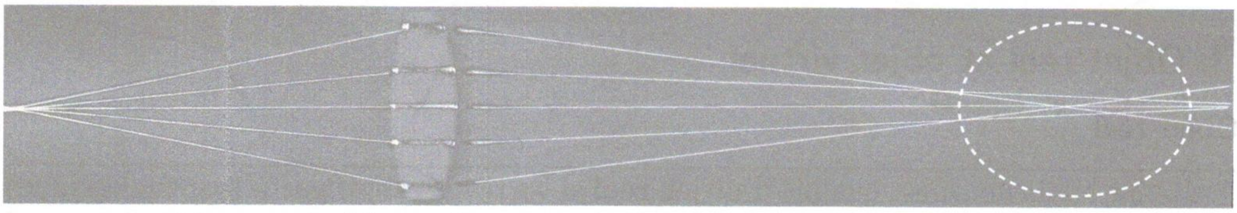
On dit que l'image A' du point objet A est **rigoureusement stigmatique** si tous les rayons issus de A ressortent du système optique en convergeant vers A'.

Dans la pratique, le stigmatisme rigoureux n'est jamais vérifié strictement.
Fréquemment, les rayons provenant d'un point A ne convergent pas exactement en un unique point A', mais leur intersection avec l'axe optique reste localisée à l'intérieur d'une région restreinte, centrée autour du point A'. On parle alors de **stigmatisme approché**.





Une lentille peut être considérée comme approximativement stigmatique lorsque les faisceaux incidents sont situés près de l'axe optique et qu'ils abordent la première face de la lentille avec une faible incidence.

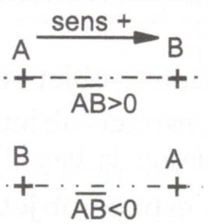


Lorsque les faisceaux incidents s'écartent de l'axe optique, ils ressortent de la lentille sans converger en un même point.

Distance algébrique et angle orienté

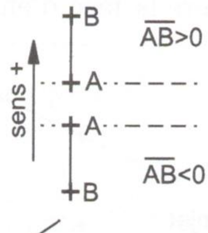
■ Afin de repérer plus facilement les positions des objets et des images, toutes les distances horizontales sont algébriques. L'axe optique est orienté en utilisant la convention suivante :

$$\overline{AB} = \begin{cases} AB \text{ si } \overrightarrow{AB} \text{ est dirigé dans le sens de propagation de la lumière} \\ -AB \text{ si } \overrightarrow{AB} \text{ est dirigé dans le sens contraire} \end{cases}$$

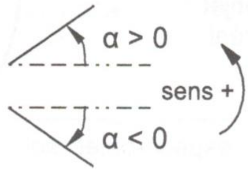


■ De la même façon, pour décrire si un objet (ou une image) est droit(e) ou inversé(e), on utilise la convention suivante :

$$\overline{AB} = \begin{cases} +AB \quad \text{si } \overrightarrow{AB} \text{ est dirigé vers le haut} \\ -AB \quad \text{si } \overrightarrow{AB} \text{ est dirigé vers le bas} \end{cases}$$



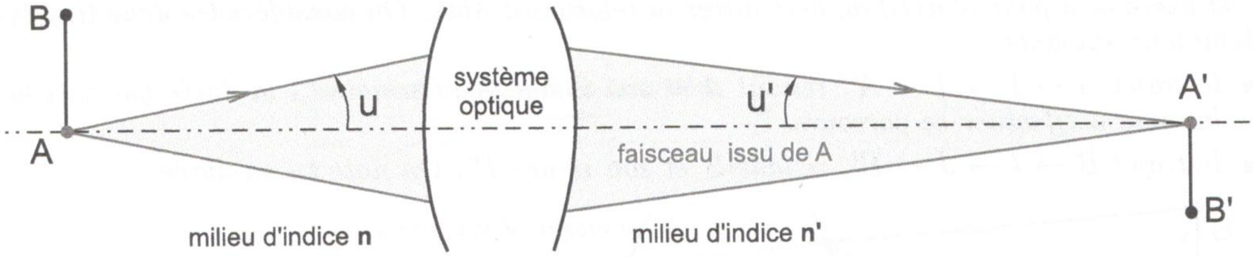
■ Les angles sont orientés en suivant la convention trigonométrique (comptés positivement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre) :



Aplanétisme et relation d’Abbe

Un système optique est dit **aplanétique** s’il donne d’un objet plan (AB) perpendiculaire à l’axe optique, une image plane (A’B’), elle aussi perpendiculaire à l’axe optique.

La plus part des système optiques ne sont pas rigoureusement aplanétiques.



Ernst Abbe (1840-1905) établi une relation conditionnant l’aplanétisme entre un objet *AB* et son image *A’B’*. Cette relation porte son nom :

relation d’Abbe : $\boxed{n.\overline{AB}.\sin u = n'.\overline{A'B'}.\sin u'}$ (2.1)

u désigne l’angle d’incidence d’un rayon issu de A et u' l’angle du rayon à la sortie du système optique.

E. Abbe

Dans la pratique, la largeur maximale du faisceau incident est limitée physiquement par la présence de diaphragmes ou par les montures des lentilles constituant le système optique.

Dans le cas où les angles u et u' sont très petits, on peut faire l’approximation $\sin u \simeq u$ et $\sin u' \simeq u'$. La relation d’Abbe devient alors :

$$\boxed{n.\overline{AB}.u = n'.\overline{A'B'}.u'} \quad (2.2)$$

Cette égalité est connue sous le nom de relation de **Lagrange-Helmoltz**.

Grandissement

Le **grandissement transversal**, noté g_y ou γ est défini comme le rapport algébrique entre la taille de l’image et celle de l’objet :

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

Le **grandissement angulaire**, fréquemment noté g_a est défini comme le rapport entre les deux angles u' et u :

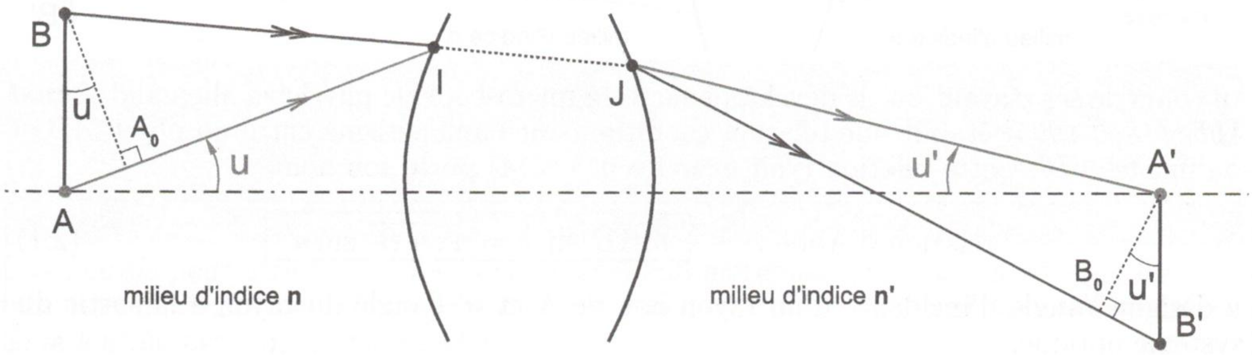
$$\boxed{g_a = \frac{u'}{u}}$$

La relation de Lagrange-Helmoltz permet d’écrire : $\boxed{g_y \times g_a = \frac{n}{n'}}$

Ex 8 : Relation d'Abbe

Cet exercice a pour objectif de démontrer la relation d'Abbe. On considère les deux trajets lumineux suivants :

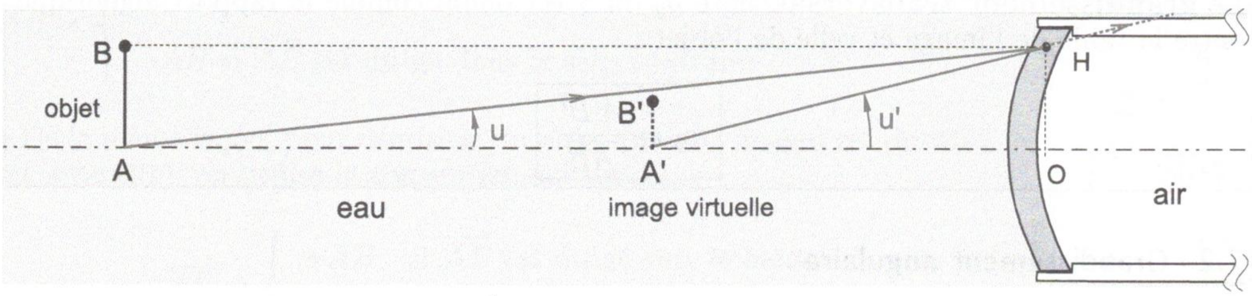
- *le trajet $A \to I \to J \to A'$, reliant A et son image A'. On note t_A la durée que met la lumière à effectuer ce parcours.*
- *le trajet $B \to I \to J \to B'$, reliant B et son image B'. On note t_B sa durée.*



1. Exprimer la différence $\Delta t = t_B - t_A$ entre les durées des deux trajets en fonction de n, n', AB, $A'B'$ et de la célérité c de la lumière dans le vide.
2. *En vertu du principe de Fermat, tous les trajets possibles reliant A et A' correspondent à la même durée, cette durée étant minimale ; t_A est donc indépendant de u. Il en est de même pour t_B, et donc pour Δt.*
   En considérant le cas particulier $u = u' = 0$, en déduire la valeur de Δt, puis conclure.

Ex 9 : Mesure algébrique et grandissement

Le hublot sphérique d'un caisson étanche pour caméra sous-marine forme, à partir d'un objet AB, une image virtuelle $A'B'$. Le milieu incident est l'eau et le milieu émergent est l'air ($n_{air} = 1$). Les positions de l'objet et de l'image sont repérées par rapport au point O : $OA = 1\,m$ et $OA' = 28\,cm$. On connaît également les hauteurs de l'objet et de son image : $AB = 8\,cm$ et $A'B' = 3\,cm$



Échelle non respectée

1. Calculer la valeur du grandissement transversal g_y de l'image.
2. Calculer la valeur du grandissement angulaire g_a.
3. À l'aide la relation de Lagrange-Helmoltz, en déduire l'indice optique de l'eau.

SOLUTIONS

Ex 8 : Relation d'Abbe

1. Écart de durée entre les trajets $B \to I \to J \to B'$ et $A \to I \to J \to A'$:

$$\Delta t = t_B - t_A = \Delta t_{J\to B'} - \Delta t_{J\to A'} + \Delta t_{B\to I} - \Delta t_{A\to I}$$

donc $$\Delta t = \frac{JB' - JA'}{c/n'} + \frac{IB - IA}{c/n} = \frac{1}{c}\big(n'.(JB' - JA') + n.(IB - IA)\big)$$

Par ailleurs, si les angles u et u' restent petits,

$$JB' - JA' \simeq B_0B' = \sin u'.A'B' \qquad \text{et} \quad IB - IA \simeq -AA_0 = -\sin u.AB$$

On obtient donc finalement : $$\Delta t \simeq \frac{1}{c}\big(n'.A'B'.\sin u' - n.AB.\sin u\big) = cste$$

2. Lorsque $u = u' = 0$, l'expression précédente donne $cste = 0$, on en déduit :

$$n'.A'B'.\sin u' = n.AB.\sin u$$

Ex 9 : Mesure algébrique et grandissement

1. Grandissement transversal : $g_y = \dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \dfrac{3\,cm}{8\,cm}$ $\boxed{g_y = 0,375}$

2. Dans le triangle (A, H, O), on peut écrire : $\tan u = \dfrac{\overline{OH}}{\overline{AO}} = \dfrac{\overline{AB}}{\overline{AO}}$ $u = 4,57°$

De même dans le triangle (O, H, A') : $\tan u' = \dfrac{\overline{OH}}{\overline{A'O}} = -\dfrac{\overline{AB}}{\overline{OA'}}$ $u' = 15,94°$

On obtient finalement : $g_a = \dfrac{u'}{u}$ $\boxed{g_a = 3,49}$

3. D'après la relation de Lagrange-Helmoltz : $g_a.g_y = n_{\text{eau}}$ $\boxed{n_{\text{eau}} = 1,31}$