

FORMATION DES IMAGES ET STIGMATISME

« Qui voit la figure humaine correctement ? Le photographe, le miroir ou le peintre ? »

Pablo Picasso

I – Les objets et les images

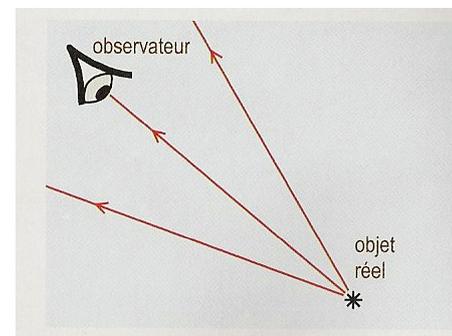
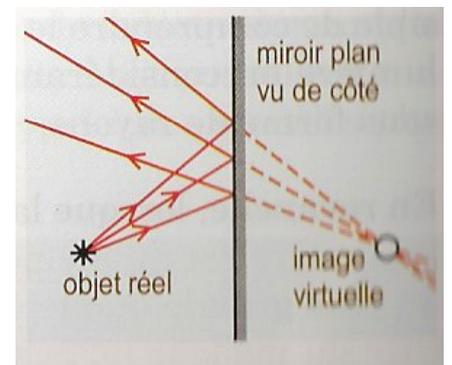
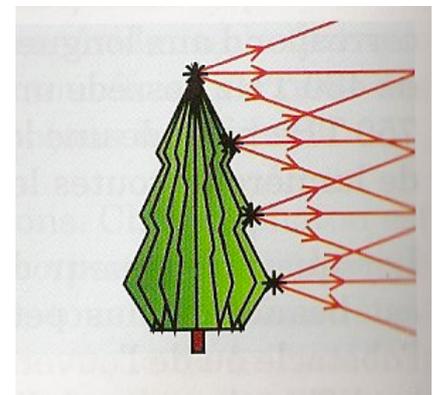
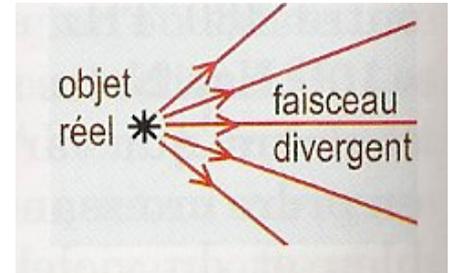
⇒ En optique géométrique, une source ponctuelle de rayons (une petite ampoule, une LED etc...) est un **OBJET REEL**.

Un **FAISCEAU** est un ensemble de rayon qui diverge à partir d'un point donné ou qui converge vers un point donné. Les rayons issus d'un objet réel forment un **FAISCEAU DIVERGENT** : plus on s'éloigne de l'objet, plus les rayons sont éloignés les uns des autres (cf. 1^{ère} figure ci-contre).

⇒ Lorsqu'on désire étudier la lumière émise ou réfléchiée par un corps dont la taille n'est pas négligeable (objet étendu), on peut considérer chaque point du corps comme étant un objet réel (cf. 2^{ème} figure ci-contre). Il n'est pas nécessaire que la source des rayons est « crée » la lumière pour qu'elle soit qualifiée d'objet. Un corps qui ne fait que réfléchir la lumière ambiante peut aussi être considéré comme un objet (c'est la cas de la majorité des objets).

⇒ Lorsqu'un objet réel est placé devant un miroir plan (cf. 3^{ème} figure ci-contre), les rayons réfléchis forment un faisceau qui divergent à partir d'un point situé « derrière » le miroir. On détermine la position de ce point en prolongeant les rayons réfléchis dans la région derrière le miroir (on va en reparler). Ces rayons sont représentés en pointillés, on les appelle des **RAYONS VIRTUELS**. Il est important de réaliser **qu'il n'y a pas réellement de lumière qui voyage le long des traits en pointillés**.

Une **IMAGE** est le point de divergence (ou de convergence) d'un faisceau de rayons qui a été dévié par un **miroir** (surface réfléchissante), un **dioptré** (interface en deux milieux transparents) ou une **lentille** (chaque face d'une lentille est un dioptré). Un miroir plan donne d'un objet réel une **IMAGE VIRTUELLE**. L'adjectif « virtuel » signifie que ce sont les prolongements des rayons qui se



croisent à la position de l'image, non les rayons eux-mêmes.

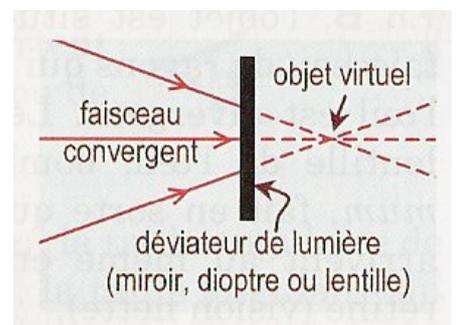
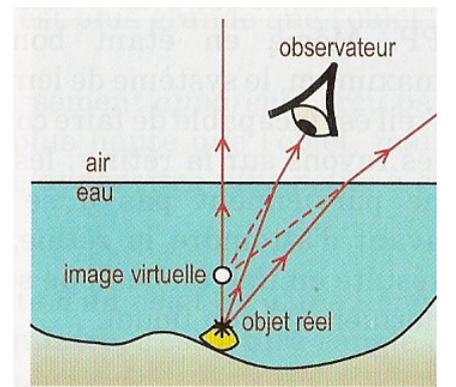
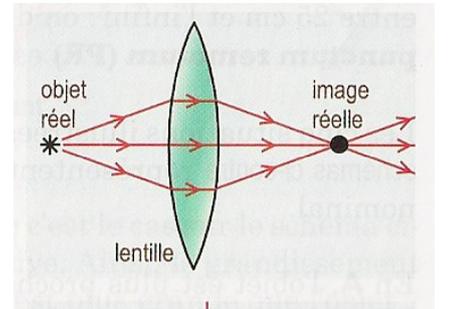
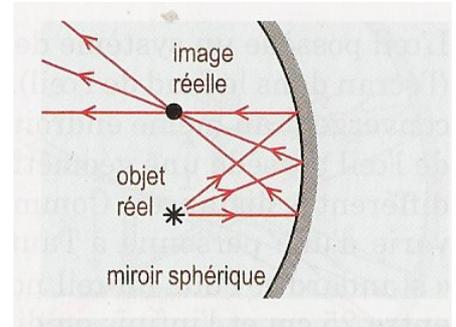
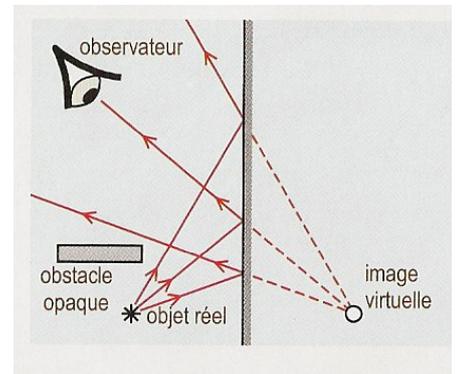
Sur La 1^{ème} figure ci-contre, un obstacle opaque empêche l'observateur de voir directement l'objet. Dans cette situation, l'observateur reçoit exactement les mêmes rayons que s'il n'y avait pas de miroir et qu'un objet réel était situé à la position de l'image virtuelle. Si le miroir est propre et de bonne qualité, l'image virtuelle peut donner l'impression d'être un objet réel, c'est pour cela que le miroir plan est un des meilleurs amis du magicien !

Il existe aussi des **IMAGES REELLES**. Lorsque les rayons qui sont déviés par un miroir ou un dioptre se croisent en un point après leur déviation, il y a un image réelle à cet endroit (cf. 2^{ème} figure ci-contre).

⇒ La 3^{ème} figure ci-contre illustre la formation d'une image réelle par une lentille (deux dioptres en succession, cf. la suite). **Il est possible de capturer une image réelle** en plaçant une plaque photographique, un détecteur électronique ou tout simplement une feuille de papier à la position de l'image. **Il est évidemment impossible de capturer une image virtuelle de la sorte**, car les rayons ne passent pas vraiment par la position de l'image virtuelle !

La 4^{ème} figure ci-contre représente l'image virtuelle créée par la surface d'un lac (dioptre plan) lorsqu'un observateur placé au-dessus de la surface regarde un objet au fond du lac. On remarque que l'objet est plus profond que son image, ici virtuelle. Ainsi lorsque l'on désire atteindre un poisson avec un harpon, il ne faut pas viser la position apparente du poisson, mais bien un point situé en dessous !

⇒ De manière générale, l'image formée par un premier déviateur de lumière peut servir d'objet à un second déviateur de lumière (nous verrons les exemples de la lunette astronomique et du microscope). Dans certains cas, le second déviateur reçoit un faisceau convergent (cf. 5^{ème} figure ci contre). En optique géométrique, **on définit un objet de manière générale comme le point de convergence ou de divergence du faisceau formé par les rayons incidents avant qu'ils ne soient déviés**. Ainsi le point situé de l'autre côté du déviateur de lumière vers lequel convergent les rayons incidents est qualifié **D'OBJET VIRTUEL**.

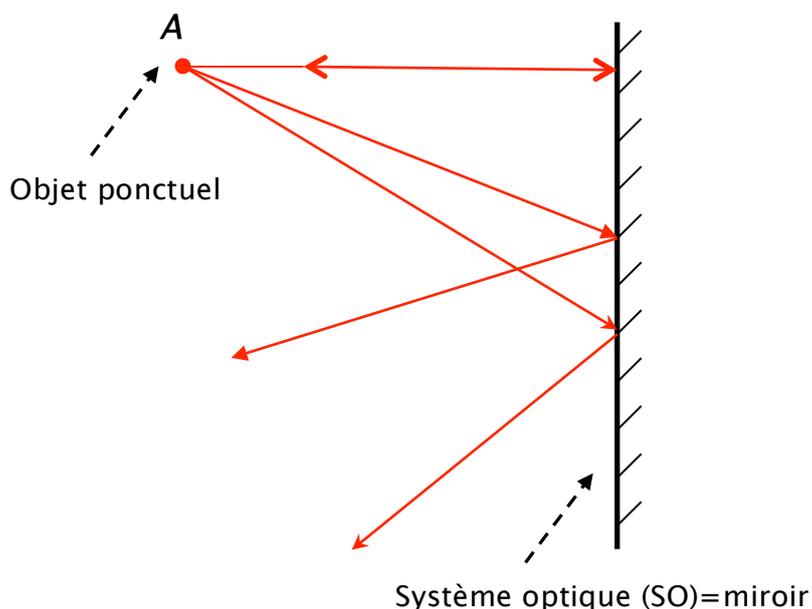


II – Formation d'images par réflexion : le miroir plan

Nous allons étudier la formation de l'image d'un objet avec un **système optique simple** : le **miroir plan**. Le miroir est une **surface réfléchissante**, on dit que c'est un **CATADIOPTRE**.

Remarque: Sauf indication contraire, on travaille avec une lumière monochromatique.

2.1 Stigmatisme rigoureux



Chaque rayon issu de l'objet ponctuel A est réfléchi en obéissant aux lois de la réflexion.

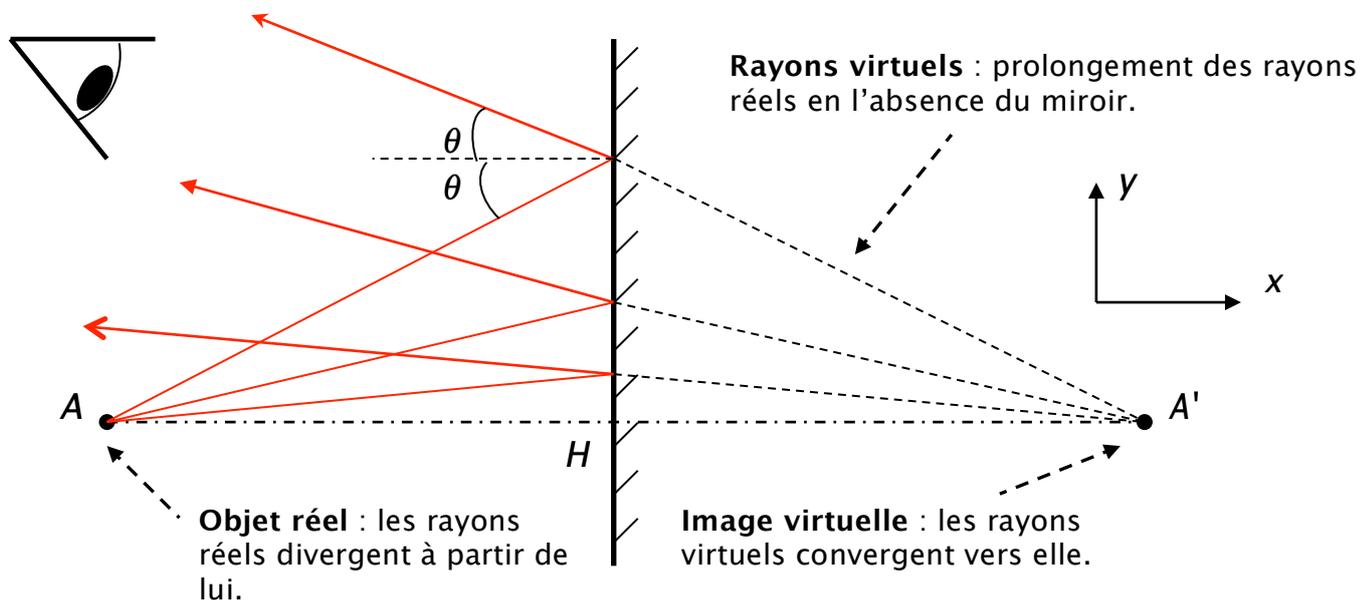
Les rayons réfléchis par le miroir semblent provenir, pour l'œil, de l'image virtuelle A' . Par construction A et A' sont symétriques par rapport à H . Comme tous les rayons issus de A semblent provenir de A' , on dit que le miroir plan est parfaitement **STIGMATIQUE** pour le couple :

(A = objet réel : A' = image virtuelle)



DEFINITION DU STIGMATISME

Le stigmatisme est la qualité que présente tout système optique de donner d'un point objet un point image et un seul



Le stigmatisme est lié à la **netteté** d'une image ; l'image d'un objet par un miroir est toujours nette.

2.2 Relation de conjugaison pour (A , A')

Une **relation de conjugaison** est une **relation algébrique** qui relie la position de l'image A' avec celle de l'objet A en fonction des caractéristiques géométriques du SO en question.

Dans le cas du miroir, la relation de conjugaison est évidente à l'aide de la figure orientée ci-dessus :

$$\overline{HA} + \overline{HA'} = 0$$

On utilise des grandeurs algébriques (symbolisées par le trait) ce qui nécessite d'orienter la figure.

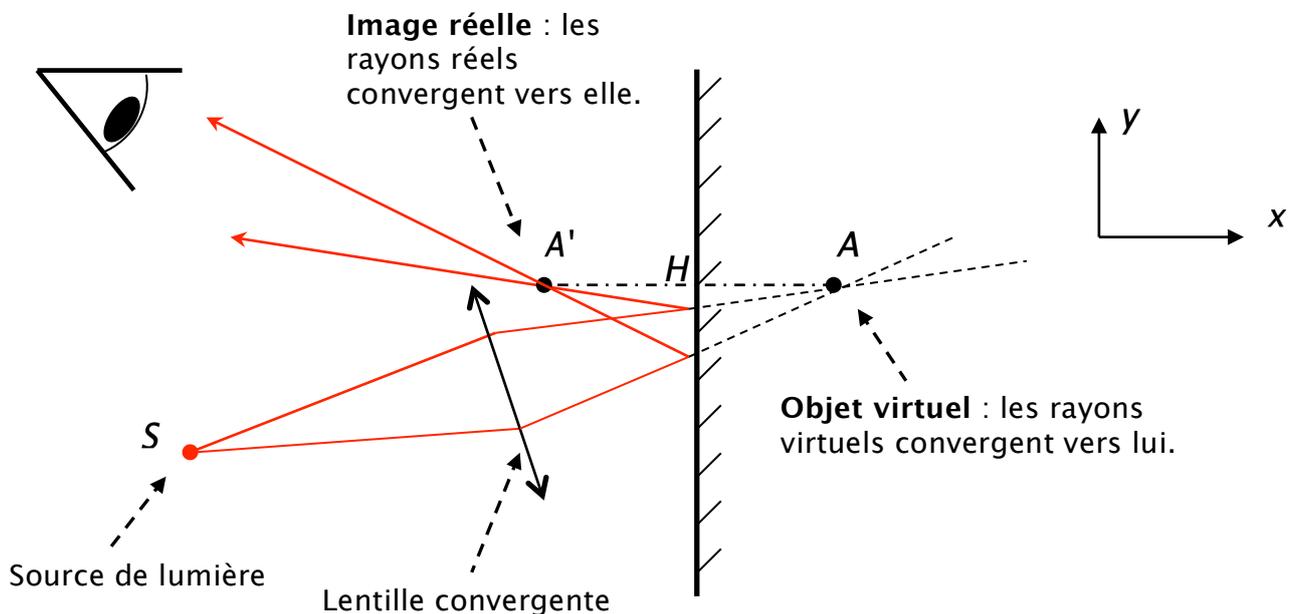
\overline{HA} est positive si on va de H à A dans le sens des x positifs et inversement.

Dans le cas du miroir, on a :

$$\begin{aligned} \overline{HA} < 0 &\Rightarrow \text{l'objet est réel.} \\ \overline{HA'} > 0 &\Rightarrow \text{l'image est virtuelle.} \end{aligned}$$

Comme nous le verrons dans le cas des autres systèmes optiques (miroirs sphériques, lentilles minces), le résultat ci-dessus est tout à fait général.

Il est possible d'envisager un couple (objet virtuel – image réelle) même si la notion d'objet virtuel est plus difficile à concevoir (nous n'en verrons quasiment pas, donc pas d'inquiétude).



On a toujours $\overline{HA} + \overline{HA'} = 0$, c'est l'intérêt d'utiliser les grandeurs algébriques.

La relation de conjugaison $\overline{HA} + \overline{HA'} = 0$ est toujours valable quelle que soit la nature de A et de A' (réelle ou virtuelle).

Par contre cette fois :

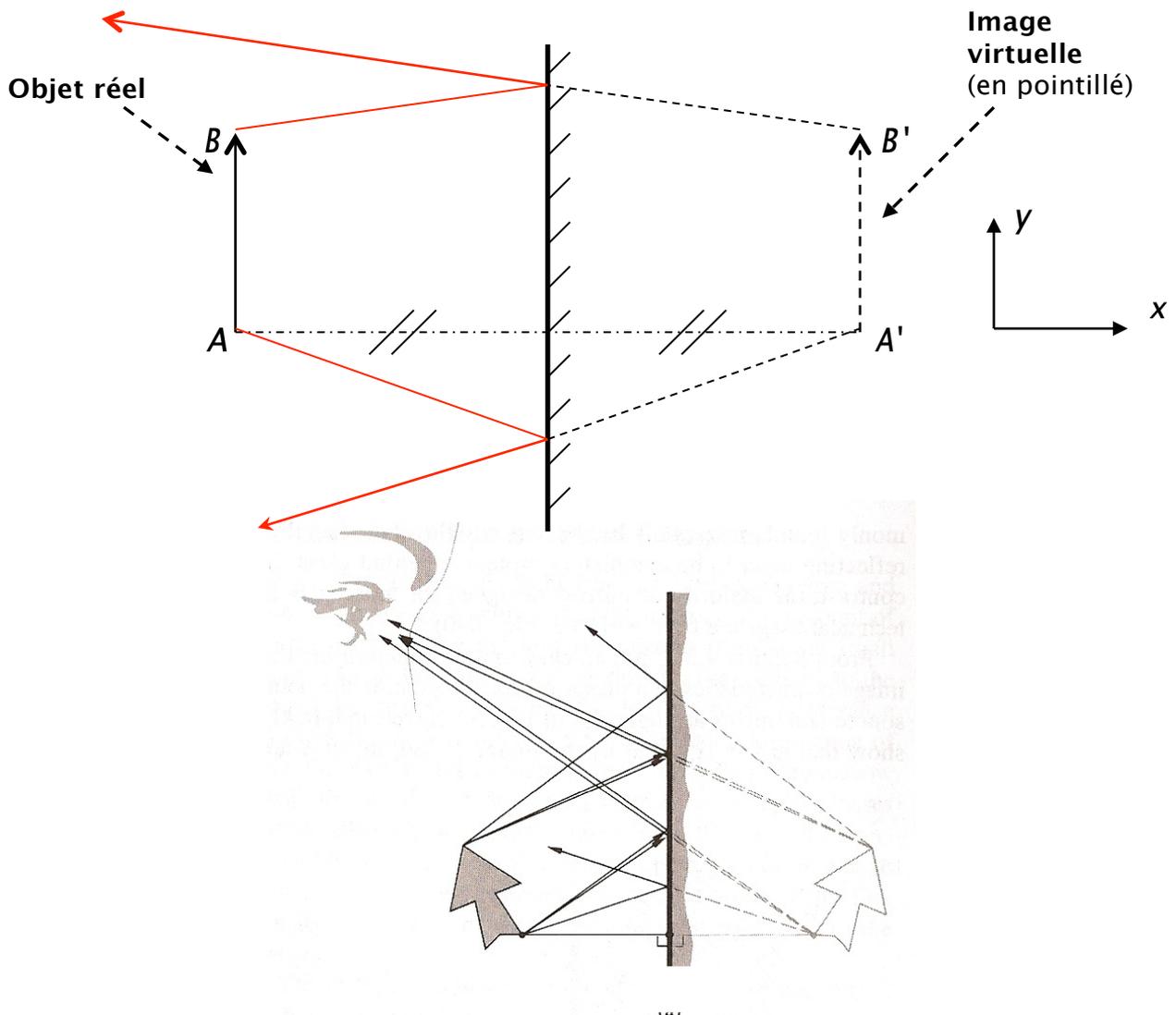
$\overline{HA} > 0 \Rightarrow$ l'objet est virtuel.

$\overline{HA}' < 0 \Rightarrow$ l'image est réelle.

Encore une fois cette relation est tout à fait générale.

Pour un miroir plan, l'objet et son image sont toujours de nature différente. Si l'un est réel, l'autre est virtuel et inversement.

2.3 **Objet et image étendus**



Le miroir plan conserve par symétrie la taille des objets. On définit le grandissement transversal (suivant Y) de la façon suivante :



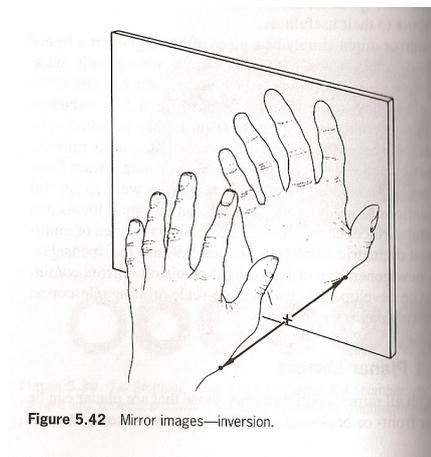
Définition du grandissement transversal: $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$

Seul le grandissement transversal est au programme, c'est-à-dire que nous étudierons toujours des objets « droits », parallèles au miroir (pas comme sur la figure ci-dessus).

Dans le cas du miroir plan, le grandissement transversal vaut simplement un :

Pour le miroir plan: $\gamma = 1$

Attention : L'image n'est pas forcément identique à l'objet à travers un miroir plan. En effet une main droite a pour image une main gauche (cf figure ci-dessous).



Exercice d'application 1 : Taille d'un miroir pour se voir en entier

Une femme de 1,60 m se tient devant un miroir vertical (type salle de bain).

Quelle doit-être la hauteur minimale du miroir et à quelle distance du sol doit-il se trouver pour que la femme puisse se voir en entier ? On suppose que les yeux de la femme se situent à 10 cm en dessous du haut de son crâne.

Exercice d'application 2 : Reflet

La photo ci-dessous est-elle à l'endroit ou à l'envers ?

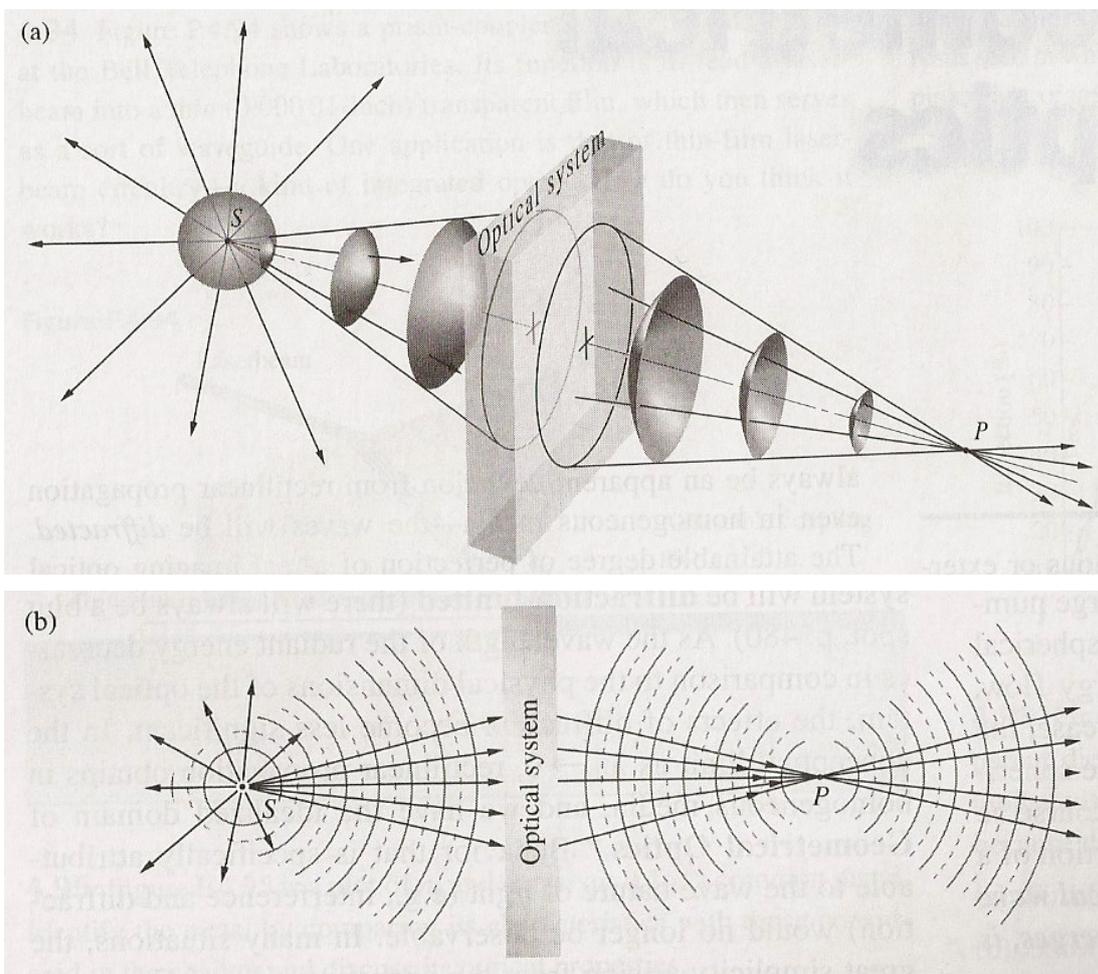


Pour répondre à la question, on peut considérer les deux images du soleil. L'une n'est pas cachée, l'autre est masquée par des branches. On peut essayer de faire un dessin du trajet des rayons lumineux issus du soleil, ceux qui arrivent directement dans l'appareil photo et ceux qui subissent une réflexion sur l'eau avant d'arriver dans l'appareil photo.

III – Stigmatisme et conditions de Gauss

3.1 Généralité

Pour que l'image d'un objet étendu soit nette, il est nécessaire que le système optique soit stigmatique pour tous les points de l'objet (cf. figure ci-dessous).



Le stigmatisme rigoureux est rarement réalisé (sauf pour le miroir plan) mais on se contente d'un stigmatisme approché. Encore ce dernier n'a-t-il lieu que si l'on respect certaines conditions dans l'utilisation des systèmes optiques comme nous allons le verrons.

On obtient un **stigmatisme approché** si les dimensions de la tache image sont inférieures ou égales à celles de la cellule réceptrice (cellule de la rétine, grain de la pellicule photographique, pixel du capteur CCD etc...)

3.2 Stigmatisme approché, exemple du dioptre plan

Considérons un **dioptr**e, c'est-à-dire une surface de séparation entre deux milieux d'indice de réfraction différents (par exemple la surface de séparation entre l'air et l'eau). Nous allons étudier la formation de l'image d'un objet à travers un dioptr. Par exemple, quand on regarde un poisson dans une rivière, on ne voit pas le poisson mais son image.

Un objet ponctuel P est observé au travers d'un dioptr air-verre (cf. figure ci-dessous). S'il émet un faisceau très large, il n'a pas d'image à proprement parler, il est vu sous la forme d'une tache s'étalant de P'_1 à P'_3 .

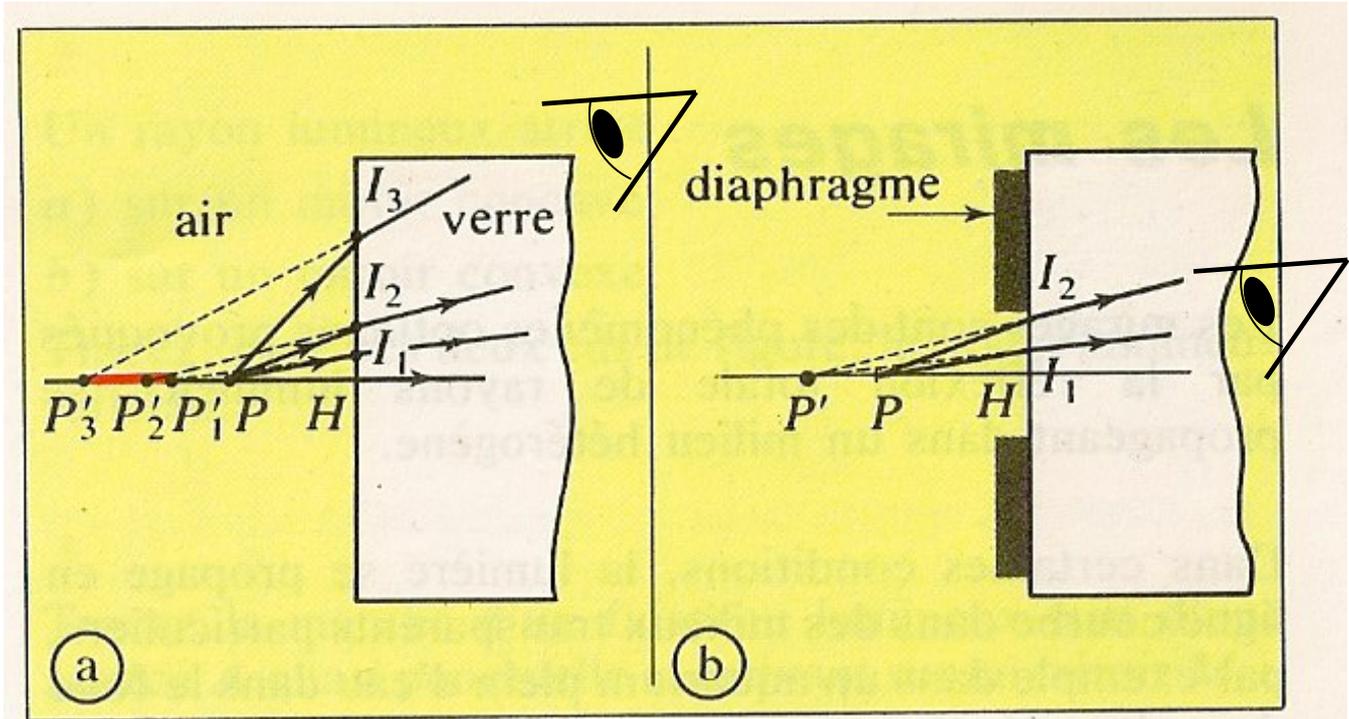


Fig. 7.22 — a) *Le dioptre plan n'est pas stigmatique. A la place de l'image de P , on observe une tache.*
b) *Une fois diaphragmé, le dioptre plan assure un stigmatisme approché.*

Le dioptre n'est pas stigmatique. Si on diaphragme à l'aide d'un orifice ne laissant passer que des rayons peu inclinés par rapport à la normale au dioptre, la tache se restreint et apparaît comme un image ponctuelle P' .

Dans ces conditions, le dioptre devient approximativement stigmatique. Les figures suivantes illustrent le stigmatisme approché du dioptre plan

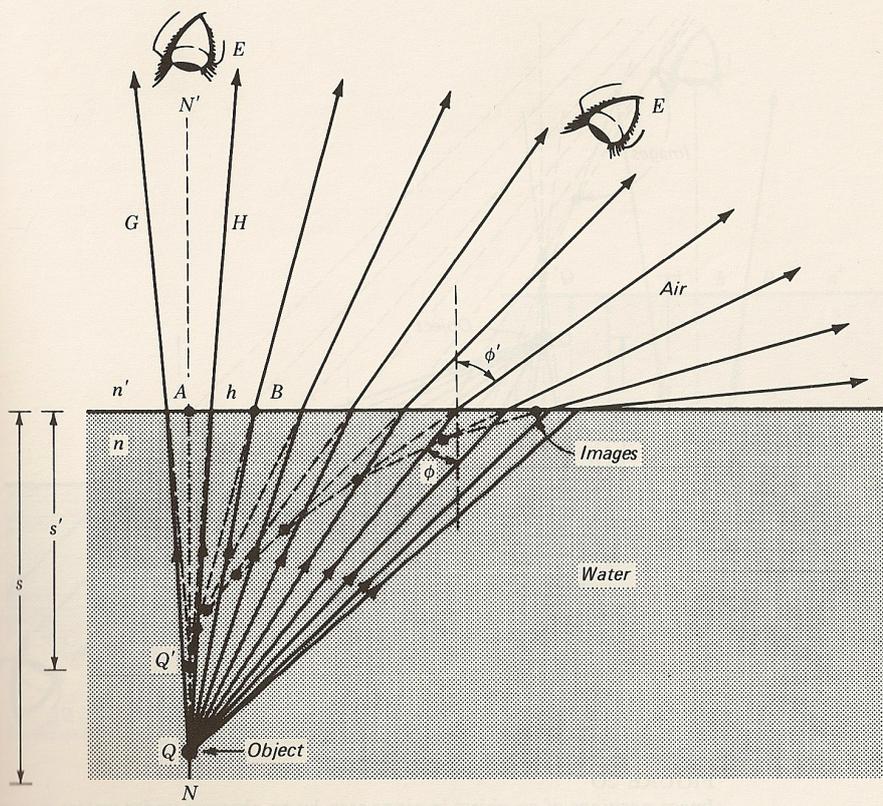


FIGURE 2N
Image positions of an object under water as seen by an observer above; $n > n'$.

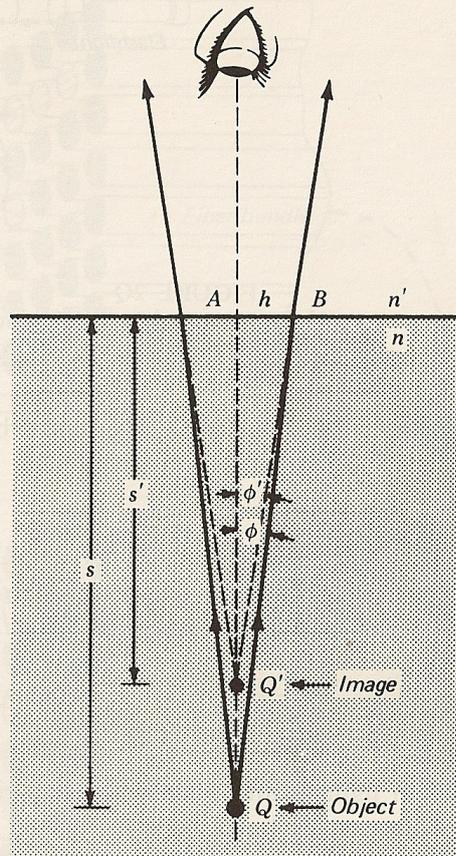


FIGURE 2P
Paraxial rays for an object in water and observed from the air above.

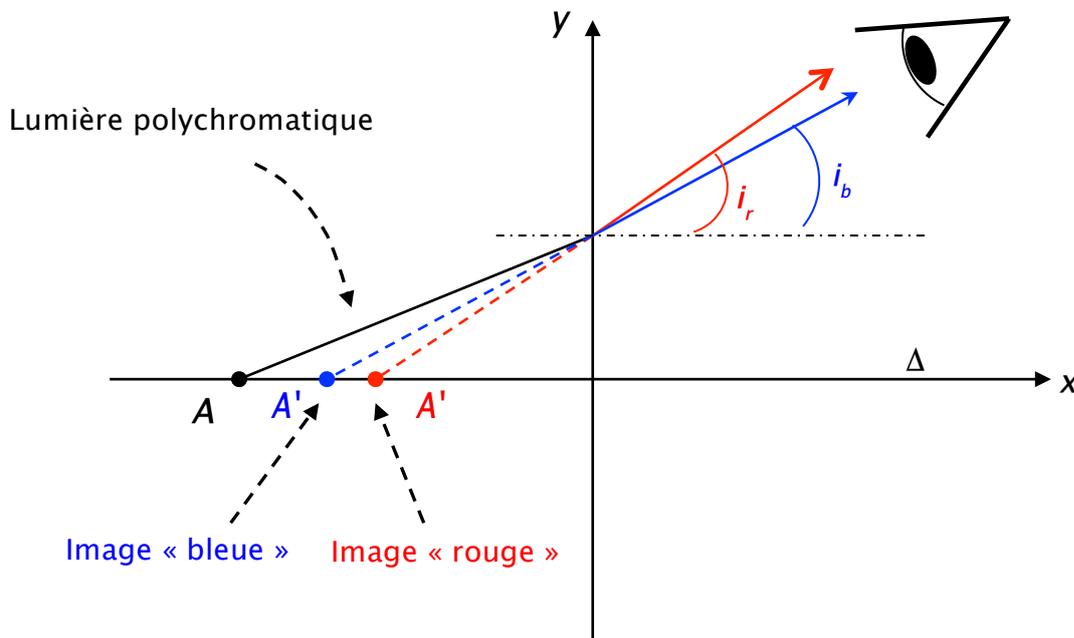
3.3 Lumière polychromatique, aberrations chromatiques

On se place toujours dans le cas des rayons lumineux faiblement inclinés par rapport à l'axe optique. Mais à présent, on considère un objet qui **émet de la lumière polychromatique** (ce qui est quasiment toujours le cas dans la pratique).

Nous savons que l'indice de réfraction est fonction de la longueur d'onde considérée ; $n = f(\lambda_0)$.

Ainsi à chaque longueur d'onde (chaque couleur) correspond une image spécifique. Globalement cela produit une image trouble irisée. On parle **d'ABERRATIONS CHROMATIQUES**.

Quand on souhaite former l'image d'un objet par un système optique (un appareil photo par exemple), la netteté de l'image est toujours limitée d'une part par les aberrations géométriques que nous avons rencontrées dans le paragraphe précédent et d'autre part par les aberrations chromatiques (il ne faut pas confondre ces deux types d'aberration).



3-4 Système optique centré et conditions de Gauss

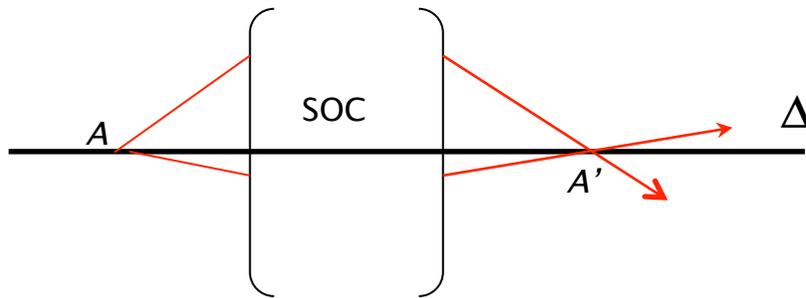
Un système optique est centré lorsqu'il possède un axe de symétrie de révolution Δ définissant ainsi l'**axe optique** du système. Par exemple les lentilles minces que nous allons étudier sont des systèmes optiques centrés.

Un rayon arrivant suivant l'axe optique d'un système optique n'est pas dévié.

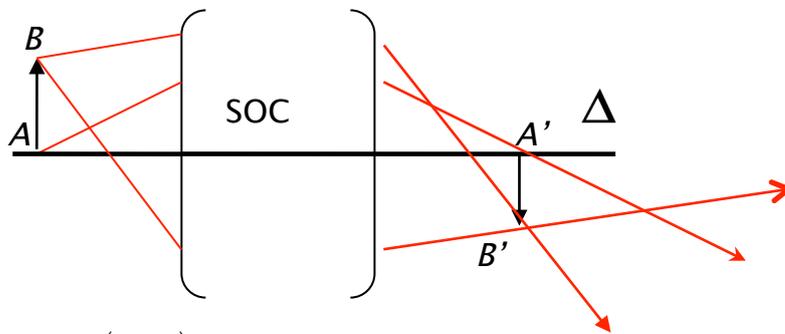
Les dioptries et les miroirs, qui constituent les systèmes optiques centrés que nous étudions, possèdent un plan tangent perpendiculaire à l'axe optique. C'est pourquoi les rayons lumineux qui sont suivant Δ ne sont pas déviés (loi de Snell-Descartes).

Un Système Optique Centré (noté SOC) est parfaitement stigmatique si tout rayon incident qui passe par A émerge en A' .

Si $A \in \Delta$ et A' image de A , alors $A' \in \Delta$.



Les appareils d'optique sont utilisés pour observer des objets non ponctuels mais étendus et de façon nette → il faut être stigmatique pour tous les couples conjugués.



Le stigmatisme pour tout couple (A, A') de l'axe optique doit se conserver pour tout couple (B, B') dans un plan perpendiculaire à Δ , on parle D'APLANETISME RIGOUREUX.

Exemples: œil, appareil photographique, lunettes...

A part le miroir plan, les SO ne sont pas rigoureusement stigmatiques.

MAIS → Stigmatisme approché lorsque la dimension de la « tache image » reste assez petite pour être considérée comme ponctuelle par le récepteur (œil, appareil photo, caméra...)

On va donc se placer dans des conditions particulières, dites **conditions (ou approximation) de Gauss**, pour considérer les SO comme quasi stigmatiques.

CONDITIONS DE GAUSS (stigmatisme approché)

➔ On ne prend que les rayons faiblement inclinés par rapport à l'axe optique

➔ On ne considère que les rayons voisins de cet axe optique

}

RAYONS PARAXIAUX

Dans la pratique, pour réaliser les conditions de Gauss, il faut que le système optique possède un diaphragme d'entrée limitant l'inclinaison des rayons, dans ce cas $\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx \alpha$. Mais si le diaphragme est trop petit, l'image est peu lumineuse (la quantité de lumière qui rentre dans le S.O est faible) et on voit apparaître le phénomène de diffraction (il faut trouver le bon compromis) (cf. figure ci-dessous).

BILAN: Facteurs jouant sur la dimension de l'image d'un objet ponctuel donc sur la netteté de formation des images :

- ⇒ Les **aberrations géométriques** dues au système optique lui-même en l'absence de stigmatisme rigoureux.
- ⇒ Les **aberrations chromatiques** dues à la nature polychromatique de la lumière naturelle.
- ⇒ La **structure granulaire** du récepteur.
- ⇒ La **nature ondulatoire de la lumière** provoquant de la diffraction et limitant la résolution des instruments d'optique (cf cours de PT).

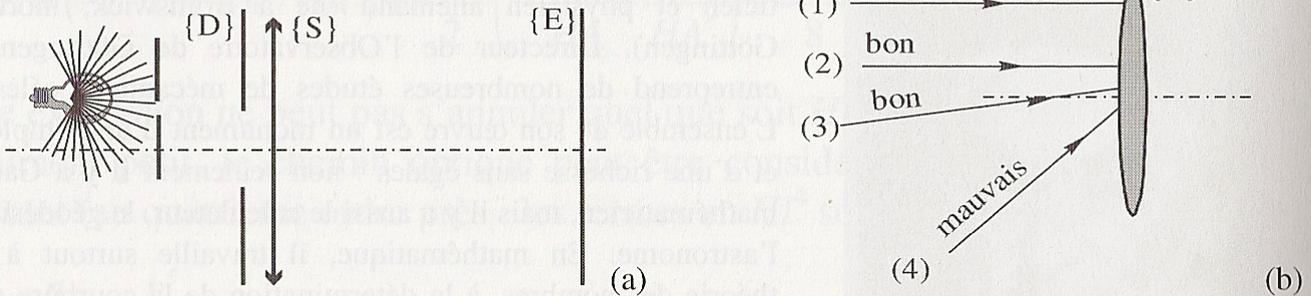


Fig. 3.36 Conditions de Gauss : (a) L'image sur l'écran [E] est convenable si [E] est à distance convenable, si S n'est pas éloignée de l'axe et le diaphragme (D) peu ouvert. (b) Les *bons rayons* (2) et (3) rencontrent la lentille près de l'axe et sont peu inclinés sur l'axe : ils obéissent aux conditions de Gauss. Il faut se limiter aux bons rayons, pour obtenir une image convenable (stigmatisme approché).