

Chapitre 2 : Formation des images

LE COURS

A Généralités sur la formation des images

A.1	Stigmatisme	1
A.2	Réalité et virtualité	2
A.3	Observation d'une image	5

B Stigmatisme approché

B.1	Existence de systèmes rigoureusement stigmatiques?	6
B.2	Condition d'un stigmatisme approché	7

C Conditions de Gauss pour les systèmes centrés

C.1	Systèmes optiques centrés	9
C.2	Conditions de Gauss	10
C.3	Aplanétisme	12

Dans ce chapitre, nous nous plaçons dans le cadre de l'**optique géométrique** (voir chapitre **OG1 - Notions élémentaires d'optique géométrique**). Nous pourrions ainsi utiliser la notion de **rayon lumineux** pour expliquer la formation des images. De plus, on se restreindra à des **milieux transparents, linéaires, homogènes et isotropes** (dans lesquels les rayons se propagent en ligne droite).

A Généralités sur la formation des images

A.1 Stigmatisme

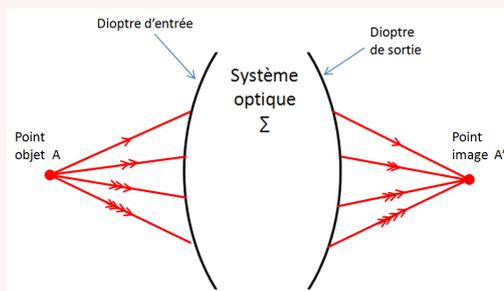
Définition

Pour un système optique Σ donné, lorsque tous les rayons incidents issus d'un même point A quelconque produisent des rayons émergents passant par un même point A' , le système est dit **stigmatique**.

On dit que A' est le **point image conjugué** du point objet A . On notera cette conjugaison sous la forme :

$$A \xrightarrow{\Sigma} A'$$

(on dira « A' est le conjugué de A à travers Σ »)



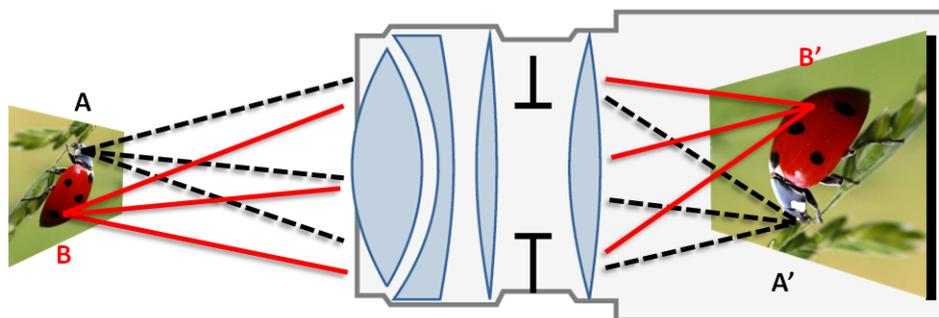
(R) En utilisant le principe du retour inverse de la lumière, A est également le point image du point objet A' si on inverse la marche des rayons lumineux :

$$A' \xrightarrow{\Sigma} A$$

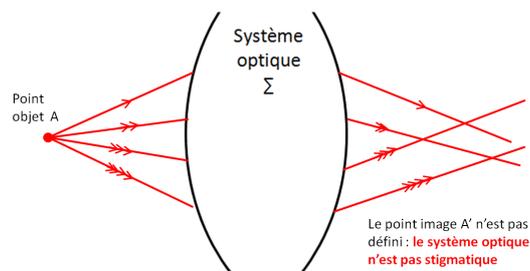
Ainsi, lorsqu'on souhaite réaliser l'image d'un objet étendu (*c.à.d. constitué d'une infinité de points objets*) à travers un système optique, **la propriété de stigmatisme du système optique permettra d'assurer que l'image correspondante soit bien nette**.

Le stigmatisme est donc un critère important pour des instruments d'optiques tels que les microscopes, lunettes astronomiques, appareils photographiques, ..., afin que les images restituées soient fidèles à l'objet observé.

Par exemple, pour prendre une belle photographie de la coccinelle ci-dessous, il est nécessaire que chaque point objet de cette source lumineuse étendue (*oui, la coccinelle est une source lumineuse ! sinon on ne la verrait pas, elle rediffuse la lumière du jour notamment ...*) ait un point image bien défini qui lui correspond de manière univoque :

Appareil photo *reflex*

À l'inverse, pour un système optique non-stigmatique, l'image finale de l'objet ne sera pas bien définie si les différents rayons émergents du dioptre de sortie et initialement issu d'un unique point objet ne semblent pas tous produire un même point image.



A.2 Réalité et virtualité

a. Types de faisceaux lumineux

Un faisceau est un ensemble de rayons lumineux. Lorsqu'on s'intéressera à la construction des images, on distinguera différents types de faisceaux lumineux :

Faisceau convergent	Faisceau divergent	Faisceau parallèle
Tous les rayons se croisent en un même point :	Tous les rayons proviennent d'un même point :	Tous les rayons sont parallèles entre eux :

► Interprétation d'un faisceau parallèle

En imaginant un faisceau très faiblement convergent, ou bien un faisceau très faiblement divergent, dans chacun de ces deux cas, le faisceau tend à devenir parallèle. De plus, dans chacun de ces deux cas le point de convergence ou divergence tend à s'éloigner.

Ainsi, suivant le contexte (*nous éclaircirons ce point plus tard*), le cas d'un faisceau parallèle peut être interprété :

- soit comme un faisceau convergent à l'infini ;
- soit comme un faisceau divergent depuis l'infini.



b. Réalité ou virtualité

Définitions

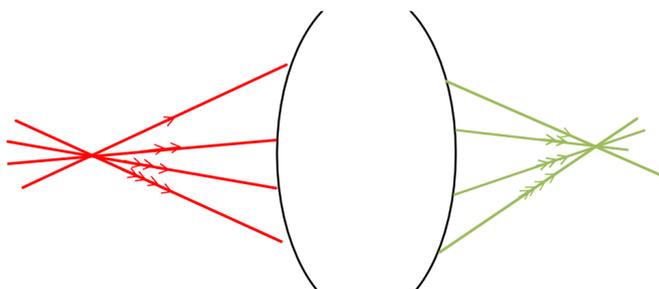
Notons A' le conjugué de A à travers le système Σ : $A \xrightarrow{\Sigma} A'$. On définit le caractère réel ou virtuel de chacun de ces deux points ainsi :

Type de point	Type de faisceau associé	Localisation du point
A réel	Faisceau <u>incident</u> divergent	avant le dioptre d'entrée au point de divergence
A virtuel	Faisceau <u>incident</u> convergent	après le dioptre d'entrée au point de convergence
A' réel	Faisceau <u>émergent</u> convergent	après le dioptre de sortie au point de convergence
A' virtuel	Faisceau <u>émergent</u> divergent	avant le dioptre de sortie au point de divergence

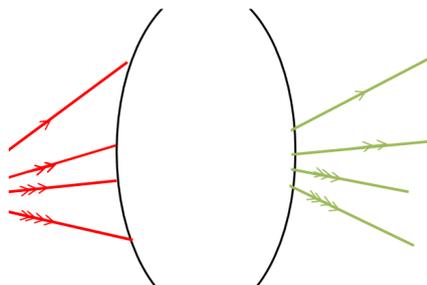
Exemples

Préciser la position du point objet A et du point image A' . Préciser également leur nature (réelle ou virtuelle).

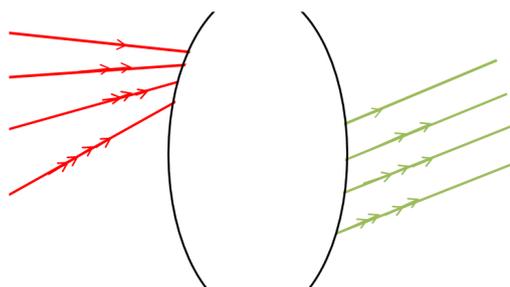
► Exemple 1

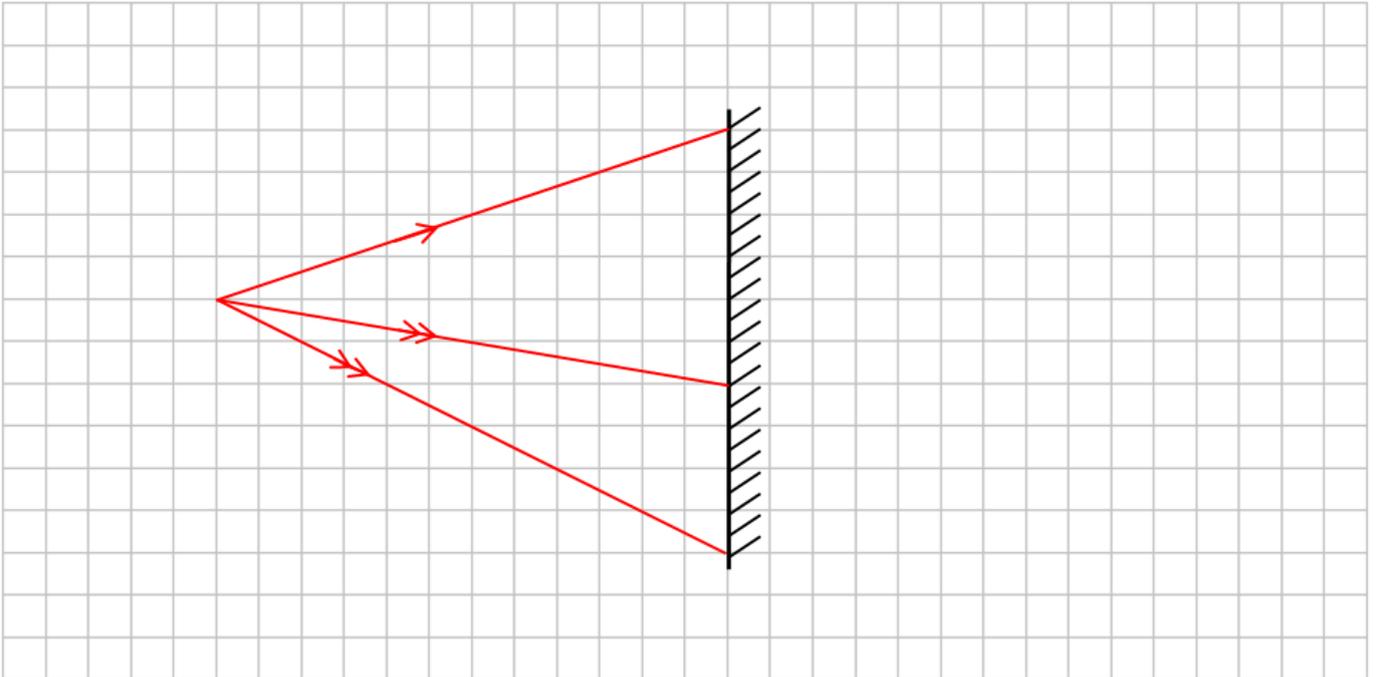
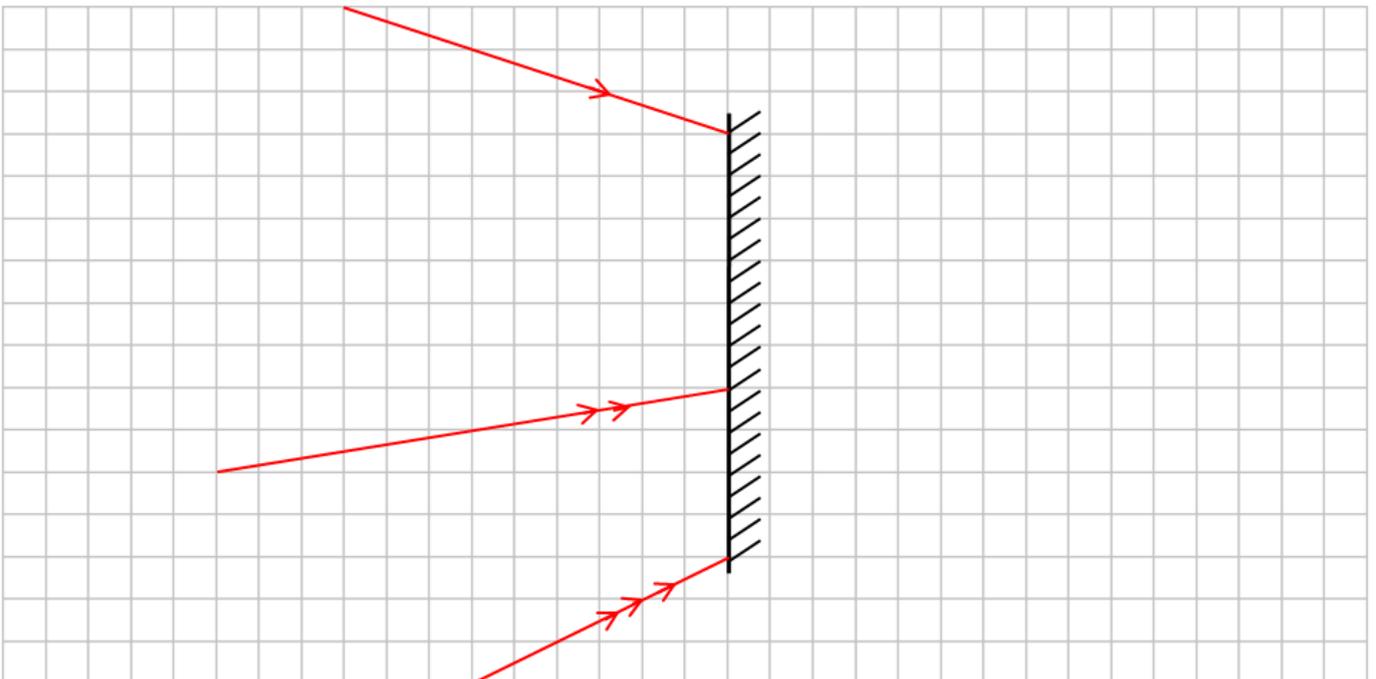


► Exemple 2



► Exemple 3

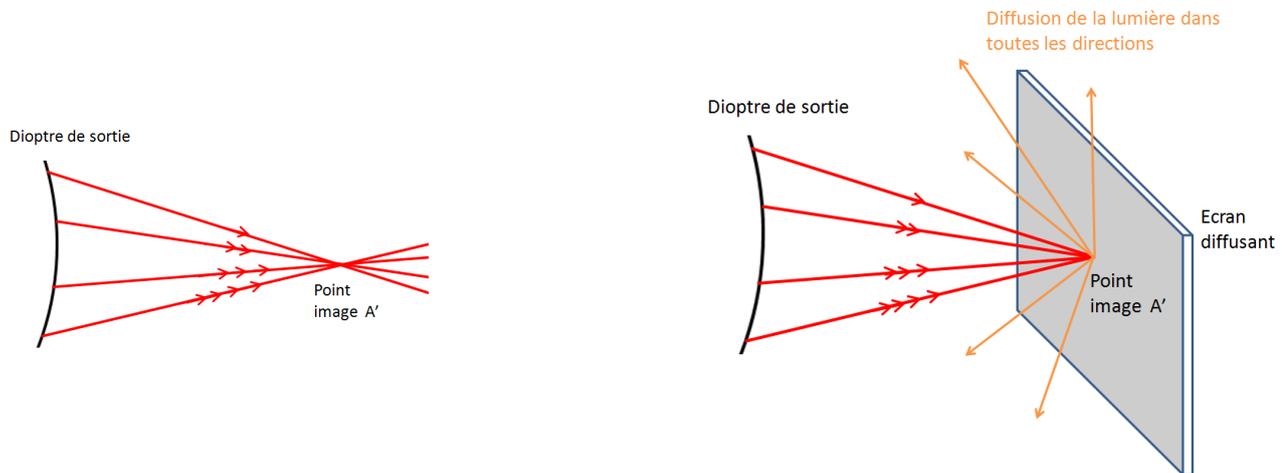


**c. Exemple du miroir plan****► Cas d'un point objet réel****► Cas d'un point objet virtuel****► Conclusion**

A.3 Observation d'une image

a. Cas d'une image réelle

Pour observer une image réelle, on pourrait simplement utiliser notre œil recueillant les rayons issus du point de divergence A' . Mais si l'observateur est mal positionné, il ne verra rien !



3

On préférera donc utiliser un **écran diffusant** placé précisément là où se forme l'image : la diffusion permettra de réémettre la lumière dans toutes les directions. L'œil de l'observateur n'a plus qu'à observer l'écran, peu importe la direction d'observation (à condition d'être placé du bon côté de l'écran !...)

(R) Si on utilise un capteur (capteur CCD par exemple), alors dans ce cas, il n'y a plus besoin de l'œil : il suffira de remplacer l'écran par le capteur. (Néanmoins, l'œil sera bien sûr utile pour regarder l'écran d'ordinateur auquel est relié le capteur ...)

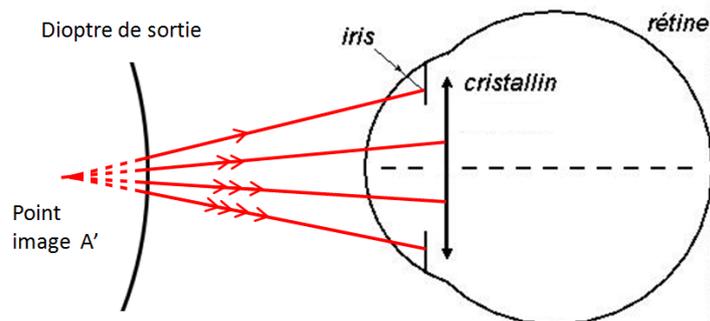
b. Cas d'une image virtuelle

D'une manière générale, dans le processus de fabrication d'une image et de l'observation de celle-ci, il y aura toujours *in fine* une image réelle à observer, même si l'image produite par le système optique est virtuelle. En effet, un capteur de lumière sera nécessairement utilisé (un capteur CCD, ou bien les cellules de la rétine de l'observateur,...) et une exploitation correcte de ce capteur implique qu'on y forme des images réelles à sa surface. Ainsi, pour observer une image virtuelle fournie par un système optique Σ , il sera nécessaire d'utiliser un système optique annexe permettant cela :

$$A \xrightarrow{\Sigma} A' \text{ virtuel} \xrightarrow{\Sigma_{\text{capteur}}} A_{\text{capteur}} \text{ réel !}$$

Exemple

La plupart du temps, ce système optique annexe Σ_{capteur} ne sera rien d'autre que notre œil ! à condition de bien placer son œil afin qu'il puisse collecter les rayons divergents provenant de l'image A' que l'on souhaite observer :



4

ATTENTION !

Il est bien sûr inconcevable de vouloir utiliser un écran diffusant pour y former un point image A' virtuel. Autrement dit, l'usage d'un écran n'a de sens que si l'image est réelle !

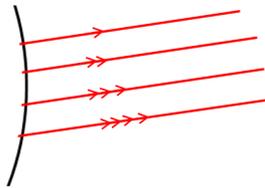
**c. Cas d'un faisceau de sortie parallèle**

Comment observer correctement le point image fourni par un système lorsque le faisceau de sortie correspondant est parallèle ?

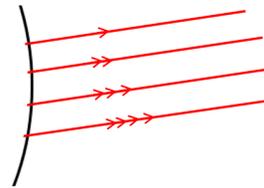
Première possibilité, en interprétant le faisceau de sortie comme un faisceau convergent à l'infini :

Deuxième possibilité, en interprétant le faisceau de sortie comme un faisceau divergent depuis l'infini :

Dioptre de sortie



Dioptre de sortie

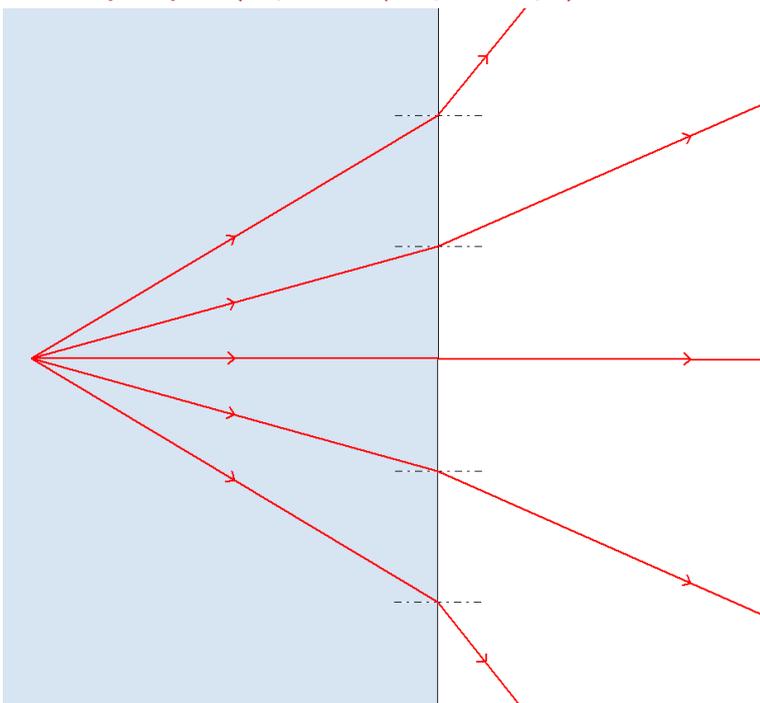


Bien sûr, c'est la deuxième solution qui sera à mettre en œuvre !

(R) La plupart des instruments d'optique (loupe, jumelles, lunette astronomique, microscope) fonctionnent précisément de cette manière : ils produisent des images rejetées à l'infini et nous observons ces images virtuelles en plaçant directement notre œil après le dioptre de sortie du système optique. Une image rejetée à l'infini permet au cristallin de ne pas se contracter et est donc reposant pour l'œil.

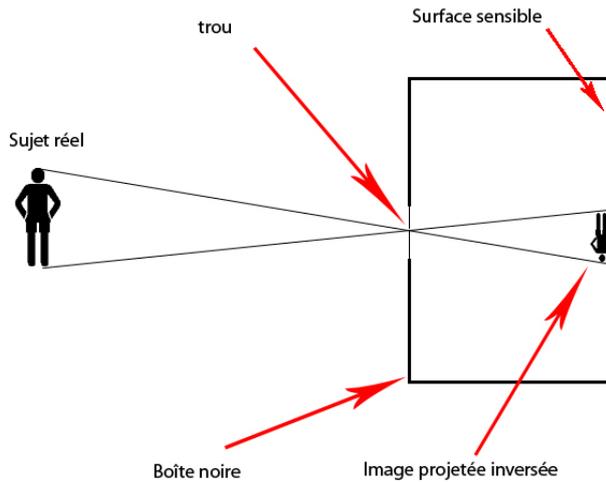
B Stigmatisme approché**B.1 Existence de systèmes rigoureusement stigmatiques ?**

Nous avons montré dans la partie **A** que le miroir plan est un système rigoureusement stigmatique. En existe-t-il d'autres ?

Exemples**► Le dioptre plan (dioptre verre/air par exemple)**

► Le sténopé

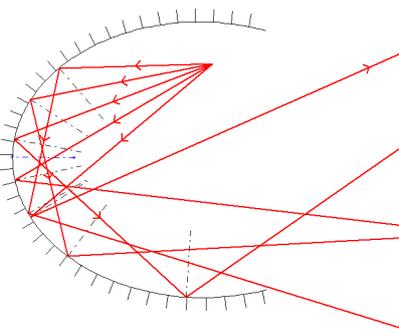
Il s'agit de l'ancêtre de l'appareil photographique : la chambre noire («camera obscura» en italien)...



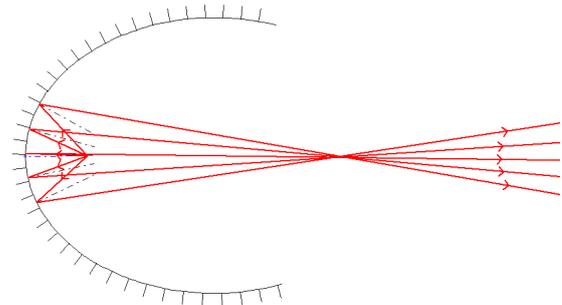
7

► Miroir elliptique

(R) (Une ellipse est caractérisée par la position de ses deux foyers F et F' et par son demi-grand axe a tel que : $\forall M \in \text{ellipse}, FM + F'M = 2a$)



Dans ce 1er cas ci-dessus, nous avons choisi un point objet A quelconque. Il n'apparaît pas de point image conjugué bien défini. Nous n'observons donc pas de stigmatisme ici.



Dans ce 2ème cas, A est confondu avec un des foyers de l'ellipse. On constate qu'il apparaît un point image A' bien défini confondu avec l'autre foyer de l'ellipse (cela peut se démontrer en utilisant la définition d'une ellipse et les lois de réflexion de Descartes).

8

Ainsi, le miroir elliptique ne semble stigmatique que pour un couple de points bien particulier, F et F' . Le stigmatisme est donc très limité ici !

En pratique, on retiendra qu'il **n'existe pas de systèmes rigoureusement stigmatiques.**

La notion de stigmatisme est donc un critère idéal vers lequel on aimerait tendre lors de la conception d'un système optique.

(R) Même le miroir plan, qui est rigoureusement stigmatique, n'existe pas en réalité car est-on capable de fabriquer des miroirs qui soient **parfaitement** plans ? Non ... De plus, la surface métallique réfléchissante est surmontée d'une plaque de verre, or, d'après le premier exemple ci-dessus, l'existence d'un dioptre plan sur le parcours de la lumière ne peut que nuire au stigmatisme !

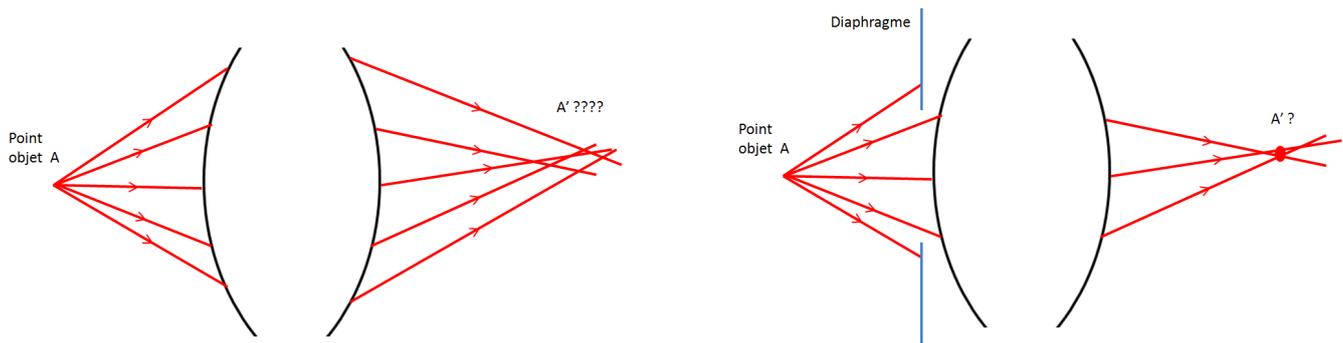
B.2 Condition d'un stigmatisme approché

Pourquoi n'arrive-t-on pas à trouver un système rigoureusement stigmatique ? (On vend pourtant dans le commerce des appareils optiques dont les marques revendiquent fièrement la qualité des images fournies.)

Peut-être parce que nous voudrions qu'il soit rigoureux justement : pour un point objet A donné nous voudrions que **tous** les rayons émergents passent par un même point A' par prolongement. Mais nous verrons qu'il n'est pas nécessaire d'être aussi exigeant.

► Sélection des «bons» rayons incidents

Si on arrive à identifier clairement une catégorie de rayons incidents qui défavorisent nettement le stigmatisme du système optique, alors nous pouvons dans certains cas les «supprimer», souvent à l'aide d'un diaphragme :



Ainsi, la «tâche image» créée par les rayons émergents peut tendre à devenir un unique point image d'autant plus lorsque l'on referme le diaphragme.

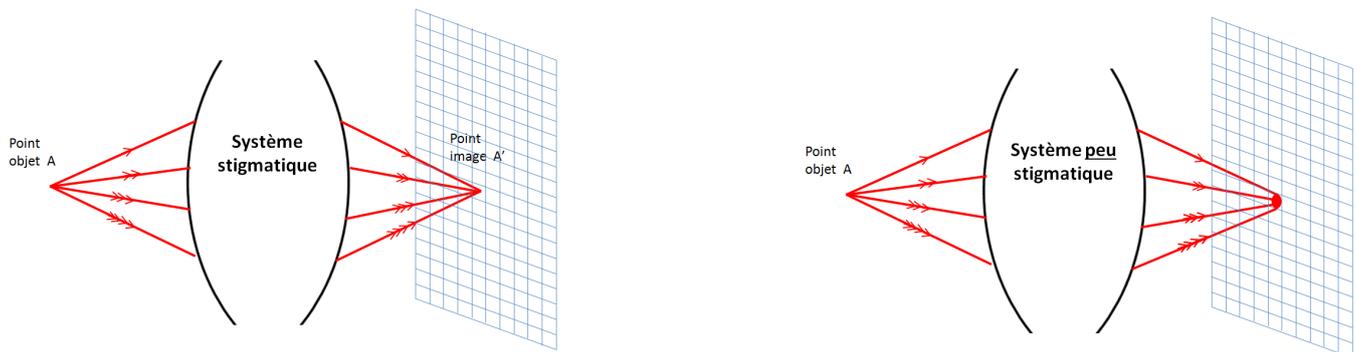
Mais il faudra bien sûr faire attention à ne pas trop refermer le diaphragme au risque de voir apparaître le phénomène de diffraction et donc d'étaler encore plus cette «tâche image».

Ainsi, même si on peut chercher à réduire sa taille, nous ne pouvons donc pas faire mieux que produire une «tâche image» au lieu d'un point image alors que l'objet initial est rigoureusement un point. **Cependant ...**

► Rôle du capteur

... est-il vraiment nécessaire que l'image d'un point objet soit rigoureusement un point ?

Par exemple, on souhaite prendre une photographie d'un point objet avec un appareil numérique dont le capteur est un capteur CCD constitué de plusieurs pixels, assimilables à des cellules rectangulaires sensibles à la lumière.



Étant limité par la résolution du capteur utilisé, un point image ne pourra pas être mieux défini qu'un pixel! Donc, même si le système est peu stigmatique, il le sera peut être suffisamment.

Condition d'un stigmatisme approché

Pour un point objet quelconque dont l'image finale réelle se forme sur un capteur, **si l'énergie lumineuse convergeant vers le capteur est concentrée dans une zone de taille plus petite que la dimension caractéristique d'une cellule du capteur**, alors le système optique pourra être considéré comme «suffisamment stigmatique».

On parlera alors de **stigmatisme approché**.

(R) Si le capteur est un capteur CCD, la cellule en question est un pixel.
Si le capteur est la rétine de l'œil qui observe directement l'image formée, la cellule est ... une cellule rétinienne, tout simplement!



C Conditions de Gauss pour les systèmes centrés

Dans cette partie **C**, nous allons préciser dans quelles conditions expérimentales il faut se placer afin qu'un système optique dit centré satisfasse un stigmatisme approché.

C.1 Systèmes optiques centrés

Définition

Un **système optique centré** est constitué de différents dioptries. L'ensemble possède un axe de symétrie de révolution commun, appelé **axe optique**.

Par convention, on oriente l'axe optique dans le sens de propagation de la lumière incidente.

L'intersection entre l'axe optique et un dioptrie est appelé **sommet** (de ce dioptrie).

Les plans perpendiculaires à l'axe optique sont appelés **plans transverses**.



10

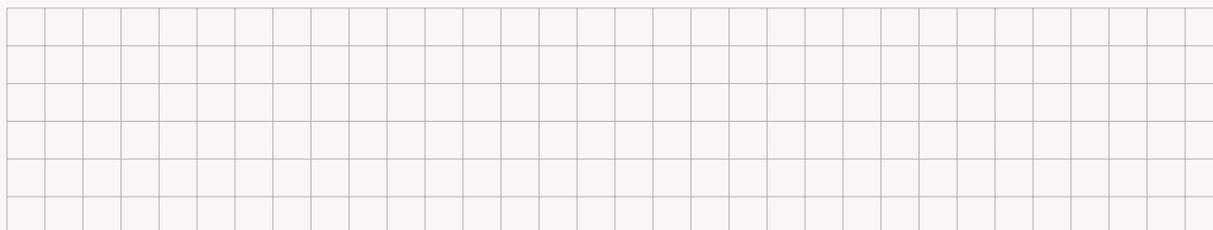
Exemples

*De nombreux systèmes optiques sont centrés. Lentille, viseur, œil, appareil photo, microscope, ...
Par contre, un prisme n'est pas un système optique centré.*

L'existence d'un axe de symétrie entraîne directement deux propriétés importantes :

Propriétés optiques des systèmes centrés

① Un rayon incident confondu avec l'axe optique produit un rayon émergent également confondu avec l'axe optique :



11

② Un point objet A situé sur l'axe optique possède un point image A' également sur l'axe optique :



R Ces propriétés se comprennent aisément avec un raisonnement en invoquant la symétrie de révolution : si le problème initial étant bien posé (point objet bien déterminé, système optique connu) est invariant par rotation autour de l'axe optique, alors nécessairement les rayons de sortie doivent aussi être invariants par rotation autour de l'axe optique. Cela entraîne donc naturellement les propriétés énoncées ci-dessus.

C.2 Conditions de Gauss

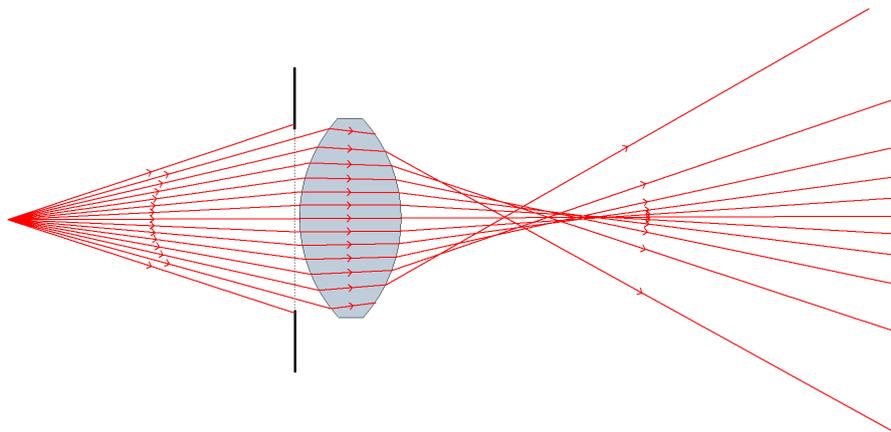
► Étude du stigmatisme d'une lentille convergente

Utilisons le logiciel de simulation OptGeo (*téléchargeable gratuitement sur internet*) permettant de tracer la marche de rayons lumineux pour différents types de systèmes optiques. Le logiciel n'utilise ni plus ni moins que les lois de Descartes pour cela.

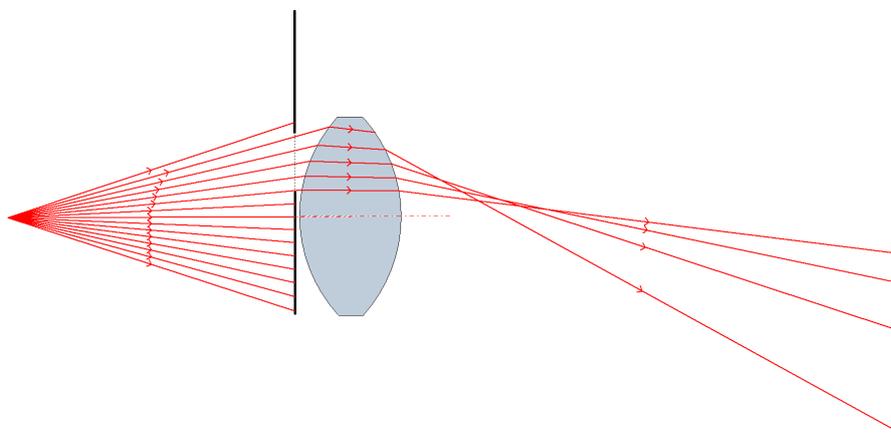
Illustrons le problème du stigmatisme sur l'exemple d'un système centré particulier : la lentille convergente. On la choisit ici biconvexe, et on choisit un indice de 1,6 pour le verre qui la constitue (l'air est assimilé au vide).

► Influence de la zone d'incidence sur le dioptr

On dispose d'un objet ponctuel (se comportant comme une source lumineuse ponctuelle). Plaçons-le par exemple sur l'axe optique de la lentille :

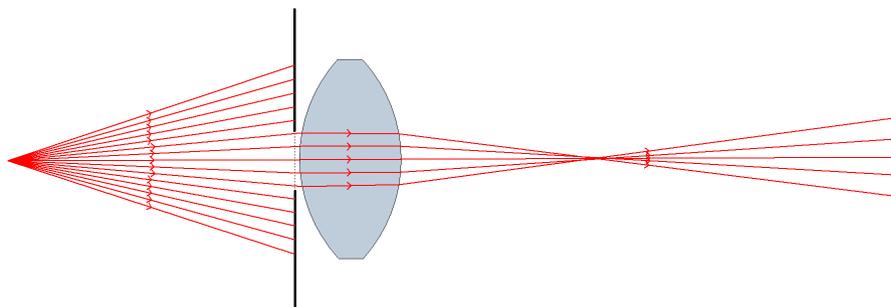


Le point conjugué n'est clairement pas défini : la lentille n'est pas stigmatique. Nous pouvons refermer légèrement le diaphragme pour éliminer certains rayons qui défavorisent le stigmatisme :



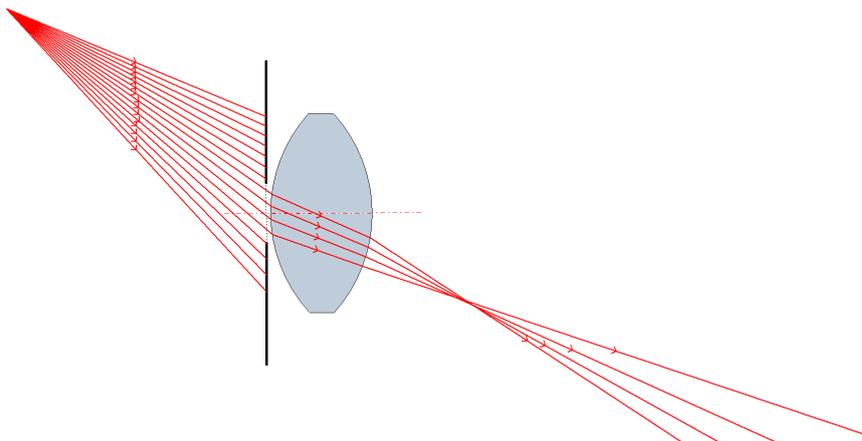
Manifestement, les rayons émergents ne convergent pas vers un même point. Ce n'est donc pas satisfaisant !

Essayons plutôt en centrant le diaphragme sur l'axe optique :



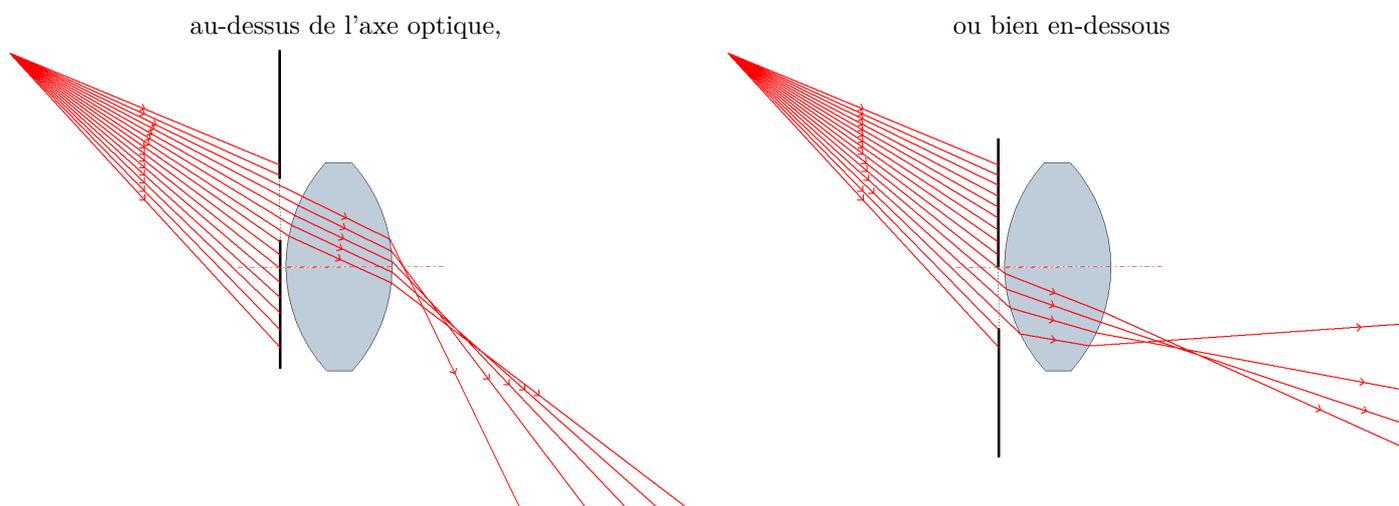
La convergence des rayons lumineux est nettement améliorée et donc le point image semble bien mieux défini.

Avec la même ouverture et même position du diaphragme, écartons maintenant l'objet ponctuel de l'axe optique :



Le point image reste encore bien défini.

Par contre, comme précédemment, le **stigmatisme se détériore à nouveau si on choisit des rayons incidents qui frappent le dioptre trop loin de l'axe optique**. Par exemple :



► Influence de l'inclinaison des rayons incidents

Désormais, d'après ce qui précède, nous savons qu'il vaut mieux ne sélectionner que des rayons incidents frappant le dioptre à proximité de l'axe optique. À présent, étudions l'influence de l'inclinaison des rayons par rapport à l'axe optique.

Avec des rayons fortement inclinés, le stigmatisme se détériore :

