

Chapitre 3 : Lentilles minces

LE COURS

A Qu'est-ce qu'une lentille ?

A.1	Présentation des lentilles sphériques	2
A.2	Modèle de la lentille mince	3

B Notions de foyer et plan focal

B.1	Foyers principaux d'une lentille	3
B.2	Plans focaux et foyers secondaires	5

C Construction géométrique des images

C.1	Règles de construction	6
C.2	Grandissement transversal	7

D Relations de conjugaison

D.1	Relation de conjugaison de Descartes	7
D.2	Relation de conjugaison de Newton	8

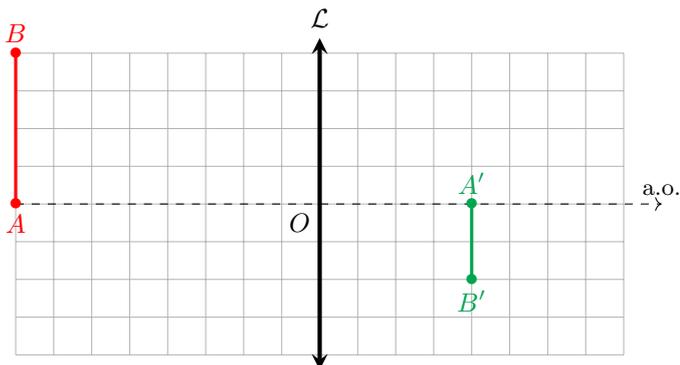
E L'œil et l'appareil photographique

E.1	L'œil	9
E.2	L'appareil photographique	11

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**. Enfin, on considère que les **conditions de Gauss** (voir chapitre **OG2 - Formation des images**) sont suffisamment bien vérifiées pour que le **stigmatisme** soit satisfaisant.

NOTION PREALABLE : qu'est-ce qu'une distance algébrique ?

Dans ce chapitre, il apparaîtra des segments verticaux et horizontaux. Nous attribuerons à leurs longueurs un signe, on parlera donc de **distances algébriques**. Cela nécessitera de faire apparaître une **convention de signe** sur les schémas. Par exemple :





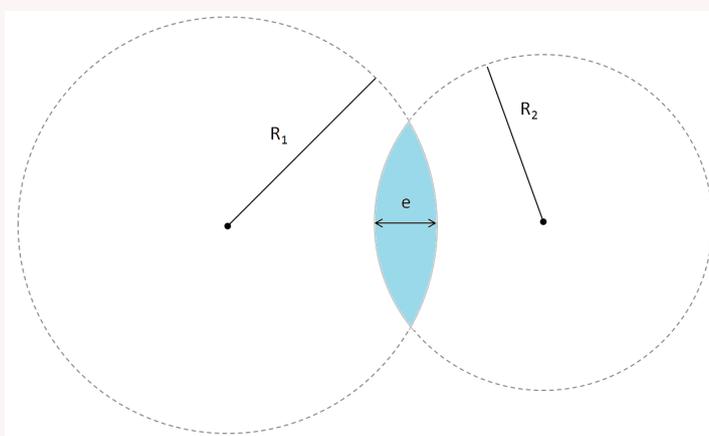
A Qu'est-ce qu'une lentille?

A.1 Présentation des lentilles sphériques

Définition

Une **lentille** est un système optique centré constitué d'un milieu transparent, linéaire, homogène et isotrope (généralement du verre) délimité par deux dioptries sphériques.

Sur le schéma ci-contre, les rayons de courbures des dioptries sont notés R_1 et R_2 , et e représente l'épaisseur de la lentille le long de l'axe optique de celle-ci.



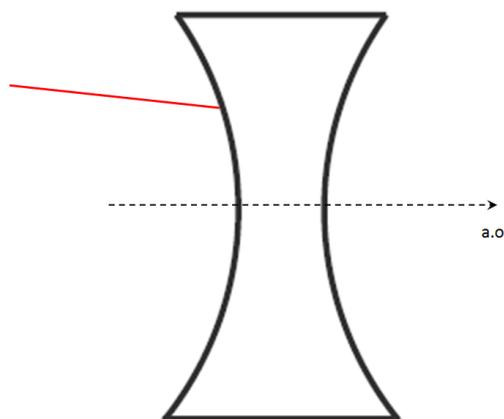
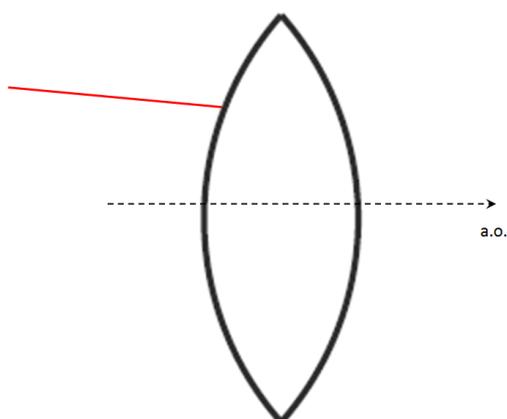
On distingue deux catégories de lentilles :

Lentilles à bords minces		
Biconvexe	Plan convexe	Ménisque convergent

Lentilles à bords épais		
Biconcave	Plan concave	Ménisque divergent

(R) *Validité de l'optique géométrique : il faut que les phénomènes de diffraction puissent être négligés. Ainsi, si on travaille dans domaine du visible, il faut : diamètre de l'ouverture des lentilles $\gg \lambda \simeq 1 \mu\text{m}$*

► Effet d'une lentille sur la déviation d'un rayon



- Une lentille à bords minces a tendance à rabattre les rayons vers l'axe optique.
- Une lentille à bords épais a tendance à écarter les rayons de l'axe optique.

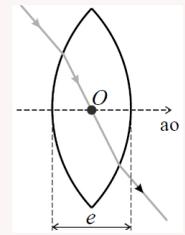
► Centre optique d'une lentille

Définition

A priori, une lentille modifie toujours la direction d'un rayon lumineux.

Mais, il existe toutefois un point particulier situé sur l'axe optique, tel que pour tout rayon passant par ce point, le rayon émergent de la lentille est de direction parallèle au rayon incident.

Ce point est appelé **centre optique** de la lentille noté O .



A.2 Modèle de la lentille mince

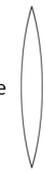
Définition

Une lentille est dite **mince** lorsque son épaisseur est très faible devant les rayons de courbures des dioptries ($e \ll R_1$ et $e \ll R_2$).

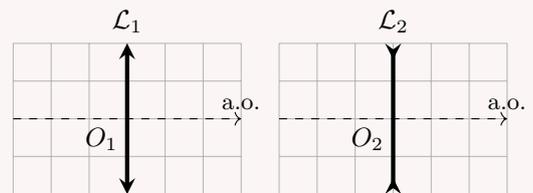
Lentille plutôt épaisse



Lentille plutôt mince



Dans ce cas, on néglige complètement cette épaisseur et on représente schématiquement les lentilles comme sur la figure ci-contre où \mathcal{L}_1 est une lentille convergente de centre optique O_1 et \mathcal{L}_2 est une lentille divergente de centre optique O_2 .



Ainsi, dans l'approximation de la lentille mince, un rayon incident passant par le centre optique n'est pas dévié.

R Attention à ne pas confondre lentille mince et lentille à bords minces ! Une lentille divergente est une lentille à bords épais mais peut être considérée comme une lentille mince si son épaisseur est négligeable.

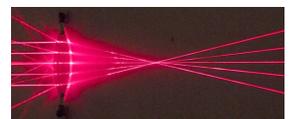
DANS TOUTE LA SUITE DU COURS, NOUS UTILISERONS LE MODÈLE LA LENTILLE MINCE.

B Notions de foyer et plan focal

B.1 Foyers principaux d'une lentille

► Foyer image principal

On peut effectuer l'expérience ci-contre avec une lentille convergente et différents faisceaux laser incidents parallèles entre eux. Il apparaît un point image bien défini.



Nous avons vu au chapitre **OG2 - Formation des images** qu'éclairer le dioptre d'entrée par un faisceau de rayons parallèles revient à disposer d'un point objet réel à l'infini. De plus, comme le faisceau est parallèle à l'axe optique de la lentille, alors ce point est situé sur l'axe optique.

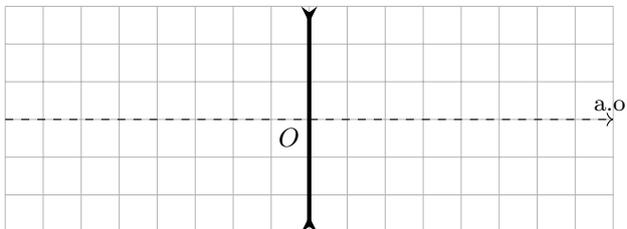
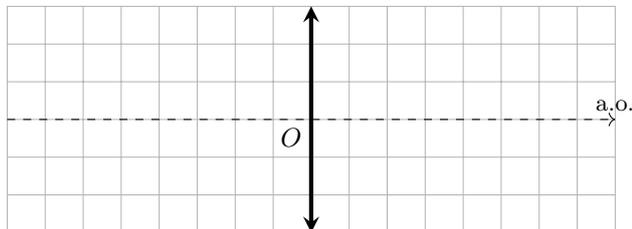


Définition

On appelle **foyer image principal** d'une lentille, noté F' , le point image conjugué d'un point objet réel à l'infini et situé sur l'axe optique, que nous noterons A_∞ :

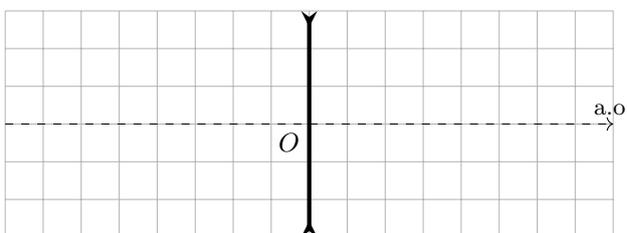
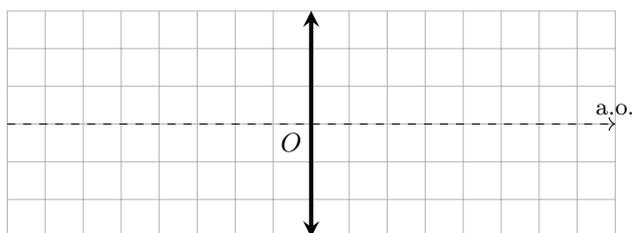


Le même phénomène peut être observé avec une lentille divergente, mais dans ce cas, le foyer image obtenu est virtuel :



► Foyer objet principal

En invoquant le principe du retour inverse de la lumière et en faisant pivoter les schémas ci-dessus de 180° horizontalement, rien n'interdirait d'observer ceci :



Cela peut être confirmé par l'expérience avec une lentille convergente par exemple. On oriente des faisceaux laser de telle sorte à ce qu'ils convergent en un point. Celui-ci se comporte alors comme un point objet pour une lentille disposée à droite. On place la lentille à une distance telle que le faisceau émergent observé est parallèle.



Définition

On appelle **foyer objet principal** d'une lentille, noté F , le point objet dont l'image conjuguée notée A'_∞ est située à l'infini et sur l'axe optique :



► Quelques propriétés des foyers principaux

Des schémas et discussions précédentes, on peut en déduire quelques propriétés :

- Il apparaît clairement que F et F' sont symétriques l'un de l'autre par rapport au centre optique O .
- Une lentille **convergente** est caractérisée par un foyer objet F et un foyer image F' **réels**.
- Une lentille **divergente** est caractérisée par un foyer objet F et un foyer image F' **virtuels**.

Définitions

La **distance focale** est définie par : . Ainsi :

- pour une lentille , $f' > 0$;
- pour une lentille , $f' < 0$.

La **vergence** d'une lentille est l'inverse de sa distance focale :



(R) Comme F est le symétrique de F' par rapport à O , on pourrait aussi écrire : $f' = \overline{OF'} = -\overline{OF} = \overline{FO}$.

ATTENTION, erreur classique ! ➤➤



F' N'EST PAS le point image conjugué de F !

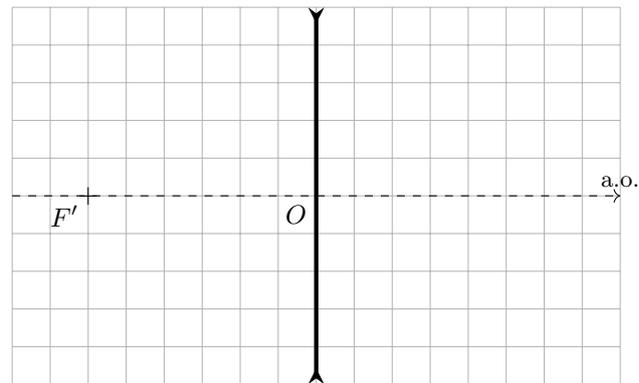
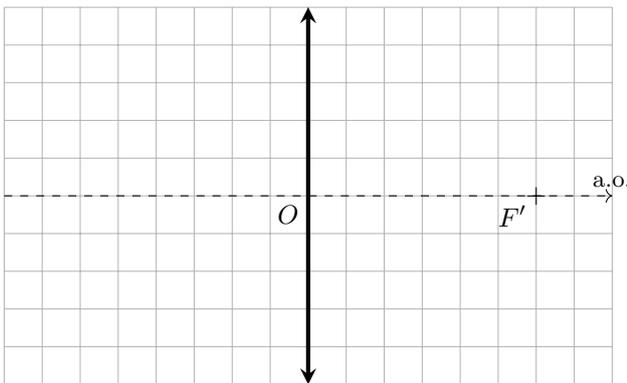


B.2 Plans focaux et foyers secondaires

Soit un objet $A_\infty B_\infty$ situé à l'infini dans un plan transverse, B_∞ n'étant pas sur l'axe optique contrairement à A_∞ . Alors **par aplanétisme**, l'image conjuguée $A'B'$ est située dans un plan transverse, et puisque A' est confondu avec F' (par définition de F'), on en déduit que B' est situé dans le plan transverse contenant F' :

Le plan transverse contenant F' est appelé **plan focal image**.

Le point image fourni par une lentille et conjugué d'un point objet à l'infini se forme nécessairement dans le plan focal image de cette lentille :

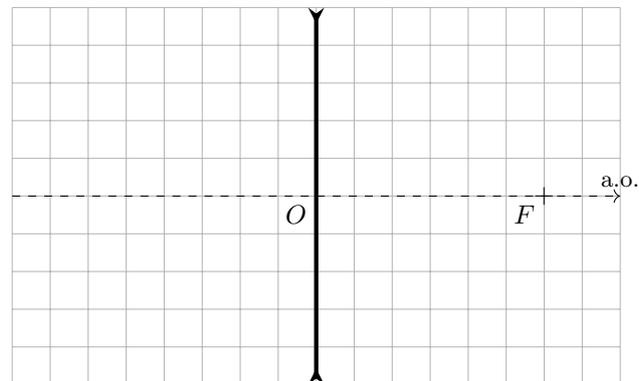
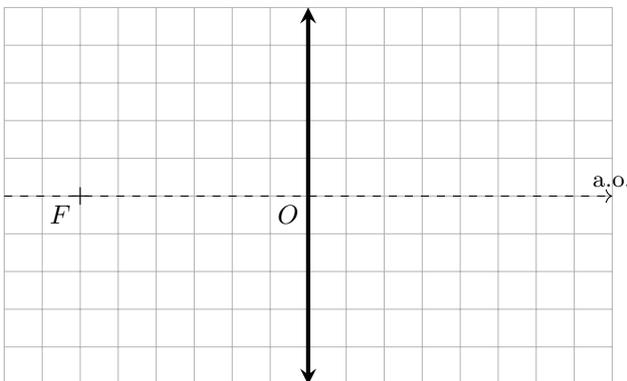


De même :

Le plan transverse contenant F est appelé **plan focal objet**.

Le point objet conjugué par une lentille d'un point image situé à l'infini est nécessairement situé dans le plan focal objet de cette lentille :

(...par un raisonnement similaire, ou simplement, en exploitant le principe du retour inverse de la lumière ...)



On parlera parfois de **foyers** (objet ou image) **secondaires** : il s'agit des points autres que F et F' contenus dans les plans focaux (objet ou image respectivement).



ACTIVITÉ N°1

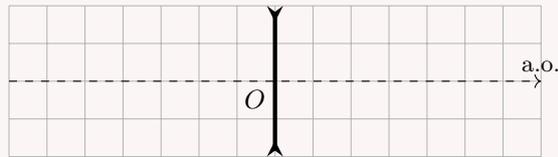
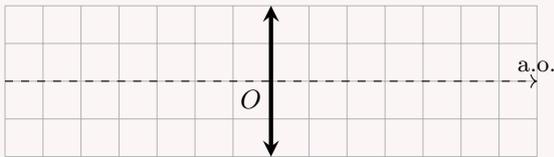
C

Construction géométrique des images

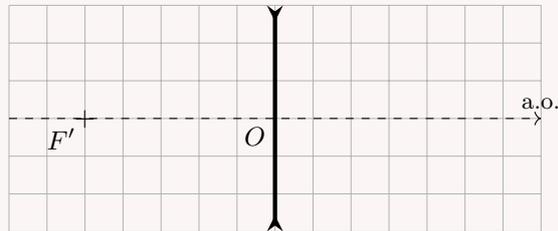
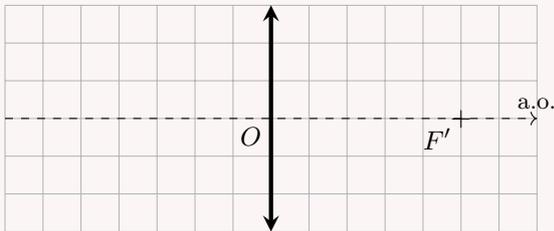
C.1 Règles de construction

Pour construire géométriquement les images conjuguées d'objets donnés, récapitulons les règles de construction établies jusqu'à présent **À CONNAÎTRE PAR CŒUR** :

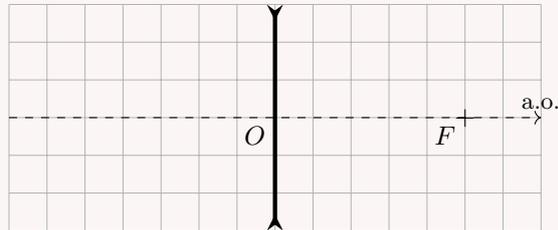
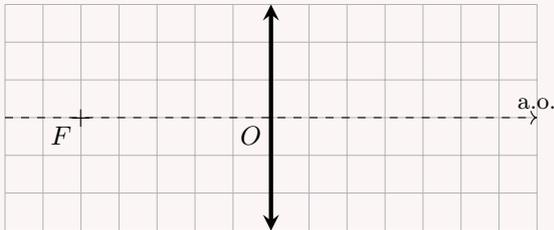
1. Un rayon incident passant par le centre optique O n'est pas dévié (*déjà énoncé et expliqué, voir paragraphe A.2*) :



2. Un rayon incident parallèle à l'axe optique produit un rayon émergent de support passant par F' (*d'après la définition du foyer image principal, voir paragraphe B.1*) :

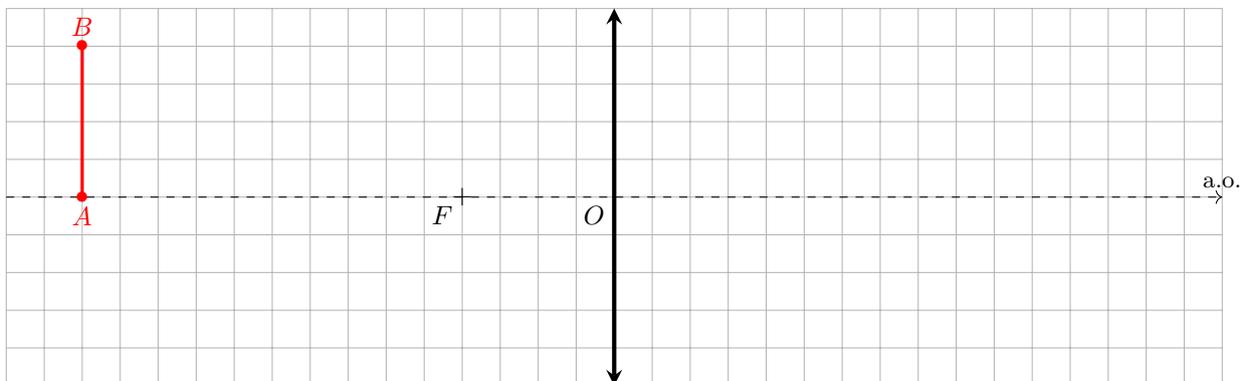


3. Un rayon incident de support passant par F produit un rayon émergent parallèle à l'axe optique (*d'après la définition du foyer image principal, voir paragraphe B.1*) :



► Comment déterminer l'image d'un objet situé dans un plan transverse ?

Voici l'exemple le plus basique qu'il soit et **À SAVOIR REFAIRE SANS HÉSITATION** :



Cet exemple simple permettra de bien mémoriser les règles ci-dessus et de savoir les transposer dans n'importe quelle situation (lentille divergente, objet virtuel, etc).



ACTIVITÉ N°2

Exemple

Dans l'exemple du paragraphe C.1, lire graphiquement les valeurs de \overline{OA} et f' .
Prédire alors la valeur de $\overline{OA'}$ et vérifier que c'est cohérent avec le tracé qui a été effectué.



16



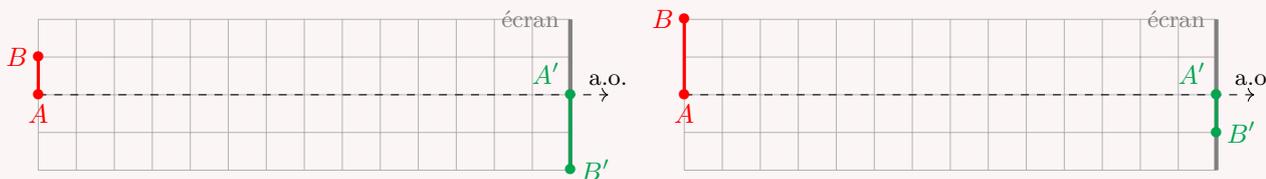
ACTIVITÉ N°3

La relation de conjugaison de Descartes permet par ailleurs de montrer la propriété ci-dessous.

Obtention d'une image réelle avec un objet réel et une lentille convergente

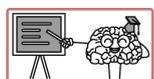
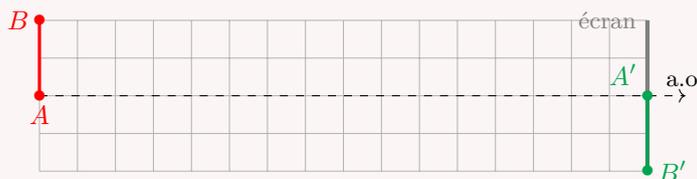
Pour former une image **réelle** d'un objet **réel** à l'aide d'une lentille **convergente** de distance focale f' , il faut placer l'écran à une distance D de l'objet vérifiant : $D \geq 4f'$.

Si $D > 4f'$: seules deux positions de la lentille permettent d'avoir une image nette sur l'écran et elles sont symétriques l'une de l'autre par rapport au milieu de $[AA']$. La position la plus proche de l'objet permet d'agrandir (*principe du vidéoprojecteur*), alors que la position la plus lointaine permet de rétrécir (*principe de l'appareil photographique*) :



17

Si $D = 4f'$: une unique position de la lentille permettent d'avoir une image nette sur l'écran et $\gamma = -1$:



DÉMONSTRATION N°3

D.2 Relation de conjugaison de Newton

Il s'agit de la **relation de conjugaison d'une lentille avec origines aux foyers** : désormais, on quantifie les positions de A et A' à l'aide des distances \overline{FA} et $\overline{F'A'}$.

Relation de conjugaison de Newton

Pour une lentille mince \mathcal{L} de distance focale f' , de foyers principaux F et F' et réalisant la conjugaison $A \xrightarrow{\mathcal{L}} A'$:
équivalent à la relation de Descartes (voir DÉMONSTRATION N°2)

18



ACTIVITÉ N°3

E L'œil et l'appareil photographique

E.1 L'œil

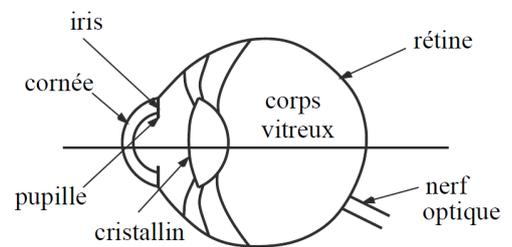
a. Description et modélisation

Ci-contre, le schéma d'une vue en coupe de l'œil.

L'iris (partie colorée) est percé de la pupille dont le diamètre est variable (de 2 à 8 mm) et permet de limiter la « quantité de lumière » pénétrant dans l'œil.

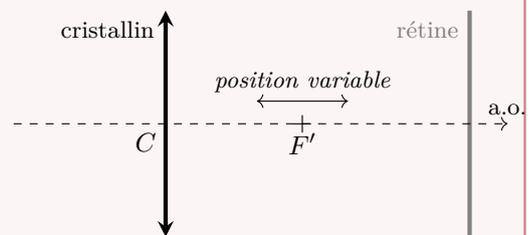
La rétine est constituée de cellules sensibles à la lumière (les cônes et les bâtonnets).

Le cristallin est assimilable à une lentille convergente biconvexe. Il est capable de se contracter et ainsi de modifier sa distance focale. Il donne d'un objet une image renversée sur la rétine.

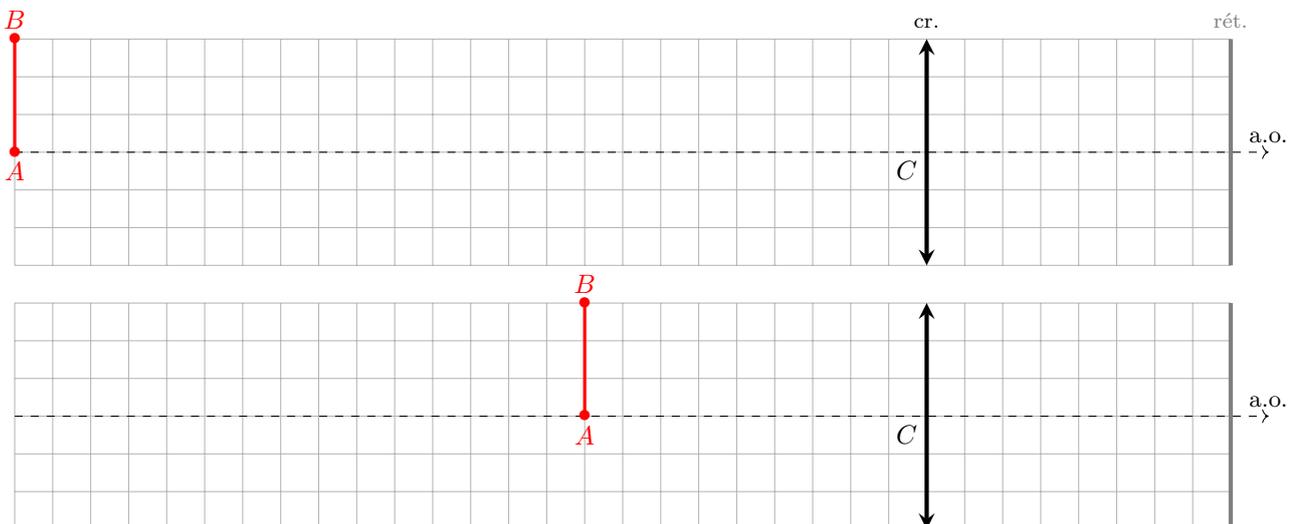


Modélisation de l'œil

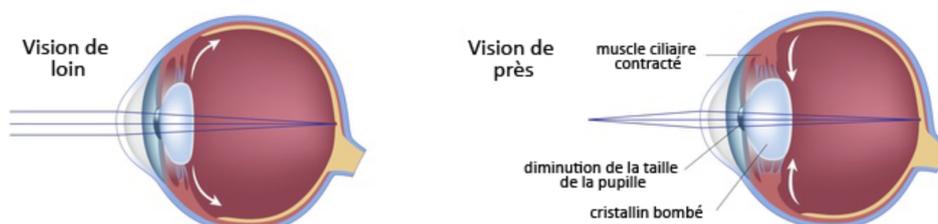
On modélise l'œil par une **lentille mince convergente** (modélisant le cristallin) de **distance focale variable** (suivant l'état de contraction du cristallin) et formant une image sur un **capteur plan fixe** (modélisant la rétine).



Pourquoi la distance focale est-elle nécessairement variable ? L'œil ne peut voir une image nette que si elle se forme sur la rétine. Pour cela, pour voir des objets plus proches, le cristallin doit se contracter pour être plus convergent (sa distance focale diminue, c'est-à-dire, sa vergence augmente), on dit que **l'œil accommode** :



La vergence augmente car les rayons de courbure des dioptries du cristallin diminuent sous l'effet de la contraction des muscles ciliaires. Ainsi, **en accommodant**, le cristallin se « bombe » :



<https://www.guide-vue.fr/glossaire/accommodation>

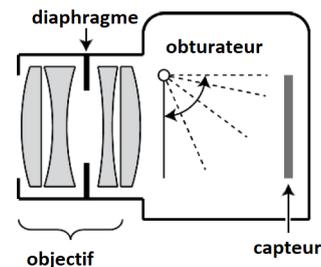
E.2 L'appareil photographique

a. Modélisation

Voici ci-contre l'anatomie générale d'un appareil photographique.

L'**obturateur** permet de laisser entrer la lumière dans le boîtier et donc d'éclairer le capteur sur lequel l'image doit être formée.

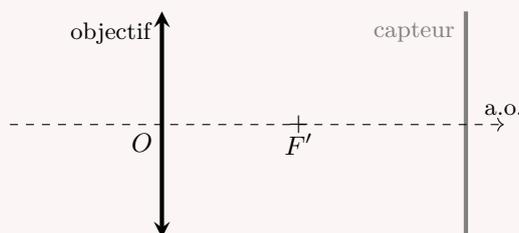
La taille du **diaphragme** permet de laisser rentrer ou plus moins de lumière et a aussi un impact sur la profondeur de champ, nous y reviendrons...



L'**objectif** permet d'effectuer la mise au point sur le capteur. Il peut être de constitution très complexe (association de lentilles convergentes et divergentes, de verres différents afin de compenser les dispersions chromatiques d'un verre grâce à celles d'un autre verre, etc). Néanmoins, nous pourrions nous contenter d'un modèle simple suffisamment satisfaisant à notre niveau.

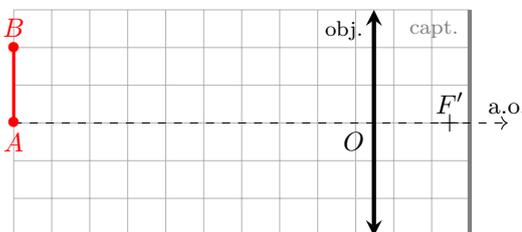
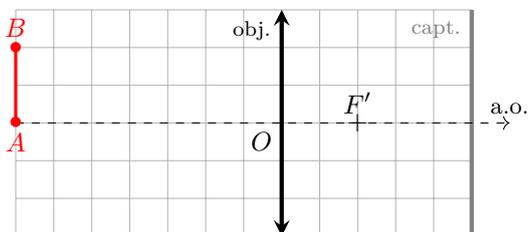
Modélisation d'un appareil photographique

L'appareil photographique peut être modélisé par l'association d'une unique **lentille mince convergente** (modélisant l'objectif) et d'un **écran** (modélisant le capteur).



b. Mise au point

En exploitant ce modèle, **pour une distance focale f' fixe, la mise au point s'effectue en déplaçant l'objectif**. Dans l'exemple ci-dessous, **complétons le schéma de gauche**. Dans le schéma de droite, l'objectif a été déplacé vers le capteur afin d'effectuer une mise au point sur le même objet AB mais situé plus loin : **compléter ce 2ème schéma pour déterminer la position de AB** .

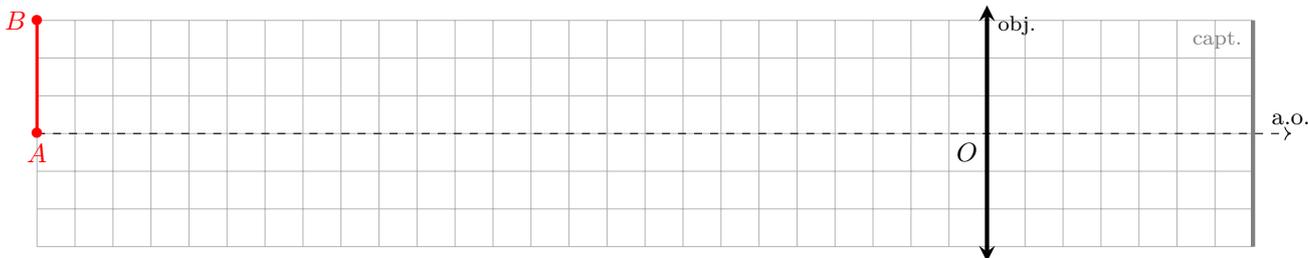


22

c. Influence de la focale

Zoom optique

Ci-dessous, complétons le 1er schéma afin d'identifier la focale f' lorsque la mise au point a été faite. Puis complétons le 2ème afin d'augmenter d'un facteur 2 (par exemple) la taille de l'image sur le capteur. **Comment a-t-on du modifier la focale f' pour cela ?**

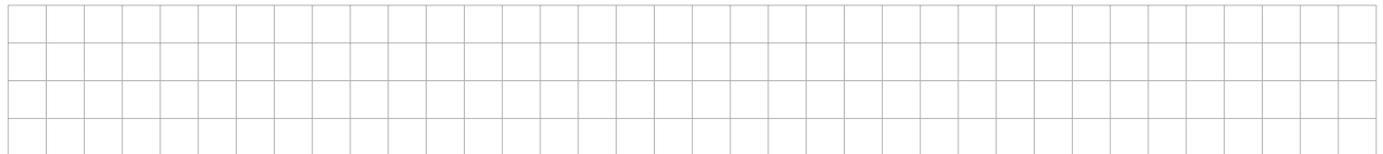
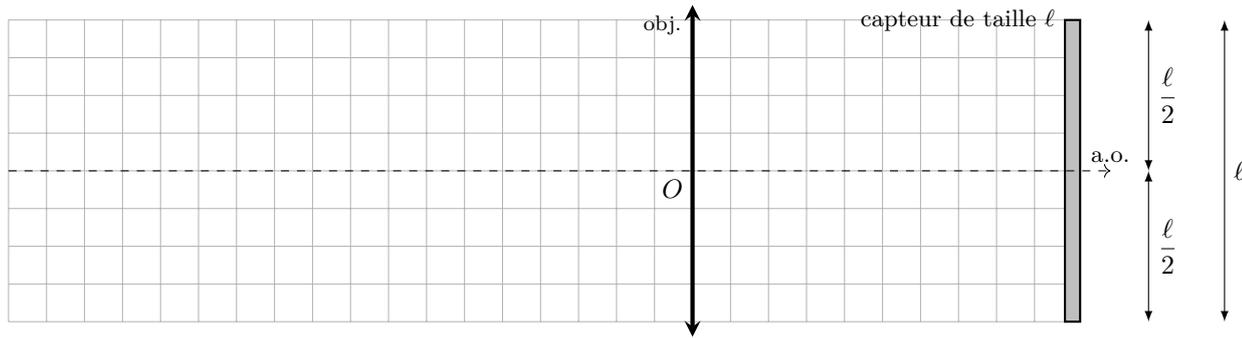


23



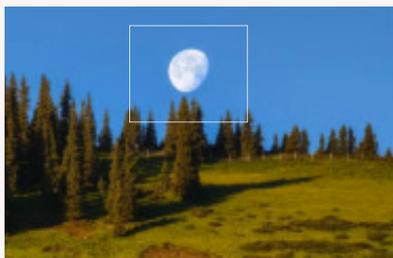
► **Champ angulaire**

La focale a également un impact sur l'angle de vision qui peut être observé par l'appareil, appelé **champ angulaire** (ou angle de champ). Limitons-nous ici au cas simple d'une mise au point à l'infini (pour un objet situé suffisamment loin donc, typiquement dans le cas d'une photographie de paysage ...) :



Bilan : influence de la focale sur la formation de l'image

L'augmentation de la distance focale diminue le champ angulaire et permet ainsi de zoomer :



d. Influence de la durée d'exposition

Plus l'obturateur est relevé pendant une longue **durée d'exposition** (ou **temps de pose**), plus la lumière éclaire longtemps le capteur. Il importe donc de choisir correctement sur l'appareil la *vitesse* d'obturation (*qui est en fait une durée, le mot est mal choisi...*) afin que l'image ne soit pas sous-exposée (cas ci-contre au-dessus avec un court temps de pose) ou sur-exposée (cas ci-contre au-dessous avec un long temps de pose).



Pour un objet en mouvement, il conviendra d'avoir une courte durée d'exposition pour éviter que l'image soit floue (des mains qui applaudissent par exemple). Pour que la photographie soit néanmoins correctement exposée, il faudra sans doute compenser avec un diaphragme plus grand (pour éclairer suffisamment le capteur) ou bien une sensibilité du capteur plus importante (mais donc plus sensible au bruit...). À l'inverse, lorsque le temps de pose est plus long, le photographe peut ainsi rendre compte de l'effet de mouvement par un effet de flou, mais il faut veiller cette fois à ne pas sur-exposer la photographie.

Cet effet de flou est souvent recherché lorsqu'on photographie un cours d'eau. Il faudra donc un long temps de pose, mais pour éviter d'éblouir le capteur (et donc de sur-exposer) si la photographie est prise en plein jour, il faudra nécessairement rajouter un filtre atténuateur devant l'objectif (*comme des lunettes de soleil en somme*). Ci-contre, un court temps de pose à gauche, et un long temps de pose à droite avec un filtre atténuateur.



e. Influence du diaphragme

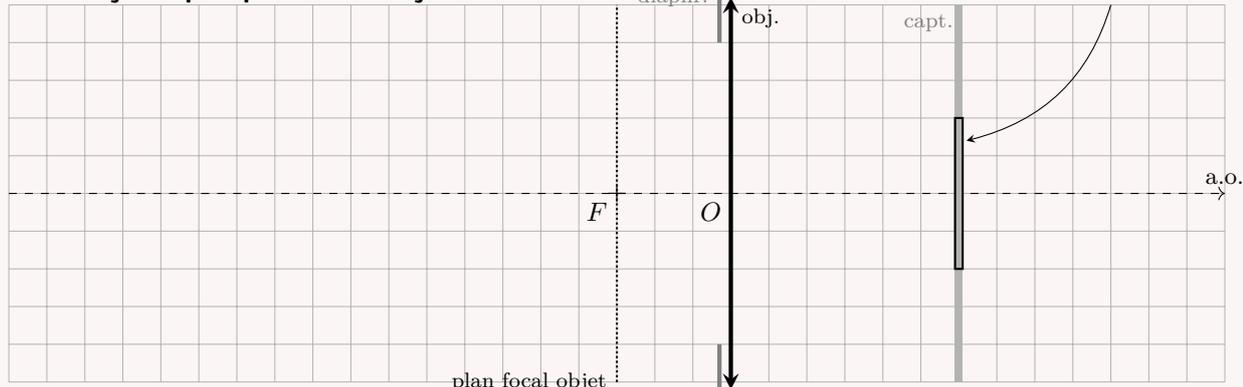
Construction géométrique de la profondeur de champ

La taille de l'ouverture du diaphragme a un impact sur la **profondeur de champ** (zone dans laquelle tous les points objets paraîtront nets sur le capteur). **Comment déterminer par construction géométrique la profondeur de champ ?**

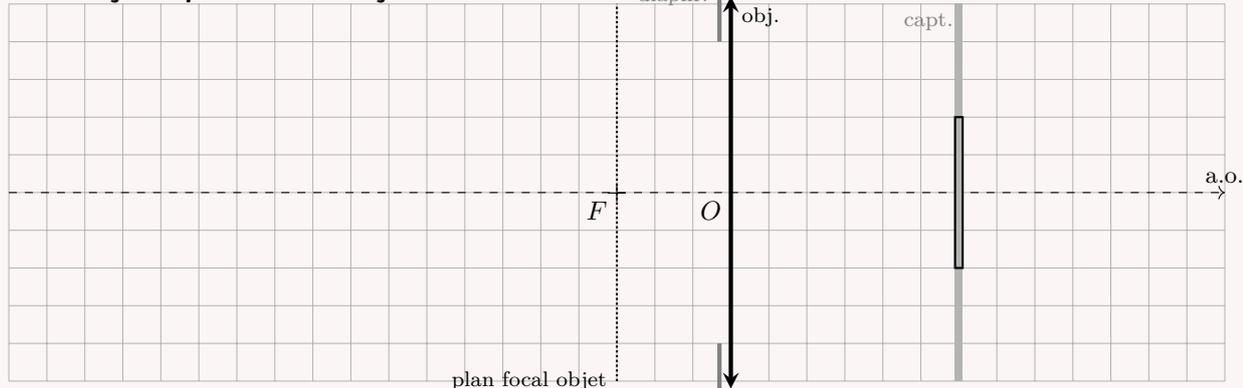
Pour un même réglage de l'appareil photographique, il s'agit d'identifier sur l'axe optique la position du point objet le plus proche et celle du point objet le plus loin qui peuvent être pris en photographie, tant que leur «tâche image» ne déborde pas d'une cellule du capteur :

1. on peut commencer par délimiter les cônes de lumière émergente à la limite du **stigmatisme approché** (revoir chapitre **OG2** si besoin) ;
2. puis, on en déduit le cône de lumière incidente correspondant grâce à la **méthode des foyers secondaires** (revoir **Activité n°1** si besoin).

Point objet le plus proche de l'objectif



Point objet le plus loin de l'objectif



25

En s'imaginant refaire ces tracés pour une ouverture du diaphragme plus petite, A_1 serait d'autant plus proche de la lentille alors que A_2 en serait d'autant plus éloigné.

Plus le diamètre du diaphragme est petit, plus la profondeur de champ est grande. Et inversement.

Mais fermer ou ouvrir le diaphragme a un autre impact : on modifie la quantité d'énergie lumineuse rentrant dans le boîtier de l'appareil et donc l'exposition de la photographie en est affectée.

<p>Grande ouverture, donc faible profondeur de champ et forte exposition</p>		<p>Petite ouverture, donc grande profondeur de champ et faible exposition</p>	
--	--	---	--

L'exposition de la photo peut être corrigée si besoin par un plus ou moins long temps de pose, ou une plus moins grande sensibilité du capteur.

(R) La distance focale a également une influence notable sur la profondeur de champ. On peut établir que plus la distance focale est grande, plus la profondeur de champ est faible ...