

Lentilles

Plan du cours

I	Introduction à l'optique géométrique	2
I.A	Modèle des rayons lumineux	2
I.B	Que voyons-nous réellement ?	3
I.C	Stigmatisme et aplanétisme	5
II	Formation d'images par une lentille	6
II.A	Lentilles réelles et modélisation.	6
II.B	Points particuliers	7
II.C	Construction d'images	8
III	Relations de conjugaison et de grandissement	11
III.A	Grandissement.	11
III.B	Relations de conjugaison	12
III.C	Former une image sur un écran à distance connue.	13
IV	Œil et vision	15
IV.A	Anatomie et modélisation.	15
IV.B	Caractéristiques de la vision	16
IV.C	Hauteur apparente d'un objet observé à l'œil	17
IV.D	Complément culturel : défauts de vision	17
V	Instruments d'optique	19
V.A	Un exemple d'instrument subjectif : la lunette astronomique	19
V.B	Un exemple d'instrument objectif : l'appareil photo	21

- (R) Résultat à connaître par cœur. (M) Méthode à retenir, mais pas le résultat.
 (D) Démonstration à savoir refaire. (Q) Aspect qualitatif uniquement.

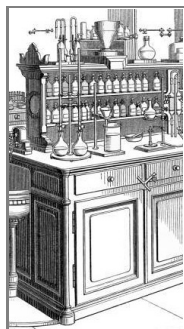
Les paragraphes sans mention en marge sont là pour faciliter votre compréhension ou pour votre culture mais n'ont pas forcément besoin d'être appris en tant que tel.

Préambule : quelles sont les différentes théories permettant de décrire les phénomènes lumineux ?



Optique géométrique : lumière = ensemble de rayons lumineux $\leadsto$ instruments d'optique, arc-en-ciel, etc.
 Optique ondulatoire : lumière = onde électromagnétique $\leadsto$ interférences, diffraction
 Optique quantique : lumière = flux de photons $\leadsto$ corps noir, effet photoélectrique, laser, etc.

→ nous allons cette année les toucher du doigt, en commençant par étudier la formation des images dans le cadre de l'optique géométrique.



Un peu d'histoire : L'optique est étudiée depuis l'Antiquité, où Euclide a exploré les lois de la réflexion. Les savants arabes, dont Alhazen, l'ont ensuite développée au Moyen Âge en étudiant la réfraction et la vision. La Renaissance a vu l'invention des lunettes et des télescopes pour l'observation astronomique, sous l'impulsion de Galilée ou Cassini. Newton et Huygens ont analysé la nature de la lumière aux XVII^e siècle en développant deux théories concurrentes, corpusculaire pour Newton et ondulatoire pour Huygens. Au XIX^e siècle, la théorie ondulatoire a été définitivement confirmée par la découverte des interférences par Young et Fresnel, puis enrichie par l'électromagnétisme de Maxwell. L'optique quantique a émergé au XX^e siècle, étudiant les interactions lumière-matière à l'échelle atomique, ce qui a par exemple permis l'avènement des lasers.

I - Introduction à l'optique géométrique

Le modèle de l'**optique géométrique** consiste à décrire la lumière comme un ensemble de rayons lumineux.

I.A - Modèle des rayons lumineux

• Définition



Un **rayon lumineux** est une ligne le long de laquelle la lumière se propage.

Il s'agit d'une notion abstraite : on ne peut pas produire ni même isoler un rayon lumineux, mais seulement un faisceau contenant une infinité de rayons.



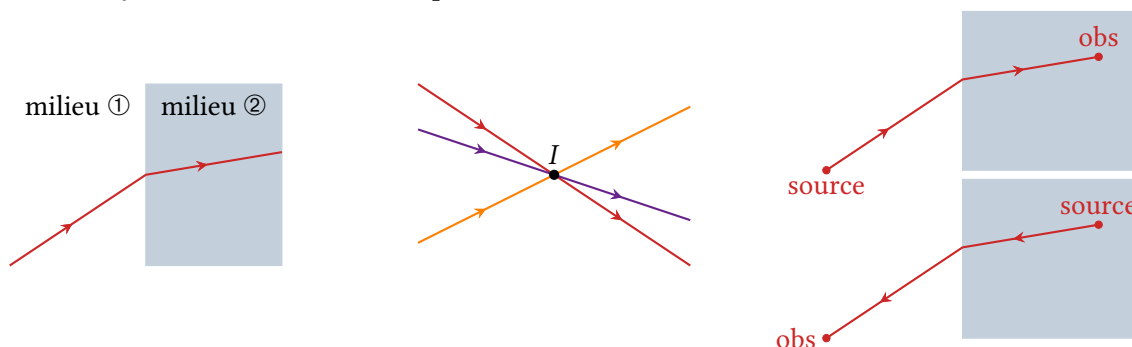
→ limite du modèle géométrique :

diffraction si l'on cherche à isoler un rayon à l'aide d'une ouverture trop petite

• Propriétés des rayons lumineux



- ▷ *Propagation rectiligne* : les rayons lumineux se propagent en ligne droite dans un milieu homogène, et sont déviés lors d'un changement de milieu : c'est le phénomène de **réfraction** ;
- ▷ *Indépendance des rayons lumineux* : les rayons lumineux se croisent sans interagir les uns avec les autres ;
- ▷ *Principe du retour inverse de la lumière* : si un rayon lumineux suit un trajet dans un sens, alors il suivrait le même trajet dans l'autre sens si les points d'émission et d'observation étaient inversés.



Ces propriétés sont des *postulats* de la théorie géométrique, c'est-à-dire qu'elles sont affirmées et ne peuvent pas être démontrées par d'autres arguments d'optique géométrique. En revanche, elles peuvent être reliées voire démontrées par les théories « supérieures » : ainsi, les lois de Snell-Descartes se démontrent en électromagnétisme.



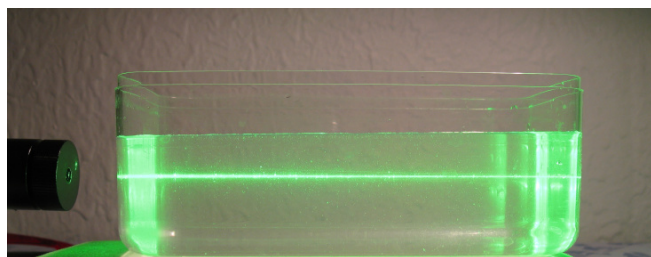
↪ limite du modèle géométrique :

les interférences lumineuses contredisent le postulat d'indépendance des rayons lumineux ↪ modèle géométrique valable lorsqu'il n'y a pas d'interférences

Espace 3

I.B - Que voyons-nous réellement ?

I.B.1 - On ne voit pas la lumière en tant que telle



Source image : <https://fr.science-questions.org>

Expérience : La cuve contient de l'eau et un peu de lait, ce qui permet de mettre les particules grasses contenues dans le lait en suspension tout en gardant un milieu globalement transparent. On l'éclaire avec un laser.

Observation : on ne voit de la lumière que dans la cuve ... pourtant il y en a forcément avant et après aussi !

Interprétation :

L'œil ne voit pas directement les rayons lumineux : pour savoir qu'il y a de la lumière à un endroit, il faut qu'elle soit déviée par un objet réfléchissant et aboutisse à l'œil de l'observateur.



Espace 4

I.B.2 - Le cerveau interprète tout

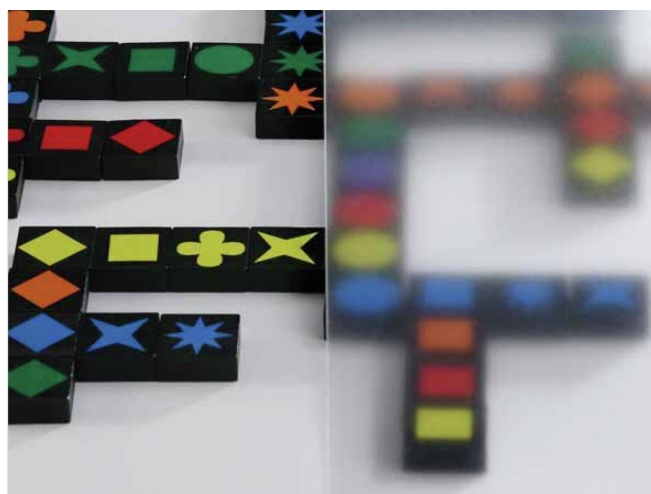
Le cerveau analyse l'inclinaison des rayons lumineux qu'il reçoit et l'interprète pour reconstruire leur trajectoire, et en déduire où se trouve l'objet observé.



Le cerveau interprète toujours le trajet de la lumière comme si elle venait en ligne droite depuis l'objet.



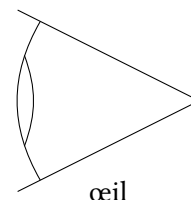
Observation au travers d'un matériau rugueux : Lorsque l'on observe un objet au travers d'un matériau rugueux, comme certaines pochettes de classeur, les rayons lumineux sont déviés de manière aléatoire en la traversant et le cerveau n'est plus capable de savoir d'où ils viennent. L'objet observé apparaît alors trouble, et ses formes sont moins discernables.



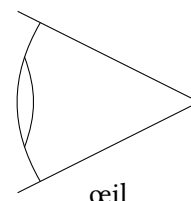
Source image : <https://www.byk-instruments.com>

objet ●

objet ●



œil



œil

Mirages : Lorsque la température dans l'air présente un fort contraste, la trajectoire des rayons lumineux n'est plus une ligne droite (le milieu n'est plus homogène) mais peut devenir une ligne courbe, voir figure 1. Pourtant, lorsque ces rayons atteignent l'œil, le cerveau les interprète toujours comme s'ils s'étaient propagés en ligne droite.

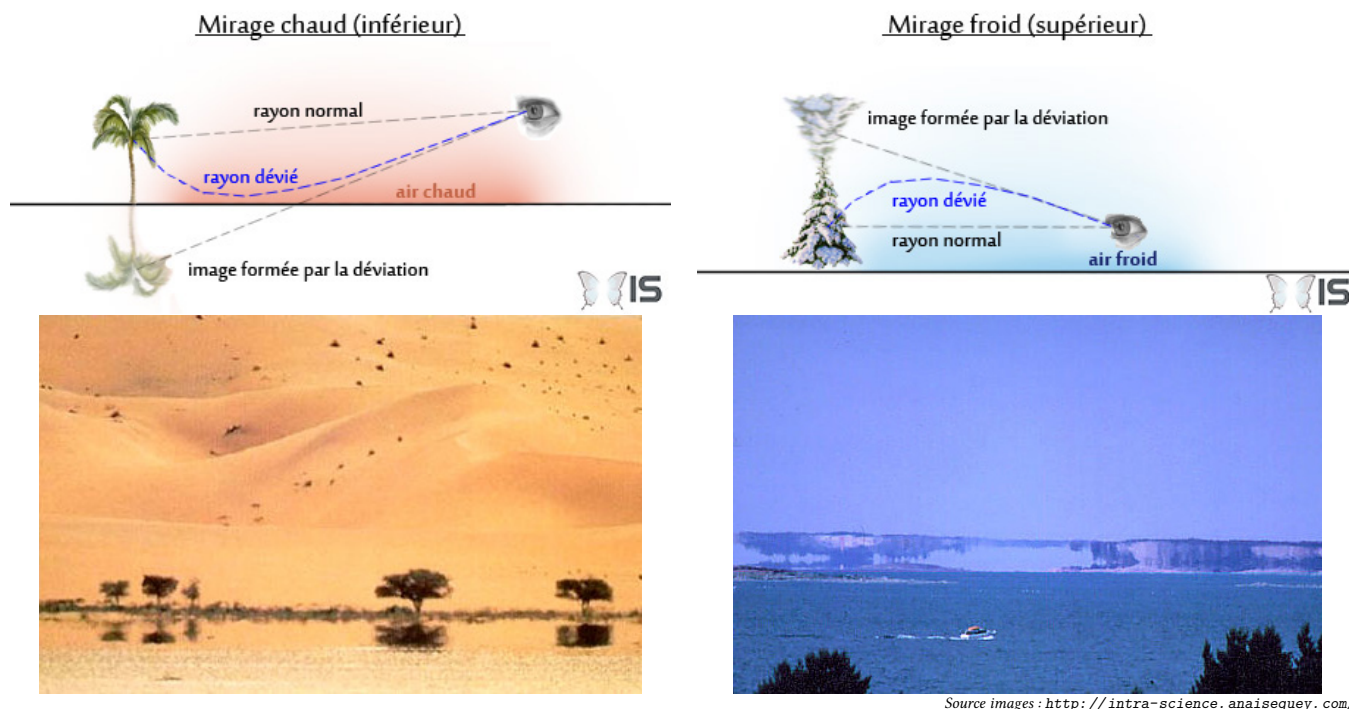


Figure 1 – Mirages.

I.B.3 - Généralisation : image réelle, image virtuelle

(R)



On appelle **système optique** un dispositif qui modifie le trajet des rayons lumineux.

On appelle **point objet** un point d'où sont issus des rayons lumineux entrant dans le système optique.

On appelle **point image réel** un point par lequel passent les rayons lumineux sortant du système optique issus d'un même point objet.

On appelle **point image virtuel** un point d'où semblent provenir les rayons sortant du système optique issus d'un même point objet mais par lequel ils ne passent pas réellement.

C'est le prolongement rectiligne des rayons qui y passe.

Plus largement, on appelle **objet** ou **image** un ensemble de points objets ou de points images.

↪ une image virtuelle est une « illusion d'optique ».

Exemple : l'image formée par le mirage est une image virtuelle.

Remarque : En étudiant les systèmes optiques composés, nous rencontrerons également des objets virtuels, c'est-à-dire des points d'où semblent provenir les rayons arrivant sur un système optique mais qui ne s'y croisent pas réellement. Un objet virtuel ne peut qu'être une image formée par un premier système optique qui sert d'objet à un second système (image intermédiaire).

Comment savoir expérimentalement si une image se forme en un point ?

on y place un écran, qui pourra dévier la lumière vers l'œil et on y verra l'image

Espace 5

(R)



Une image réelle peut toujours être observée sur un écran, une image virtuelle jamais.

I.C - Stigmatisme et aplanétisme

L'image d'un objet par un système optique peut être déformée : c'est par exemple le cas pour le matériau rugueux. Le stigmatisme et l'aplanétisme sont des notions permettant de le caractériser plus précisément.

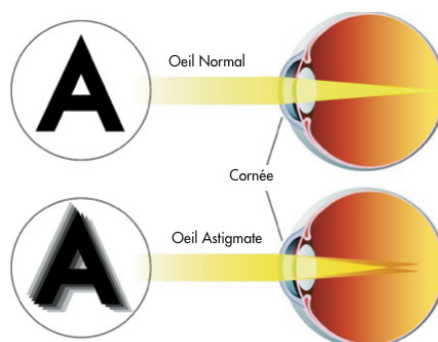
I.C.1 - Stigmatisme et aplanétisme rigoureux

Un système optique (Σ) est dit **stigmatique** si l'image qu'il forme de tout point objet A est un point image A' , par opposition à une tâche diffuse.

On dit alors que A et A' sont **conjugués** par (Σ) et on note

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

Remarque culturelle : Comme son nom l'indique, l'astigmatisme est un défaut de vision où l'œil perd ses propriétés de stigmatisme.



L'aplanétisme concerne les **systèmes optiques centrés**, c'est-à-dire qui possèdent un axe de révolution appelé **axe optique**, traditionnellement noté Δ .

Exemples :

Lentille, lunette astro, microscope sont des systèmes centrés.

Périscopes de sous-marin ou grandes jumelles de surveillance marine n'en sont pas.

Espace 6

Un système optique est dit **aplanétique** si l'image d'un objet perpendiculaire à l'axe optique est elle aussi perpendiculaire à l'axe optique.

I.C.2 - Stigmatisme et aplanétisme approchés

Seul un miroir plan est rigoureusement stigmatique et aplanétique pour tout point objet, mais la plupart des systèmes optiques sont utilisés dans des conditions qui leur permettent de l'être approximativement ... et c'est en pratique suffisant.

→ tout capteur optique (œil inclus !) possède une résolution minimale, quantifiée par son **cercle de confusion** : deux points séparés d'une distance inférieure au diamètre du cercle de confusion sont indiscernables.

Un système optique peut être considéré approximativement stigmatique et aplanétique tant que les défauts associés sur l'image sont de diamètre inférieur à celui du cercle de confusion du capteur utilisé.

🚫🚫🚫 **Attention !** Le stigmatisme approché ne dépend pas que du système optique, mais aussi du capteur utilisé.

I.C.3 - Conditions de Gauss

Simulation : voir figure 2, réalisée avec le logiciel OptGeo, développé par J.-M. Biansan.

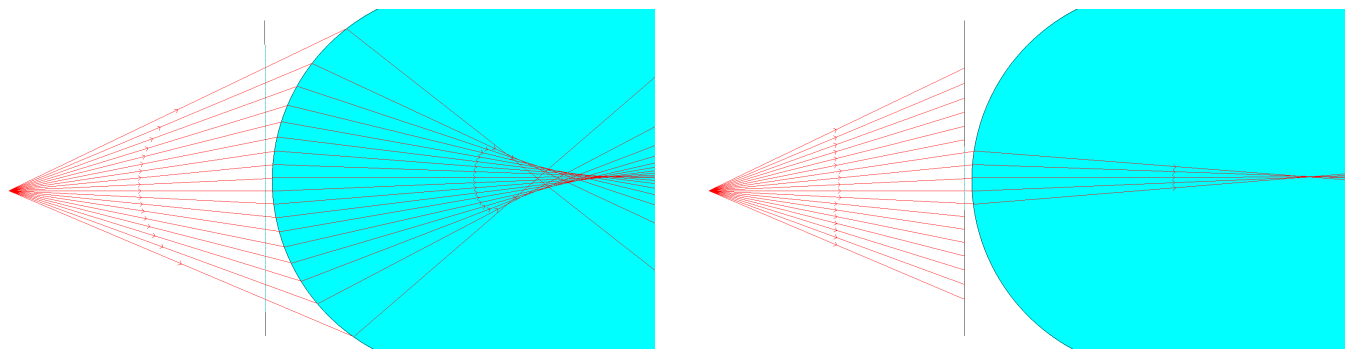


Figure 2 – Mise en évidence des conditions de Gauss. Une source émet des rayons dans toutes les directions, et un diaphragme permet de sélectionner ceux qui pénètrent dans le système optique (en l'occurrence une boule de verre) où l'on observe l'image formée.

Généralisation : on admet que les observations faites pour le système optique ci-dessus sont générales.

(R)



- Le stigmatisme et l'aplanétisme sont d'autant meilleurs que
- les rayons lumineux sont proches de l'axe optique ;
 - les rayons lumineux sont peu inclinés par rapport à l'axe optique.

De tels rayons sont dits **paraxiaux**, et ces conditions sont appelées **conditions de Gauss**.

De façon générale, un système utilisé dans les conditions de Gauss est considéré stigmatique et aplanétique ... même si on reste peu précis sur ce que signifie quantitativement être « peu incliné » et « proche » de l'axe optique.

II - Formation d'images par une lentille

II.A - Lentilles réelles et modélisation



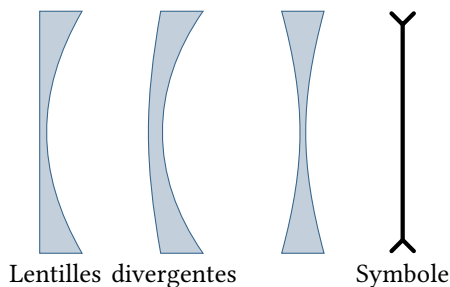
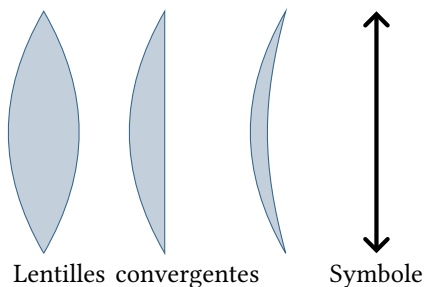
Une **lentille** est un système optique constitué d'un matériau transparent, dont les faces sont sphériques ou planes.

Elle est dite **mince** si le rayon de courbure de ses faces est très supérieur à son épaisseur.

Une lentille aux bords fins est **convergente** : elle fait converger en un point un faisceau parallèle incident.

Une lentille aux bords épais est **divergente** : elle écarte (= fait diverger) un faisceau parallèle incident.

Une lentille mince se symbolise par une double flèche, ce qui rappelle qu'elle est mince (pas d'épaisseur) et la façon dont évolue son épaisseur (bords plus ou moins épais que le centre).



Images réalisées à partir d'un code de Jimmy Roussel, <https://femto-physique.fr/>



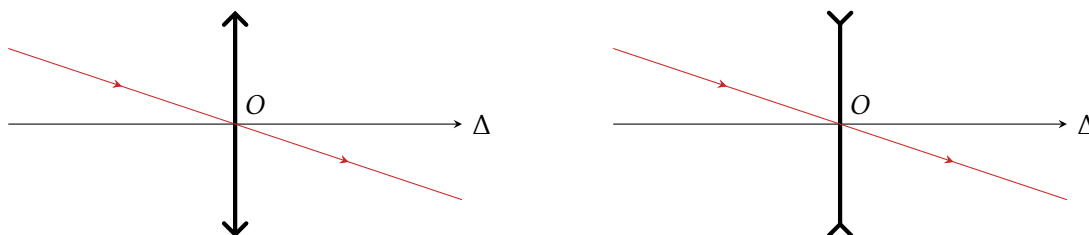
Une lentille mince utilisée dans les conditions de Gauss est stigmatique et aplanétique.

↪ hypothèse implicite dans toute la suite.

II.B - Points particuliers

II.B.1 - Centre optique

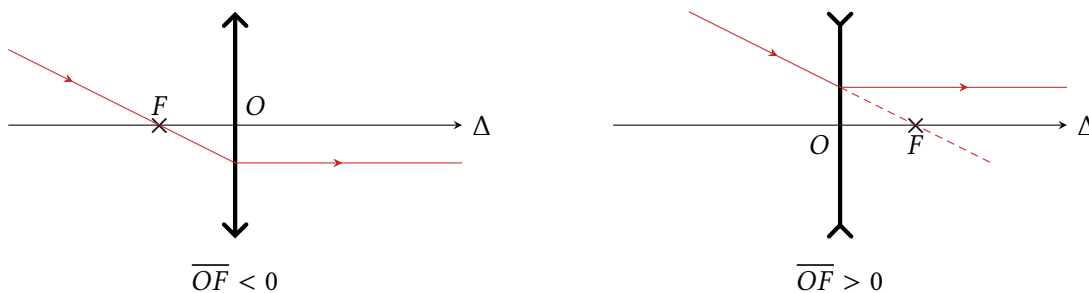
On appelle **centre optique** O d'une lentille son point d'intersection avec son axe optique.
Un rayon passant par O n'est pas dévié par la lentille.



II.B.2 - Foyers et distance focale

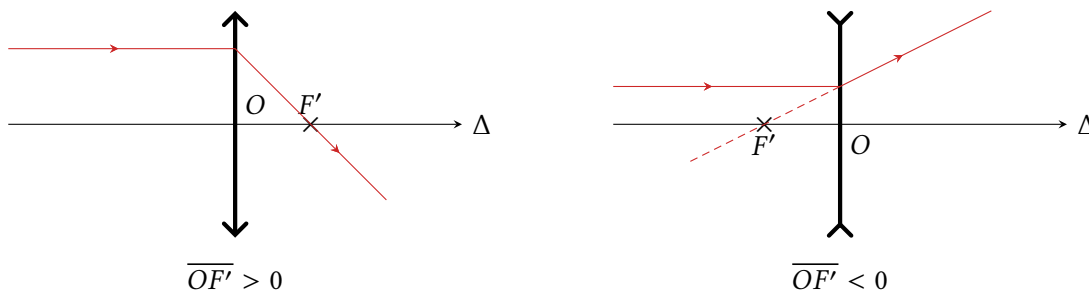
Rappel : l'axe optique est orienté dans le sens de propagation de la lumière, ce qui fixe le signe des distances algébriques, positives dans le sens de l'axe optique.

Tout rayon incident passant par le **foyer objet** F ressort de la lentille parallèlement à l'axe optique.
Le foyer objet d'une lentille convergente se situe *avant* la lentille, celui d'une lentille divergente *après* :



On appelle **distance focale objet** la distance algébrique $f = \overline{OF}$.

Tout rayon arrivant sur la lentille parallèlement à l'axe optique ressort en passant par le **foyer image** F' .
Le foyer image d'une lentille convergente se situe *après* la lentille, celui d'une lentille divergente *avant* :



On appelle **distance focale image** la distance $f' = \overline{OF'}$.

Elle est toujours positive pour une lentille convergente, et négative pour une divergente.

Dans le cas d'une lentille divergente, les rayons eux-mêmes ne passent pas par F et F' qui ne sont pas « du bon côté » de la lentille : il faut considérer leur prolongement rectiligne (rayons virtuels).

Lorsque le milieu de propagation est le même des deux côtés de la lentille (implicitement de l'air), les foyers objet et image sont symétriques par rapport au centre optique.

→ conséquence : $\overline{OF} = -\overline{OF'}$ soit $f' = -f$

Espace 7

→ la distance focale objet est très peu utilisée en pratique, et la distance focale « tout court » désigne implicitement la distance focale image.

On appelle **vergence** d'une lentille la grandeur

$$V = \frac{1}{f'}$$

La vergence s'exprime en **dioptries** : $[V] = \delta$, avec $1 \delta = 1 \text{ m}^{-1}$.

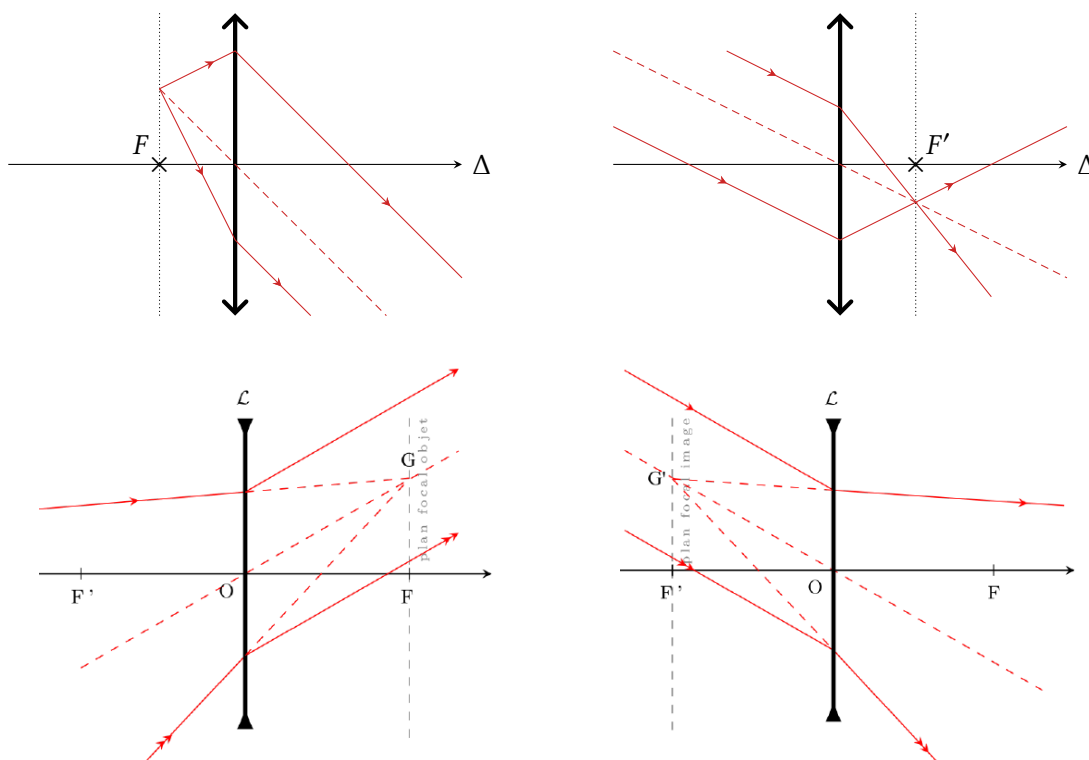
Une lentille de vergence positive est convergente, une autre de vergence négative est divergente.

Remarque culturelle : la dioptrie est l'unité usuelle pour exprimer la correction des verres de lunettes.

II.B.3 - Plan focaux, foyers secondaires

Le **plan focal objet** est le plan perpendiculaire à l'axe optique contenant le foyer objet. Tous les rayons incidents issus d'un point du plan focal objet ressortent de la lentille parallèles entre eux, dans la direction donnée par le rayon non-dévié passant par O .

Le **plan focal image** est le plan perpendiculaire à l'axe optique contenant le foyer image. Deux rayons incidents parallèles entre eux se croisent dans le plan focal image.



Les points appartenant aux plans focaux sont parfois appelés **foyers secondaires de la lentille**.

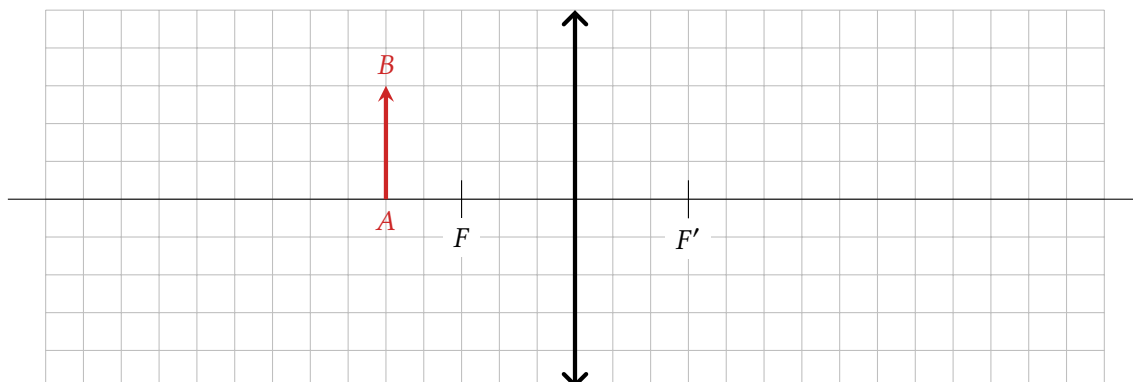
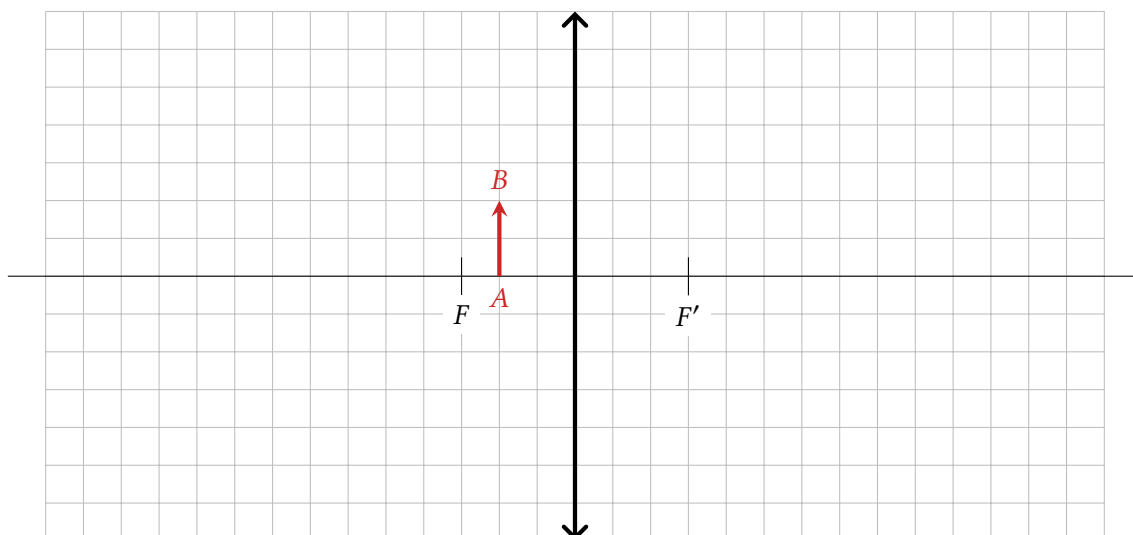
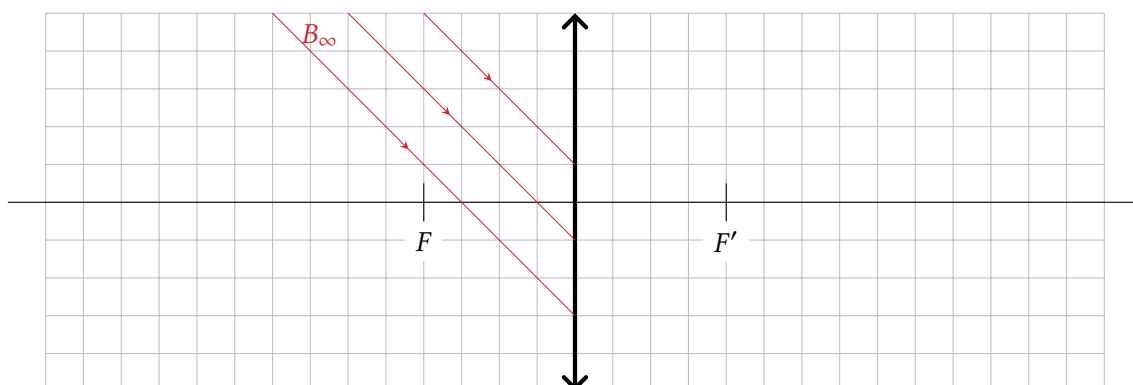
II.C - Construction d'images

La construction d'images repose sur le stigmatisme : si deux rayons issus du point objet A se coupent en un point A' (réel ou virtuel), il s'agit forcément de l'image de A par la lentille. Les deux rayons à tracer sont à choisir parmi les rayons particuliers :

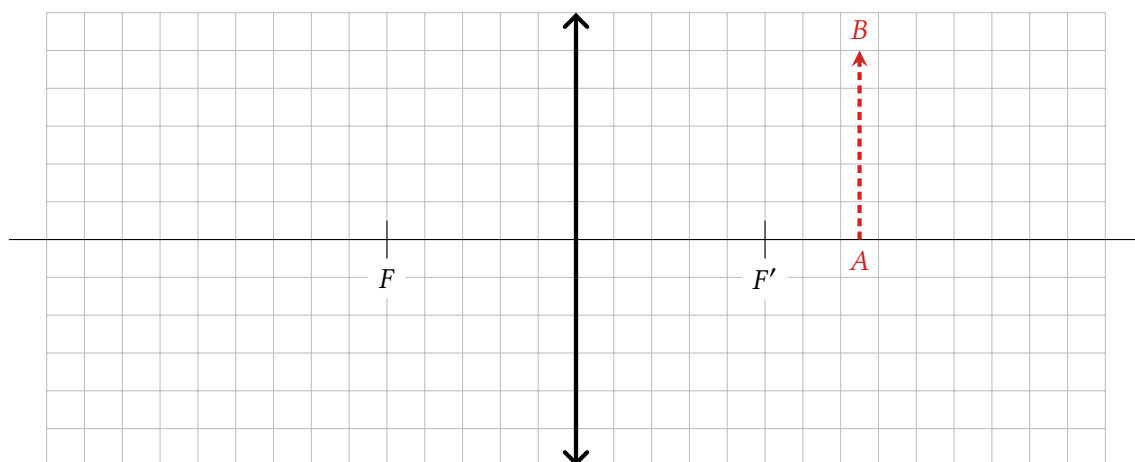
- le rayon issu de A passant par O n'est pas dévié ;
- le rayon issu de A parallèle à l'axe optique ressort en passant par F' ;
- le rayon issu de A passant par F ressort parallèle à l'axe optique.

Application 1 : Construction d'images par une lentille convergente

corrigé p. ??

Construire l'image de l'objet AB sur les schémas ci-dessous.**1 - Objet réel situé avant le plan focal objet****2 - Objet réel situé entre le plan focal objet et la lentille****3 - Objet à l'infini : tous les rayons issus d'un objet à l'infini sont parallèles entre eux.**

4 - Objet virtuel : cet objet est forcément formé par une autre lentille, qui aurait été placée avant celle que l'on considère ici.



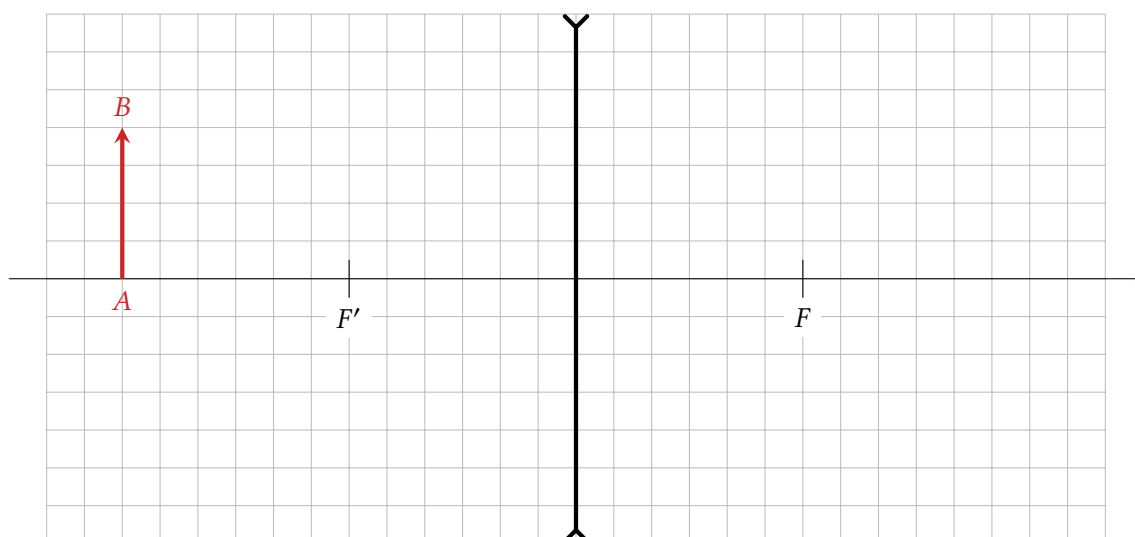
M

Application 2 : Construction d'images par une lentille divergente

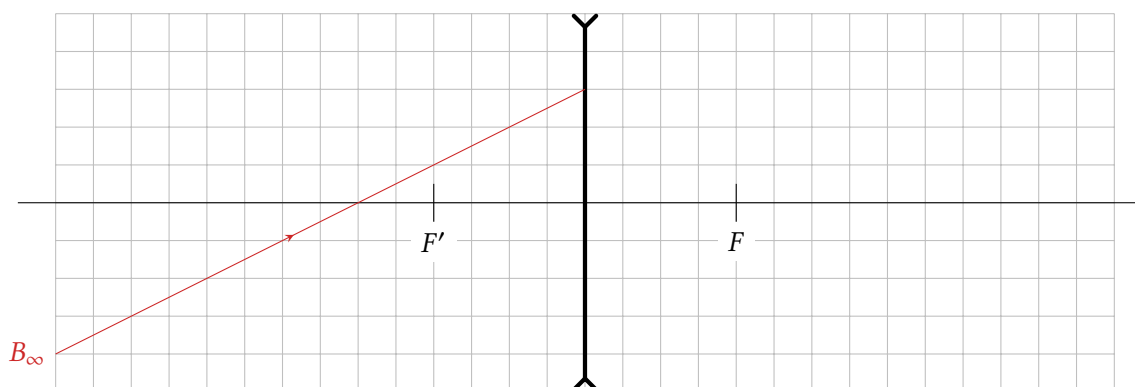
corrigé p. ??

Construire l'image de l'objet AB sur les schémas ci-dessous.

1 - Objet réel



2 - Objet à l'infini



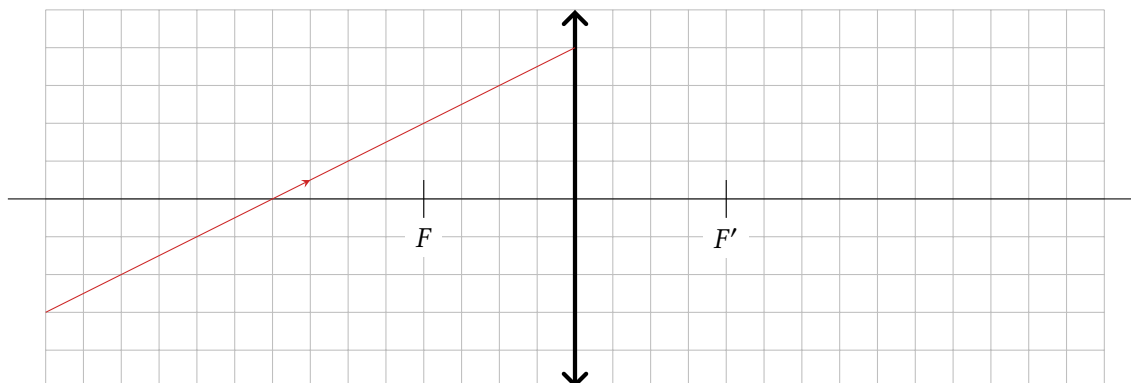
Application 3 : Prolongation d'un rayon

corrigé p. ??



Prolonger le rayon représenté en sortie de la lentille.

Méthode : utiliser la propriété que deux rayons incidents parallèles se coupent dans le plan focal image de la lentille, en prenant le rayon non-dévié comme second rayon.



III - Relations de conjugaison et de grandissement

III.A - Grandissement

III.A.1 - Définition

Les distances dans la direction perpendiculaire à l'axe optique sont également algébrisées, comptées positives vers le haut.

On appelle **grandissement** d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique le rapport

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

► image **droite** = même sens que l'objet : $\gamma > 0$

► image **agrandie** : $|\gamma| > 1$

► image **renversée** : $\gamma < 0$

► image **réduite** : $|\gamma| < 1$

Espace 8

Espace 10

Espace 9

Espace 11

III.A.2 - Relations de grandissement

Une relation de grandissement permet d'exprimer le grandissement en fonction uniquement de la position de l'objet et/ou de l'image le long de l'axe optique.

Le grandissement d'un objet par une lentille mince est donné par les relations

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -\frac{f}{\overline{FA}} = -\frac{\overline{F'A'}}{f'}$$

Démonstration : établissons les relations de grandissement pour une lentille convergente, dans la situation où un objet réel donne une image réelle, voir figure 3.

En identifiant les tangentes, et en étant vigilant au signe des angles :

$$\tan \alpha = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OA'}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{OA}} \quad \text{d'où} \quad \boxed{\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}}$$

De même,

$$\tan \beta = \frac{\overline{AB}}{\overline{FA}} = \frac{\overline{OJ}}{\overline{FO}} = \frac{\overline{A'B'}}{-f} \quad \text{d'où} \quad \boxed{\gamma = -\frac{f}{\overline{FA}} = \frac{f'}{\overline{FA}}}$$

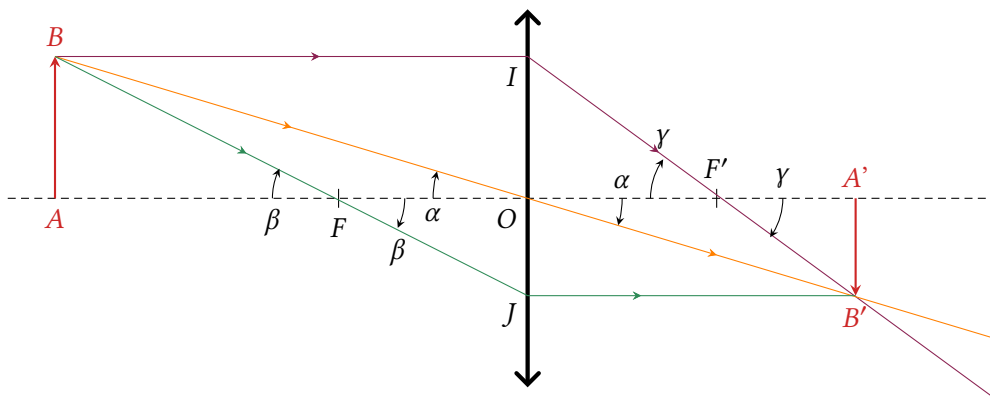


Figure 3 – Formation d’une image réelle par une lentille convergente.

et enfin

$$\tan \gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{F'A}} = \frac{\overline{OI}}{\overline{F'O}} = \frac{\overline{AB}}{-f'} \quad \text{d'où} \quad \boxed{\gamma = -\frac{\overline{F'A'}}{f'}}$$

Espace 12

⇒ **Généralisation** : on peut montrer que ces relations s’écrivent à l’identique dans toutes les situations, et avec les deux types de lentilles.

(M)

Application 4 : Image agrandie

corrigé p. 28

Déterminer la position des objets dont l’image par une lentille convergente est agrandie. La représenter sur un schéma.

III.B - Relations de conjugaison

Les relations de conjugaison permettent de déterminer la position de l’image connaissant celle de l’objet.

III.B.1 - Relation de conjugaison de Newton avec origine aux foyers

(R)



Relation de conjugaison de Newton :

$$\overline{FA} \overline{F'A'} = -f'^2$$

(D)

Démonstration : Produit en croix dans les relations de grandissement :

$$\gamma = \frac{f'}{\overline{FA}} = -\frac{\overline{F'A'}}{f'} \quad \text{d'où} \quad \overline{FA} \overline{F'A'} = -f'^2$$

Remarque : Le plus utile est souvent d'interpréter cette relation comme une invariance vis-à-vis de A :

$$\forall A, \quad \overline{FA} \overline{F'A'} = \text{cte}.$$

L'appliquer en prenant $A = A' = O$ (le centre optique est son propre conjugué!) permet d'ailleurs de retrouver le résultat.

III.B.2 - Relation de conjugaison de Descartes avec origine au centre optique



Relation de conjugaison de Descartes :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

(R)

Démonstration : On introduit le centre optique dans la relation de Newton,

$$(\overline{FO} + \overline{OA})(\overline{F'O} + \overline{OA'}) = -f'^2 \quad \text{d'où} \quad -f' \overline{OA} + f' \overline{OA'} + \overline{OA} \overline{OA'} = 0$$

et en divisant par $f' \overline{OA} \overline{OA'}$, il vient

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}.$$

Application 5 : Objet réel, image réelle

corrigé p. 28

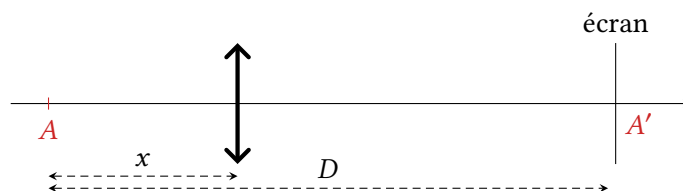
(M)

Déterminer la position des objets réels dont l'image par une lentille convergente est réelle, et la représenter sur un schéma. Même question pour une lentille divergente.

III.C - Former une image sur un écran à distance connue

Une problématique courante est celle de choisir la lentille adéquate lorsque la distance D entre l'objet et l'écran est imposée et connue : c'est par exemple le cas pour tous les systèmes de projection (cinéma, vidéoprojecteur, etc.)

↪ le paramètre est cette fois-ci la distance $D = \overline{AA'}$ et on cherche la position de la lentille.



La relation de conjugaison s'écrit dans cette situation

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad \text{soit} \quad \frac{1}{D-x} - \frac{1}{-x} = \frac{1}{f'} \quad \text{d'où} \quad x^2 - Dx + Df' = 0.$$

(D)

Il n'est possible de former l'image que si cette équation admet des racines réelles, donc si son discriminant est positif :

$$D^2 - 4Df' \geq 0 \quad \text{soit} \quad f' \leq \frac{D}{4}.$$

Les deux positions sont alors

$$x_{\pm} = \frac{D \pm \sqrt{D(D - 4f')}}{2}$$

On constate qu'elles sont symétriques par rapport au milieu du segment AA' , ce qui est cohérent avec le principe de retour inverse.

Espace 15

R

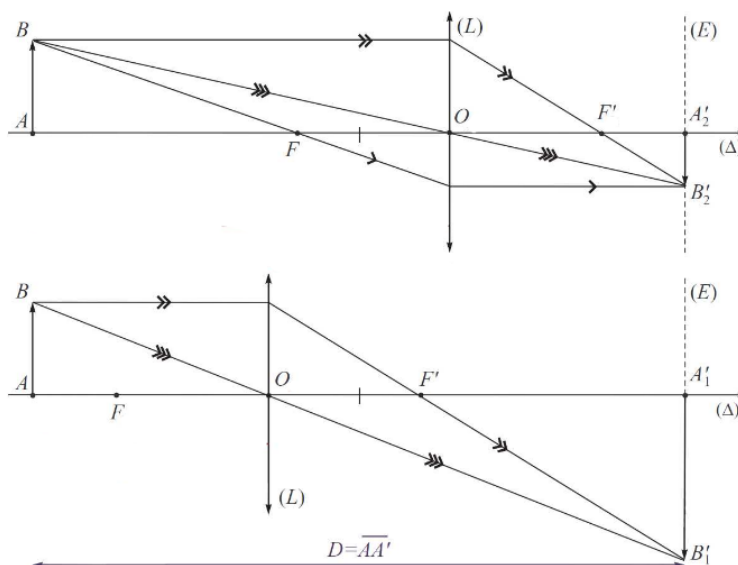
Une lentille ne permet de former une image sur un écran situé à distance D de l'objet que si sa focale est suffisamment petite,

$$f' \leq \frac{D}{4}.$$

Deux positions de la lentille peuvent alors convenir.



Animation JAVA permettant de déplacer la lentille et voir l'effet sur la position de l'image.



Source image : <https://www.sosryko.fr>

M

Q

Application 6 : Comparaison du grandissement dans les deux positions

corrigé p. 28

Montrer que l'une de ces deux positions donne une image agrandie et l'autre réduite, comme on peut le constater sur les schémas ci-dessus.

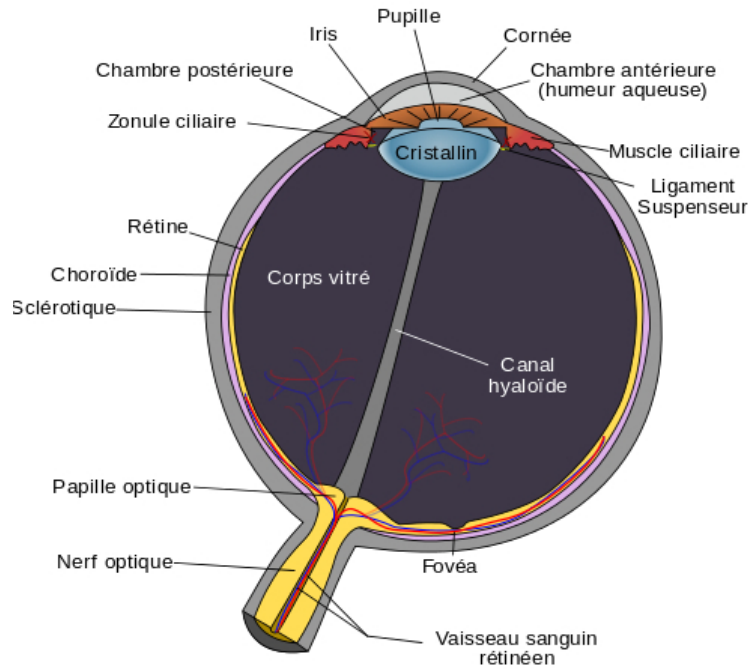
IV - Œil et vision

IV.A - Anatomie et modélisation

Remarque culturelle : il existe dans le monde animal au moins quarante types d'organes visuels que l'on appelle des yeux, dont les plus simples permettent à peine de distinguer obscurité et pleine lumière.

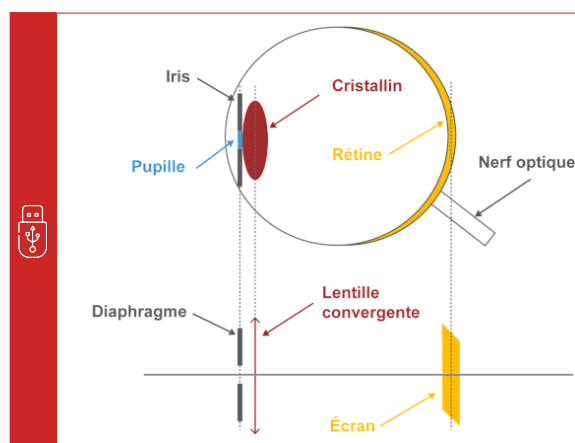
Un schéma anatomique de l'œil humain est représenté figure 4. Sur le strict plan optique, les éléments les plus importants sont

- l'**iris** et la **pupille**, qui jouent un rôle analogue à un diaphragme et permettent de contrôler la quantité de lumière entrant dans l'œil ;
- le **cristallin** dont les déformations servent à former l'image de l'objet sur la rétine : c'est l'**accommodation** ;
- la **rétine**, qui joue le rôle de capteur et envoie des signaux nerveux vers le cerveau, qui analyse l'image.



Source image : Wikipedia

Figure 4 – Schéma anatomique de l'œil humain. La lumière entre dans l'œil par la cornée, une pellicule protectrice transparente. Elle traverse ensuite un liquide, l'humeur aqueuse, qui permet de fixer la pression mécanique s'exerçant sur la face avant du cristallin. La pupille diaphragme cette lumière, qui arrive ensuite sur le cristallin. Il s'agit d'un petit disque fibreux, transparent et flexible qui permet de dévier les rayons lumineux et de les focaliser sur la rétine, la zone sensible de l'œil. La rétine est formée de cellules sensorielles, les cônes (vision diurne) et les bâtonnets (vision nocturne), et de cellules nerveuses, les neurones. Tous les neurones se regroupent au niveau du nerf optique, qui part ensuite vers le cerveau.



La modélisation la plus simple de l'œil consiste à associer une lentille convergente de focale variable (le cristallin) et un écran ou un capteur (la rétine), situé à distance fixe de la lentille.

Ce modèle est parfois complété d'un diaphragme de diamètre réglable (la pupille).

Attention ! C'est la focale du cristallin qui varie, mais pas la distance entre le cristallin et la rétine qui est fixée par l'anatomie à environ 2 cm.

IV.B - Caractéristiques de la vision

IV.B.1 - Champ visuel



Le **champ visuel** quantifie la portion d'espace visible pour un capteur optique. Il est défini comme l'angle entre les rayons extrêmes accessibles au capteur.

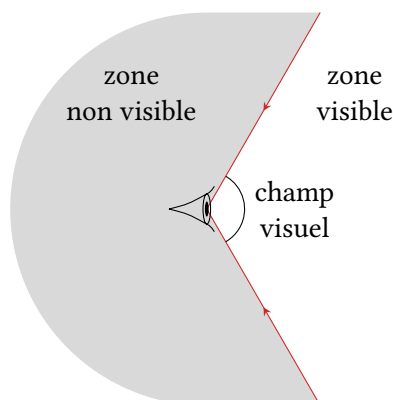


Figure 5 – Champ visuel. Les objets situés dans la zone grisée ne sont pas visibles, alors que ceux situés dans la zone blanche le sont.



Ordre de grandeur pour l'œil :

- en pivotant l'œil : 180° en horizontal, 150° en vertical ;
- pour un œil fixe : 3° pour une vision précise (lecture, etc.) mais 120° pour la perception du mouvement.

IV.B.2 - Pouvoir séparateur ou acuité visuelle



Le **pouvoir séparateur** ou **pouvoir de résolution** d'un capteur optique quantifie sa capacité à distinguer deux points très proches. Il est défini comme l'angle minimal que doivent former deux rayons pour pouvoir être interprétés comme provenant de deux points différents.



Figure 6 – Pouvoir de résolution. Tous les points situés dans la zone grisée ne sont pas discernables, c'est-à-dire qu'ils seront interprétés comme un seul et unique point.

Il est assez intuitif que le pouvoir de résolution soit défini par un angle plutôt que par une longueur : on ne voit pas avec la même précision les objets éloignés et les objets proches.



Ordre de grandeur pour l'œil : environ 1' d'arc ($= 1/60^\circ = 0,017^\circ = 3 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$) au centre du champ visuel et dans des conditions d'éclairage optimales.

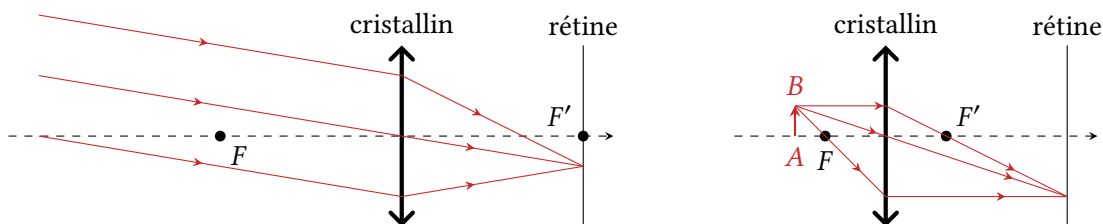
IV.B.3 - Plage d'accommodation

L'œil ne voit net que si l'image se forme sur la rétine, ce qui impose d'adapter la focale du cristallin à la distance objet-œil : c'est l'**accommodation**. Ce processus est limité, ce dont il est simple de se rendre compte en approchant un crayon de son œil : il devient flou lorsqu'il est trop près !

🚫🚫🚫 **Attention !** La distance cristallin-rétine est fixe, seule change la focale du cristallin.

On appelle **ponctum remotum** le point le plus éloigné de l'œil qui est visible nettement, et **ponctum proximum** le point le plus proche de l'œil qui est visible nettement.

Le ponctum remotum d'un œil **emmétrope** (sans défaut) se situe à l'infini.
Le ponctum proximum d'un œil emmétrope se trouve 20 à 25 cm devant l'œil.



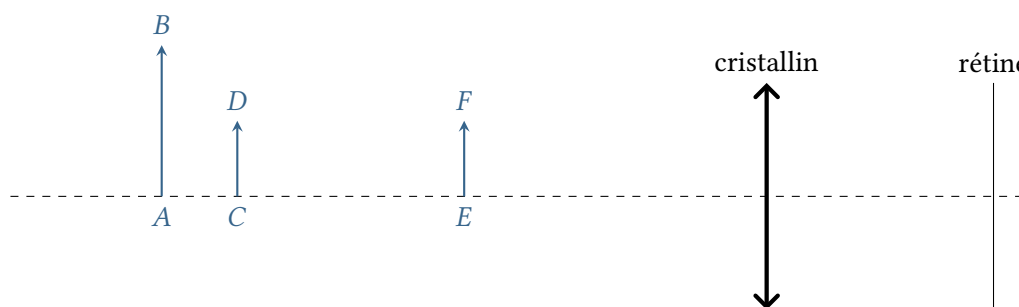
Lorsque l'œil ne fait pas d'effort pour accommoder, il observe naturellement au ponctum remotum. Cela permet une observation sans fatigue visuelle.

Remarque : En forçant volontairement, on peut voir jusqu'à une distance de l'ordre de 10 cm, mais cela entraîne une forte fatigue et n'est pas faisable dans la durée.

IV.C - Hauteur apparente d'un objet observé à l'œil

La taille d'un objet observé à l'œil n'est pas directement reliée à sa taille réelle : vous pouvez recouvrir le visage de votre voisin simplement en regardant votre pouce.

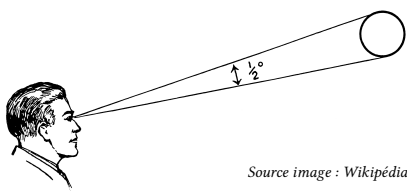
Un exemple pour comprendre : lequel de ces objets apparaît le plus grand lorsque l'œil accomode pour former son image sur la rétine ?



→ paramètre pertinent pour décrire la hauteur d'un objet : angle d'inclinaison des rayons

Espace 16

On appelle **hauteur apparente** (ou diamètre apparent, etc.) d'un objet observé à l'œil l'angle formé par les rayons issus de ses deux extrémités.



Source image : Wikipédia

Ordre de grandeur : le diamètre apparent de la Lune ou du Soleil observés à l'œil nu est de l'ordre de $0,5^\circ$. Pour des astres plus petits, l'unité usuelle est la **minute d'arc** : $1' = 1^\circ/60$, donc $0,5^\circ = 30'$.

IV.D - Complément culturel : défauts de vision

IV.D.1 - Myopie

Le cristallin d'un myope est trop convergent, si bien que le ponctum proximum d'un myope se trouve plus près de l'œil que pour un emmétrope mais le ponctum remotum n'est pas à l'infini, voir figure 7. En effet, contracter le cristallin ne peut que le rendre plus convergent que ce qu'il n'est au repos. Comme il faut rendre l'œil moins convergent, les verres de lunettes sont des lentilles divergentes dont la correction est exprimée par une vergence (le nombre de dioptries) négative. La myopie concerne 30 à 40 % de la population mondiale, avec de fortes variations géographiques (jusqu'à 80 % des jeunes adultes en Asie de l'Est).

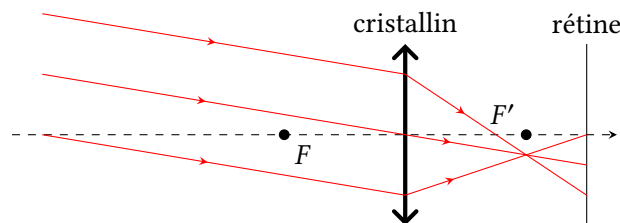


Figure 7 – Formation d'image du punctum remotum par un œil myope qui n'accommode pas.

IV.D.2 - Hypermétropie

L'hypermétropie est l'opposée de la myopie : le cristallin d'un hypermétrope n'est pas assez convergent. Par conséquent, le punctum proximum d'un hypermétrope est plus éloigné de l'œil que celui d'un emmétrope, et un hypermétrope doit accommoder pour voir un objet à l'infini, voir figure 8. Cela entraîne une fatigue visuelle pouvant être importante et nécessiter une correction. Comme l'œil doit être rendu plus convergent, les verres de lunettes sont des lentilles convergentes, dont la correction est exprimée par une vergence positive. Ce défaut de vision touche 10 à 15 % des adultes, et une part un peu plus importante des enfants.

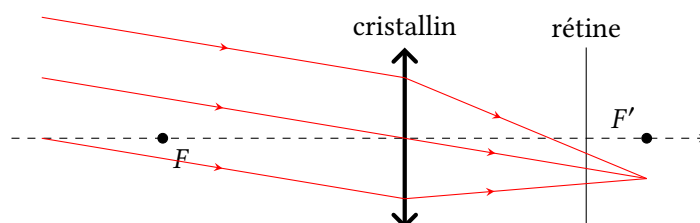


Figure 8 – Formation d'image du punctum remotum par un œil hypermétrope qui n'accommode pas.

IV.D.3 - Astigmatie ou astigmatisme

Le cristallin d'un astigmate n'est plus parfaitement sphérique mais a plutôt une forme de ballon de rugby. Comme le nom de la maladie l'indique, le cristallin n'est alors plus stigmatique et les images qu'il forme sont entachées d'aberrations géométriques. De 20 à 30 % de la population est concernée par l'astigmatie, en général couplée à la myopie ou l'hypermétropie.

IV.D.4 - Presbytie

La presbytie, d'un mot grec signifiant « vieillard » ou « ancien », est un trouble de la vision qui rend difficile la focalisation du cristallin, et donc la vision de près. Cela a pour conséquence d'éloigner le punctum proximum. Ce n'est pas une maladie mais un processus de vieillissement normal de l'œil, qui commence dès la naissance mais se manifeste classiquement entre 40 et 45 ans.

IV.D.5 - Daltonisme

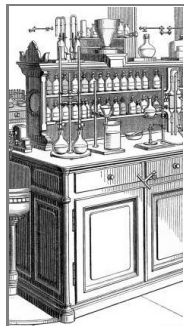
Le daltonisme est un trouble de la vision des couleurs, qui empêche de distinguer correctement certaines teintes. Il résulte d'une anomalie des cellules photoréceptrices de la rétine appelées cônes, responsables de la perception des couleurs. On distingue trois types de cônes : les cônes L, sensibles au rouge, les cônes M, sensibles au vert, et les cônes S, sensibles au bleu. Selon le type de cônes affecté, la personne daltonienne aura des difficultés à différencier certaines gammes de couleurs. La cause la plus fréquente est génétique, liée à une mutation sur le chromosome X, ce qui explique qu'il touche 8 % des hommes mais seulement 0,5 % des femmes : les femmes possédant deux chromosomes X, une mutation sur l'un peut être compensée par l'autre. En revanche, les hommes, qui possèdent un chromosome X et un chromosome Y, ne peuvent pas bénéficier de cette compensation.

V - Instruments d'optique

Un **instrument d'optique** est un dispositif qui utilise les propriétés de la lumière afin de former, analyser ou enregistrer une image ou un signal lumineux. Ces instruments peuvent avoir pour but d'améliorer (au sens large) la vision humaine, d'analyser des phénomènes physiques, ou encore de mesurer des grandeurs liées aux systèmes observés. Ce cours se restreint aux instruments d'optique utilisant (ou modélisables par) des lentilles dans le cadre de l'optique géométrique.

On distingue les instruments d'optique **objectifs**, dont l'image finale est formée sur un capteur ou un écran, et les instruments d'optique **subjectifs**, destinés à former des images observées à l'œil. L'œil observant sans fatigue au punctum remotum, un instrument subjectif est toujours conçu pour former une image à l'infini.

V.A - Un exemple d'instrument subjectif : la lunette astronomique



Un peu d'histoire : La lunette astronomique fut inventée au début du XVII^e siècle, probablement par Hans Lippershey en 1608, puis rapidement perfectionnée par Galilée en 1609. Cet instrument permit des découvertes majeures : les satellites de Jupiter, les phases de Vénus, les reliefs de la Lune et une vision plus précise de la Voie lactée. Ces observations remettaient en cause le système géocentrique et confirmaient l'héliocentrisme proposé par Nicolas Copernic en 1513. Toutefois, la lunette présente des limites techniques, notamment les aberrations chromatiques et la difficulté d'agrandir les lentilles. De nos jours, les télescopes à miroirs dominent la recherche scientifique, tandis que la lunette reste prisée des astronomes amateurs pour sa simplicité.



Une lunette astronomique est un instrument d'optique subjectif, permettant d'observer à l'œil des objets très éloignés en les grossissant. Il s'agit d'un système optique composé de deux entités distinctes :

- ▷ un **objectif** (côté objet), par lequel entre la lumière : c'est un dispositif à plusieurs lentilles, modélisable par une unique lentille convergente (L_1) de grande focale $f'_1 \sim 1$ m pour une lunette amateur ;
- ▷ un **oculaire** (côté œil), par lequel sort la lumière : dispositif modélisable par une unique lentille convergente (L_2) de petite focale $f'_2 \sim 1$ cm.

L'image A_0B_0 de l'objet par l'objectif est appelée **image intermédiaire**, elle sert d'objet à l'oculaire. On note symboliquement :

$$AB \xrightarrow{(L_1)} A_0B_0 \xrightarrow{(L_2)} A'B'$$

Pour alléger les constructions de rayons, ceux issus d'une extrémité de l'objet sont très souvent supposés parfaitement parallèles à l'axe optique. Il ne reste à tracer que les rayons issus de l'autre extrémité.

Application 7 : Lunette astronomique

corrigé p. 28

- 1 - Déterminer la distance devant séparer les deux lentilles.
- 2 - Représenter la marche des rayons dans la lunette sur la figure 9.
- 3 - Le grossissement de la lunette est défini comme le rapport entre le diamètre apparent de l'astre observé avec et sans lunette. L'exprimer en fonction des focales de l'objectif et de l'oculaire. Analyser son signe.

Approximation des petits angles :

Pour un angle **en radians** θ tel que $\theta \ll 1$, on peut utiliser les approximations suivantes :

$$\sin \theta \simeq \theta \qquad \tan \theta \simeq \theta \qquad \cos \theta \simeq 1$$

⚠️ ⚠️ ⚠️ **Attention !** Ces approximations ne sont pas valables pour un angle exprimé en degrés !

Cette approximation est illustrée figure 10. C'est pour le sinus qu'elle est la meilleure (écart inférieur à 5 % pour des angles inférieurs à 30°), et pour le cosinus qu'elle est la moins pertinente.

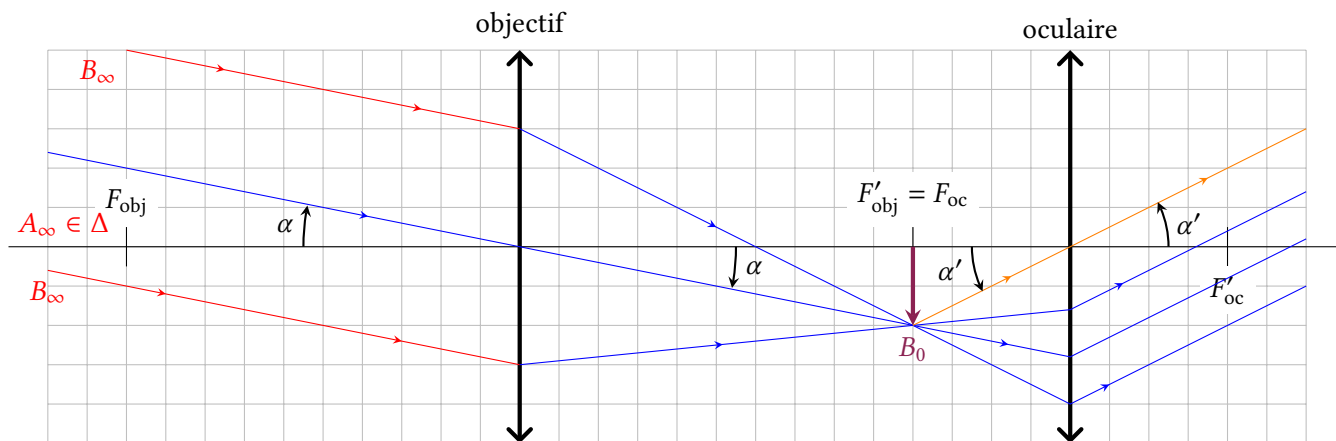


Figure 9 – Marche des rayons dans une lunette astronomique.

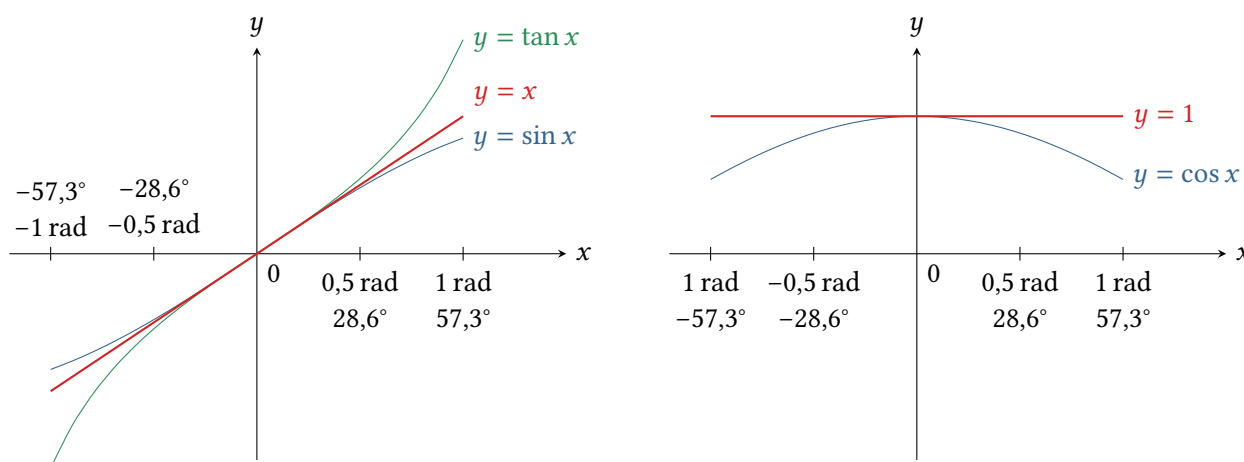


Figure 10 – Approximation des petits angles.

► **Pour approfondir** : L'approximation des petits angles revient à approximer la courbe de la fonction par sa tangente en $x = 0$. En effet, la tangente à la courbe représentative d'une fonction f en $x = a$ a pour équation

$$y = f(a) + f'(a)(x - a).$$

Appliquer cette relation aux fonctions trigonométriques en $a = 0$ conduit exactement aux résultats énoncés ci-dessus : par exemple pour le sinus

$$y = \sin(0) + \cos(0)(x - 0) = 0 + 1 \times (x - 0) = x.$$

Plus largement, ces approximations viennent de la théorie des développements limités, qui constituent des approximations d'une fonction quelconque par des polynômes : l'approximation des petits angles est ainsi un développement limité d'ordre 1. Vous étudierez les développements limités en cours de maths cette année, et nous aurons de nombreuses occasions de nous en ressuir. ■

Bilan à retenir :

Une lunette astronomique est un instrument **afocal** : elle forme une image à l'infini d'un objet à l'infini.

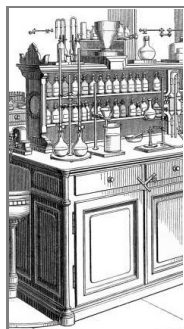
Le plan focal image de l'objectif est donc confondu avec le plan focal objet de l'oculaire.

Son **grossissement** est défini comme le rapport des diamètres apparents avec et sans lunette, il s'exprime en fonction des focales des lentilles par

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = -\frac{f'_{\text{obj}}}{f'_{\text{oc}}}$$

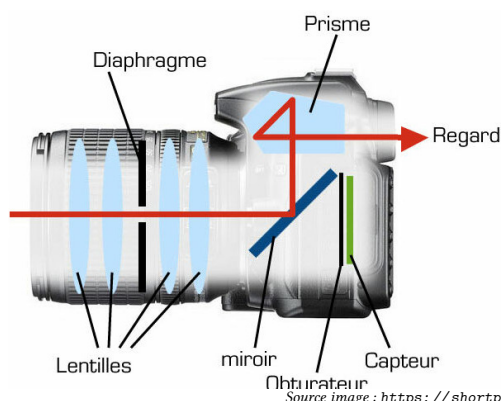
Le grossissement est négatif : l'image par la lunette est renversée.

V.B - Un exemple d'instrument objectif : l'appareil photo

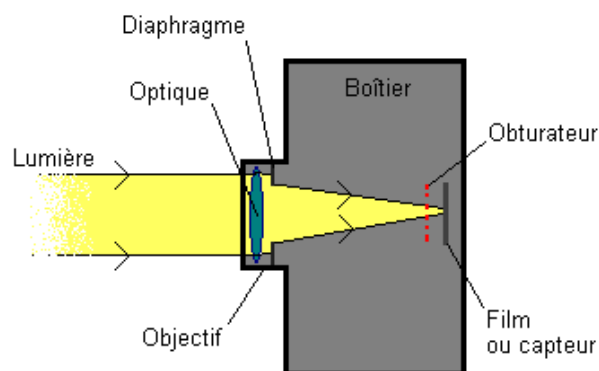


Un peu d'histoire : La première photographie permanente a été obtenue par Nicéphore Niepce en 1826. En 1839, Louis Daguerre invente le daguerréotype, qui produit des images très détaillées sur une plaque métallique argentée, uniques et non reproductibles. La même année, William Fox Talbot met au point le calotype, utilisant du papier sensibilisé et permettant de tirer plusieurs copies à partir d'un négatif, principe fondateur de la photographie argentique. En 1888, George Eastman démocratise la photographie avec le Kodak à film en rouleau. Au XX^e siècle, les progrès incluent la pellicule couleur, les appareils reflex et la miniaturisation. À partir des années 1990, la révolution numérique transforme la photographie, supprimant le film argentique et ouvrant la voie aux appareils compacts puis aux capteurs intégrés dans les smartphones.

V.B.1 - Constitution et modélisation



Source image : <https://shortpixel.com/>



Source image : <http://photo.stereo.free.fr>

Figure 11 – Constitution d'un appareil photo. Le miroir permettant de dévier la lumière vers le viseur se soulève lors de la prise de la photo, juste avant que l'obturateur ne s'ouvre pour laisser la lumière atteindre le capteur.

- L'**objectif** est constitué d'un ensemble de lentilles pouvant se déplacer les unes par rapport aux autres. On le modélise par une unique lentille convergente de focale f' constante. La **mise au point**, c'est-à-dire le réglage de l'appareil permettant d'obtenir une photo nette, se fait en déplaçant l'objectif jusqu'à obtenir une image nette sur le capteur.
- Un **diaphragme** de diamètre réglable permet de modifier le diamètre apparent de l'objectif. Son diamètre D est souvent donné via le **nombre d'ouverture** $N = f'/D$. Dans la modélisation, le diaphragme est supposé accolé à la lentille modélisant l'objectif.
- Le **capteur** est constitué d'une matrice de cellules photosensibles : les **pixels**, abréviation de *picture element*. La précision de la photo prise est bien sûr due aux dimensions et à la disposition des pixels, quantifiées par le **cercle de confusion** qui définit la plus petite tâche que le capteur est capable de discerner. La durée pendant laquelle le capteur reçoit de la lumière par ouverture de l'obturateur est appelée **temps de pose** ou **durée d'exposition**.

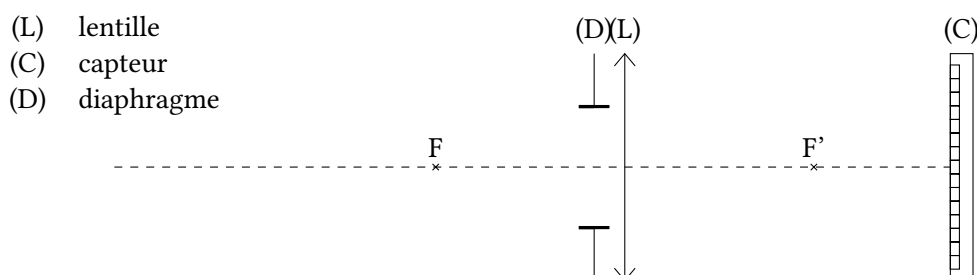


Figure 12 – Modélisation d'un appareil photo.

V.B.2 - Champ

R



On appelle **champ** la zone de l'espace visible sur la photo, c'est-à-dire dont l'image se forme sur le capteur.

→ le capteur étant de taille fixe, le champ est directement lié au grandissement par l'objectif : plus le grandissement est élevé, plus le champ est réduit.

Observation d'images : voir figure 13.



$$f' = 18 \text{ mm}, N = 10, \tau = \frac{1}{100} \text{ s}$$



$$f' = 50 \text{ mm}, N = 10, \tau = \frac{1}{100} \text{ s}$$



$$f' = 135 \text{ mm}, N = 10, \tau = \frac{1}{100} \text{ s}$$

Figure 13 – Influence de différents paramètres sur le champ.

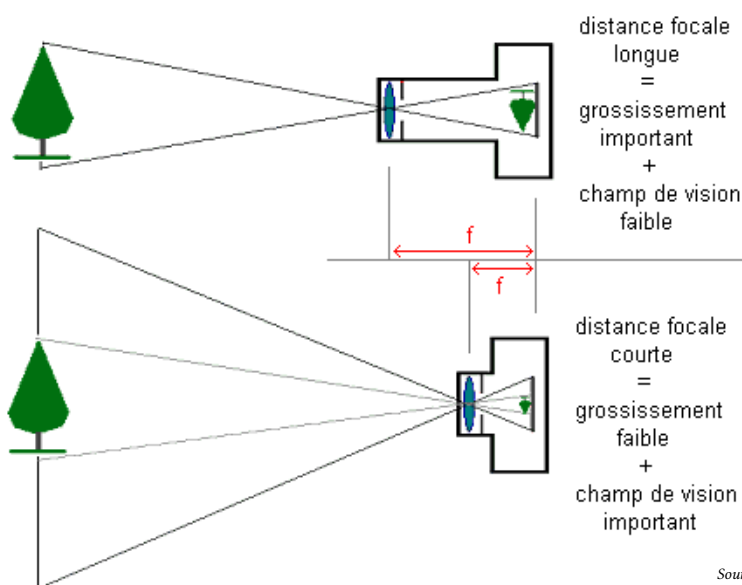
Q



Utiliser un objectif de plus grande focale permet d'obtenir un champ plus réduit.

D

Interprétation : voir figure 14.



Source image : <http://photo.stereo.free.fr>

Figure 14 – Lien entre champ et focale de l'objectif.

impact de la focale sur le grandissement → formule de grandissement

$\gamma = -f/\overline{FA} = f'/\overline{FA}$ avec $\overline{FA} = \text{cte}$ car déplacer l'objectif ne change quasiment pas la distance à la cascade.

Conclusion : $|\gamma|$ augmente si f' augmente.

Remarque : peut-on raisonner avec la deuxième formule de grandissement $\gamma = -\overline{F'A'}/f'$?

Non, car déplacer l'objectif pour refaire la mise au point change notablement la distance $\overline{F'A'}$.

Espace 18

V.B.3 - Exposition



L'**exposition** représente la luminosité de la photo.
Elle est directement liée à la quantité de lumière ayant atteint le capteur pendant le temps de pose.

(R)

Observation d'images : voir figure 15.



Plus le temps de pose est grand, et plus le diaphragme est ouvert, plus la photo est exposée
... mais un temps de pose plus long peut générer un flou sur les sujets en mouvement,
un compromis est alors à trouver.

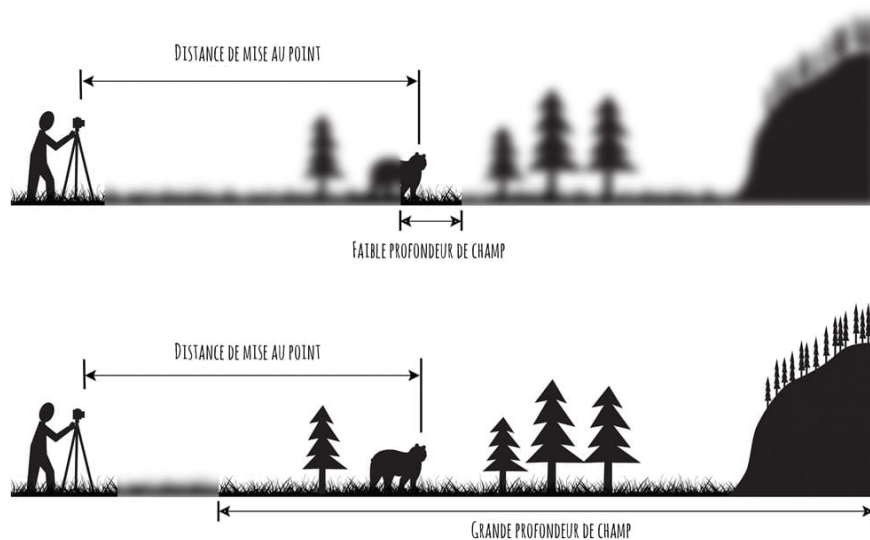
(Q)

V.B.4 - Profondeur de champ



On appelle **profondeur de champ** la distance séparant le point le plus proche et le plus éloigné qui apparaissent nets sur la photo.

(R)



Source image : <https://lartdelaphoto.fr>

↪ à quelle condition un point apparaît-il net ?

(R)

son image sur le capteur doit être perçue comme un point, c'est-à-dire la tâche lumineuse formée sur le capteur doit être de diamètre inférieur au cercle de confusion du capteur ($\approx$ taille d'un pixel).

Espace 19

Observation d'images : voir figure 16.

- le flou de l'arrière plan peut-il être dû aux différents temps de pose ?
non car bâtiment fixe

Espace 20

- quel paramètre semble déterminant sur la profondeur de champ ?
ouverture du diaphragme

Espace 21



$$f' = 22 \text{ mm}, N = 8, \tau = \frac{1}{1000} \text{ s}$$



$$f' = 22 \text{ mm}, N = 8, \tau = \frac{1}{250} \text{ s}$$



$$f' = 22 \text{ mm}, N = 8, \tau = \frac{1}{80} \text{ s}$$



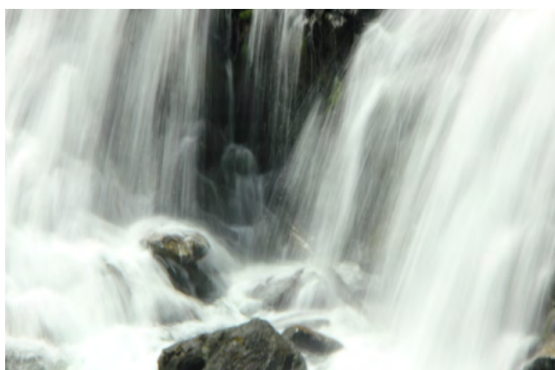
$$f' = 22 \text{ mm}, N = 20, \tau = \frac{1}{250} \text{ s}$$



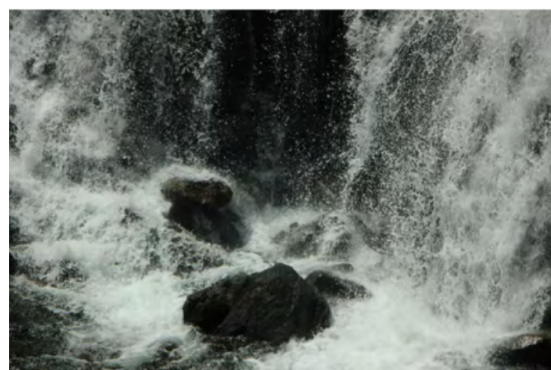
$$f' = 22 \text{ mm}, N = 8, \tau = \frac{1}{250} \text{ s}$$



$$f' = 22 \text{ mm}, N = 3,5, \tau = \frac{1}{250} \text{ s}$$



$$f' = 135 \text{ mm}, N = 32, \tau = \frac{1}{6} \text{ s}$$



$$f' = 135 \text{ mm}, N = 5,6, \tau = \frac{1}{640} \text{ s}$$

Figure 15 – Influence de différents paramètres sur l'exposition d'une photo.



$$f' = 85 \text{ mm}, N = 5,6, \tau = \frac{1}{320} \text{ s}$$



$$f' = 85 \text{ mm}, N = 20, \tau = \frac{1}{160} \text{ s}$$



$$f' = 85 \text{ mm}, N = 36, \tau = \frac{1}{125} \text{ s}$$

Figure 16 – Influence de différents paramètres sur la profondeur de champ.

- question subsidiaire : pourquoi modifier le temps de pose entre les photos ?
pour garder une exposition constante

Espace 22



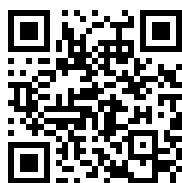
Plus le diaphragme est fermé, c'est-à-dire plus le nombre d'ouverture $N = f'/D$ est grand, plus la profondeur de champ est grande.



Interprétation : plus le diaphragme est fermé, voir figure 17, plus la tâche formée sur le capteur par un point qui n'est pas dans le plan de mise au point est petite, et donc plus elle a de chance d'apparaître nette si son diamètre devient inférieur à celui du cercle de confusion.



Construction géométrique de la profondeur de champ :



L'animation Geogebra ci-contre (scanner ou cliquer) permet de tracer les rayons extrêmes issus d'un point objet A, et donc de comparer la tâche qu'il forme sur le capteur au cercle de confusion. Le diamètre de l'objectif et sa focale sont modifiables également.

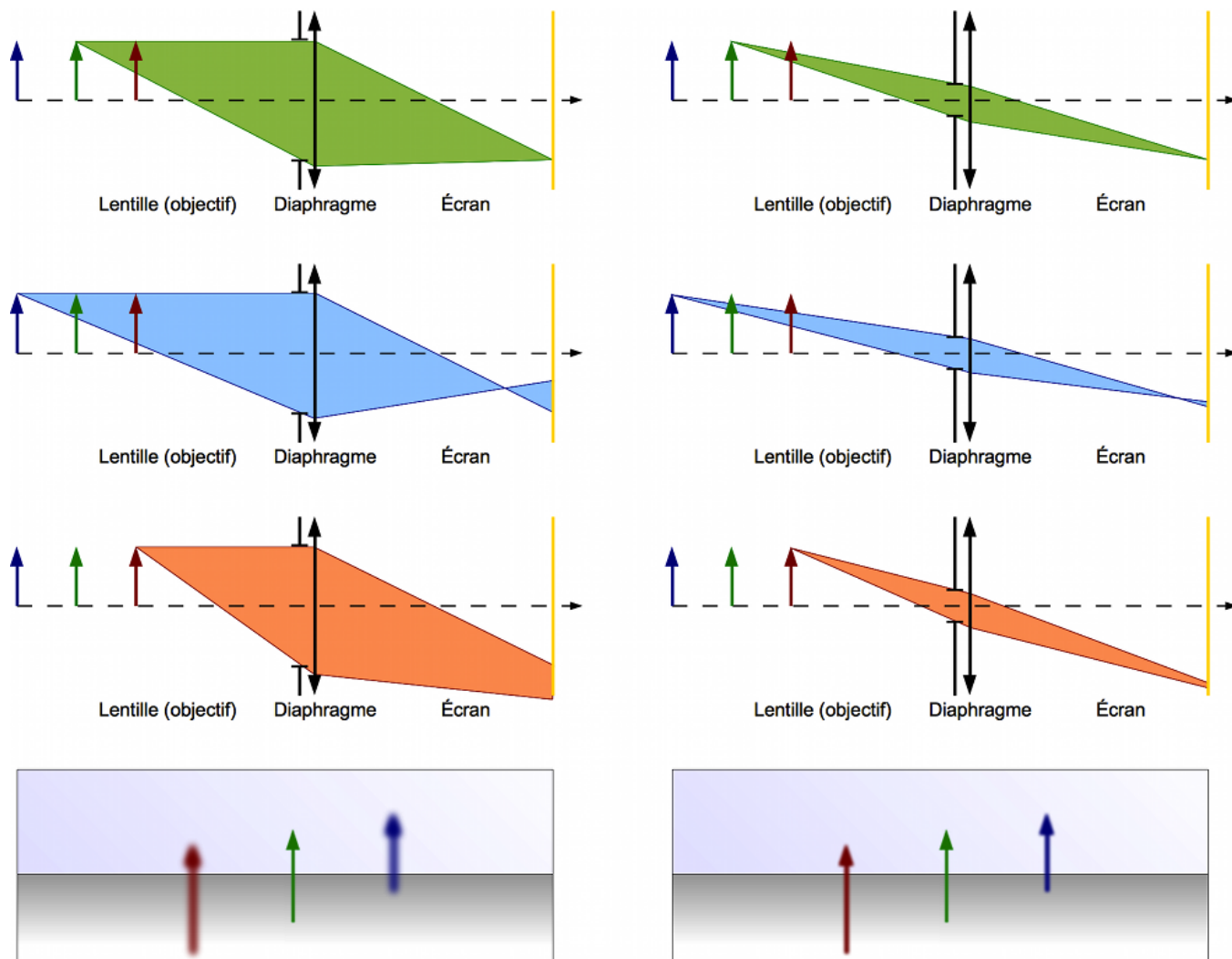


Figure 17 – Lien entre ouverture du diaphragme et profondeur de champ.



Application 8 : Construction de la profondeur de champ sur un schéma

corrigé p. ??

La figure 18 représente un appareil photo faisant la mise au point sur un objet AB (seul le point A est représenté). Le but est de construire graphiquement la profondeur de champ associée au réglage représenté.

- 1 - Notons A_1 le point de l'axe optique dont l'image A'_1 est située la plus loin *derrière* le capteur tout en apparaissant nette. Sur le schéma *du haut*, placer A'_1 , puis construire son antécédent A_1 par l'objectif.
- 2 - Notons A_2 le point de l'axe optique dont l'image A'_2 est située la plus loin *devant* le capteur tout en apparaissant nette. Sur le schéma *du bas*, Placer A'_2 , puis construire son antécédent A_2 par l'objectif.
- 3 - En déduire la profondeur de champ en combinant les deux schémas.

Méthode de construction des antécédents : les points A'_1 et A'_2 étant sur l'axe optique, il faut commencer par placer un point B'_1, B'_2 hors de l'axe, puis construire son antécédent B_1, B_2 puis en déduire A_1 et A_2 par projection ... ce que je n'ai pas fait sur la figure 18 où les points sont placés par le calcul.

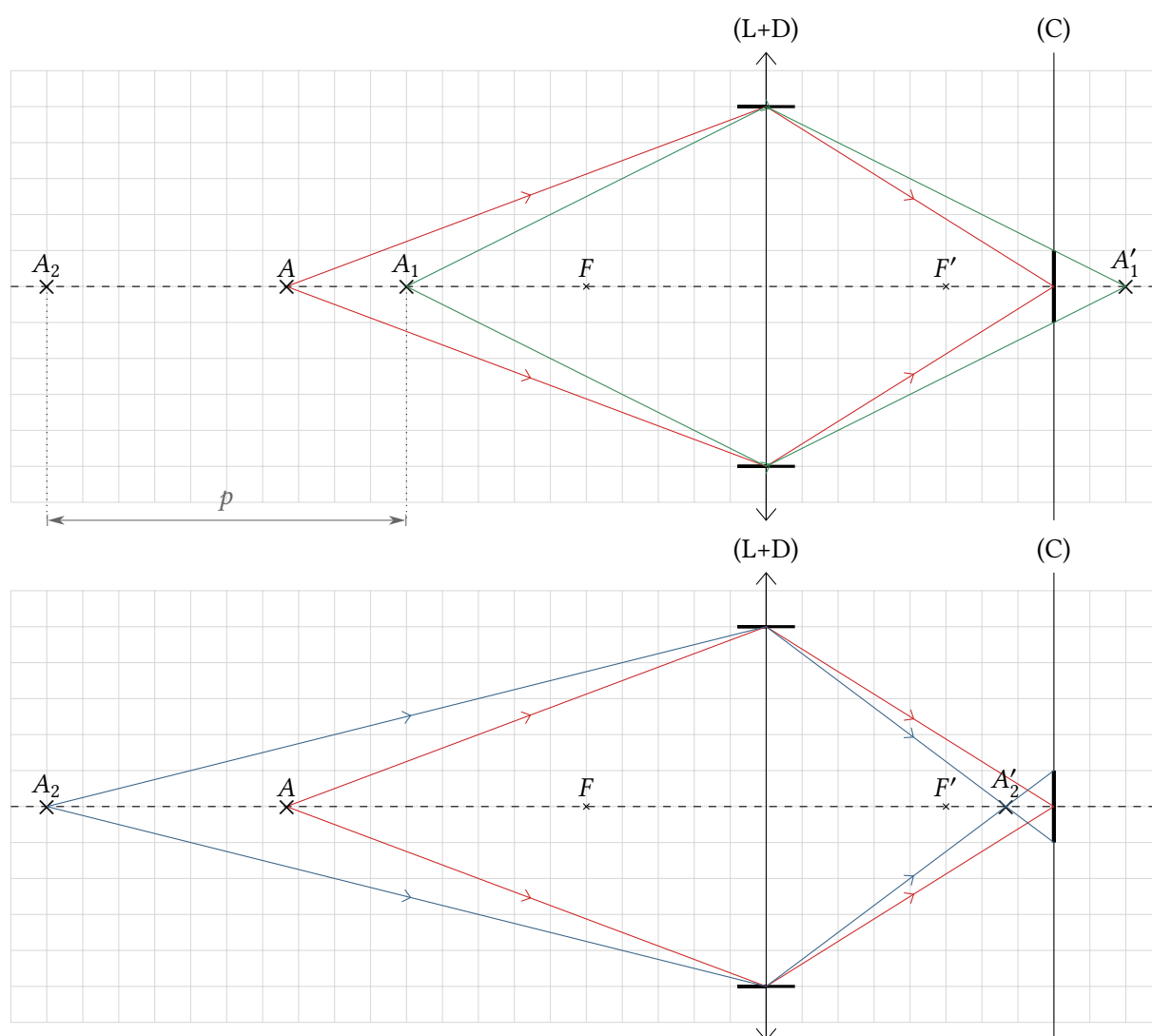


Figure 18 – Construction géométrique de la profondeur de champ. Le trait épais sur le capteur (C) matérialise le diamètre du cercle de confusion.

Éléments de correction des applications de cours

Ces corrections sont parfois incomplètes, et presque toujours moins détaillées que ce qui est présenté en classe.
Vos notes de cours sont donc l'outil à privilégier pour les travailler, davantage que le présent document.

Application 4 : Image agrandie énoncé p. 12

On cherche les distances (algébriques) $\overline{OA}$ ou $\overline{FA}$ permettant d'obtenir un grandissement $|\gamma| > 1$... et on utilise la relation la plus pratique. Comme on ne s'intéresse pas à la position de l'image, on cherche une relation qui implique γ et uniquement la position de l'objet.

→ relation de grandissement avec origine au foyer.

$$\gamma = \frac{f'}{\overline{FA}}$$

On en déduit que l'on cherche $\overline{FA}$ tel que

$$|\gamma| = \left| \frac{f'}{\overline{FA}} \right| = \frac{f'}{|\overline{FA}|} > 1 \quad \text{soit} \quad |\overline{FA}| < f'$$

Schéma figure 19.

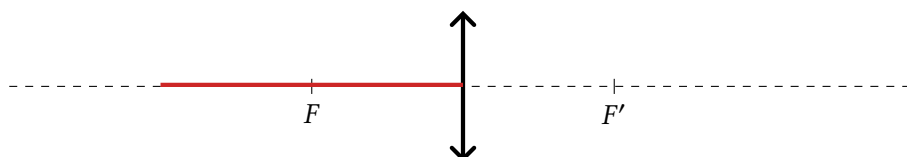


Figure 19 – Position des objets permettant de former une image agrandie par une lentille convergente.

Application 5 : Objet réel, image réelle énoncé p. 13

La nature réelle de l'image est plus simple à exprimer à partir de la relation de conjugaison de Descartes, c'est donc elle que l'on utilise. Puisque l'image est réelle, on cherche $\overline{OA}$ tel que

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{\overline{OA}} > 0 \quad \text{soit} \quad \frac{1}{\overline{OA}} > -\frac{1}{f'}$$

*** **Attention !** On ne peut pas inverser l'inégalité sans précaution, car la fonction inverse n'est pas monotone sur $\mathbb{R}$!

Si la lentille est convergente $f' > 0$ et comme $\overline{OA} < 0$ les deux membres sont de même signe : on peut inverser, ce qui donne

$$\overline{OA} < -f'$$

Tous les points à gauche du foyer objet F donnent une image réelle.

Si la lentille est divergente, $-1/f' > 0$ donc $\overline{OA} > 0$... ce qui est contradictoire avec le fait que l'objet soit réel. Ainsi, un objet réel ne peut pas former une image réelle par une lentille divergente.

Application 6 : Comparaison du grandissement dans les deux positions énoncé p. 14

Le grandissement vaut $\gamma = \overline{OA'}/\overline{OA}$: l'image est agrandie si $|\overline{OA'}| > |\overline{OA}|$, c'est-à-dire si la lentille est plus proche de l'objet que de l'écran.

Application 7 : Lunette astronomique énoncé p. 19

1 L'objet AB se trouve à l'infini, donc l'image intermédiaire A_0B_0 se trouve dans le plan focal image de l'objectif : ainsi, $\overline{O_1A_0} = f'_1$. De plus, l'image final $A'B'$ doit se trouver à l'infini, donc l'image intermédiaire doit se trouver dans le plan focal objet de l'oculaire : ainsi, $\overline{A_0O_2} = f'_2$. On en déduit que les deux lentilles sont séparées de

$$\overline{O_1O_2} = \overline{O_1A_0} + \overline{A_0O_2} = f'_1 + f'_2.$$

2 Voir figure 9 page 20.

3 La méthode applicable à tous les instruments d'optique consiste à identifier des tangentes des angles intéressants en raisonnant autour de l'image intermédiaire, en étant vigilant aux signes. Par définition,

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha},$$

et

$$\tan \alpha = \frac{\overline{A_0 B_0}}{\overline{O_1 F'_1}} = \frac{\overline{A_0 B_0}}{f'_1} < 0 \quad \text{et} \quad \tan \alpha' = \frac{\overline{A_0 B_0}}{\overline{O_2 F'_2}} = -\frac{\overline{A_0 B_0}}{f'_2} > 0.$$

Dans l'approximation des petits angles,

$$\alpha = \frac{\overline{A_0 B_0}}{f'_1} \quad \text{et} \quad \alpha' = -\frac{\overline{A_0 B_0}}{f'_2}$$

d'où on conclut

$$G = -\frac{f'_1}{f'_2} < 0.$$

L'image finale est renversée, ce qui est cohérent avec le tracé des rayons : les rayons issus de B arrivent du haut en entrée de lunette, mais en ressortent en venant du bas.

Expériences de cours envisageables

Une belle liste ne vaut pas engagement à tout faire tous les ans ☺

On ne voit pas la lumière en tant que telle

- ☐ Un laser monté sur un pied;
- ☐ Un écran;
- ☐ Un truc plein de poussière de craie (effaceur de tableau, etc.)