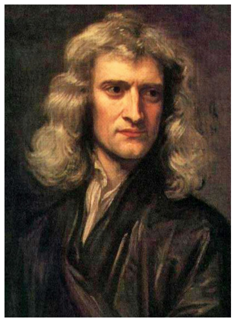
Thème I. Ondes et signaux (Optique géométrique)
Chapitre n°2 Formation des images

Quelques scientifiques ayant travaillé sur les miroirs et les lentilles :


Galilée (1564-1642) utilisant sa lunette


René Descartes (1596-1650)


Issac Newton (1643-1727)

Quelques instruments utilisant des lentilles et des miroirs :


Appareil photographique numérique


Lunette astronomique


Télescope de Newton


Microscope

Pré-requis

- 2nde : Thème Ondes et signaux
  - Lentilles, modèle de la lentille mince convergente : foyers, distance focale.
  - Utiliser le modèle du rayon lumineux pour déterminer graphiquement la position, la taille et le sens de l'image réelle d'un objet plan réel donnée par une lentille mince convergente.
  - Définir et déterminer géométriquement un grandissement.
  - Modéliser l'œil.
- 1re : Thème Ondes et signaux
  - Relation de conjugaison d'une lentille mince convergente. Grandissement.
  - Image réelle, virtuelle, droite, renversée.
  - Utiliser des grandeurs algébriques.
- Terminale : Thème Ondes et signaux
  - Modèle optique d'une lentille astronomique avec objectif et oculaire convergents.
  - Grossissement d'une lunette afocale.

Objectifs du chapitre

— Construire l'image d'un objet par un miroir, une lentille mince convergente ou divergente.

— Connaître et utiliser les relations de conjugaison pour les lentilles minces afin de déterminer la position d'une image connaissant celle d'un objet (ou inversement).

— Étudier des dispositifs optiques : l'œil, l'appareil photographique, la lunette astronomique, le microscope.

Plan du cours

Ai-je bien appris mon cours ?

1 – ☺ – ☹ – Construire l'image d'un objet par un miroir plan.

2 – ☺ – ☹ – Définir les conditions de Gauss et expliquer l'intérêt de s'y placer.

3 – ☺ – ☹ – Expliquer le lien entre le stigmatisme approché et les caractéristiques d'un détecteur.

4 – ☺ – ☹ – Définir les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence.

5 – ☺ – ☹ – Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide de rayons lumineux par une lentille mince convergente ou divergente, identifier sa nature réelle ou virtuelle.

6 – ☺ – ☹ – Énoncer les formules de conjugaison et de grandissement transversal de Descartes et Newton.

7 – ☺ – ☹ – Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente.

8 – ☺ – ☹ – Donner la modélisation de l'œil.

9 – ☺ – ☹ – Définir et donner l'ordre de grandeur de la limite de la résolution angulaire.

10 – ☺ – ☹ – Définir punctum proximum, punctum remotum, accommodation. Donner l'ordre de grandeur de la plage d'accommodation.

11 – ☺ – ☹ – Donner la modélisation de l'appareil photographique.

12 – ☺ – ☹ – Construire géométriquement la profondeur de champ d'un appareil photo pour un réglage donné.

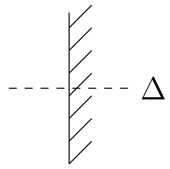
I Miroir plan

I.1 Construction d'une image

Capacités exigibles : Construire l'image d'un objet, identifier sa nature réelle ou virtuelle.

Animation : Images par un miroir plan

Un miroir plan est une surface plane réfléchissante (symbole ci-contre).
Le système optique constitué du miroir plan possède un axe de révolution, qui est orthogonal au miroir : toute rotation autour de cet axe laisse inchangée la marche des rayons. Cet axe est l'**axe optique du système** (Δ).

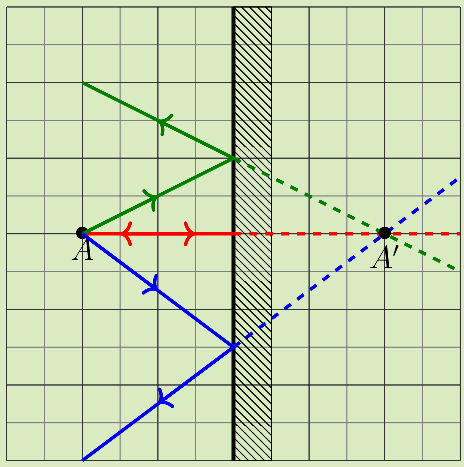


À retenir : Règles de tracés

- Les rayons doivent être tracés à la règle, et chaque rayon avec un stylo (ou feutre fin) de couleur différente.
- Les rayons doivent être orientés par une **flèche**.
- Les rayons incidents et les rayons émergents sont tracés en **traits pleins, avec une flèche dessus**.
- Les **prolongements** des rayons incidents et les prolongements des rayons émergents sont tracés en **traits pointillés**.

Exercice à maîtriser n°1 – Construction de l'image par un miroir plan

R1. Tracer la marche de trois rayons issus de A et frappant le miroir en trois points différents.



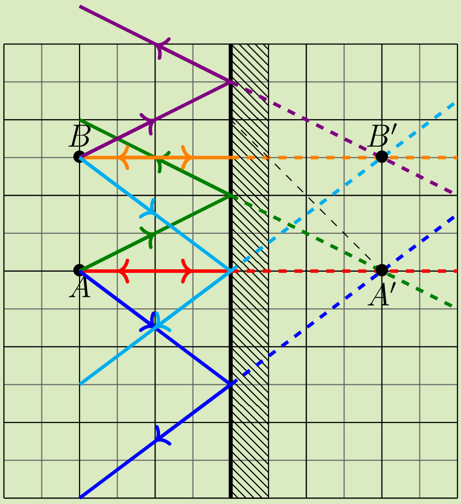
R2. Tracer le prolongement en pointillés (ces rayons n'existent pas) des rayons réfléchis dans la partie arrière de $(\mathscr{M})$. Commenter.

> **Solution:** Pour un observateur placé en avant du miroir, tous les rayons issus de A et réfléchis par le miroir semblent provenir du point A', symétrique du point A par rapport au miroir plan.
> Le prolongement des rayons réfléchis dans la partie arrière du miroir se croisent. Les rayons réfléchis semblent provenir de ce point d'intersection : c'est l'image A' de A par le miroir.
> On dit qu'elle est virtuelle, car elle est à l'intersection des prolongements des rayons réfléchis, et ne peut pas être projetée sur un écran. Cependant elle existe : on la voit !

Considérons un objet (AB) réel perpendiculaire à l'axe optique du miroir.

R3. Tracer l'image $A'B'$ de cet objet par le miroir.

Solution:



R4. Comment est-elle par rapport à l'objet ?

Solution: L'image est symétrique de l'objet par rapport au miroir. Comme elle est virtuelle, on la représente en pointillés.

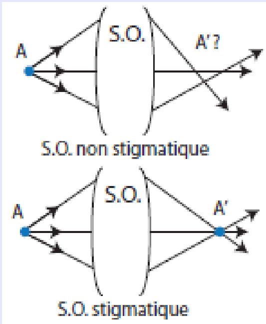
Définitions : Objet et image réels et virtuels

- Un **objet** pour un système optique donné est situé sur les rayons incidents, c'est-à-dire sur le rayons qui se dirigent vers le système optique étudié.
- Un **objet est réel** s'il se situe à l'intersection des rayons incidents.
- Un **objet est virtuel** s'il se situe à l'intersection des PROLONGEMENTS des rayons incidents.
- Une **image** pour un système optique donné est située sur les rayons émergents, c'est-à-dire sur le rayons qui sortent du système optique étudié.
- Une **image est réelle** si elle se situe à l'intersection des rayons émergents.
- Une **image est virtuelle** si elle se situe à l'intersection des PROLONGEMENTS des rayons émergents.

I.2 Stigmatisme rigoureux

Définition : Stigmatisme rigoureux

Un système optique est dit **rigoureusement stigmatique** s'il donne d'un objet ponctuel A un point image A' **unique**.
On dit que A' est l'image de A ou que A **et** A' **sont conjugués par le système optique**.
Dans ce cas, il existe une relation entre la position de l'image et celle de l'objet appelée **formule de conjugaison**.



À retenir : Stigmatisme rigoureux du miroir plan

Le miroir plan est le seul système rigoureusement stigmatique pour tout point objet.

II Conditions de Gauss

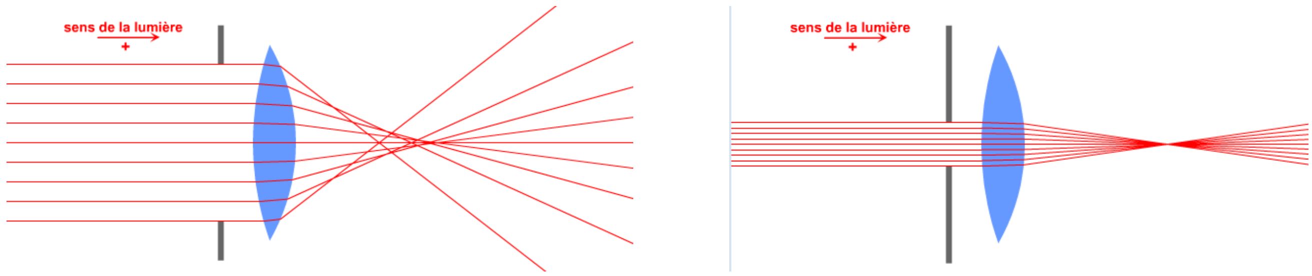
II.1 Stigmatisme approché

Capacités exigibles : Énoncer les conditions permettant un stigmatisme approché et les relier aux caractéristiques d'un détecteur.

Lorsque l'on prend en photo un paysage, on souhaite que l'image obtenue sur le capteur numérique soit la plus nette possible. Le système optique contenu dans l'objectif de l'appareil photo (lentilles minces) doit vérifier un certain nombre de propriétés, que l'on va énoncer.

On considère un **point source** A **placé à l'infini** sur l'axe optique avant une lentille mince convergente.

Animation : Stigmatisme des lentilles



Activité n°2 – Stigmatisme des lentilles ?

R1. La lentille réalise-t-elle un stigmatisme rigoureux dans ces conditions ?

> **Solution:**
> Les rayons issus d'un point objet ne se croisent pas en un unique point après la lentille, par conséquent la lentille ne réalise pas un stigmatisme rigoureux dans ces conditions.

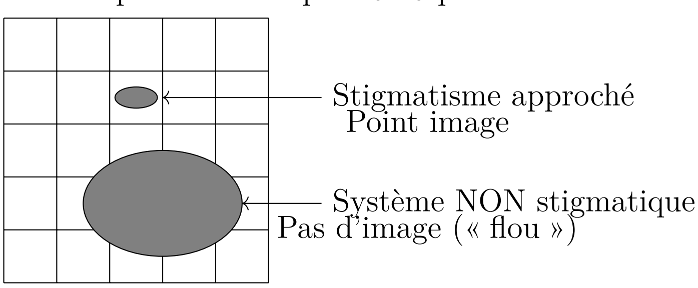
R2. Quel dispositif, placé à proximité de la lentille, permet de s'approcher du stigmatisme rigoureux ? Quel autre effet aurait-il sur l'image ?

> **Solution:**
> Le diaphragme permet de s'approcher du stigmatisme rigoureux, on constate en effet qu'en sa présence, et d'autant plus qu'il est fermé, les rayons se croisent dans une zone restreinte de l'espace. On constate donc qu'en ne permettant pas aux rayons éloignés de l'axe optique de traverser la lentille on obtient un meilleur stigmatisme.
> En limitant les rayons lumineux qui traversent la lentille, le diaphragme aura également comme conséquence de rendre l'image moins lumineuse. Il faudra faire un compromis entre stigmatisme et luminosité.

Le stigmatisme rigoureux est-il nécessaire pour avoir une image nette ? Autrement dit, à quelle condition verra-t-on un point et non une tache ?

Qu'il s'agisse de la rétine de l'œil ou d'un capteur d'appareil photo numérique, les capteurs sont constitués de cellules : les cônes/bâtonnets sur la rétine et les pixels pour l'appareil photo. Cela confère au capteur une **résolution maximale** : le récepteur ne peut pas distinguer des détails plus petits que le plus petit élément qui le constitue. Des rayons émergeant du système optique parvenant sur la même cellule photosensible du capteur peuvent être considérés comme confondus. L'observateur aura donc l'impression de voir un point.

Illustration avec un capteur numérique : 5×5 pixels



À retenir : stigmatisme approché

Un système optique réalise un **stigmatisme approché** si les rayons incidents issus d'un point objet A passent au voisinage de A' de **dimension inférieure à la dimension caractéristique des cellules du capteur**. Cette notion dépend donc du capteur utilisé.

Remarque (pas à retenir) : Quelles sont les causes de non stigmatisme ? On les regroupe en deux catégories principales :

— Les **aberrations géométriques** : on considère une lumière monochromatique. L'image d'un point n'est alors pas exactement un point.

— Les **aberrations chromatiques** : la lumière blanche est composée de plusieurs longueurs d'onde λ. Or l'indice optique n du verre de la lentille dépend de λ (phénomène de dispersion), donc les différentes couleurs monochromatiques ne vont pas converger exactement au même point. Il en résulte des taches colorées.

II.2 Conditions de Gauss

À retenir : conditions de Gauss

Le système optique est utilisé dans les **conditions de Gauss**, si les rayons sont **paraxiaux**, c'est-à-dire :

- les rayons sont peu inclinés par rapport à l'axe optique ;
- les rayons sont peu éloignés de l'axe optique ;

Quand elles sont satisfaites, ces conditions impliquent :

- le système optique réalise un **stigmatisme approché** : $A \xrightarrow{S.O.} A'$;
- le système optique réalise un **aplanétisme approché** : l'image d'un objet perpendiculaire à l'axe optique est également perpendiculaire à l'axe optique $\left(AB \perp \text{axe optique} \xrightarrow{S.O.} A'B' \perp \text{axe optique}\right)$.

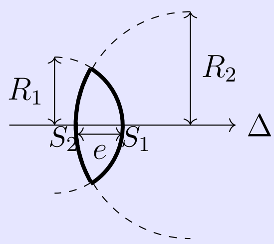
Alors, **les angles** θ entre l'axe optique et les rayons lumineux **sont très petits devant 1 radian**, et on pourra écrire, $\boxed{\text{avec } \theta \text{ en radian : } \sin(\theta) \approx \theta \quad \tan(\theta) \approx \theta \quad \cos(\theta) \approx 1}$.

III Lentilles minces

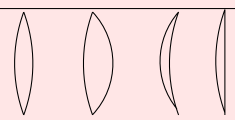
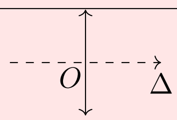
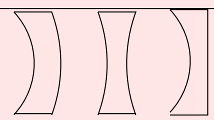
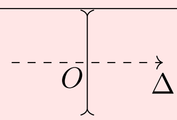
III.1 Différentes lentilles

Définitions : Lentille

Une **lentille** est un matériau transparent, homogène et isotrope délimité par deux dioptres dont l'un au moins est sphérique.
Une **lentille est mince** si la distance e entre les deux sommets est très inférieure aux rayons de courbure (R_1 et R_2), de sorte que l'on puisse les confondre en un même point appelé **centre optique**, noté O.
On note Δ l'**axe optique** : c'est l'axe de révolution de la lentille.



À retenir : Deux types de lentille mince

Lentilles convergentes		Lentilles divergentes	
Bords minces (plus épaisse au centre qu'au bord)		Bords épais (plus épaisse au bord qu'au centre)	
Formes	Symbole	Formes	Symbole
			

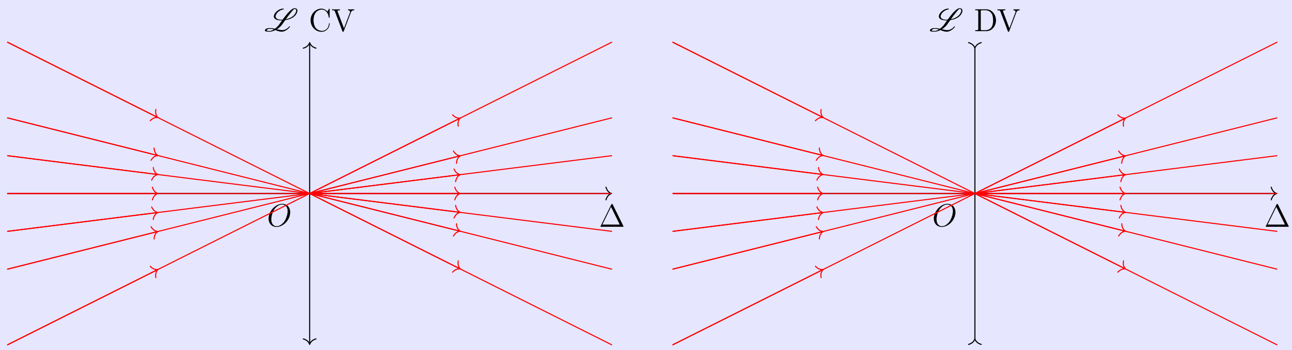
<u>**Capacités exigibles :**</u> **Connaître les définitions et les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence**

III.2 Centre optique

Définition : centre optique

Le **centre optique** est le **point de la lentille mince sur l'axe optique**.
Un rayon passant par le centre optique d'une lentille mince n'est pas dévié.

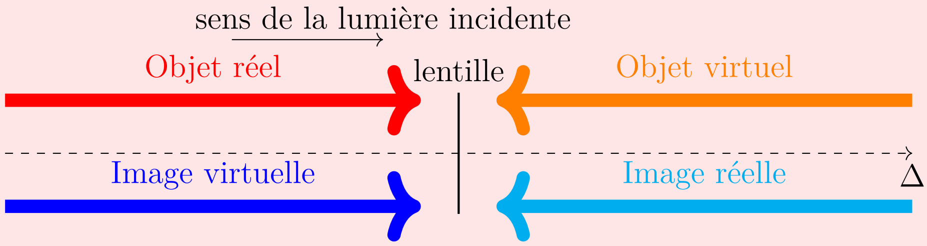
Solution:



III.3 Objet et image

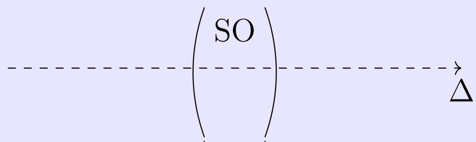
À retenir

Peu importe la nature de la lentille :

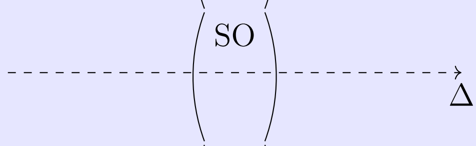


Définitions : Objet et image à l'infini

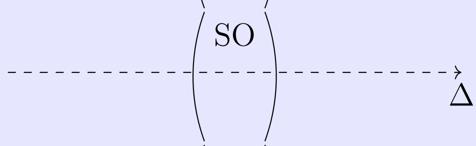
- Un point objet est dit **à l'infini SUR l'axe optique** lorsque les rayons arrivent sur le système optique **parallèlement à l'axe optique**.



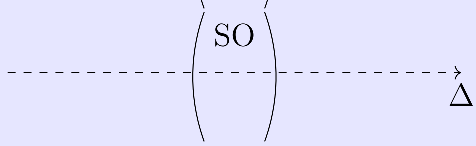
- Un point image est dit **à l'infini SUR l'axe optique** lorsque les rayons émergent du système optique **parallèlement à l'axe optique**.



- Un point objet est dit **à l'infini HORS l'axe optique** lorsque les rayons arrivent sur le système optique **parallèlement entre eux et inclinés par rapport à l'axe optique**.



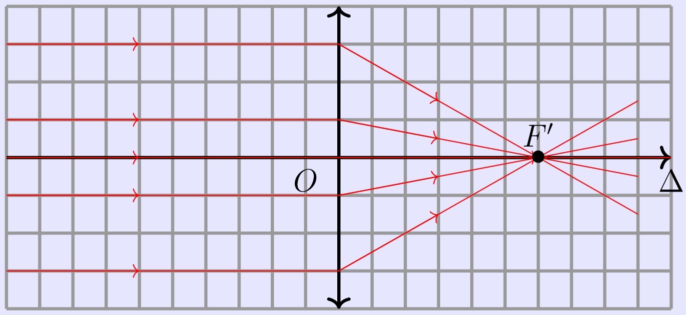
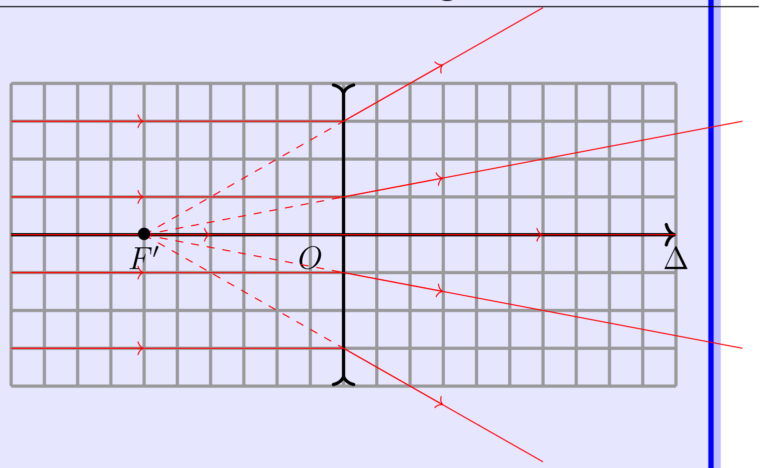
- Un point image est dit **à l'infini HORS l'axe optique** lorsque les rayons émergent du système optique **parallèlement entre eux et inclinés par rapport à l'axe optique**.



III.4 Foyers et plans focaux

Définition : Foyer principal image

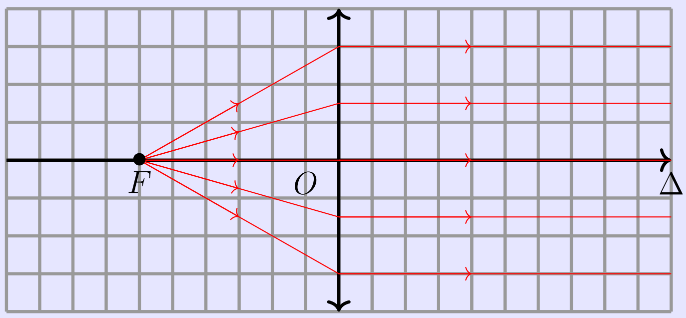
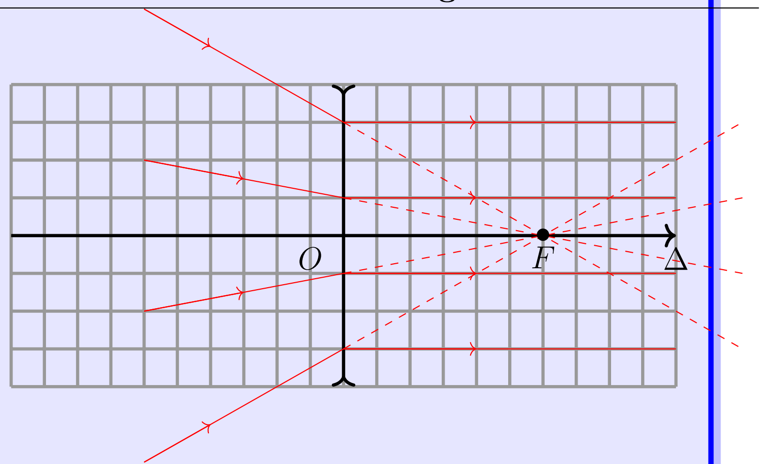
Le foyer principal image F' est le point image d'un point objet situé à l'infini sur l'axe optique. Un rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par F' (ou son prolongement passe par F').

Lentille convergente	**Lentille divergente**
	

On appelle **plan focal image**, le plan perpendiculaire à l'axe optique passant par F'.

Définition : Foyer principal objet

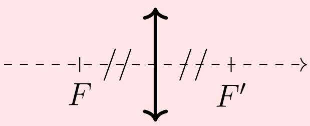
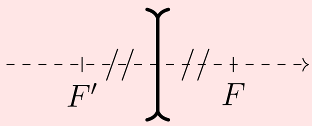
Le point image d'un objet situé au foyer principal objet F est envoyée à l'infini. Un rayon incident passant par F (ou dont le prolongement passe par F) émerge parallèlement à l'axe optique.

Lentille convergente	**Lentille divergente**
	

On appelle **plan focal objet**, le plan perpendiculaire à l'axe optique passant par F.

À retenir

F et F' sont symétriques par rapport à O pour une lentille mince.

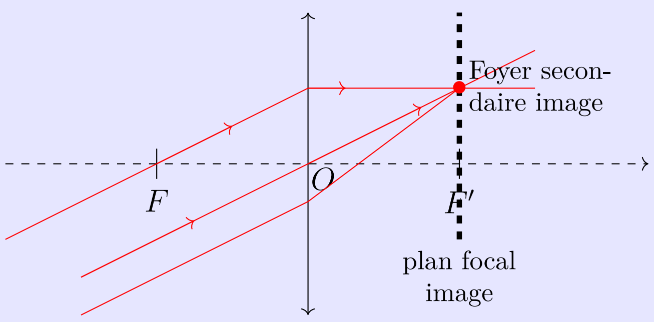
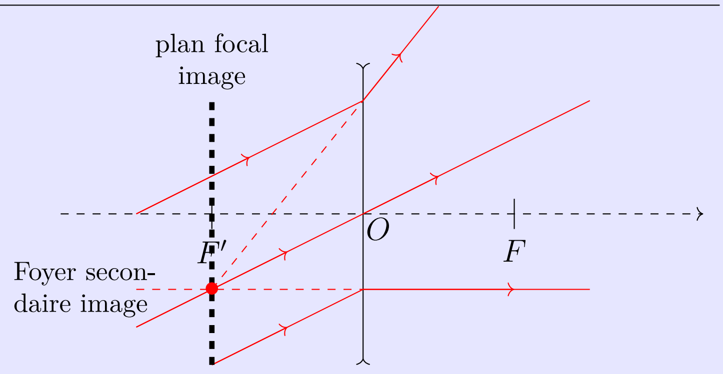
Lentille convergente	**Lentille divergente**
$\longrightarrow$ sens de la lumière incidente	$\longrightarrow$ sens de la lumière incidente
	

Attention – Erreur à ne pas commettre

F et F' ne sont pas conjugués par la lentille mince : F' N'est PAS l'image de F.

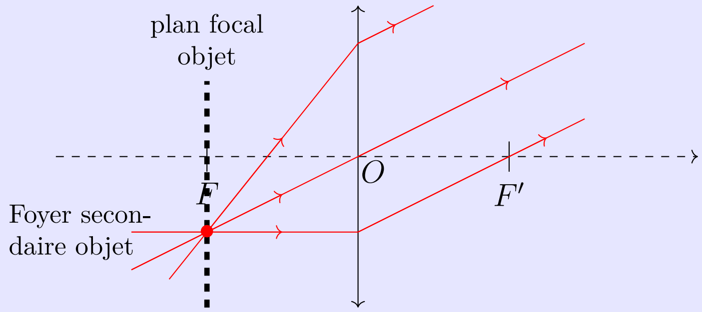
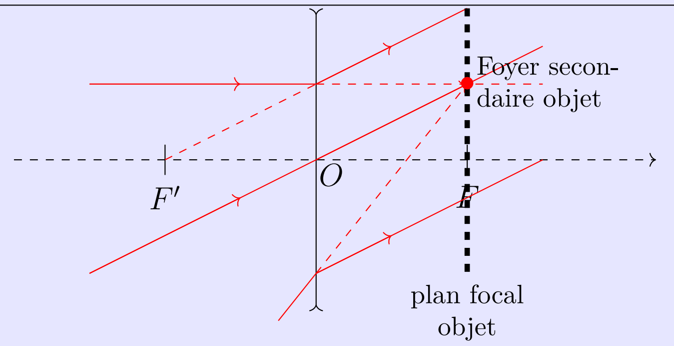
Définition : foyers secondaires image

Les **foyers secondaires image**, notés ϕ', sont les points du plan focal image différents de F'.
Un foyer secondaire image est l'image d'un point objet situé à l'infini hors de l'axe optique.

Lentille convergente	**Lentille divergente**
	

Définition : foyers secondaires objet

Les **foyers secondaires objet**, notés ϕ, sont les points du plan focal objet différents de F.
L'image d'un foyer secondaire objet est située à l'infini hors de l'axe optique.

Lentille convergente	**Lentille divergente**
	

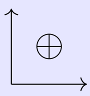
III.5 Distance focale et vergence

Définition : Distances algébriques

En optique, on utilise les **distances algébriques**, notées avec une barre au-dessus ($\overline{OA}$) qui renseignent sur la distance (au sens habituel) qui sépare les deux points, et sur le sens dans lequel est mesurée la distance.

Pour cela, il est nécessaire de définir un sens positif :

- Le long de l'axe optique, le **sens positif** est le **sens de la lumière incidente**.
- Perpendiculairement à l'axe optique, le sens positif est souvent choisi « vers le haut ».



Définitions : Distance focale et vergence

- La **distance focale image** est la distance algébrique $f' = \overline{OF'}$ (en **mètre**)
- La **distance focale objet** est la distance algébrique $f = \overline{OF}$ (en **mètre**), avec $f = -f'$.
- La **vergence** $V = \dfrac{1}{f'}$ (en **dioptrie** $\delta = \mathrm{m}^{-1}$)

À retenir

- La distance focale image f' et la vergence d'une **lentille convergente** sont positives
- La distance focale image f' et la vergence d'une **lentille divergente** sont négatives

Attention : MAJUSCULES $\neq$ minuscules

Soyez très vigilants dans les notations f, f' , F, F' : les **foyers** doivent être notés avec une **lettre majuscule**, et les **distances focales** avec une **lettre minuscule**.

IV Constructions géométriques avec les lentilles

IV.1 Construction de l'image d'un objet

Capacités exigibles : Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide de rayons lumineux.

IV.1.a) Principe

Méthode : Tracé d'une image

Pour représenter l'image $A'B'$ d'un objet AB perpendiculaire à l'axe optique (Δ) avec A sur (Δ) et B hors de (Δ), il faut tracer les trois rayons suivants issus de B afin de déterminer B' :

1. Le rayon passant par le centre optique O n'est pas dévié par la lentille.
2. Le rayon incident issu de B et parallèle à l'axe optique émerge en passant par F'.
3. Le rayon incident issu de B et passant par F émerge parallèlement à l'axe optique.

B' est à l'intersection de ces trois rayons, et on en déduit A' qui est le projeté orthogonal de B' sur (Δ).

Exercice à maîtriser n°3 – Construction de l'image d'un objet

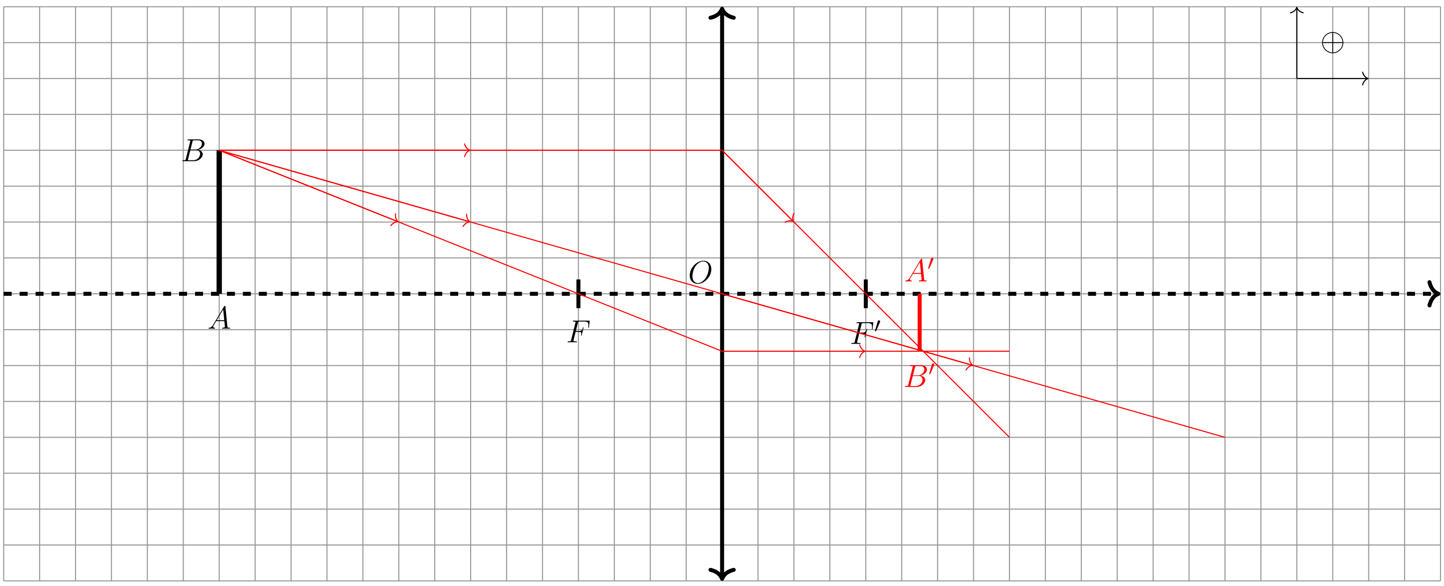
R1. Réaliser les tracés ci-dessous.

R2. Préciser pour chaque tracé la nature de l'objet (réel/virtuel) et la nature de l'image (réelle/virtuelle).

Animation pour s'entraîner aux tracés

IV.1.b) Cas des lentilles convergentes

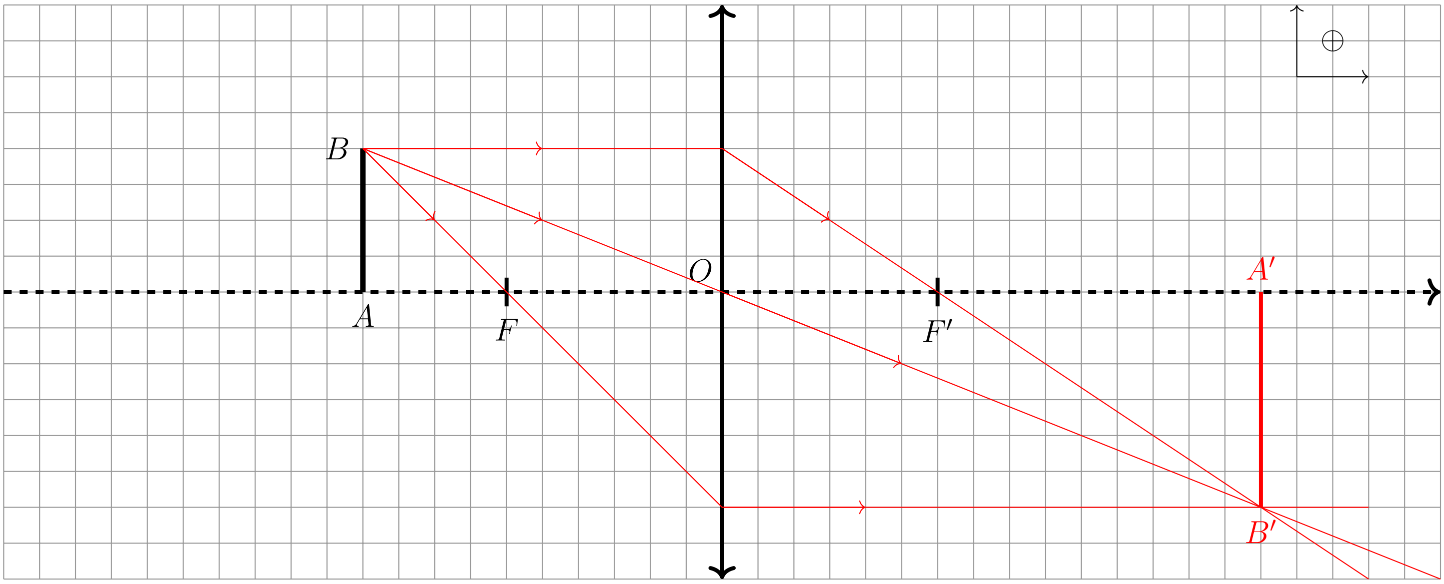
- Objet réel, tel $\left|\overline{OA}\right| > 2f'$
  - Le rayon incident passant par B et par O n'est pas dévié.
  - Le rayon incident passant par B et par F ressort parallèlement à l'axe optique.
  - Le rayon incident passant par B et parallèle à l'axe optique ressort en passant par F'.



L'image est plus petite que l'objet, donc $|\gamma| < 1$.

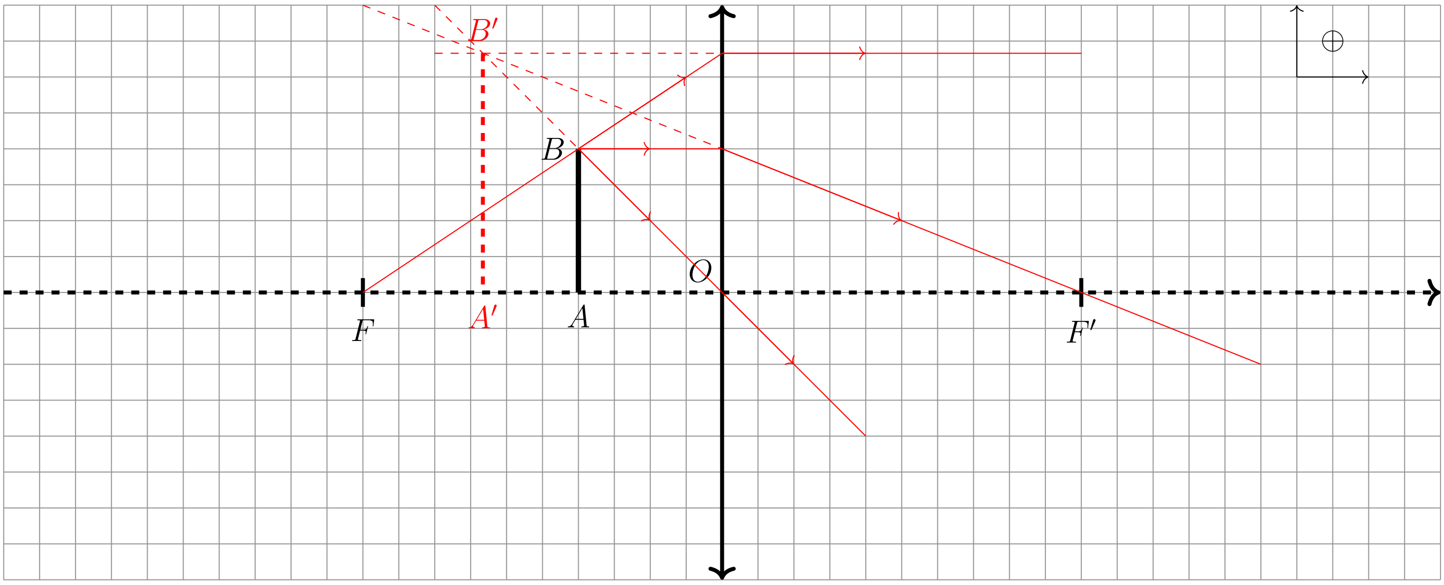
L'image est renversée, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} < 0$, donc $\gamma < 0$.
L'objet est réel, donc $\overline{OA} < 0$.
L'image est réelle, donc $\overline{OA'} > 0$.

- Objet réel, tel $f' < \left|\overline{OA}\right| < 2f'$



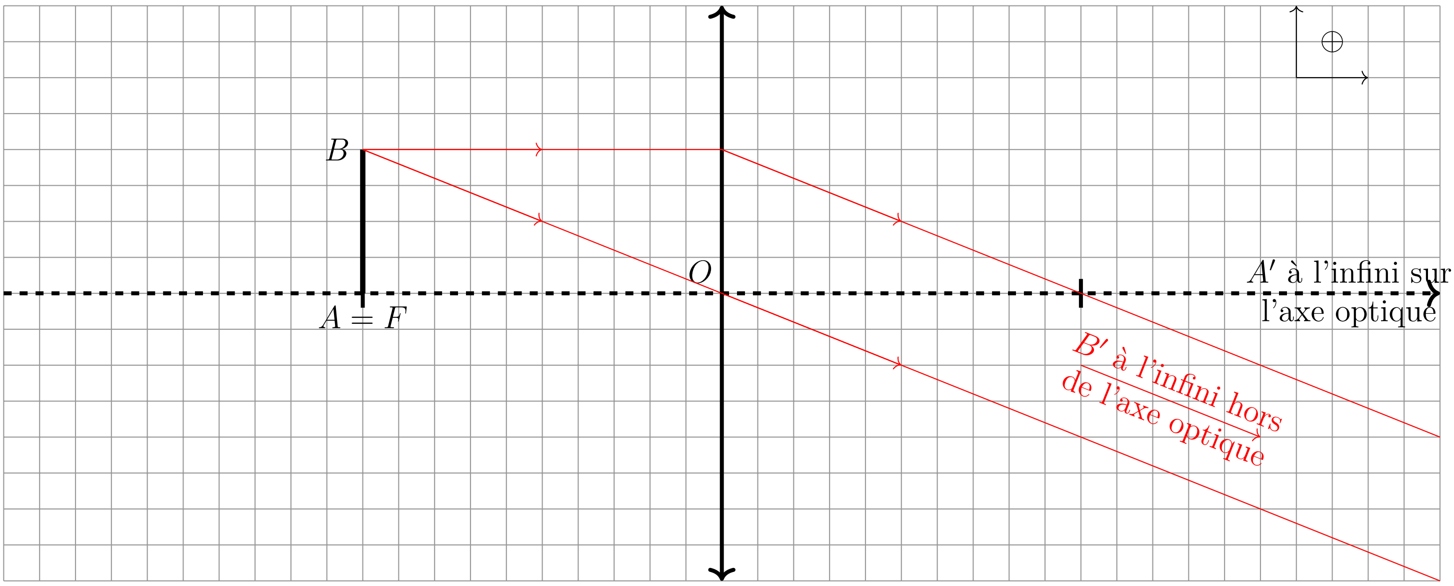
L'image est plus grande que l'objet, donc $|\gamma| > 1$.
L'image est renversée, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} < 0$, donc $\gamma < 0$.
L'objet est réel, donc $\overline{OA} < 0$.
L'image est réelle, donc $\overline{OA'} > 0$.

- Objet réel, tel $\left|\overline{OA}\right| < f'$
  - Le rayon incident passant par B et par O n'est pas dévié.
  - Le rayon incident passant par B et par F ressort parallèlement à l'axe optique.
  - Le rayon incident passant par B et parallèle à l'axe optique ressort en passant par F'.



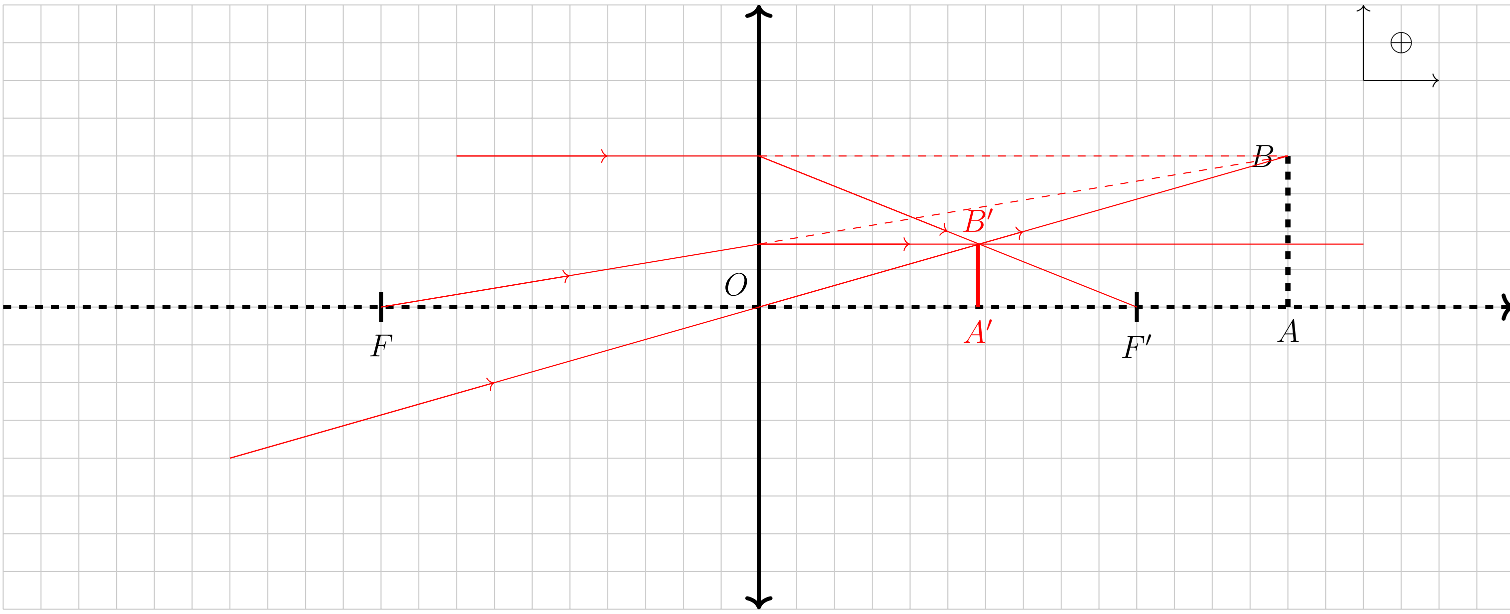
Les 3 rayons émergents divergent et ne se coupent pas. Les prolongements des 3 rayons émergents se coupent en B', l'image est donc virtuelle, donc $\overline{OA'} < 0$.
L'objet est réel, donc $\overline{OA} < 0$.
L'image est plus grande que l'objet, donc $|\gamma| > 1$.
L'image est droite (de même sens que l'objet), $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} > 0$, donc $\gamma > 0$.

- Objet réel dans le plan focal objet



L'image est située à l'infini, avec A' à l'infini sur l'axe optique et B' à l'infini hors de l'axe optique.

- Objet virtuel
  - Le prolongement du rayon incident passant par B et par O n'est pas dévié.
  - Le prolongement du rayon incident passant par B et par F ressort parallèlement à l'axe optique.
  - Le prolongement du rayon incident passant par B et parallèle à l'axe optique ressort en passant par F'.



L'image est plus petite que l'objet, donc $|\gamma| < 1$.
L'image est droite, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} > 0$, donc $\gamma > 0$.
L'objet est virtuel, donc $\overline{OA} > 0$.
L'image est réelle, donc $\overline{OA'} > 0$.

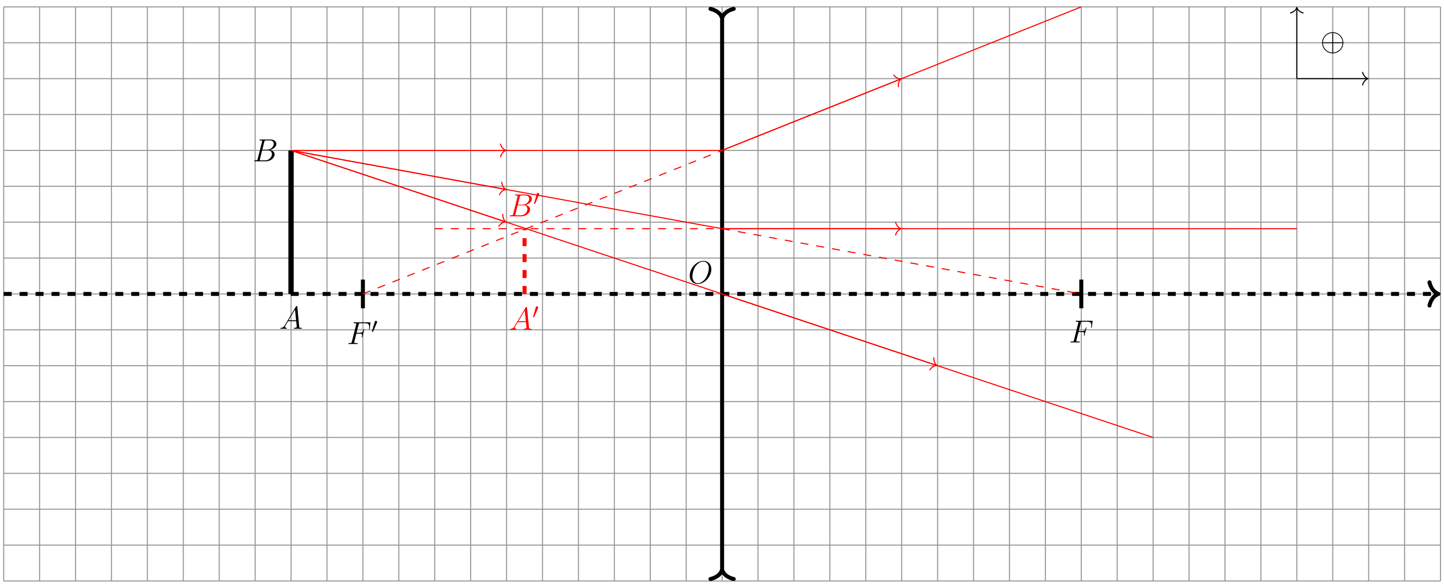
IV.1.c) Cas des lentilles divergentes

■ Objet réel

— Le rayon incident passant par B et par O n'est pas dévié.

— Le rayon incident passant par B et dont le prolongement passe par F ressort parallèlement à l'axe optique.

— Le rayon incident passant par B et parallèle à l'axe optique a son prolongement qui passe par F'.



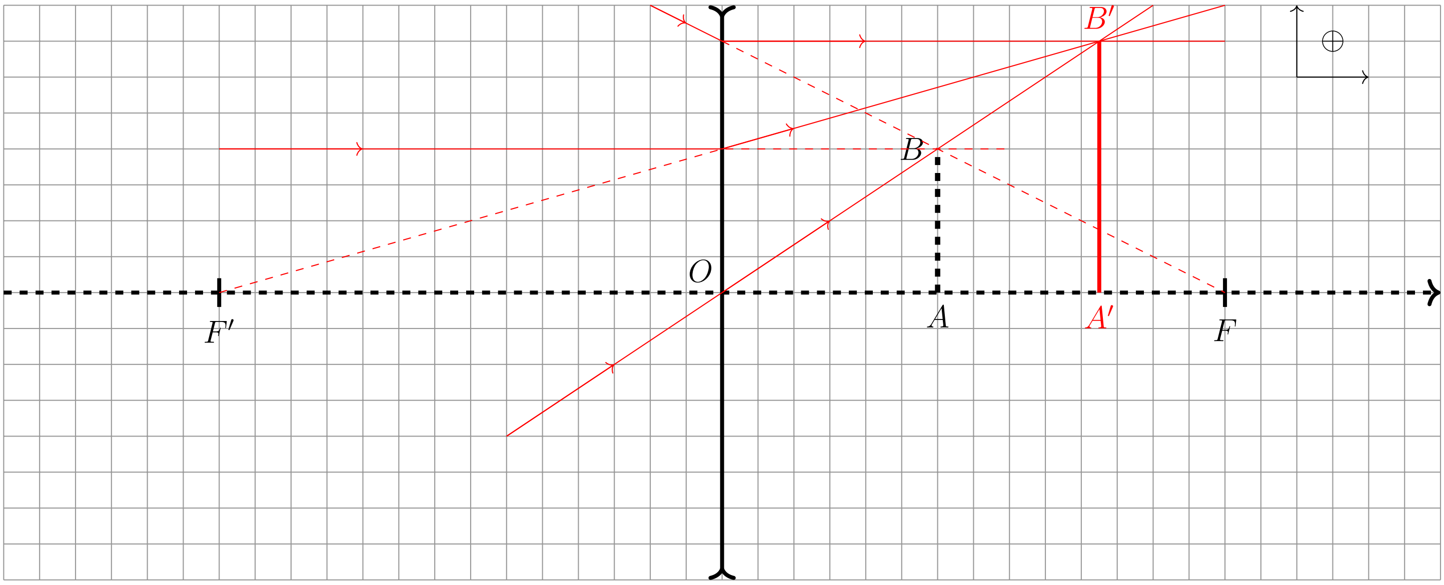
Les 3 rayons émergents ne se coupent pas. Les prolongements des 3 rayons émergents se coupent en B', l'image est donc virtuelle.
L'image est plus petite que l'objet, donc $|\gamma| < 1$.
L'image est droite, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} > 0$, donc $\gamma > 0$.
L'objet est réel, donc $\overline{OA} < 0$.
L'image est virtuelle, donc $\overline{OA'} < 0$.

■ Objet virtuel $\left|\overline{OA}\right| < \left|f'\right|$

— Le rayon incident passant par B et par O n'est pas dévié.

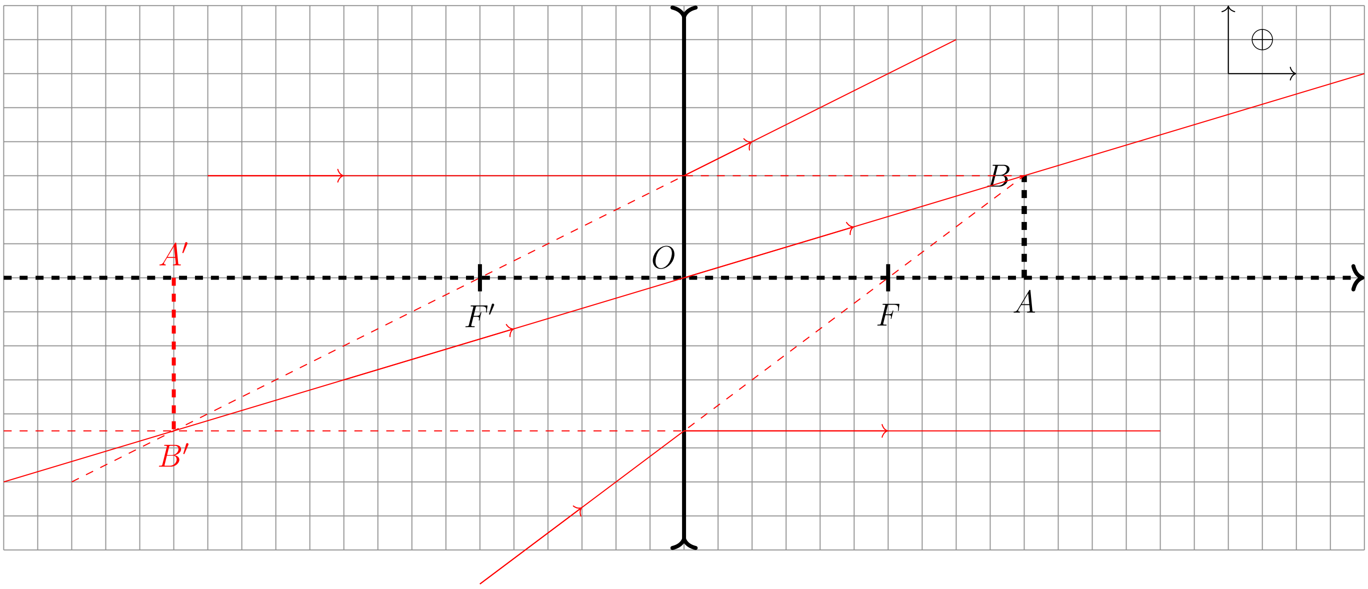
— Le rayon incident dont le prolongement passe par B et par F, ressort parallèlement à l'axe optique.

— Le rayon incident parallèle à l'axe optique et dont le prolongement passe par B ressort en passant par F'.



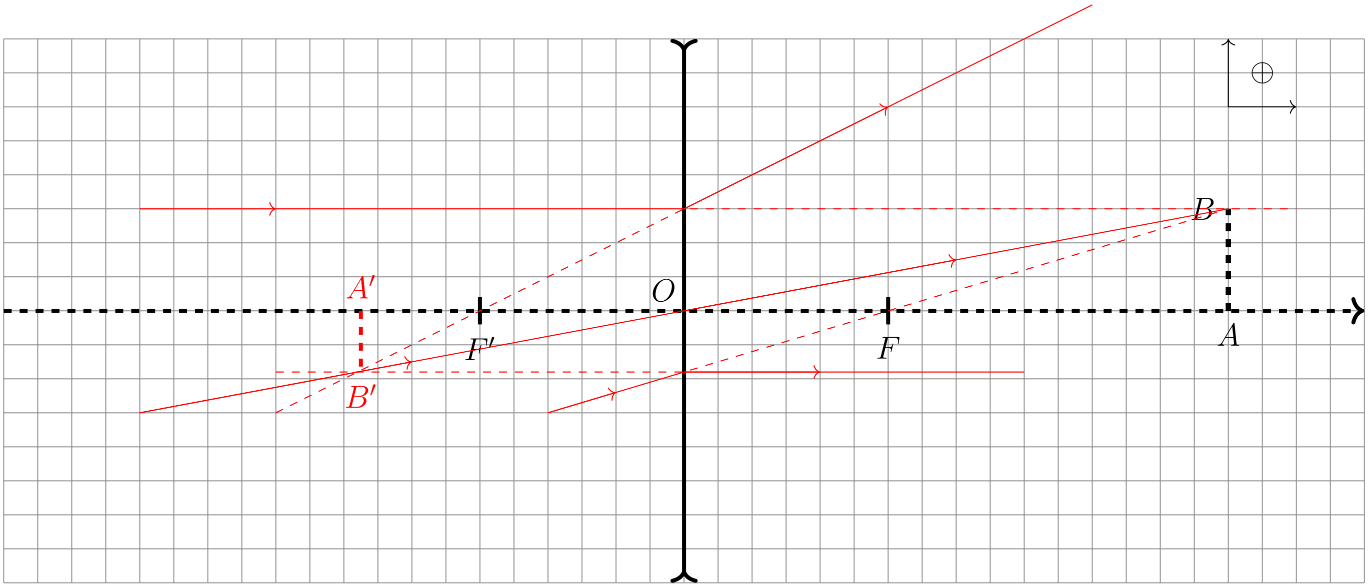
L'image est plus grande que l'objet, donc $|\gamma| > 1$.
L'image est droite, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} > 0$, donc $\gamma > 0$.
L'objet est virtuel, donc $\overline{OA} > 0$.
L'image est réelle, donc $\overline{OA'} > 0$.

■ Objet virtuel $\left|f'\right| < \left|\overline{OA}\right| < 2\left|f'\right|$



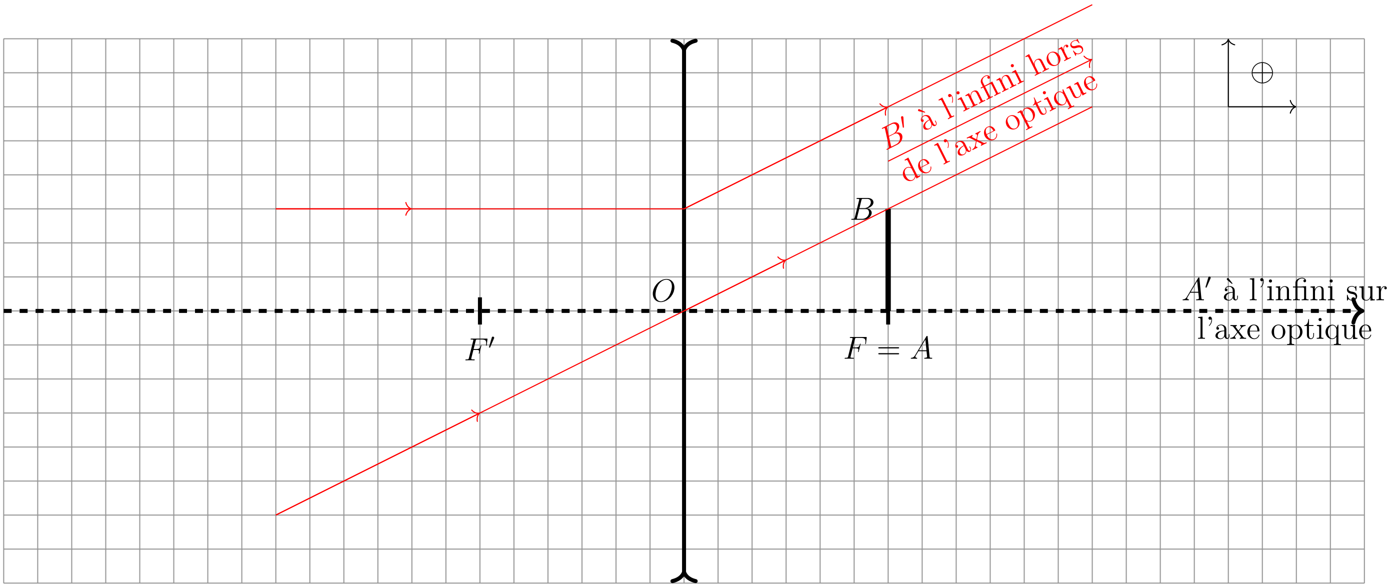
L'image est plus grande que l'objet, donc $|\gamma| > 1$.
L'image est renversée, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} < 0$, donc $\gamma < 0$.
L'objet est virtuel, donc $\overline{OA} > 0$.
L'image est virtuelle, donc $\overline{OA'} < 0$.

■ Objet virtuel $\left|\overline{OA}\right| > 2\left|f'\right|$



L'image est plus petite que l'objet, donc $|\gamma| < 1$.
L'image est renversée, $\overline{AB} > 0$ et $\overline{A'B'} < 0$, donc $\gamma < 0$.
L'objet est virtuel, donc $\overline{OA} > 0$.
L'image est virtuelle, donc $\overline{OA'} < 0$.

■ Objet virtuel dans le plan focal objet



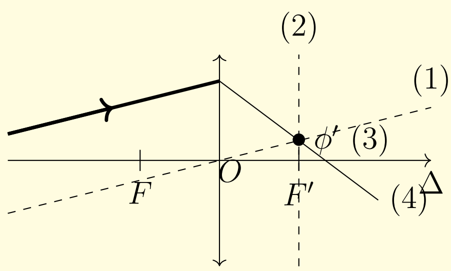
L'image est située à l'infini, avec A' à l'infini sur l'axe optique et B' à l'infini hors de l'axe optique.

IV.2 Construction d'un rayon

Méthode : Construction du cheminement d'un rayon incident quelconque

Si on a un rayon incident dont on souhaite tracer le rayon émergent :

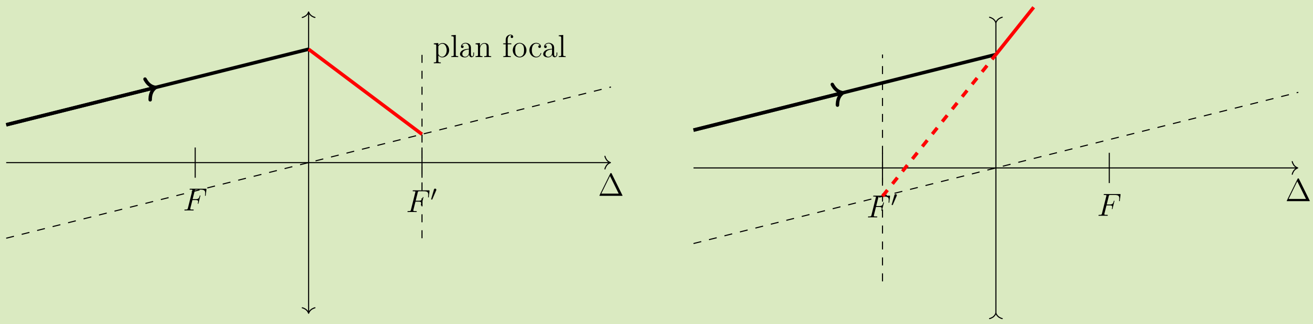
1. Tracer un rayon auxiliaire, en pointillés, parallèle au rayon incident inconnu, passant par O. Ce rayon auxiliaire n'est pas dévié.
2. Tracer en pointillés le plan focal image (plan transverse passant par F').
3. Repérer l'intersection entre le rayon auxiliaire et le plan focal image, ce point est un foyer image secondaire ϕ'.
4. Le rayon incident inconnu et le rayon auxiliaire étant parallèle entre eux ils se croisent dans le plan focal image : au point ϕ' repéré précédemment.
   Il reste à tracer le rayon émergent issu du rayon incident passant par ce point ϕ'.



Exercice à maîtriser n°4 –

Tracer les rayons émergents correspondant aux rayons incidents.

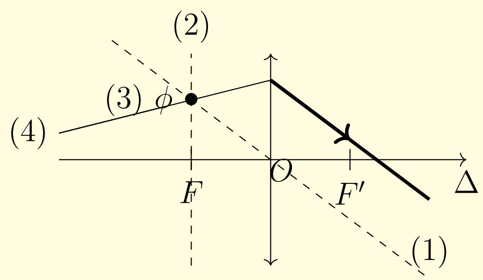
Solution:



Méthode : Construction du cheminement d'un rayon émergent quelconque

Si on a un rayon émergent dont on souhaite tracer le rayon incident qui lui a donné naissance :

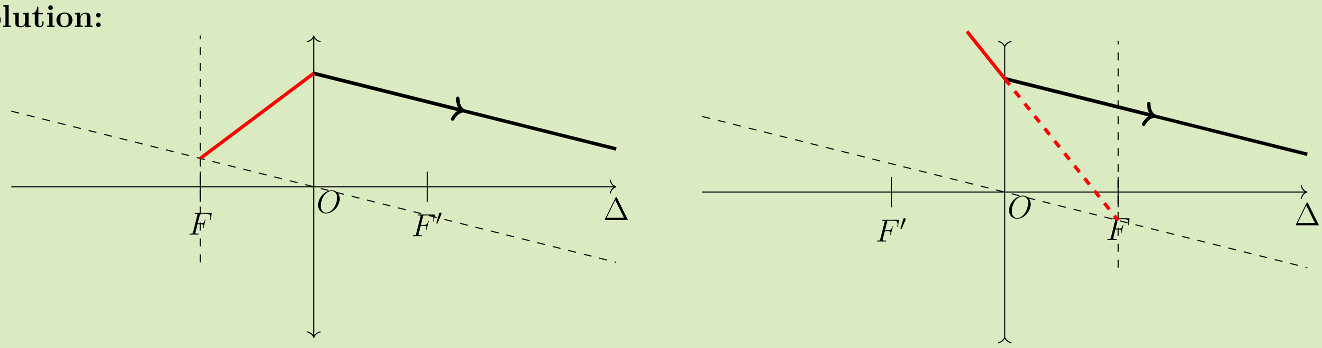
1. Tracer un rayon auxiliaire, en pointillés, parallèle au rayon émergent inconnu, passant par O. Ce rayon auxiliaire n'est pas dévié.
2. Tracer en pointillés le plan focal objet (plan transverse passant par F).
3. Repérer l'intersection entre le rayon auxiliaire et le plan focal objet, ce point est un foyer objet secondaire ϕ.
4. Le rayon émergent inconnu et le rayon auxiliaire émergent de la lentille parallèlement, donc ils proviennent d'un même plan focal objet : le foyer secondaire objet ϕ.
   Il reste à tracer le rayon incident passant par ce point objet ϕ qui donne le rayon émergent.



Exercice à maîtriser n°5 –

Tracer les rayons incidents correspondant aux rayons émergents.

Solution:



V Détermination par le calcul des caractéristiques des objets et images

V.1 Relations de conjugaison et de grandissement transversal

<u>Capacités exigibles :</u> **Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal de Descartes et de Newton).**

Définition : Grandissement transversal

Le <u>**grandissement transversal**</u> est le rapport algébrique de la taille de l'image $\overline{A'B'}$ à celle de l'objet $\overline{AB}$, celui-ci étant orthogonal à l'axe optique : $\boxed{\gamma = \dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}}$

C'est une grandeur algébrique (positive ou négative) sans dimension.

Activité n°6 —

R1. Que peut-on dire sur l'objet et l'image si $\gamma > 0$? si $\gamma < 0$?

Solution:
Si $\gamma > 0$, alors $\overline{AB}$ et $\overline{A'B'}$ sont de même signe, l'objet et l'image sont donc de même sens.
Si $\gamma < 0$, alors $\overline{AB}$ et $\overline{A'B'}$ sont de signes opposés, l'objet et l'image sont donc de sens opposés.

R2. Que peut-on dire sur l'objet et l'image si $|\gamma| > 1$? si $|\gamma| < 1$?

Solution: Si $|\gamma| > 1$, alors $|\overline{A'B'}| > |\overline{AB}|$, donc l'image est plus grande que l'objet.
Si $|\gamma| < 1$, alors $|\overline{A'B'}| < |\overline{AB}|$, donc l'image est plus petite que l'objet.

R3. Préciser pour chaque tracé effectué précédemment le signe de γ, et la comparaison de $|\gamma|$ à 1.

À retenir : Formules de conjugaison et de grandissement transversal

Pour un objet AB transverse avec A situé sur l'axe optique conjugué avec l'image $A'B'$ par une lentille mince de centre optique O, de foyer principal objet F, de foyer principal image F' et de distance focale f' : $A \xrightarrow{\mathscr{L}(O,f')} A'$

Relations	… de conjugaison	… de grandissement
… avec origine au centre (de Descartes)	$\dfrac{1}{\overline{OA'}} - \dfrac{1}{\overline{OA}} = \dfrac{1}{f'}$	$\gamma = \dfrac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$
… avec origine aux foyers (de Newton)	$\overline{F'A'} \times \overline{FA} = -f'^2$	$\gamma = \dfrac{\overline{F'A'}}{-f'} = \dfrac{f'}{\overline{FA}}$

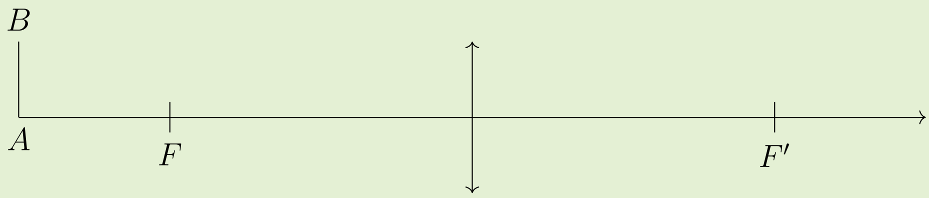
Attention — Erreur à ne pas commettre

Toutes les grandeurs qui interviennent dans les relations de conjugaison sont des **grandeurs algébriques**.
L'**orientation choisie le long de l'axe optique est celle de la lumière incidente**.
Ainsi, il faut traduire « on photographie un objet à une distance de 5 m » par $\overline{OA} = -5$ m.

Activité n°7 — Applications des relations de conjugaison et de grandissement

R1. Un objet AB de 0,5 cm est placé 30 cm avant une lentille convergente de distance focale 20 cm, perpendiculairement à son axe. Déterminer la position, la nature et la taille de l'image.

Solution: Commencer par faire un schéma en plaçant (grossièrement) les différents éléments, et les distances mises en jeu.



ATTENTION : $\overline{OA} = -30$ cm < 0 (car A situé avant la lentille)

Relation de conjugaison de Descartes : $\dfrac{1}{\overline{OA'}} - \dfrac{1}{\overline{OA}} = \dfrac{1}{f'} \Leftrightarrow \dfrac{1}{\overline{OA'}} = \dfrac{1}{\overline{OA}} + \dfrac{1}{f'} \Leftrightarrow \dfrac{1}{\overline{OA'}} = \dfrac{f' + \overline{OA}}{f' \times \overline{OA}}$

Ainsi : $\boxed{\overline{OA'} = \dfrac{f' \times \overline{OA}}{f' + \overline{OA}}}$

A.N. : $\underline{\overline{OA'} = \dfrac{20 \times -30}{20 - 30} = 60 \text{ cm}} > 0$: l'image est donc réelle car située après la lentille.

Grandissement : $\gamma = \dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \dfrac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$, ainsi $\boxed{\overline{A'B'} = \overline{AB} \times \dfrac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}}$

A.N. : $\underline{\overline{A'B'} = 0,5 \times \dfrac{60}{-30} = -1,0 \text{ cm} < 0}$: l'image est renversée par rapport à l'objet.

R2. Une lentille divergente de distance focale -3 cm donne d'un objet une image droite trois fois plus grande. Déterminer, <u>efficacement</u> la position de l'objet. Est-il réel ou virtuel ?
En déduire la position de l'image. Est-elle réelle ou virtuelle ?

Solution: $f' = -3$ cm et $\gamma = 3$.

D'après la relation de grandissement de Newton : $\gamma = \dfrac{f'}{\overline{FA}}$, soit $\overline{FA} = \dfrac{f'}{\gamma} = -1$ cm : l'objet est situé entre O et F, et est donc virtuel.

D'après la relation de conjugaison de Newton $\overline{F'A'} \times \overline{FA} = -f'^2$, $\overline{F'A'} = \dfrac{-f'^2}{\overline{FA}} = 9$ cm elle est donc située au-delà de O, l'image est réelle.

V.2 Projection de l'image d'un objet réel

<u>Capacités exigibles :</u> **Établir et connaître la condition $D \geq 4f'$ pour former l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente.**

On cherche à projeter l'image d'un objet éclairé sur un écran, que l'on souhaite agrandie, lumineuse et nette sur l'écran, les positions de l'objet et de l'écran sont souvent fixées et donc la distance D entre les deux.

Méthode : Établir la condition $D \geq 4f'$ pour la réalisation d'une projection

On souhaite déterminer une condition sur la distance D qui sépare un objet et l'écran sur lequel on souhaite projeter l'image de cet objet à l'aide d'une lentille convergente de distance focale f'.

1. Faire un schéma de la situation et poser $D = \overline{AA'}$.
2. Appliquer la relation de conjugaison de Descartes.
3. Exprimer $\overline{OA'}$ en fonction de $\overline{OA}$ et D : $\overline{OA'} = \overline{OA} + D$.
4. Travailler l'équation précédente pour obtenir une équation du deuxième degré vérifiée par $\overline{OA}$:

$$\overline{OA}^2 + D\overline{OA} + Df' = 0$$

5. En exploitant le fait que discriminant de l'équation précédente doit être positif pour obtenir des solutions réelles, obtenir la condition reliant D et f' pour réaliser une projection.

Animation : Méthode de Bessel - Condition $D > 4f'$

Démonstration à maîtriser n°8 – Condition $D \geq 4f'$ pour réaliser une projection

R1. Lors d'une projection, quelles sont les natures (réelle/virtuelle) de l'objet et de l'image ?

Solution: Lors d'une projection, l'objet et l'image sont réels.

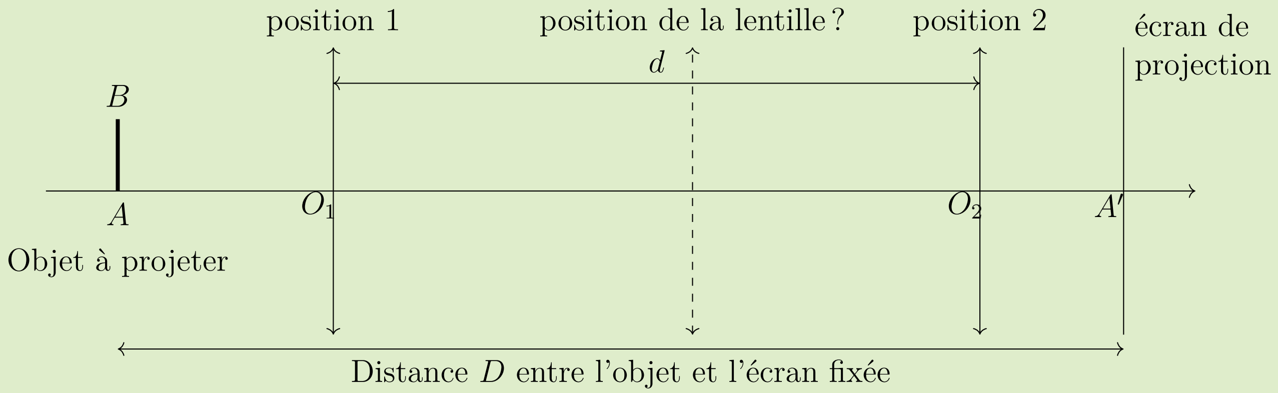
R2. Quel type de lentille permet la réalisation d'une projection ?

Solution: La lentille à utiliser est une lentille convergente, la lentille divergente donnant d'un objet réel nécessairement une image virtuelle.

En effet d'après la relation de conjugaison de Descartes $\dfrac{1}{\overline{OA'}} - \dfrac{1}{\overline{OA}} = \dfrac{1}{f'}$. Un objet réel est tel que $\overline{OA} < 0$, et une image réelle telle que $\overline{OA'} > 0$, alors f' est nécessairement positive.

R3. En suivant la méthode ci-dessus, montrer qu'une projection peut être réalisée que si a distance D séparant l'objet et l'écran est supérieure à une certaine distance dépendant de la distance focale.

Solution:



D'après la relation de conjugaison de Descartes : $\dfrac{1}{\overline{OA'}} - \dfrac{1}{\overline{OA}} = \dfrac{1}{f'}$

Or $D = \overline{AA'} = \overline{AO} + \overline{OA'} = \overline{OA'} - \overline{OA}$, soit $\overline{OA'} = \overline{OA} + D$

En injectant dans la relation de conjugaison :

$$\frac{1}{\overline{OA}+D} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \Leftrightarrow \frac{\overline{OA} - (\overline{OA}+D)}{\overline{OA} \times (\overline{OA}+D)} = \frac{1}{f'}$$

Soit $-Df' = \overline{OA} \times (\overline{OA}+D) \Leftrightarrow \boxed{\overline{OA}^2 + D\overline{OA} + Df' = 0}$ qui est une équation du deuxième degré qui possède 2 racines réelles si le discriminant est strictement positif, 1 racine double si le discriminant est nul, aucune racine sinon.

Pour utiliser la lentille pour réaliser une projection, il faut qu'il existe au moins une solution réelle : $\Delta \geq 0 \Leftrightarrow D^2 - 4Df' \geq 0 \Leftrightarrow \boxed{D \geq 4f'}$

À retenir : Condition sur la distance objet-écran pour la projection

Pour réaliser la projection d'un objet sur un écran à l'aide d'une lentille convergente de distance focale

f', il faut placer l'écran à une distance D de l'objet quatre fois supérieure à la distance focale :

$$D \geq 4f'$$

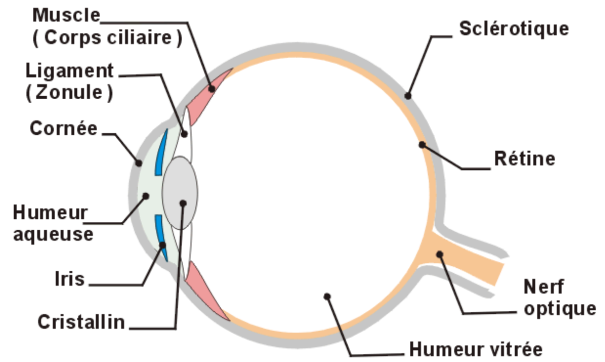
Attention – Erreur à ne pas commettre
Cette relation ne fait que donner la distance minimale qui doit séparer un objet d'un écran pour pouvoir réaliser la projection de l'objet sur l'écran avec une lentille convergente donnée, elle ne sert à rien d'autre !

VI Exemples d'instrument d'optique

VI.1 L'œil

VI.1.a) Modélisation

<u>Capacités exigibles :</u> Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur fixe.

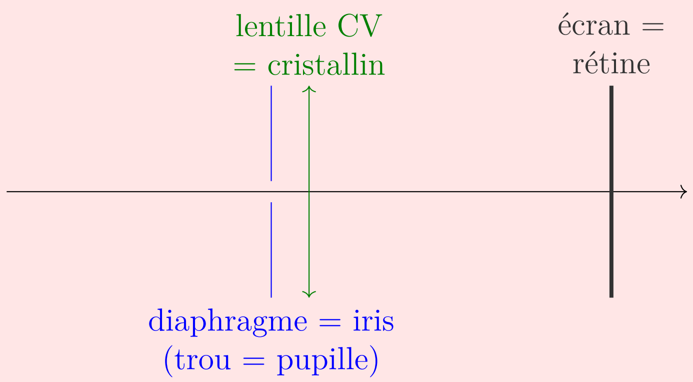


L'œil possède une forme environ sphérique de rayon environ 15 mm.

<u>Éléments principaux de l'œil :</u>

- L'iris (partie colorée) est percé de la **pupille** dont le diamètre est variable (entre 2 mm et 8 mm) et qui joue le rôle de **diaphragme** en limitant l'intensité lumineuse pénétrant dans l'œil (la taille de la pupille s'adapte à la luminosité de l'objet observé).
- Le **cristallin** est un muscle, qui, avec la cornée, est assimilable à une **lentille mince** biconvexe dont la distance focale est variable selon sa contraction (la vergence est de l'ordre de $+20\ \delta$). Il donne d'un objet une image renversée sur la rétine.
- La **rétine** est constituée de cellules sensibles à la lumière (les cônes et les bâtonnets). Elle joue le rôle d'un **écran**.
- Le corps vitreux (ou humeur vitreuse) est une substance gélatineuse d'indice de réfraction $1,336$.
- L'ensemble {rétine-nerf optique} code l'image sous la forme d'influx nerveux et l'envoie au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique. Le cerveau interprète le message (retournement de l'image, correction de la distorsion, vision relief).

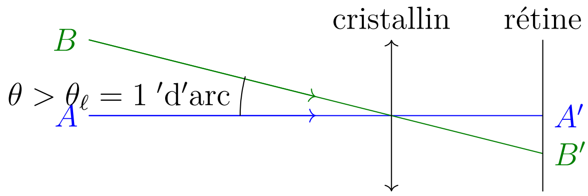
À retenir : Modélisation optique de l'œil



VI.1.b) Limite de résolution angulaire

<u>Capacités exigibles :</u> Connaître l'ordre de grandeur de la limite de résolution angulaire.

Deux points objet A et B sont vus distinctement si A' et B', leurs images par le cristallin se forment sur deux cellules de la rétine différentes.



Il faut que $A'B'$ soit supérieur à la taille d'une cellule de la rétine. Pour cela il faut que l'angle entre les rayons arrivant dans l'œil soit suffisamment grand (la taille de l'œil est fixée).

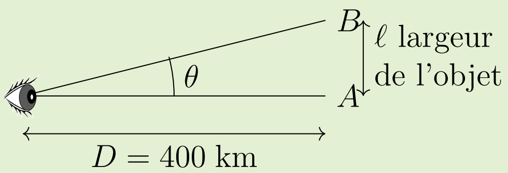
À retenir : limite de résolution angulaire

On appelle **pouvoir séparateur angulaire de l'œil** l'angle limite sous lequel deux points lumineux peuvent être vus séparés. Il est **de l'ordre de 1' d'arc soit** $(1/60)\,°$ **environ** 3×10^{-4} **radian** dans de bonnes conditions d'éclairement (ni trop sombre, ni trop lumineux).

Activité n°9 — Depuis l'ISS

Quelle est la taille du plus petit objet distingable par un.e astronaute à bord de l'ISS (située à environ 400 km de la terre) ?

Solution:



$\tan(\theta) = \dfrac{\ell}{D}$

L'objet est distingué si $\theta > \theta_\ell = 1\,'$, soit $\boxed{\ell > D\tan(\theta)}$

Avec $\theta = \dfrac{1}{60} \times \dfrac{\pi}{180}$ rad $\ll 1$ rad

Ainsi $\ell > D\theta = 116$ m

VI.1.c) Plage d'accommodation

Capacités exigibles : Connaître l'ordre de grandeur de la plage d'accommodation.

Animation sur la vision

À retenir : plage d'accommodation

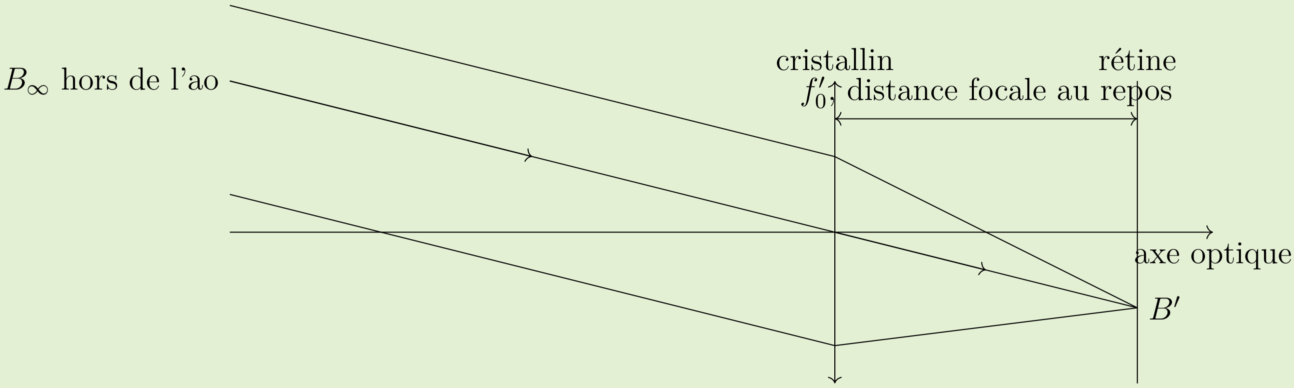
- L'œil ne peut voir un objet net que si son image se forme sur la rétine.
- Un **œil au repos** voit net à une distance maximale, notée D_m correspondant au **punctum remotum** (**PR**).

  Un œil emmétrope (« normal ») voit net sans accommoder à l'infini, son PR se trouve donc à l'infini.
- Pour voir des objets plus proches, l'**œil doit accommoder** : le cristallin se bombe, grâce aux muscles ciliaires, afin de diminuer sa distance focale (il augmente sa vergence). Le plan de mise au point s'avance.
- Le point le plus proche que l'œil peut voir net est le **punctum proximum** (**PP**). Le PP correspond à la distance minimale de vision distincte (notée d_m). Il vaut en moyenne 25 cm et tend à s'éloigner avec l'âge (presbytie).

Activité n°10 — Plage d'accommodation

R1. Faire un schéma rendant compte de la vision d'un objet situé au punctum remotum d'un œil emmétrope.

Solution: L'image d'un objet observé nettement se forme sur la rétine, c'est-à-dire les rayons émergents après traversée du cristallin se croisent sur la rétine.



L'image de l'objet situé à l'infini (c'est-à-dire à distance très grande devant la taille de l'œil, à la distance focale du cristallin) se forme dans le plan focal image, donc la distance entre le cristallin et la rétine est égale à la distance focale du cristallin au repos.

R2. Pour que l'objet soit toujours vu net, où doit se former l'image de l'objet par le cristallin ? Dans l'œil, qu'est-ce qui ne varie pas ? Qu'est-ce qui varie pour permettre la vision nette ?

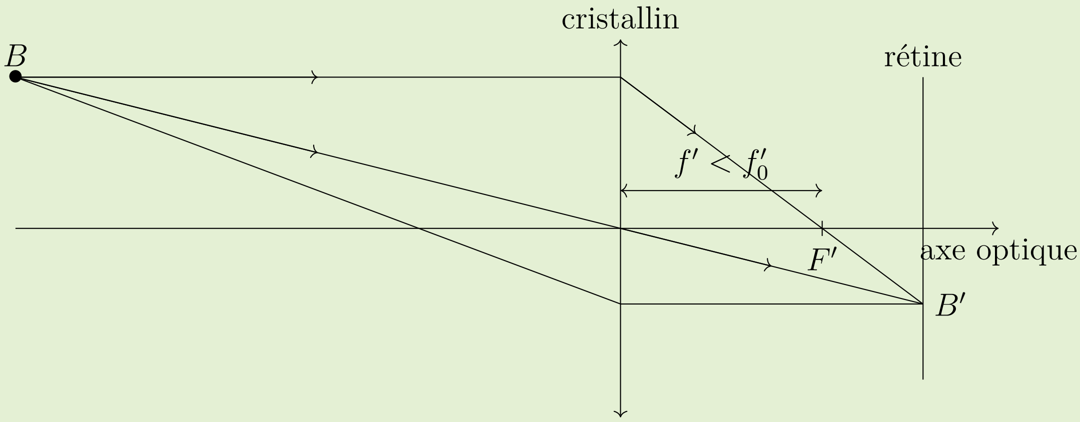
Solution: Pour que l'objet soit toujours vu net, il faut que son image par le cristallin se forme sur la rétine, c'est-à-dire que les rayons émergents se croisent sur le cristallin.

La taille de l'œil ne varie pas, c'est-à-dire la distance entre le cristallin et la rétine est constante.

Lorsque l'objet se rapproche, pour qu'il soit vu net, il est nécessaire que la distance focale du cristallin varie.

R3. Faire un schéma rendant compte de la vision d'un objet situé entre le punctum remotum et le punctum proximum. Comment évolue la distance focale du cristallin ?

Solution: Considérons un objet entre le punctum proximum et le punctum remotum, c'est-à-dire pas à l'infini mais tout de même observable.



On peut, grâce au tracé de rayon, déterminer la position des foyers principaux de la lentille (cristallin), et constater que la distance focale est plus faible ici que dans le cas de l'observation d'un objet très éloigné.

VI.2 Appareil photographique

VI.2.a) Modélisation

<u>Capacités exigibles :</u> **Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur.**

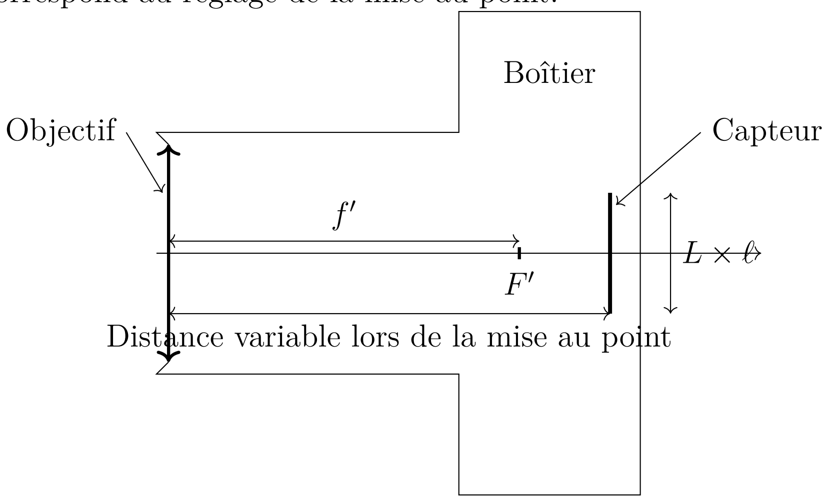
L'appareil photographique est un instrument d'optique complexe comprenant plusieurs lentilles, miroirs et diaphragmes. Les deux éléments essentiels d'un appareil sont l'objectif et le capteur photosensible. Cependant, on peut comprendre les grands principes de la photographie (en tant que technique) à l'aide de la modélisation simplificatrice de la figure ci-dessous qui en permet une description dans le cadre de l'optique géométrique :

- L'objectif d'un appareil photographique est constitué de plusieurs lentilles et diaphragmes : nous le modélisons comme l'association d'un unique diaphragme circulaire et d'une unique lentille mince convergente.

  L'objectif est caractérisé par sa focale (c'est-à-dire distance focale) f' et par le diamètre d'ouverture du diaphragme D
- Dans les appareils numériques, le capteur lumineux CCD (charge coupled device) est une matrice de cellules photosensibles : les pixels (picture element). Il est caractérisé par la taille des pixels, le grain noté g (en référence aux anciens appareils argentiques) et sa dimension $L \times \ell$ en pixels.

  C'est le capteur numérique qui « capte » la lumière lorsque la photo est prise et transforme la lumière en signal électrique.

L'ensemble du dispositif ainsi schématisé admet un axe de révolution, il s'agit donc un système centré. La distance entre l'objectif et le capteur peut varier, entre f' et $f' + \delta$, avec δ ce qu'on appelle le tirage de l'appareil photographique. Le réglage de d correspond au réglage de la mise au point.



VI.2.b) Profondeur de champ

<u>**Capacités exigibles :**</u> **Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné.**

Pour réaliser une image nette d'un objet situé à une certaine distance de l'objectif, il faut réaliser la mise au point. Avec le modèle du paragraphe précédent, cette opération revient à jouer sur la distance d entre le capteur et la lentille de l'objectif de sorte que l'image de l'objet soit située sur le capteur.

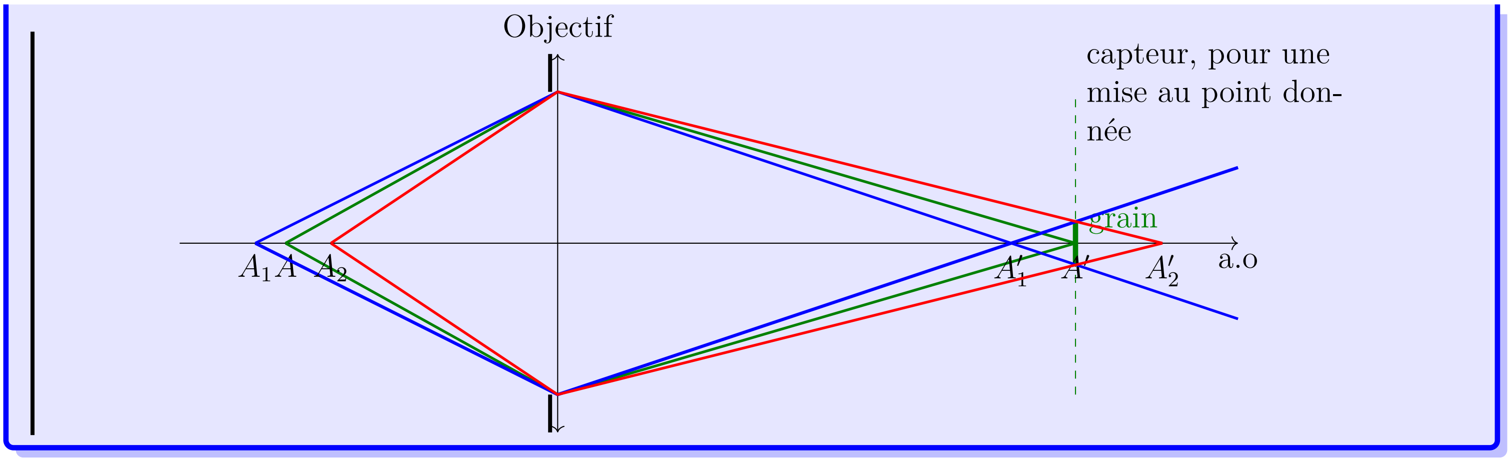
Or le capteur n'est pas ponctuel, mais est constitué de pixels ayant une certaine extension spatiale (le grain g). Tant que l'image d'un point objet sur le capteur sera d'une taille inférieure au grain, si l'exposition est suffisante, tout se passera comme si l'image était ponctuelle. Le capteur ne fait pas de différence entre les deux situations et donnera une image nette. Ainsi, pour une mise au point donnée, on définit la profondeur de champ comme la zone de l'espace dans laquelle tout objet photographié sera net.

Définition : Profondeur de champ

On appelle <u>**profondeur de champ (PDC)**</u> la distance entre les deux points objet extrêmes de l'axe optique dont les images sont vues nettement sur le capteur de l'appareil photo, pour une mise au point donnée.

Sur le schéma ci-dessous, la mise au point est effectué sur A : le capteur est placé au niveau de A', image de A par l'objectif.

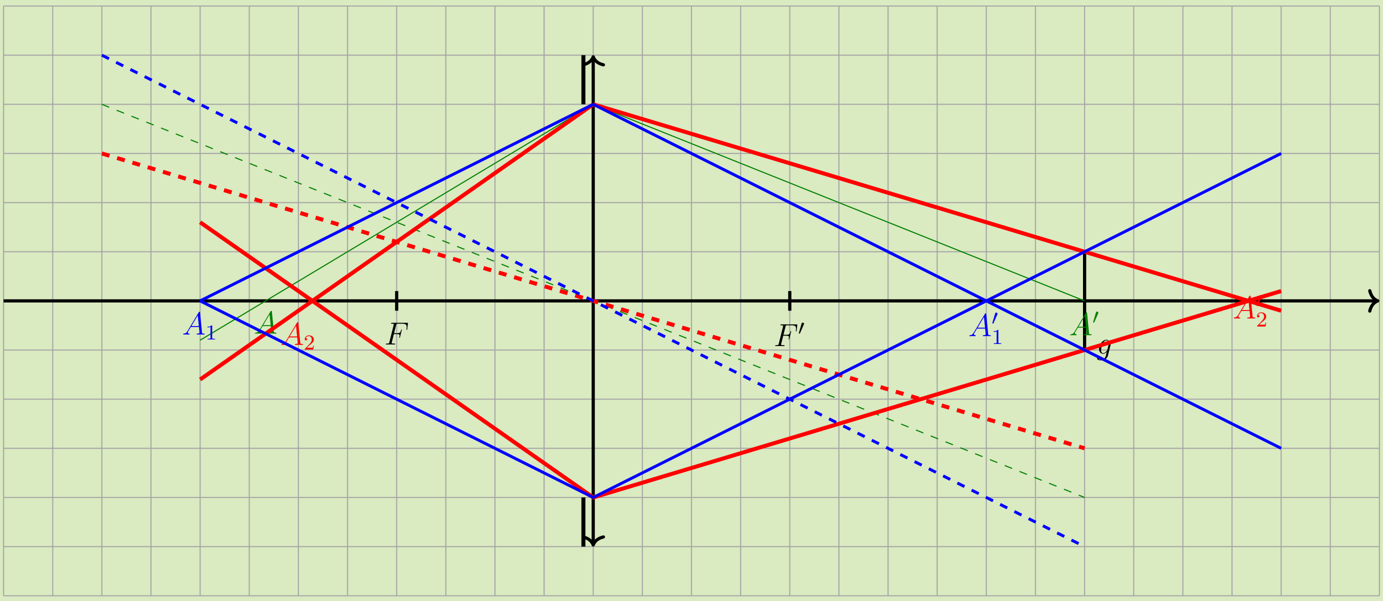
Les objets situés entre A_1 et A_2 sont nets, aux autres positions l'objet est flou, la profondeur de champ est la distance A_1A_2.



Exercice à maîtriser n°11 – Construction géométrique de la PDC

On souhaite déterminer graphiquement la profondeur de champ dans le cas où l'appareil photo est réglé pour photographier nettement le point A. On considère un capteur placé dans le plan de A', et un pixel de hauteur g centré sur l'axe optique.

R1. Déterminer la position du point objet A conjugué du point image A' situé sur la cellule du capteur et l'axe optique.



R2. Déterminer les positions des deux points image extrêmes, A'_1 et A'_2 qui apparaîtront nets sur l'écran.

R3. Déterminer les positions des deux points objets A_1 et A_2 conjugués par la lentille avec A'_1 et A'_2.

R4. Identifier la profondeur de champ.

VI.3 Autres instruments d'optique (cf TD/DM)

VI.3.a) Lunettes astronomiques et de Galilée

Pour observer des objets situés loin, on utilise divers instruments d'optique :

- les **lunettes** sont constituées de **deux systèmes optiques transparents complexes** que nous pouvons modéliser par deux lentilles minces.
  - Le premier système optique traversé par la lumière, situé du **côté de l'objet**, est appelé **objectif**. Il est modélisé par une lentille convergente nécessairement.
  - Le deuxième système optique traversé par la lumière, situé du **côté de l'œil**, est appelé **oculaire**.
    - On parle de lunette astronomique, si l'oculaire est convergent.
    - On parle de lunette de Galilée, si l'oculaire est divergent.

- L'observation doit se faire sans fatigue, donc l'image finale doit être rejetée à l'infini. Pour cela, il faut que, quelque soit la nature de l'oculaire :

$$\text{objet à l' } \infty \xrightarrow{\mathscr{L}_1} \text{ plan focal image de } \mathscr{L}_1 \quad \text{et} \quad \text{plan focal objet de } \mathscr{L}_2 \xrightarrow{\mathscr{L}_2} \text{ image à l' } \infty$$

$$A_{\infty \text{ sur l'axe optique}} \xrightarrow{\mathscr{L}_1} A_1 = F_1' \quad \text{et} \quad A_1 = F_2 \xrightarrow{\mathscr{L}_2} A'_{\infty \text{ sur l'axe optique}}$$

$$\boxed{F_1' = F_2}$$

  On parle de système afocal : il donne l'image d'un objet à l'infini une image à l'infini.

- On caractérise les lunettes par le **grossissement** ($\neq$ grandissement) défini par $G = \dfrac{\alpha'}{\alpha}$, où α est l'angle sous lequel on voit l'objet à l'œil nu (sans lunette), et α' est l'angle sous lequel on voit l'image à travers la lunette.
- les télescopes dont le deuxième système optique est un miroir sphérique. Le premier peut être une lentille, un miroir plan ou un miroir sphérique. Nous n'étudierons pas ces systèmes cette année car miroirs sphériques ne sont pas au programme.

VI.3.b) Microscope

Pour observer des objets très petits, on utilise un microscope constitué de deux systèmes optiques transparents complexes qui peuvent être modélisés par deux lentilles minces convergentes.

L'objectif est une lentille convergente de petite distance focale.

Ce n'est pas un système afocal : il doit donner d'un objet situé à distance finie une image à l'infini. L'image intermédiaire doit se former dans le plan focal objet de l'oculaire, mais qui n'est pas confondu avec le plan focal image de l'objectif.

On caractérise les microscope par le **grossissement** ($\neq$ grandissement) défini par $G = \dfrac{\alpha'}{\alpha}$, où α est l'angle sous lequel on voit l'objet à l'œil nu situé au punctum proximum (souvent pris par convention à 25 cm), et α' est l'angle sous lequel on voit l'image à travers le microscope.

La course aux lunettes

Pendant la guerre de Sept Ans, un Anglais, John Dollond, met au point une lunette astronomique d'une qualité jamais atteinte. L'apprenant, Clairaut et D'Alembert se jettent dans la théorie pour percer son secret.

par Fabrice Ferlin

En 1764 paraît le troisième volume des *Opuscules mathématiques* de D'Alembert, un gros ouvrage de 450 pages. Or, si les volumes, antérieurs et postérieurs, de cette série sont consacrés chacun à une multitude de sujets mathématiques et physiques, celui-ci ne traite que d'un seul thème : la théorie des aberrations optiques dans les lunettes astronomiques. En outre, les mémoires sont enchaînés de telle manière que l'on a, comme D'Alembert le dit lui-même, un traité continu sur la question. On peut même dire que c'est la seule œuvre scientifique de longue haleine de sa « vieillesse »… Et ceci alors qu'il n'a pratiquement jamais abordé l'optique. Notons que d'autres mémoires suivront, les publications de notre auteur sur ce sujet représentant au total plus de 900 pages imprimées. Par ailleurs, tout cet immense travail est complètement oublié aujourd'hui : qui irait citer D'Alembert pour ses recherches en optique ?

Alors, pourquoi cet intérêt soudain pour cette branche de la physique ? Et pourquoi cette partie considérable (du moins en volume) des publications de notre auteur est-elle « passée à la trappe » ?

La réponse à la première question est liée à la venue d'un Suédois en France. En 1760, Bengt Ferner, de l'Université d'Uppsala, arrive à Paris après un long passage par l'Angleterre, apportant des informations surprenantes pour les scientifiques français : un nouveau type de lunettes astronomiques, les lunettes achromatiques, est apparu en Angleterre. Immédiatement, Clairaut, le grand concurrent de D'Alembert, se passionne pour la question. Pourquoi cet engouement pour ce qui peut paraître une amélioration technique mineure ?

Les premières lunettes astronomiques avaient été tournées vers le ciel par Galilée, à la charnière des années 1609 et 1610. Or, pendant 150 ans, ces instruments (mais aussi les microscopes) furent affectés d'aberrations chromatiques très gênantes, dues à l'inégale réfrangibilité de la lumière *(voir la figure page 85)* : les rayons de différentes couleurs (ou longueurs d'onde, dirions-nous aujourd'hui) n'étaient pas réfractés de la même manière, ce qui entraînait une importante irisation des images et, surtout, une limitation drastique de la puissance de ces instruments. Il existe aussi, nous le verrons, un autre type d'aberrations, en

www.hms-vengeance.co.uk/hms.htm

www.sil.edu

général moins gênant, les aberrations géométriques, dues pour l'essentiel à la forme des objectifs.

Les performances médiocres des instruments incitèrent Newton à construire un télescope à miroir dépourvu, comme tout télescope à miroir, des aberrations chromatiques. Toutefois la qualité des miroirs de l'époque et la nécessité de les réargenter régulièrement diminuaient considérablement l'intérêt de cette solution. Surtout, Newton, à la suite de ses expériences sur la décomposition de la lumière, avait affirmé, de manière erronée, l'impossibilité de supprimer les aberrations chromatiques pour les lunettes. Étant donné la grande réputation du savant anglais, cette affirmation ne fut pas remise en cause jusque vers le milieu du XVIII^e siècle et bloqua notablement les progrès dans les performances optiques des lunettes.

Or, en 1748, Euler lit un mémoire devant l'Académie de Berlin, dans lequel il combat l'opinion de Newton. Il donne aussi une théorie permettant, selon lui, de corriger les aberrations chromatiques pour une lunette avec un objectif constitué de verre et d'eau. Ce rebondissement entraîne, dans les années 1750, une polémique avec le fabricant anglais d'instruments d'optique John Dollond (1706-1761), défenseur de l'orthodoxie newtonienne, et la parution d'un mémoire du mathématicien suédois Samuel Klingenstierna, dans lequel est montrée l'erreur de Newton.

En 1758 apparaissent sur le marché londonien les premières lunettes corrigées, fabriquées par ce

achromatiques

National Library of Sweden / photo Jens Gustafsson

dernier. Telle est la nouvelle que Ferner apporte aux savants français. On est en pleine guerre de Sept Ans (1756-1763). La France et la Grande-Bretagne sont dans deux camps opposés, et presque toute communication, en particulier scientifique, est coupée entre les deux pays : en France, on ne sait rien des travaux de Dollond. Or, les enjeux sont importants, non seulement pour les progrès de l'astronomie, mais peut-être aussi pour la navigation, voire d'un point de vue militaire : il s'agit de fabriquer des lunettes bien plus puissantes, bien plus courtes et moins encombrantes. Surtout, par un intérêt économique bien senti, Dollond s'est bien gardé de donner des informations trop précises, afin de maintenir les concurrents, anglais ou étrangers, à distance *(voir l'encadré page 84)*.

Un point pour Clairaut

Dès lors, on comprend l'intérêt, pour d'éminents mathématiciens tels Clairaut et D'Alembert, d'édifier la théorie des aberrations optiques : de la sorte, on saurait calculer les combinaisons optiques optimales – les recettes des instruments « parfaits », ou presque –, sans être obligé de recopier servilement les lunettes de Dollond. En outre, il y a de bonnes raisons de penser que celui-ci, qui n'est tout de même pas un théoricien de premier ordre, ne dispose pas d'une telle théorie : on devrait donc pouvoir surclasser ses instruments. D'ailleurs, cette même année 1760, le Suédois Klingenstierna, maître de Ferner, publie une première ébauche de théorie.

À ce stade, cependant, où en est Euler qui, depuis 1748, a publié toute une série de mémoires sur la correction des aberrations ? Disons simplement que, suite à un préjugé théorique, il est resté sur l'idée d'objectifs constitués de verre et d'eau, qui ne donneront rien de bon. Pendant longtemps l'éminent savant refusera de croire à la possibilité de supprimer les aberrations en employant le *crown-glass* et le *flint-glass*. Il ne renoncera à ses conceptions et ne reconnaîtra la valeur des travaux de Dollond et de Clairaut qu'en 1764, à la suite des travaux de Johann Zeiher (1720-1784) à Saint-Pétersbourg, qui obtiendra un nouveau verre extrêmement dispersif.

La dispersion est l'écart de réfrangibilité (et donc d'indice) entre les rayons extrêmes du spectre optique (rouge et violet). Ainsi, un verre très dispersif est tel que la déviation de la lumière dépend fortement de sa longueur d'onde. Euler croyait que la dispersion dépendant de l'indice du verre. Or le nouveau verre de Zeiher avait un indice comparable au verre ordinaire et une dispersion considérablement plus forte. C'était

Le savant suédois Bengt Ferner (1724-1802,** ci-contre**), suscita l'intérêt de Clairaut et de D'Alembert pour les lunettes achromatiques en leur rapportant les avancées du Britannique John Dollond (1706-1761,** page ci-contre à droite**) dans ce domaine. La guerre de Sept Ans avait interrompu les échanges scientifiques entre la France et l'Angleterre. Page ci-contre à gauche, un des affrontements : la bataille de « Quiberon Bay » (1759).

déjà le cas entre le *flint-glass* et le *crown-glass*, mais de façon moins nette, ce qui n'avait pas convaincu Euler.

Ainsi, en 1760, Clairaut s'est mis au travail et, dès l'année suivante, il lit un premier mémoire de son cru devant l'Académie des sciences, sous le titre : *Mémoire sur les Moyens de perfectionner les lunettes d'approche par l'usage d'objectifs composés de plusieurs matières différemment réfringentes*.

Dans ce texte, après avoir donné les moyens de déterminer l'indice et le pouvoir dispersif des matériaux transparents, Clairaut calcule les caractéristiques d'objectifs à deux lentilles corrigés des aberrations chromatiques et sphériques. C'est la première fois qu'est publiée une théorie des objectifs achromatiques permettant la détermination de leurs caractéristiques. Clairaut obtient un « privilège » pour la publication de son mémoire : devant l'intérêt de ses travaux, on décide d'insérer son texte dans le prochain volume des *Mémoires de l'Académie royale des sciences*, et non dans le volume de l'année 1761 (à paraître beaucoup plus tard).

Un autre mémoire, prolongement du premier, est lu par Clairaut devant l'Académie en juin 1762 et publié dans le recueil des mémoires de 1757, obtenant donc le même privilège que le texte précédent. Dans ce travail, Clairaut détermine expérimentalement les caractéristiques optiques (indices et pouvoirs dispersifs) des milieux transparents et examine les conséquences de l'imprécision de ces données sur la qualité des objectifs calculés. Enfin, dans un troisième mémoire (lu en mars-avril 1764), qui paraîtra dans le recueil de 1762, Clairaut généralise sa théorie par l'étude de tous les rayons lumineux émis par la source, alors que jusque-là, il avait réduit son étude aux seuls rayons situés dans le plan contenant l'axe optique et la source.

Peter Dollond (1730-1820), fils et successeur de John Dollond.

Le procès Dollond

John Dollond a transmis son sens du commerce à son fils. À partir de 1764, Peter Dollond, qui succède à son père décédé en 1761, poursuit en justice les nombreux opticiens londoniens fabriquant et commercialisant des lunettes achromatiques : celles-ci sont protégées par un brevet, et tout vendeur doit lui verser une redevance. Or, il s'avère que les premiers objectifs achromatiques ont été construits par le magistrat Chester Moor Hall dès 1733, bien avant le brevet de John Dollond. Toutefois, très discret, l'inventeur n'a pas commercialisé ses lentilles et l'événement est resté quasi inconnu.
Informés de ceci, de nombreux opticiens envoient une pétition au *Private Council* afin de demander la révocation du brevet : ils arguent que Dollond (le père) s'est attribué faussement l'invention des lunettes achromatiques, dont le véritable créateur est Hall. Ils affirment que Dollond a en fait été mis au courant par J. Rew, en 1752 à propos de ce nouveau type de lentilles et de leur construction.
Le brevet n'est pas révoqué et, en 1766, Dollond fait condamner James Champneys, l'un des signataires de la pétition, dont la forte amende entraîne la faillite. Dans son jugement, la cour, reconnaissant en Hall l'inventeur des objectifs achromatiques, estime normal que Dollond continue à jouir de son brevet, car, « ce n'est pas la personne qui a gardé son invention dans son tiroir qui mérite de la voir protéger par un brevet, mais celle qui en a fait bénéficier le public », ce qui fera jurisprudence dans le droit anglais.

Les succès de Clairaut dans une matière nouvelle incitent D'Alembert à ne pas rester sur la touche, d'autant qu'après la lecture de ses deux premiers mémoires, tout n'est pas achevé, loin de là. D'une part, seule la théorie des aberrations pour les objets situés au centre du champ est établie. D'autre part, même dans ce cas, Clairaut a laissé de nombreuses questions de côté. D'Alembert s'engouffre donc sur ces pistes…

Le fruit de ses travaux est le troisième tome des *Opuscules mathématiques* (1764), qui compte cinq mémoires, d'environ 80 pages chacun en moyenne (entre 60 et 120 pages), numérotés de 16 à 20 ; les mémoires 1 à 15 consacrés à différents sujets sont parus dans les deux premiers volumes des *Opuscules*. D'Alembert complète ses recherches par des mémoires lus devant l'Académie et publiés dans les recueils de celle-ci. Ces mémoires, versions perfectionnées de sa théorie, ne la modifient pas essentiellement, aussi ne les examinerons-nous pas ici.

L'œil, pas si parfait

En toute logique, D'Alembert commence par proposer une méthode pour corriger les aberrations chromatiques, qui sont les plus gênantes. À cause de l'inégale réfraction des couleurs, le système de lentilles qui constitue l'objectif forme les images d'un objet observé (disons une étoile) à des distances différentes selon la couleur des rayons lumineux *(voir la figure* a *page ci-contre)*. L'étoile envoyant des rayons des différentes couleurs du spectre (hormis les minces raies d'absorption), il se forme plusieurs images correspondant aux différentes couleurs. D'Alembert considère que si l'on arrive à faire coïncider les images pour deux couleurs éloignées (le rouge et le violet), alors on pourra considérer que, pour l'essentiel, les aberrations chromatiques seront éliminées. Utilisant les lois de l'optique géométrique (c'est-à-dire la loi dite de Snell-Descartes pour la réfraction, ou loi des sinus), il calcule les rayons de courbure des différentes surfaces des lentilles, de manière à ce que les distances des images soient égales. Il effectue ce calcul pour trois surfaces (c'est-à-dire deux lentilles accolées) et quatre surfaces (deux lentilles avec de l'air entre elles). Évidemment, une des lentilles est supposée en *crown-glass* et l'autre en *flint-glass*, ce qui permet à D'Alembert d'utiliser les indices donnés par Dollond pour ces deux types de verre et pour les deux couleurs.

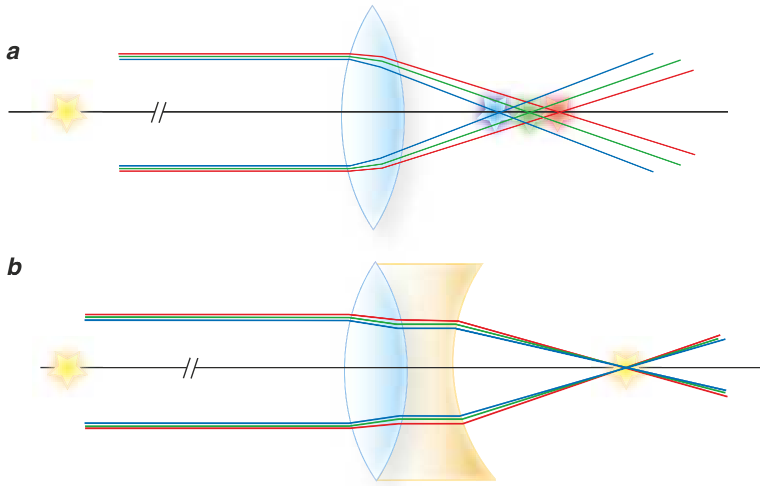
De nos jours, nous procédons toujours de la même manière pour fabriquer des objectifs achromatiques. Seuls les objectifs apochromatiques (de très bonne qualité) nécessitent d'égaliser les distances images pour trois couleurs. L'idée n'est toutefois pas de D'Alembert : Euler en 1748, et Clairaut, dès son premier mémoire, l'avaient déjà employée. L'originalité de D'Alembert réside dans l'étude de cas de figure non traités par Clairaut : ainsi, il regarde non seulement comment supprimer les aberrations, mais aussi comment les réduire dans une proportion donnée, certains cas ne permettant pas l'élimination totale. Autre aspect important, il étudie l'effet de l'épaisseur des lentilles. Clairaut s'était limité au cas des lentilles minces, à épaisseur nulle, ce qui n'est qu'une approximation peu réaliste.

Si D'Alembert s'intéresse aux épaisseurs, c'est aussi pour une autre raison. Newton avait cru montrer l'impossibilité d'éliminer les aberrations chromatiques. Or Euler, en 1748, puis dans les années 1750, s'était fondé sur le fait que l'œil semblait dépourvu d'aberrations chromatiques pour contrer l'affirmation de Newton et s'autoriser à rechercher une théorie d'élimination de ces aberrations. Ce faisant, il avait dépassé le cadre scientifique et avait expliqué que cette perfection optique de l'œil, cette parfaite élimination des aberrations, constituait une preuve très forte de l'existence de Dieu, affirmant même que les athées n'auraient rien à y répondre et devraient rendre les armes.

L'encyclopédiste D'Alembert, on s'en doute, ne partage pas cette vision. Aussi n'est-il guère étonnant qu'il cherche à réfuter Euler sur l'achromatisme de l'œil. Il applique donc sa théorie à l'œil, système optique où les épaisseurs ne peuvent être négligées. À cette fin, il emploie les données expérimentales de l'époque (sur les indices des différents milieux transparents de l'œil) et montre que celui-ci n'est pas dépourvu des aberrations chromatiques, mais qu'elles sont assez faibles pour ne pas perturber la vision. En réalité, les données expérimentales du XVIII^{e} siècle étaient d'une trop médiocre qualité pour que le calcul de D'Alembert soit indiscutable. Cependant, il n'en est pas moins prouvé de nos jours que l'œil n'est pas exempt d'aberrations. Quant au problème théologique, D'Alembert ne l'aborde pas explicitement.

Euler n'apprécie pas outre mesure la réfutation de D'Alembert, d'autant que certaines autres critiques se trouvent éparses dans le même volume. Par exemple, D'Alembert remarque qu'Euler a utilisé quatre surfaces pour éliminer l'aberration chromatique, alors que trois auraient suffi… La réponse de ce dernier, assez virulente, paraît dans le volume de mars 1765 du *Journal Encyclopédique*, sous le titre *Remarques de M. Euler sur quelques passages qui se trouvent dans les trois volumes des* Opuscules mathématiques *de M. d'Alembert*. Il affirme en particulier que si la suppression des aberrations n'est pas totale, alors celles-ci devraient prendre une ampleur insoutenable pour les objets situés sur le bord du champ visuel. En outre, il estime peu probable que l'image formée par les rayons de couleur moyenne (verte) tombe juste sur la rétine, comme le veut D'Alembert. Enfin, il défend de nouveau le finalisme, estimant qu'il n'y a pas de raison que les aberrations soient seulement très petites dans l'œil, étant donné que « celui (comprendre : le Créateur) qui aura pu rendre si petite cette confusion dans l'œil, a bien été en état de la réduire absolument à rien ». D'Alembert répondra lui-même à cet article, dans un mémoire qui sera publié quelques années plus tard dans les recueils de l'Académie des sciences de Paris.

Après les aberrations chromatiques, notre savant s'attaque à l'autre type d'aberrations : les aberrations



L'aberration chromatique* (a) *: la déviation du rayon à travers la lentille varie en fonction de sa longueur d'onde (couleur) : les longueurs d'onde rouges sont moins déviées que les bleues. La solution de John Dollond* (b) *: il couple un verre peu dispersif (le* crown-glass*, lentille convexe à gauche) et un verre très dispersif (le* flint-glass*, lentille concave à droite) afin que leurs pouvoirs dispersifs se compensent.

géométriques, qu'il appelle *aberration de sphéricité*. En 1637, dans sa *Dioptrique*, Descartes avait montré que les courbures sphériques suivant lesquelles on taille les lentilles étaient cause de mauvaise qualité des images : tous les rayons émis par un objet ponctuel ne convergeaient pas en un point unique pour former une image ponctuelle, d'où une certaine confusion des images. L'illustre auteur prouvait en outre que des lentilles dont les surfaces seraient de type ellipsoïdal ou hyperbolique ne présenteraient pas ce défaut. Or, il s'était avéré techniquement impossible, à l'époque, de tailler des lentilles de ce type. De surcroît, Newton avait montré que le défaut de qualité des lunettes astronomiques était dû aux aberrations chromatiques et non aux aberrations sphériques, rendant la question moins intéressante.

Les aberrations hors-axe

L'idée de D'Alembert est donc, puisqu'on emploie trois ou quatre surfaces sphériques et non plus deux, comme pour les lunettes traditionnelles, de voir si ces nouveaux paramètres ne permettraient pas, en plus de l'élimination du chromatisme, d'améliorer aussi les résultats sur ce front. Cette fois, il n'emploie donc plus que des rayons d'une seule couleur. Pour simplifier, il prend d'abord le cas d'un point objet observé le long de l'axe optique (c'est-à-dire au centre du champ). L'image se forme sur ce même axe optique, et D'Alembert calcule la distance où les différents rayons lumineux croisent de nouveau l'axe optique après avoir traversé le système de lentilles. Les calculs s'allongent… D'Alembert prouve ainsi que la distance où se forme l'image est fonction de l'écart entre le centre de la lentille et le point où les rayons traversent celle-ci. En d'autres termes, on pourrait diviser la lentille en anneaux concentriques correspondant tous à une distance donnée de l'image. En outre, dans le cas de rayons proches du centre (les rayons paraxiaux), la distance image est proportionnelle au carré de l'écart précédent. Là encore, D'Alembert montre qu'en employant au moins trois

Le secret du *flint-glass*

Pendant un demi-siècle, la construction des objectifs achromatiques resta pratiquement le monopole des Anglais pour une raison simple : les opticiens du continent avaient le plus grand mal à se procurer du flint-glass *de qualité. Le* flint-glass *doit son origine à l'essor de la production de houille en Angleterre et à la raréfaction du charbon de bois, due à un important déboisement du pays. Contrairement aux creusets chauffés au charbon de bois, ceux chauffés à la houille devaient être fermés, car la température n'y était sinon pas assez élevée pour porter le sable en fusion (avec de l'alcali). Pour faciliter la fusion, les verriers ajoutaient en outre du minium (oxyde de plomb). Le résultat était un beau cristal, dont la fabrication se développa en Angleterre, tandis qu'en France, par exemple, il n'y en eut pas avant 1785.*

Ce cristal épais et contenant du plomb, nommé flint-glass*, fut promu à un grand avenir en optique lorsque Dollond l'utilisa pour construire des objectifs achromatiques. Toutefois, les exigences de qualité du verre pour la fabrication d'objectifs de lunettes astronomiques étaient très élevées, et pendant toute la fin du XVIII^e siècle, la production d'un bon* flint*, propre à cet usage, était le fruit d'un hasard heureux.*

En Angleterre même, Dollond se servait le premier, et achetait le contenu entier qui sortait du creuset, retirait les parties du verre ayant la meilleure qualité, et revendait le reste ; ainsi, il se procurait la plus grande partie du flint *propre à l'optique, les autres opticiens anglais devant se contenter de verre d'assez mauvaise qualité. Les fabricants du continent, quant à eux, n'obtenaient que les « plus bas morceaux », d'autant que les Anglais, pour des raisons de concurrence économique, veillaient à ce qu'aucun* flint *de bonne qualité ne soit fourni à l'étranger.*

Les pays continentaux essayèrent de réagir. La consommation de verre optique était trop faible sur le continent pour que les fabricants français, par exemple, puissent engager les énormes frais nécessaires aux recherches sur la fabrication du flint*. Aussi l'Académie royale des sciences de Paris mit-elle la question au concours pour l'année 1766. Toutefois, faute de réponse convenable, le prix (1200 livres), reporté d'année en année, fut finalement décerné à Lebaude, un maître-verrier de Picardie dont les résultats, fort médiocres, étaient très insuffisants pour des optiques astronomiques.*

Des chercheurs français, tel Rochon, entreprirent eux aussi des recherches les années suivantes, mais sans résultat tangible. La manufacture de Saint-Gobain n'eut pas plus de succès ; aussi, en 1786, l'Académie des sciences remit-elle la même question au concours, avec cette fois un prix de 12 000 livres et des exigences plus strictes ; le prix, reporté jusqu'en 1791, ne fut jamais attribué.

Il fallut attendre le début du XIX^e siècle pour produire en France du flint *de qualité, avec le développement des cristalleries ; Artigues, industriel propriétaire d'une de ces entreprises, mit au point des méthodes bien déterminées pour produire un verre de qualité, méthodes qu'il rendit publiques.*

À la même époque, grâce aux recherches de Fraunhofer à Munich, l'Allemagne devint aussi capable de produire du flint-glass *de très bonne qualité ; l'atelier de Fraunhofer et du Suisse Guinand joua un rôle fondamental pour l'industrie allemande du verre optique.*

Un vase anglais en* flint-glass *fabriqué à la fin du XVIII^e siècle.

http://www.privymaster.org/GlossaryII.htm

surfaces optiques, on peut éliminer ce type d'aberration et, surtout, combiner cette élimination avec celle des aberrations chromatiques. Ici aussi, D'Alembert n'a pas la primeur du résultat : Clairaut a fait, certes avec des méthodes un peu différentes, la même chose en 1761. Comme pour les aberrations chromatiques, l'apport de D'Alembert consiste surtout en l'étude de nouveaux types de combinaisons optiques non proposées par Clairaut et dans la réduction des aberrations dans une proportion donnée.

Ensuite, et c'est peut-être là le plus intéressant, D'Alembert regarde ce qui se passe pour les points qui ne sont pas sur l'axe optique et ne seront donc pas au centre du champ. Les calculs, déjà lourds, s'allongent encore… Il décrit ainsi ce qu'on appelle les *aberrations hors-axe*. Ce type d'aberrations géométriques, appelées aujourd'hui aberrations de Seidel en l'honneur de leur redécouvreur, l'Allemand Ludwig Seidel (1821-1896), se divisent en quatre types principaux : la coma, l'astigmatisme, la courbure de champ et la distorsion, auxquels s'ajoute l'aberration sphérique, qui ne dépend pas de l'écartement de l'objet par rapport à l'axe optique.

Notre auteur commence par se restreindre aux rayons lumineux situés dans le plan contenant l'objet et l'axe optique, avant de généraliser son étude à l'ensemble de tous les rayons. Il calcule alors les aberrations « longitudinales » et « latitudinales » (ou transversales) : autrement dit, il étudie l'étalement de l'image selon l'axe optique, puis perpendiculairement à celui-ci. Par rapport au cas où l'objet est sur l'axe, apparaissent de nouveaux termes qui correspondent aux aberrations de Seidel, en particulier la coma et l'astigmatisme, mais aussi la courbure de champ.

D'Alembert jouit-il, pour une fois, de la primeur du résultat ? Pas tout à fait. Le 18 janvier 1764, il remet un premier exemplaire de son ouvrage aux commissaires de l'Académie des sciences, afin d'obtenir son approbation. Cette caution n'a rien d'obligatoire, mais donne de la crédibilité à l'ouvrage. L'approbation donnée, le livre paraît à l'été. Seulement voilà… En mars et avril, Clairaut lit, devant la même Académie, son troisième mémoire sur les lunettes, mémoire consacré… aux aberrations hors-axe ! D'Alembert, qui comptait sûrement sur cette partie de son livre pour damer le pion à son adversaire, n'a pas dû apprécier. En tout cas, il ajoute un petit texte en bas de page, en note de l'« Avertissement » qui introduit son livre :

*Lorsque cet Ouvrage a été remis aux Commissaires nommés pour l'examiner (en janvier 1764) il n'y avoit encore de lû à l'Académie que les deux Mémoires imprimés dans les Vol. de 1756 & 1757. Ainsi ce qui a été lû depuis (en Mars & Avril 1764) & dont je n'ai point d'ailleurs entendu la lecture, n'a pu m'être d'aucun secours pour les recherches analogues qu'on pourra trouver dans cet Ouvrage, & qui ont été imprimées aux mois de Juillet et d'Août 1763, pendant que j'étois en Allemagne ; comme l'*Errata *ne le prouve que trop. D'ailleurs les principales de mes formules ont été déposées au Secrétariat de l'Académie, aux mois de Juillet 1762 ; et Janvier 1763 ; & l'impression de ce troisième Volume a commencé il y a plus d'un an & demi ; la difficulté & la lenteur de l'impression sont cause qu'il n'a pas paru plutôt.*

Bien que D'Alembert ne précise pas qui est l'auteur des mémoires des volumes de 1756 et 1757, on comprend qu'il s'agit de Clairaut. Et bien qu'il n'explicite pas les « recherches analogues », vu le thème du mémoire que Clairaut vient de présenter, il s'agit évidemment des aberrations hors-axe. D'Alembert rappelle qu'il a été invité l'année précédente par le roi de Prusse Frédéric II. En son absence, du 20 juin au 27 août, il n'a pas pu corriger les épreuves de la partie correspondante de son livre, et a donc ajouté de nombreuses corrections à la fin de l'ouvrage. Quant au dépôt de ses formules, nous n'en avons pas trouvé trace dans les archives de l'Académie. Nous ne savons pas non plus quelle a été la réaction de Clairaut, à qui il ne restait d'ailleurs que quelques mois à vivre (il meurt en mai 1765).

Les résultats de Clairaut et D'Alembert sont essentiellement équivalents, bien que leurs méthodes de calcul soient parfois différentes. Les deux hommes ont travaillé de manière indépendante et parallèle, et il n'est pas possible de donner la priorité à l'un ou à l'autre : ils sont les créateurs de la théorie des aberrations hors-axe. Toutefois, D'Alembert a commis une erreur (due à l'oubli d'un report de terme) dans le calcul de l'aberration de coma, si bien que seul Clairaut a donné l'expression exacte dans un premier temps, D'Alembert corrigeant son expression dans un mémoire ultérieur.

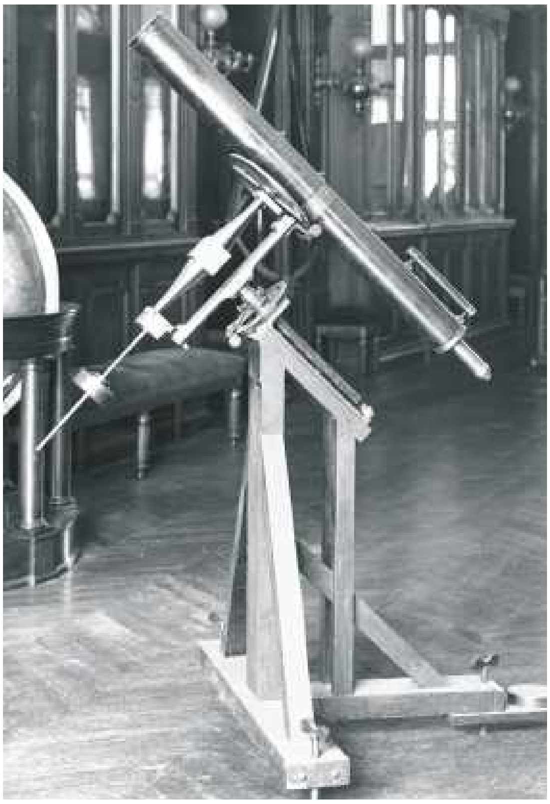
Euler a tort, Newton aussi

De façon logique, après les aberrations de l'objectif, D'Alembert étudie la résultante, au niveau de l'œil, des aberrations dues à l'ensemble de la lunette astronomique. Une lunette est constituée certes d'un objectif tourné du côté des astres, mais aussi d'une petite lentille, nommée oculaire, du côté de l'œil. Clairaut s'est limité aux aberrations de l'objectif, tout comme D'Alembert jusqu'ici. Or, l'important est l'étude des aberrations optiques de l'ensemble de la lunette, et de leur effet sur l'œil. C'est donc le but que se fixe D'Alembert dans le Mémoire 18. Il calcule en particulier la largeur de la « tache d'aberration » sur la rétine, c'est-à-dire la dimension que prend l'image d'un point, image qui, par suite des aberrations, n'est pas ponctuelle comme elle devrait l'être *(voir la figure page 89)*. Cette tache doit être suffisamment petite pour ne pas affecter la vue. La théorie de D'Alembert présente des insuffisances, dues à l'état des connaissances de l'époque : on ignore le rôle des phénomènes de diffraction dans la limitation de la qualité des images données par un instrument, rôle qui ne sera étudié que dans les années 1830, par le Britannique sir George Airy (1801-1892).

Le mémoire suivant est consacré au calcul concret d'instruments corrigés à l'aide de cette théorie. En particulier, afin d'améliorer le traitement des aberrations, il propose de supprimer l'aberration sphérique pour deux couleurs différentes, ce qui doit en pratique l'éliminer pour toutes les couleurs. Cette méthode est parfois connue sous le nom de condition de D'Alembert ou condition de D'Alembert-Gauss. Ce procédé a en effet longtemps été attribué à Gauss, jusqu'à ce qu'un article allemand du physicien Moser, en 1887, rappelle le rôle de D'Alembert. Toutefois, Clairaut est le premier à avoir proposé (très brièvement) cette méthode dans son premier mémoire ; en outre, il en a fait une étude assez complète – plus complète que celle de D'Alembert – dans son troisième et dernier mémoire sur les lunettes achromatiques. Il est possible que la vive critique de cette méthode par John Herschel (1792-1871), astronome britannique, en 1821, critique dirigée contre D'Alembert et ignorant Clairaut (dont il ne devait pas connaître le mémoire), soit à l'origine de l'erreur de Moser.

Enfin, le Mémoire 20, qui achève le tome III des *Opuscules*, traite de la détermination des indices optiques des différents milieux pour diverses couleurs, condition *sine qua non* pour pouvoir appliquer les théories précédentes. Avant de présenter différentes méthodes expérimentales, D'Alembert soulève une question à laquelle les plus grands ont répondu, sans le satisfaire : existe-t-il une loi générale donnant la dispersion

Lunette astronomique achromatique fabriquée par Peter Dollond dans les années 1770.



Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Si l'essentiel des recherches de D'Alembert en optique a concerné les lunettes achromatiques, son premier travail académique dans ce domaine a trait à la vision : il s'agit d'un mémoire publié dans le premier volume de ses Opuscules *(1761), intitulé* Doutes sur différentes questions d'optique. *Tout au long, D'Alembert se pose des questions très simples et souvent peu soulevées : voit-on les objets dans la direction où ils sont réellement, ou dans une direction un peu déviée ? Quel est le lieu apparent des objets que l'on observe à partir d'un instrument d'optique (en particulier une lunette astronomique) ? La question de la grandeur apparente des objets vus à l'œil nu est quant à elle l'occasion de toute une étude sur la façon dont il faut planter deux rangées d'arbres pour qu'elles paraissent parallèles (où l'on voit qu'il ne faut surtout pas les planter parallèles !)*

D'une manière générale, ce texte met en doute des idées reçues et témoigne d'un scepticisme assez typique chez D'Alembert (voir *Doutes sur les probabilités*, page 62). *Le savant conclut que ces questions sont très peu avancées de son temps, et qu'« en optique tout est encore à faire ». Il reviendra peu sur le sujet, sauf dans un bref mémoire publié en 1780 en réponse à des objections adressées par le savant auvergnat Étienne Dutour de Salvert.*

*Comment D'Alembert a-t-il pu s'occuper de telles questions ? Son intérêt pour le sujet a sans doute été éveillé par sa collaboration à l'*Encyclopédie *: en charge des articles scientifiques, il a travaillé sur plusieurs articles du domaine. Au fil des différents articles d'optique apparaissent les idées (et les doutes !) propres à D'Alembert sur la question, idées que l'on retrouve dans le mémoire de 1761. Il est très possible que l'interdiction de l'*Encyclopédie *en 1759 l'ait incité à consigner ses résultats dans un mémoire. Par ailleurs, une querelle de priorité l'avait opposé à Pierre Bouguer (1698-1758) en 1755, au sujet du parallélisme apparent des allées d'arbres : Bouguer avait en effet présenté cette année-là un mémoire sur ce problème, susceptible d'intéresser les concepteurs des parcs entourant les châteaux ; D'Alembert était intervenu pour revendiquer des résultats non encore publiés, mais qu'il affirmait avoir obtenus depuis plusieurs années, lors de la rédaction des articles de l'*Encyclopédie. *Le mémoire de 1761 lui donne l'occasion de présenter sa théorie et de revendiquer de nouveau sa priorité vis-à-vis de Bouguer, décédé entretemps.*

Là encore, les travaux de D'Alembert sont vite oubliés. Certes, ils n'ont pas l'ampleur de ceux sur les lunettes astronomiques. Le physicien écossais David Brewster (1781-1868) se souviendra de lui dans les années 1830, mais pour critiquer ses idées sur la direction apparente des objets et présenter sa propre théorie, sa loi de la direction visible *(si l'œil perçoit dans la bonne direction les objets situés le long de l'axe optique, il perçoit les autres légèrement déviés par rapport à leur position réelle). Plusieurs autres chercheurs aborderont ces questions aux* XIX*e et* XX*e siècles. En particulier, la direction apparente de la vision sera étudiée en 1879 par Ewald Hering (1834-1918), dont les lois de la direction visible sont toujours admises, même si de nombreux travaux se poursuivent dans le domaine, souvent à l'initiative de chercheurs en psychologie.*

La question du parallélisme apparent a été traitée par F. Hillebrand, puis W. Blumenfeld au début du XX*e siècle ; ces travaux ont contribué à dégager la notion d'espace visuel. En 1948, R. K. Luneburg a montré que celui-ci est non euclidien, mais de type riemannien (à courbure constante). Des recherches sont toujours en cours sur ce point.*

www.shutterstock.com / photo Nikita Tiunov

Deux rangées parallèles d'arbres nous paraissent convergentes* (ci-contre). *Comment les planter pour qu'elles nous semblent parallèles ? En rangées divergentes, mais de combien, s'interroge D'Alembert ?

d'un milieu optique, c'est-à-dire l'écart de réfrangibilité entre les rayons extrêmes du spectre optique (rouge et violet), à partir de son indice (donné pour une certaine couleur) ?

Euler croit à l'existence d'une telle loi. Il en a donné une formulation *ad hoc* dans son mémoire de 1748 à partir de considérations de symétrie, voire d'harmonie. En outre, il a affirmé qu'une telle loi ne peut pas être déterminée à partir de l'expérience (compatible, selon lui, avec plusieurs lois différentes), mais seulement par des considérations théoriques *a priori*.

Par ailleurs, la loi d'Euler s'oppose à une autre que Newton avait cru trouver par l'expérience, loi qui avait bloqué, nous l'avons vu, l'apparition d'instruments achromatiques durant plusieurs décennies. Ainsi, lorsque D'Alembert se penche sur la question, deux lois sont censées donner la dispersion en fonction de l'indice.

Prenant le contre-pied de l'attitude d'Euler, pour qui l'expérience ne peut décider, D'Alembert se « propose de faire voir […] qu'on ne peut ni établir, ni attaquer solidement par la théorie, ni l'équation de M. Newton, ni l'équation de M. Euler » et que l'expérience est le seul moyen sûr de déterminer les pouvoirs dispersifs des différents milieux optiques. Il attaque les différents présupposés à partir desquels Euler a cru tout à la fois établir sa loi de dispersion et réfuter celle de Newton. En particulier, Euler critiquait les problèmes que la loi de Newton posait dans le cas de plusieurs réfractions successives ou lorsque le sens de la lumière était changé. Ce type d'arguments, montre D'Alembert, ne saurait établir la loi d'Euler, tant qu'on ne connaît pas les vraies causes et le vrai mécanisme de la réfraction : c'est ce mécanisme qui détermine la dispersion et fait qu'il existe ou non une loi qui la relie à la réfraction. En attendant de le connaître, seule l'expérience peut trancher, n'en déplaise à Euler.

La loi de Newton est disqualifiée par la seule existence (récente) des lunettes achromatiques. Quant à la loi d'Euler, D'Alembert montre, tout en restant prudent, qu'elle n'est pas compatible avec les mesures d'indices et de dispersions faites par Dollond sur plusieurs milieux transparents. La découverte peu après d'un nouveau type de verre très dispersif par Zeiher, ruinera définitivement la théorie d'Euler.

Rouge carmin ou rouge orangé ?

D'Alembert reviendra rapidement sur cette question quelques années plus tard, dans le Mémoire 49 de ses *Opuscules*. Il reprendra et élargira sa critique en pointant la recherche d'une uniformité dans les lois de la nature, à l'origine selon lui de la fausse loi de la dispersion donnée par Euler. Il estime que ce sont là des « raisonnemens métaphysiques », et que cette « prétendue uniformité […] peut nous induire en erreur, puisqu'en s'appuyant sur ce principe, on pourroit assigner des loix de la réfraction toutes différentes les unes des autres & toutes également vraisemblables ».

Les travaux de D'Alembert en optique ont donc eu leur importance. Pourquoi, alors, ont-ils été oubliés, au point que les aberrations hors-axe sont dites de Seidel, du nom d'un chercheur allemand du siècle suivant ? On pourrait penser que l'oubli s'est fait au profit de Clairaut, dont les travaux ont débuté plus tôt. Or celui-ci est tout autant oublié, et nombre d'ouvrages actuels font remonter la théorie des aberrations optiques au XIX^e siècle, en particulier à Ludwig Seidel, qui a présenté ses travaux en 1856. Certains relatent néanmoins les premiers pas vers l'achromatisme, du mémoire d'Euler de 1748 aux premières lunettes de Dollond, mais aucun ne mentionne les travaux théoriques de D'Alembert ou de Clairaut.

D'une part, cet oubli tient à l'échec de ces théories du point de vue de leur application concrète. Elles ont été conçues en vue d'éviter de longs tâtonnements infructueux aux fabricants. Or, ceux-ci, à de rarissimes exceptions près (Dollond ou Ramsden en Angleterre) sont des artisans dépourvus de formation scientifique, qui ne peuvent guère tirer profit des longues équations de Clairaut ou D'Alembert. D'autre part, il est dû à l'absence de théorie spectroscopique, avant les travaux de l'opticien et astronome allemand Joseph von Fraunhofer (1787-1826), vers 1810. En effet, D'Alembert, Clairaut ou Euler proposent de calculer les lentilles de manière à supprimer les aberrations chromatiques pour deux couleurs données. Or la couleur « rouge » ou la couleur « violette » représentent en réalité une large partie du spectre, une large gamme de longueurs d'onde. Il est nécessaire de caler ces couleurs sur une longueur d'onde précise (correspondant à une bande spectrale d'absorption déterminée) pour obtenir de bons résultats, faute de quoi les améliorations attendues peuvent vite s'avérer chimériques… C'est ce que rappelle John Herschel dans un mémoire de 1821, où il explique que ses prédécesseurs du XVIII^e siècle ont abouti à des formules très lourdes qui n'ont servi à rien.

Aussi les travaux des années 1760 tombent-ils peu à peu dans l'oubli. Dans les années 1840, de nouvelles recherches sont lancées sur les aberrations hors-axe, suite à l'invention de la photographie. Les objectifs photographiques, avec leurs champs bien plus larges que ceux des lunettes astronomiques, posent en effet des problèmes aigus d'aberrations hors-axe. La nouvelle génération de chercheurs (Petzval, Seidel…) ignore manifestement les résultats du siècle précédent.

Un homme, cependant, fait exception : Hans Boegehold (1876-1965). Dans une série d'articles très documentés et d'un haut niveau théorique (parus entre les deux guerres mondiales), le mathématicien et opticien allemand a pour ainsi dire redécouvert et réévalué les travaux sur l'achromatisme du XVIII^e siècle. Malheureusement, ses écrits semblent eux-mêmes fort oubliés de nos jours, bien que cités, pour certains, dans l'édition des œuvres d'Euler.

Fabrice Ferlin *est docteur en histoire des sciences. Sa thèse, soutenue à l'Université de Lyon en 2008, s'intitule* Mille pages étonnantes et méconnues de D'Alembert sur les lunettes achromatiques et la vision.

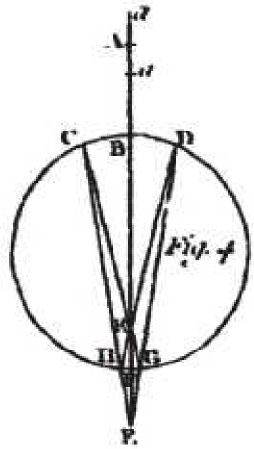


Figure du Mémoire 18 de D'Alembert sur « l'aberration dans l'œil » : le savant examine l'effet de l'aberration des lunettes sur l'œil en calculant le diamètre HG *de la tache « qui forme au fond de l'œil la peinture du point a ». Ce point est décalé par rapport au point* A*, dont l'image est « un seul & unique point* F *».*