

# Optique Instrumentale

## Travaux Dirigés

*Ce document appartient à*

---

<b>Cursus/option</b>	<b>1A</b>
<b>Date de mise à jour</b>	<b>septembre 2023</b>
<b>Année scolaire</b>	<b>2023/2024</b>
<b>Auteur</b>	<b>Sébastien de Rossi</b>



## Activités introductives

---

Matériel disponible

Source blanche étendue  
Écran carton blanc  
Deux diaphragmes  
Lentille convergente courte focale  
Lentille convergente longue focale  
Lentille divergente  
Objet diapositive  
Miroir plan

1. Estimer, à l'aide d'une simple lampe les signes et les distances focales des lentilles fournies.
2. Construire avec une lentille convergente l'image de la diapositive éclairée de telle sorte que,
  - Sa taille soit plus grande.
  - Sa taille soit plus petite.
  - Sa taille soit de même dimension que l'objet.

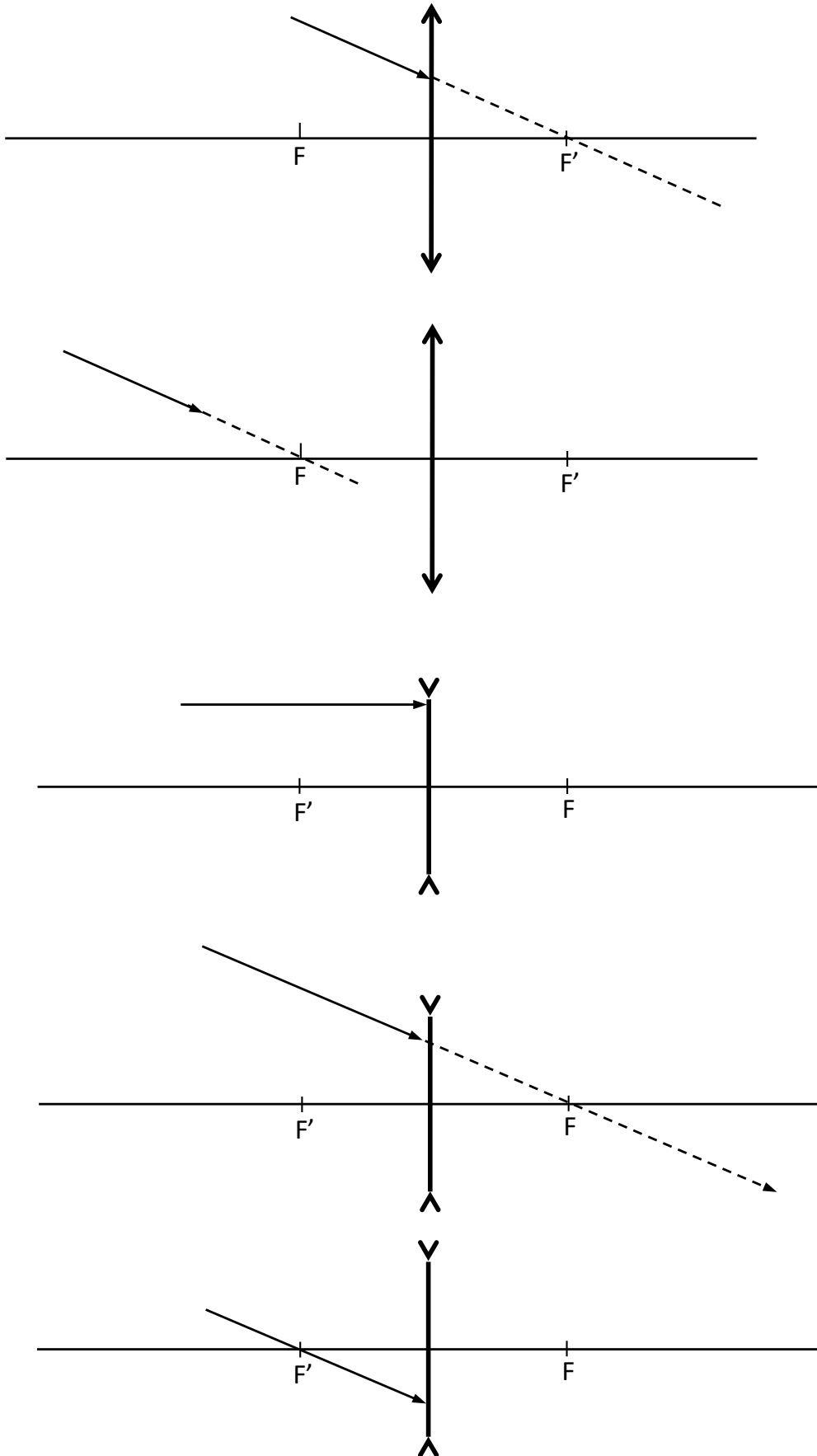
Faites les tracés de rayons correspondants. Dans la 3<sup>ème</sup> situation, en déduire une mesure simple de la distance focale. Observer l'image obtenue lorsque vous masquer la moitié supérieure (ou inférieure) de la lentille. Expliquer simplement vos observations à l'aide d'un tracé de rayons.

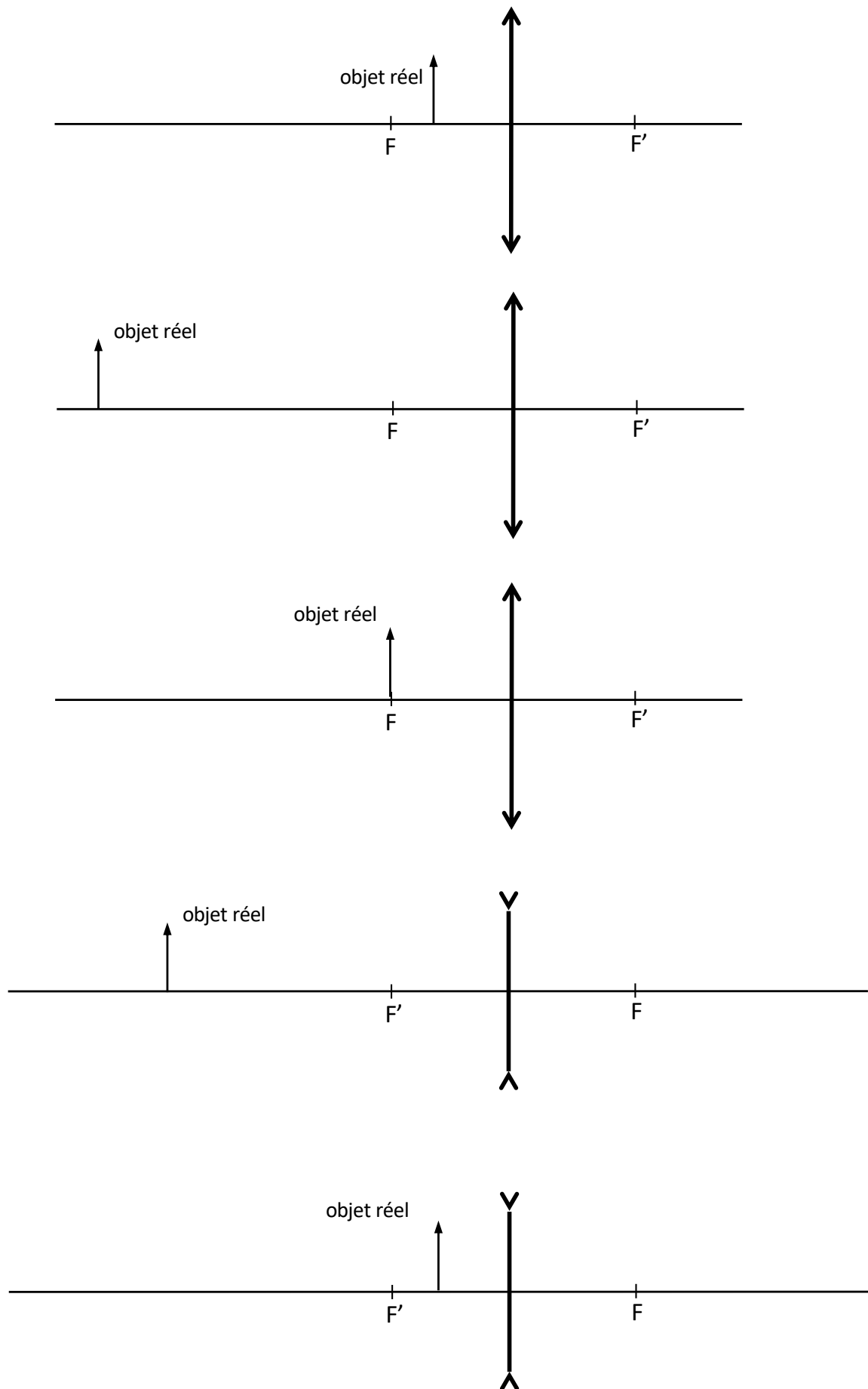
3. Estimez par auto-collimation la distance focale des lentilles convergentes. Faites le tracé de rayons correspondant.
4. Construire une source de lumière quasi-ponctuelle à l'infini. Déterminer sa taille apparente. Faites le tracé de rayons correspondant.
5. Construire une image à l'infini de l'objet diapositive avec une lentille puis projeter avec une deuxième lentille son image agrandie sur un écran. Déplacer ensemble la deuxième lentille et l'écran en avant et en arrière et déterminer ce qui change dans l'image. Faites le tracé de rayons correspondants.
6. Obtenir avec une lentille une image virtuelle rétrécie d'un objet réel que vous observerez à l'œil. Faites le tracé de rayons correspondant.
7. Obtenir avec une lentille une image virtuelle agrandie d'un objet réel que vous observerez à l'œil. Faites le tracé de rayons correspondant.

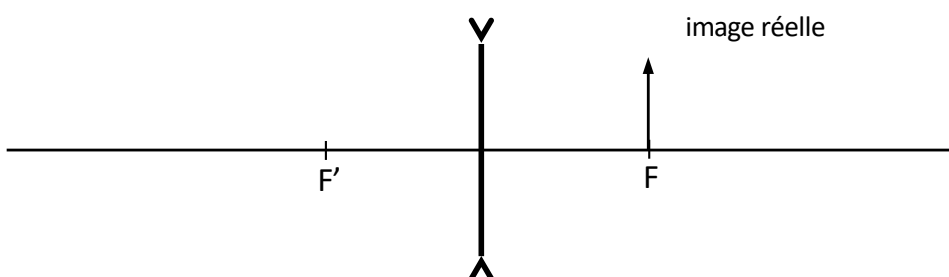
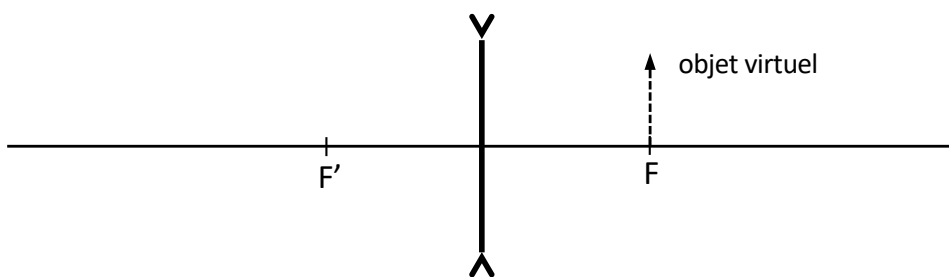
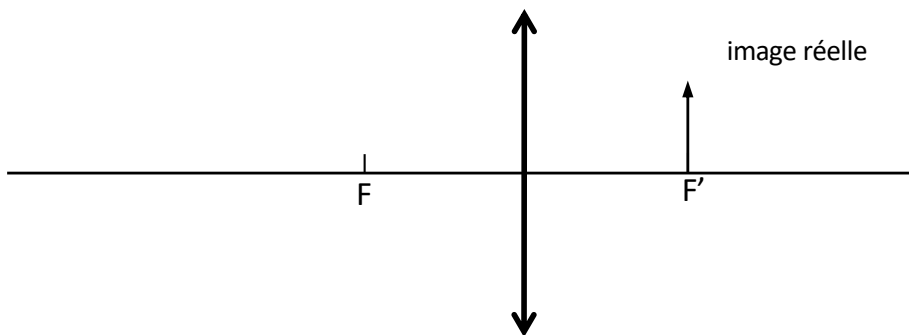
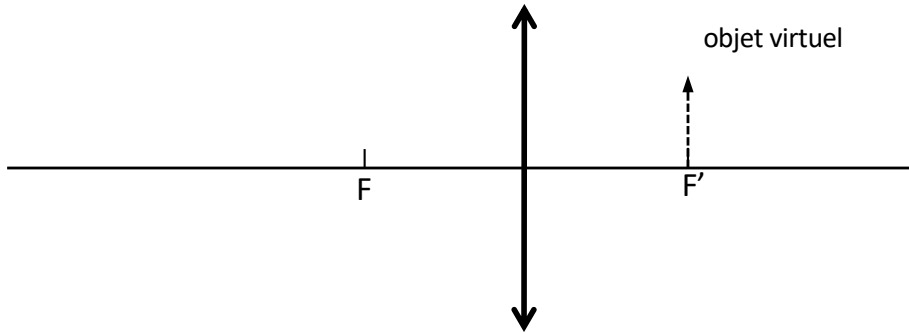
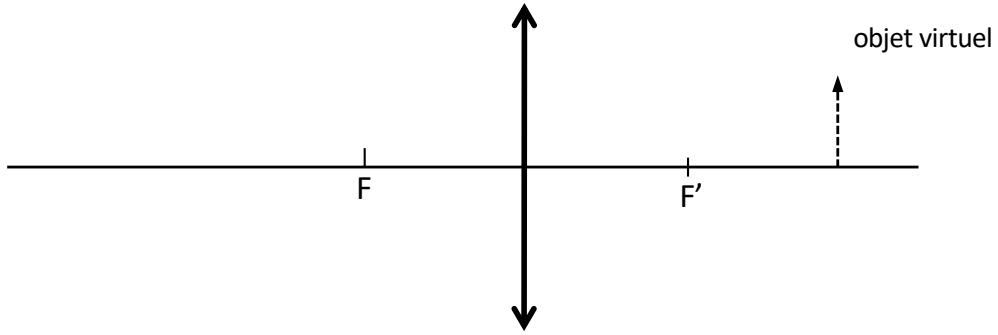


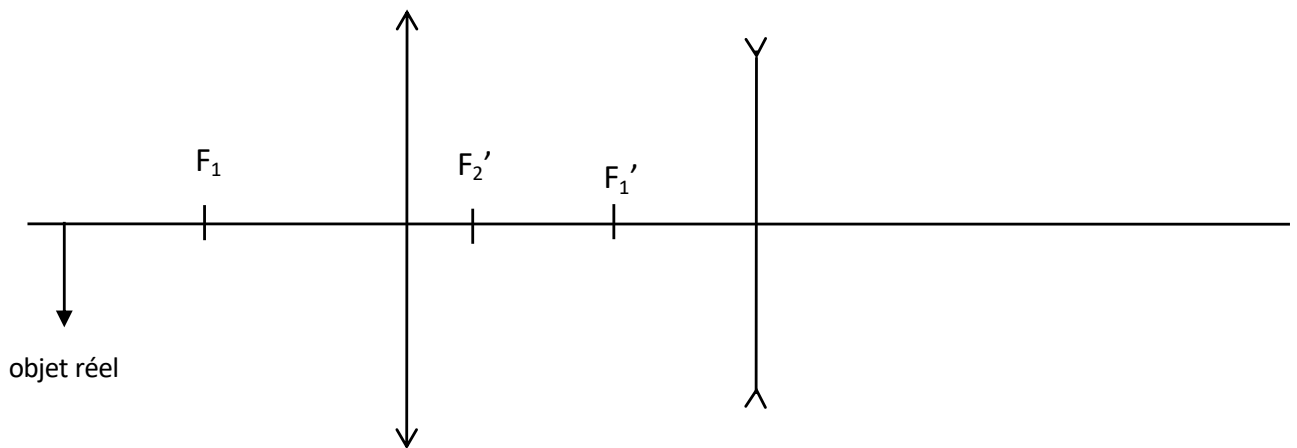
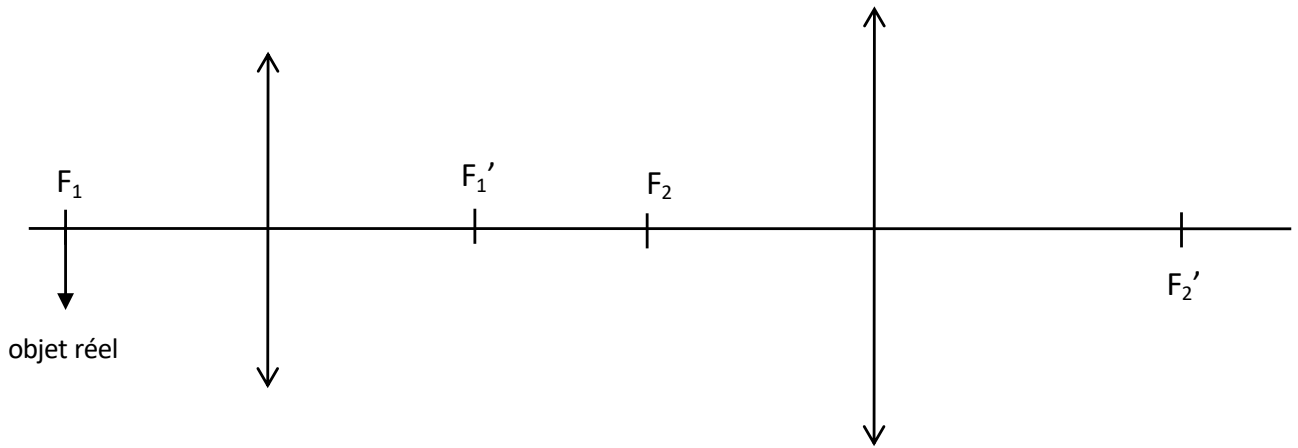
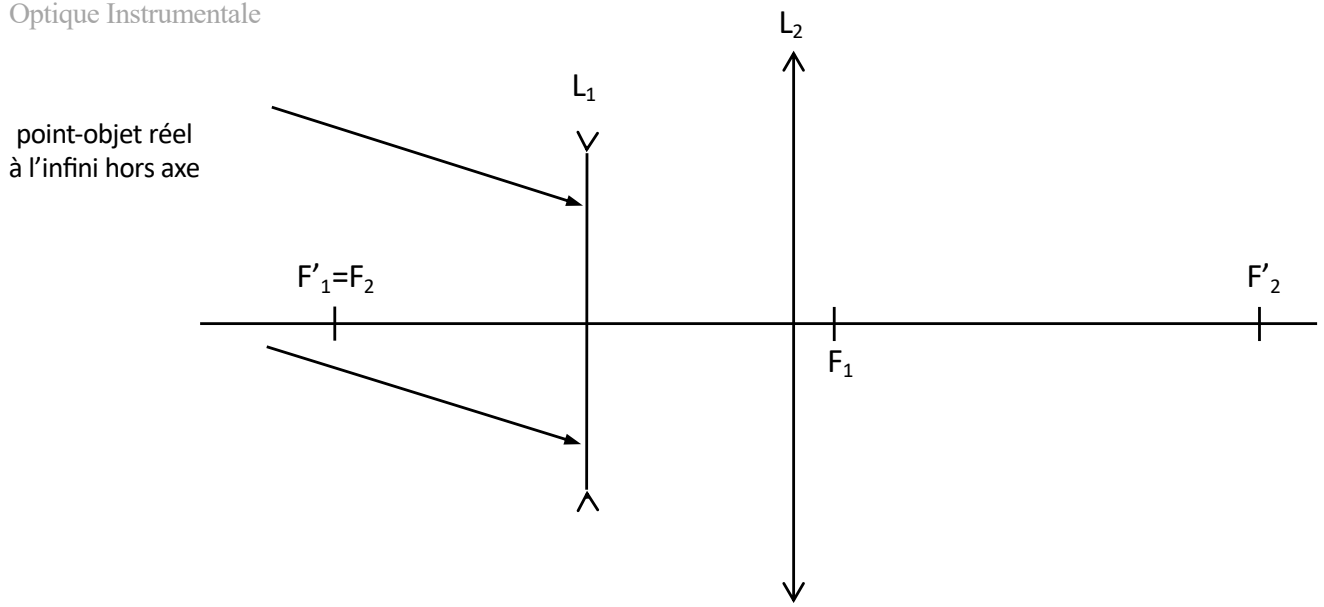
# Constructions géométriques dans les lentilles minces

---

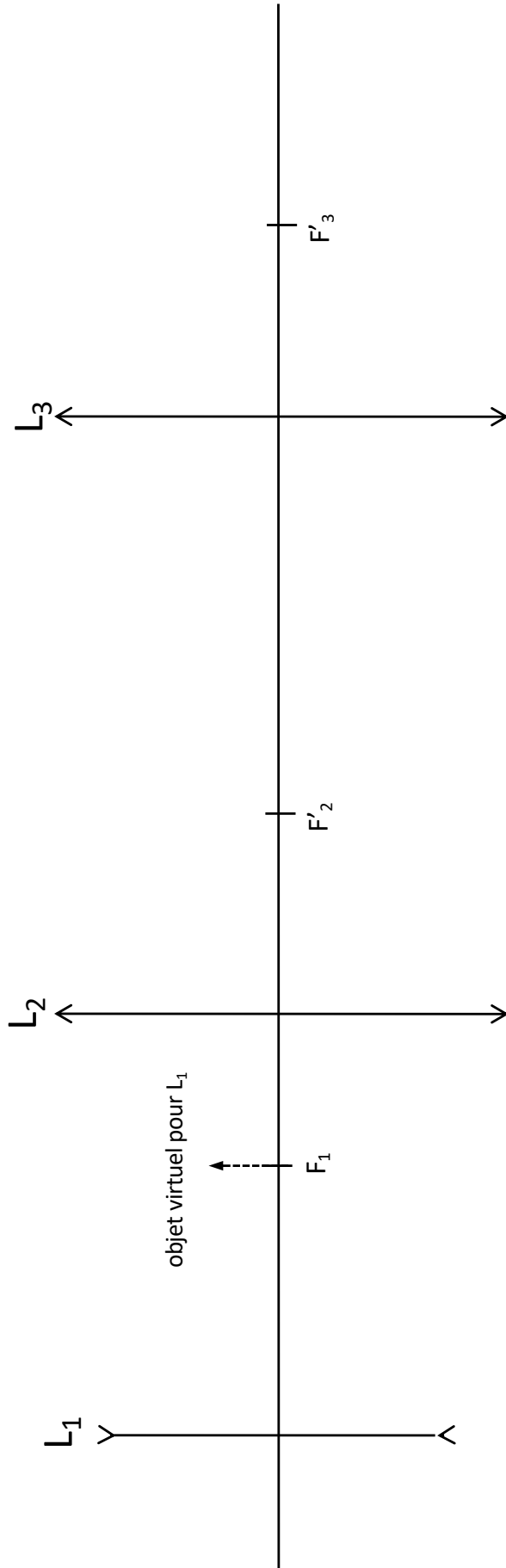










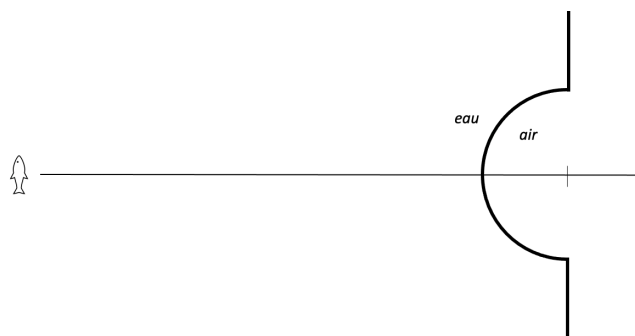




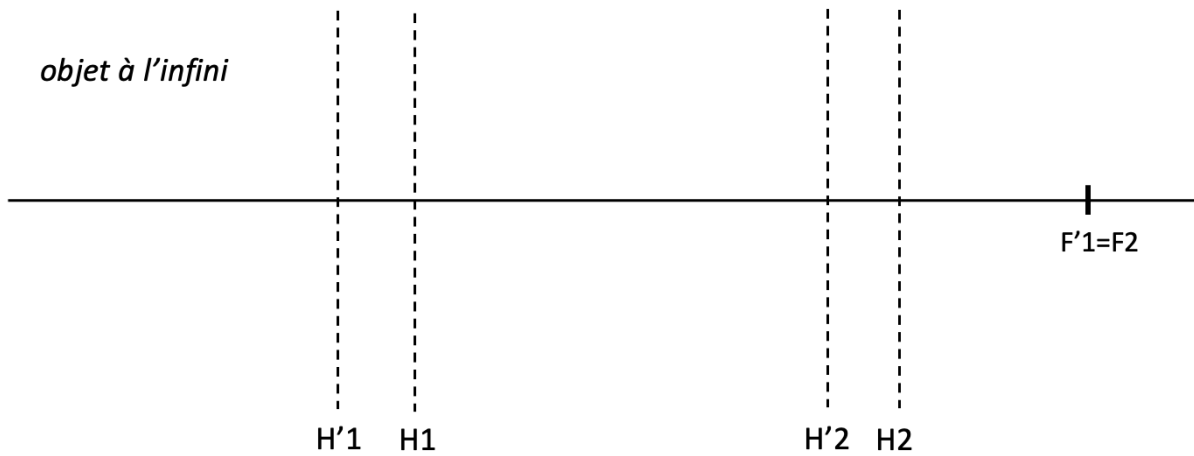
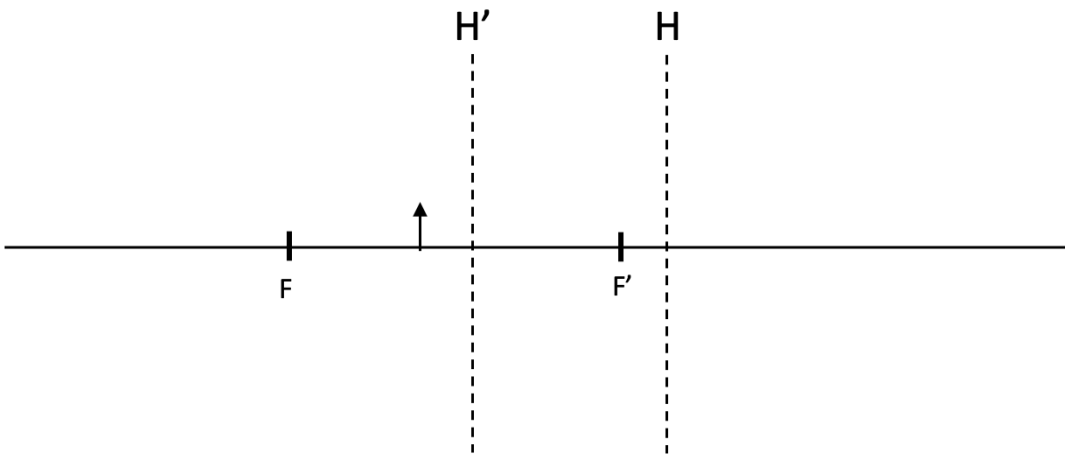
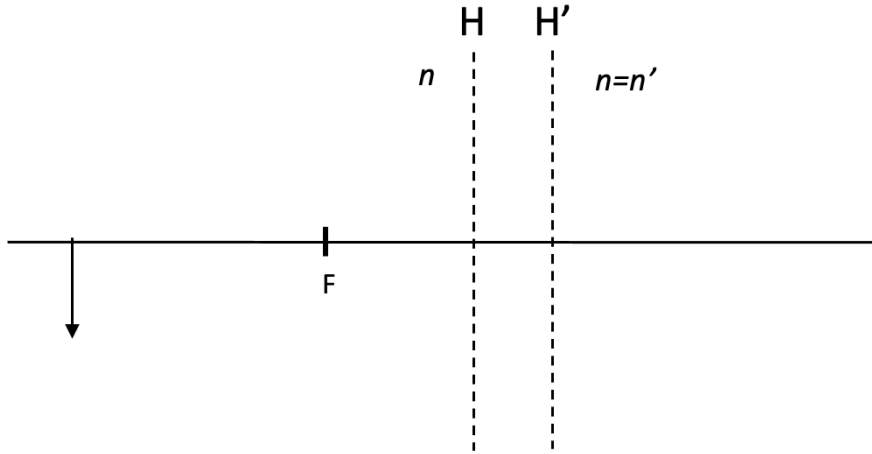
## Lentilles minces, systèmes centrés

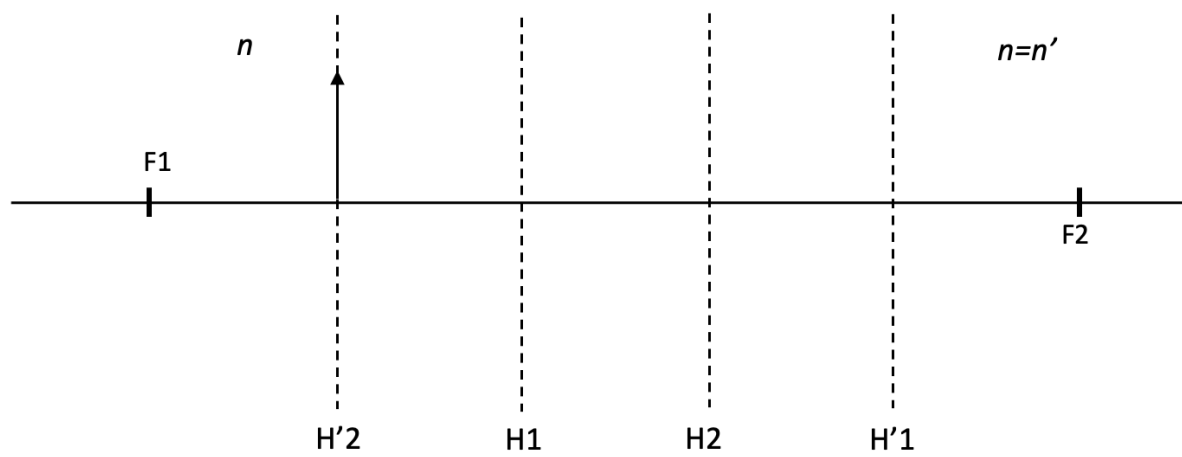
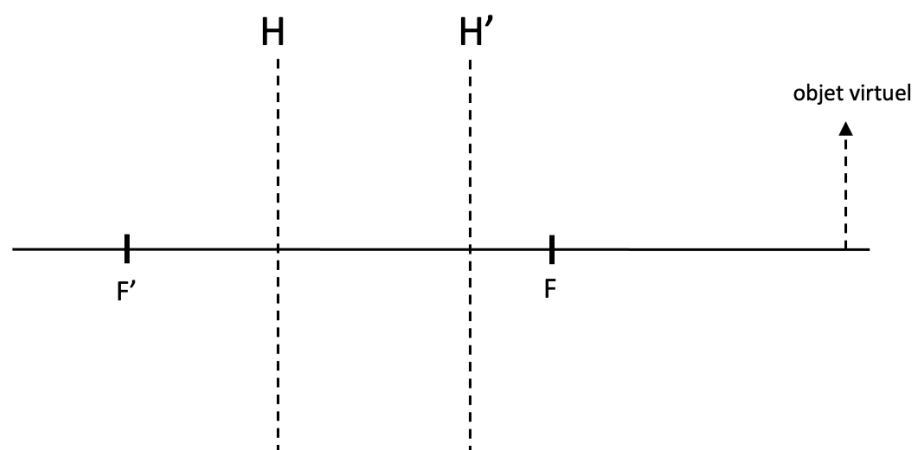
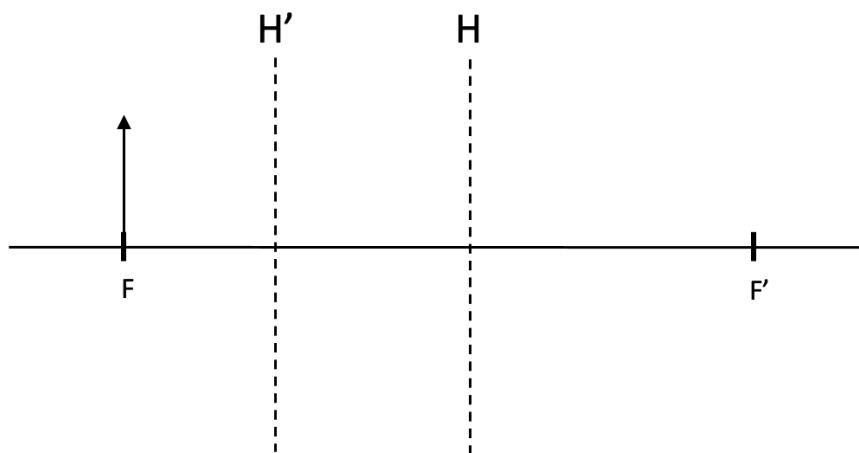
---

1. Le Soleil a un diamètre de  $1,4 \times 10^6$  km et est situé à  $1,5 \times 10^8$  km de la Terre. Quelle est le diamètre du spot de lumière focalisé par une lentille mince convergente, de distance focale 100 mm et de diamètre 20 mm ?
2. On vous demande de former à 1 mètre une tache lumineuse de diamètre 1 mm avec une LED de taille de diamètre 3 mm. Déterminer la nature, la focale et la position de la lentille mince nécessaire.
3. Le capteur carré d'un smartphone fait 5 mm de côté avec des pixels carrés de côté  $5 \mu\text{m}$ . L'objectif photo associé a une distance focale de 5 mm. Sur combien de pixel s'étale la tour Eiffel (300 m de haut) située à 5 km.
4. Une source lumineuse de diamètre  $100 \mu\text{m}$  est collimatée par une lentille de focale 1 mètre. Quel est le diamètre de l'empreinte du faisceau à 1 km ?
5. Un système optique centré de distance focale 1500 mm et d'interstice  $\overline{HH'} = -76 \text{ mm}$ , fait l'image d'un objet situé à l'infini vu sous un angle de  $56''$  (objet et image sont dans l'air). Déterminer la taille de l'image et sa distance par rapport au plans principaux. Faites un dessin.
6. Un poisson de taille 20 cm est à 5 mètres d'une vitre sphérique. La vitre est convexe (la lumière se propage du poisson vers la vitre) et son rayon de courbure est +1 mètre. On néglige son épaisseur. Déterminer la position et la taille de l'image du poisson. Faites un schéma en positionnant les foyers.



7. Faire les tracés de rayons suivants.







## Lunette afocale

---

On considère une lunette afocale formée des éléments optiques suivants,

- Un objectif de focale 800 mm et de diamètre 80 mm assimilé à une lentille mince convergente
- Un oculaire de focale 80 mm et de diamètre 30 mm assimilé à une lentille mince convergente

1. Faire un schéma de principe de la lunette et écrire les conjugaisons.
2. Déterminez la distance entre l'objectif et l'oculaire.
3. Exprimer la taille de l'image intermédiaire fournie par l'objectif d'un objet vu à l'infini sous un angle  $\theta$ , puis exprimer l'angle  $\theta'$  sous lequel est vue l'image intermédiaire à travers l'oculaire. En déduire une expression du grossissement de la lunette.
4. Sur l'annexe (échelle transversale  $\times 2$  et longitudinale  $\times 1/4$ ) faire un schéma de la lunette complète et tracer deux rayons, provenant d'un point objet à l'infini sur l'axe, qui s'appuient sur les bords de l'objectif et qui traversent toute la lunette.
5. Déterminer la position et le diamètre de la pupille d'entrée de la lunette.
6. Déterminer la position et le diamètre de la pupille de sortie. La positionner sur le schéma. Que constatez-vous par rapport à votre tracé de la question 4.
7. Trouver une relation entre le grossissement de la lunette et les diamètres des pupilles d'entrée et de sortie.
8. Vérifier la relation précédente avec une vraie paire de jumelles fournie par votre enseignant·e.





Echelle longitudinale :  $\times 1/4$   
Echelle transversale :  $\times 2$

Lunette afocale

OBJECTIF





## Microscope

---

On réalise un microscope avec un objectif de grandissement  $\times 3$ , de focale 40 mm, de diamètre 6 mm, et avec un oculaire de grossissement commercial  $\times 20$ , de diamètre 8 mm. Les deux lentilles sont considérées minces et convergentes. Le diaphragme d'ouverture (pupille du système) est un diaphragme de diamètre 4 mm placé au foyer image de l'objectif.

1. Faire un schéma de principe et écrire les conjugaisons.
2. Déterminer la distance entre le centre de l'objectif et son plan objet, et la distance entre le centre de l'objectif et son plan image.
3. Déterminer la focale de l'oculaire à l'aide du grossissement commercial  $G_{c-oculaire}$ .  
*Le grossissement commercial est défini comme le rapport entre l'angle  $\theta'$  sous lequel est vu l'image à travers l'instrument de l'objet (de taille  $y$ ) et l'angle  $\theta_{250}$  sous lequel serait vu l'objet s'il était placé à 250 mm de l'œil sans instrument.*  $G_{c-oculaire} = \frac{\theta'}{\theta_{250}}$ .
4. Sur l'annexe (échelle transversale  $\times 20$  et longitudinale  $\times 1$ ), tracer deux rayons provenant d'un objet ponctuel placé au foyer du microscope sur l'axe et traversant l'instrument dans sa totalité en s'appuyant sur les deux bords du diaphragme d'ouverture.
5. Où se trouve la pupille d'entrée du microscope et sous quel angle est-elle vue ?
6. Déterminer la position et la taille  $\phi_{PS}$  de la pupille de sortie et la positionner sur le schéma.
7. Sur l'annexe, tracer deux rayons qui s'appuient sur les deux bords de la pupille d'entrée, pour un point objet provenant d'un bord du champ de pleine lumière et qui traversent l'ensemble du microscope.
8. Faites le tracé en bord de champ total et comparer votre résultat à l'expression approchée  $\phi_{CT} \approx \phi_{oculaire}/g_y$  (expression que vous pourrez retrouver analytiquement).



Echelle longitudinale :  $\times 1$   
Echelle transversale :  $\times 20$

Microscope



A



## Objectif de Gauss

---

L'objectif de Gauss est un objectif symétrique constitué de deux lentilles minces convergentes identiques  $L_1$  et  $L_2$  de centre respectif  $O_1$  et  $O_2$ , placées symétriquement par rapport au diaphragme d'ouverture  $D$ . Cet objectif est utilisé avec un capteur constitué de  $512 \times 512$  pixels carrés de  $20 \mu\text{m}$  de côté et travaille pour un objet placé à l'infini. Les lentilles  $L_1$  et  $L_2$  sont séparées de 40 mm et leurs focales identiques valent  $f'_1 = f'_2 = 60 \text{ mm}$ . Le diamètre du diaphragme  $D$  est de 11,25 mm. La longueur d'onde de travail est  $\lambda = 500 \text{ nm}$ .

1. Faire un schéma de principe et écrire les conjugaisons.
2. Montrer que  $\overline{O_2F'} = -\overline{O_1F} = 15 \text{ mm}$ .
3. Déterminer la distance focale  $f'$  de l'objectif et déterminer la position des points cardinaux  $H, H', F, F'$ .
4. Quelle est la taille de l'image d'un objet vu sous un diamètre angulaire de  $1^\circ$ .
5. Calculer les positions et les diamètres des pupilles d'entrée et de sortie de l'objectif.
6. Sur l'annexe (échelle longitudinale  $\times 2$  et échelle transversale  $\times 6$ ), vérifier par une construction vos calculs de pupilles. Positionner les foyers, et les plans principaux.
7. Tracer deux rayons, pour un point objet à l'infini sur l'axe, qui s'appuient sur les deux bords de la pupille d'entrée et qui traversent l'ensemble de l'objectif.

On impose que le diamètre de champ de pleine lumière soit égal à la diagonale du capteur.

8. En déduire le rayon de champ du champ de pleine lumière dans l'espace image.
9. Calculer le rayon du champ de pleine lumière dans l'espace intermédiaire et le rayon angulaire dans l'espace objet.
10. Tracer deux rayons qui s'appuient sur les deux bords de la pupille d'entrée pour un point objet à l'infini sur l'un des bords du champ de pleine lumière et qui traversent l'ensemble de l'objectif. En déduire par une mesure à la règle les diamètres minima des lentilles pour obtenir ce champ.
11. Déterminer les résolutions transversales dans l'espace objet compte tenu de la diffraction et de l'échantillonnage dû aux pixels. Commentez vos résultats.
12. Déterminer la distance hyperfocale de l'objectif (la distance hyperfocale est la distance minimale d'approche par rapport à l'objectif pour que l'image reste aussi nette qu'à l'infini).





Echelle longitudinale :  $\times 2$   
Echelle transversale :  $\times 6$

Objectif de Gauss

$O_1$

$L_1$



**Photométrie (2 séances)**

---

**Exercice 1**

Les normes d'éclairage public imposent un éclairage moyen sur un trottoir de 15 lux. On considère un lampadaire équivalent à une source ponctuelle isotrope émettant  $10^4$  lumens suspendue à 5 m au-dessus du sol.

1. Calculer l'intensité de la source.
2. Calculer l'éclairage au sol situé à la verticale du lampadaire et à 5 mètres.

**Exercice 2**

Soit une source étendue lambertienne de diamètre 20 mm et de luminance  $L = 10 \text{ W/cm}^2/\text{sr}$ .

1. Calculer le flux émis par la source dans le demi-espace vers l'avant de la source.

On place une photodiode circulaire, de diamètre 5 mm, sur l'axe de cette source à 1 mètre.

2. Calculer le flux reçu par cette photodiode.
3. On ajoute entre la source et la photodiode, à 50 cm de la source un trou de 1 mm de diamètre. Que devient le flux reçu par la photodiode ?

**Exercice 3**

Le Soleil est considéré comme une source étendue lambertienne de diamètre apparent  $\beta = 0,5^\circ$  dont la luminance est de  $2,2 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ . Le ciel est considéré une source étendue et possède une luminance moyenne sur un demi-espace de  $10 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ .

1. Déterminer l'éclairage au niveau du sol si le soleil est exactement au zénith et si l'angle entre le zénith et la direction du Soleil fait un angle  $\theta$  ?
2. Déterminer l'intensité équivalente du Soleil (distance Terre-Soleil =  $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ ).
3. Déterminer l'éclairage au sol dû au ciel.

*max 1<sup>ère</sup> séance*

On utilise un système optique aplanétique ouvert à  $f/N$  comme concentrateur solaire.

4. Déterminer l'éclairage obtenu au foyer du concentrateur.
5. Déterminer une expression du facteur de concentration (gain en éclairage entre le sol et le foyer) en fonction du nombre d'ouverture et de l'angle sous lequel on voit le Soleil depuis la Terre.
6. Comment augmenter ce facteur de concentration ? Pourquoi ne peut-il pas dépasser une valeur maximale que l'on calculera ?

**Exercice 4**

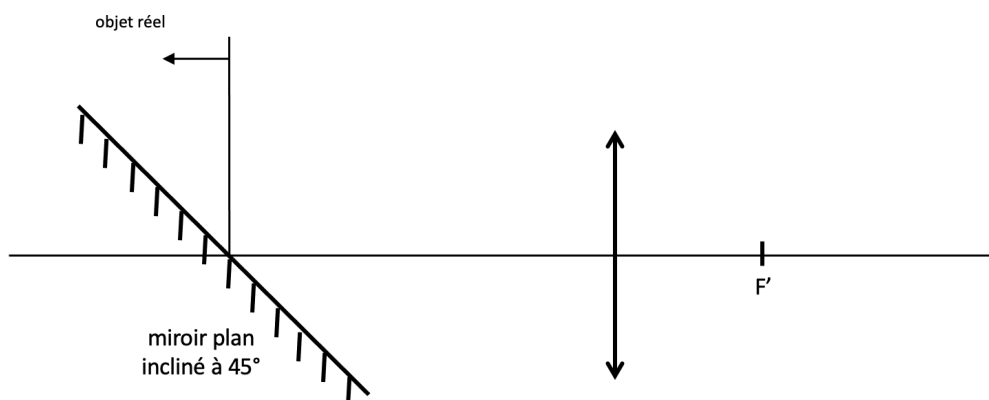
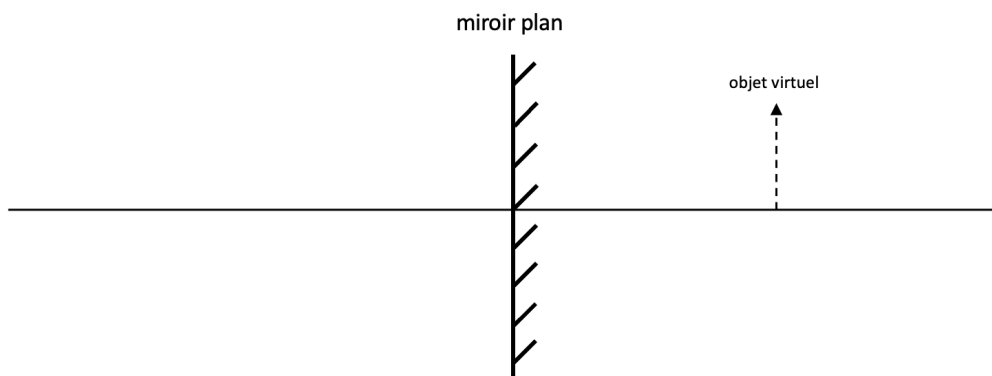
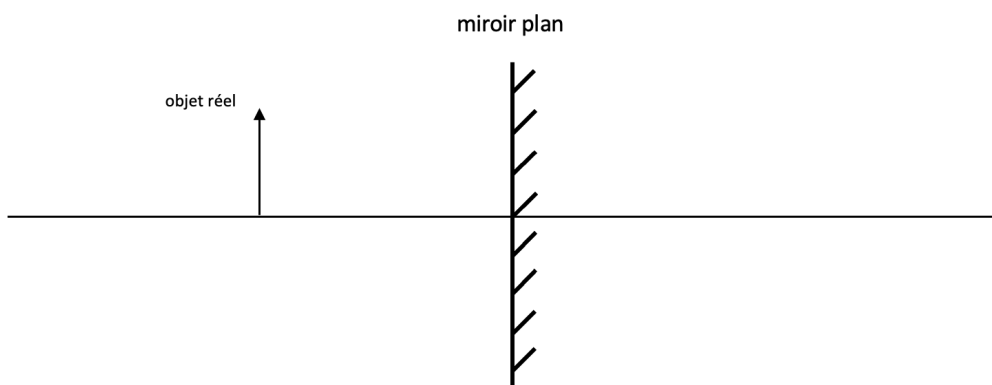
On souhaite capter un maximum de flux en provenance d'une source circulaire lambertienne de diamètre 1 mm, de luminance  $1 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ , sur un détecteur circulaire de diamètre 2 mm placé à 1 mètre. Dans les 3 cas suivants, déterminer le flux maximum capté par le détecteur.

1. On ne place aucune lentille entre la source et le détecteur.
2. On conjugue la source sur le détecteur avec une lentille de diamètre 15 mm dont vous déterminerez la focale (taux de transmission de 98%).
3. On utilise une deuxième lentille de diamètre 15 mm sachant que la 1<sup>ère</sup> lentille conjugue la source sur la 2<sup>ème</sup> lentille et la 2<sup>ème</sup> lentille conjugue la 1<sup>ère</sup> lentille sur le détecteur. Déterminer les focales.



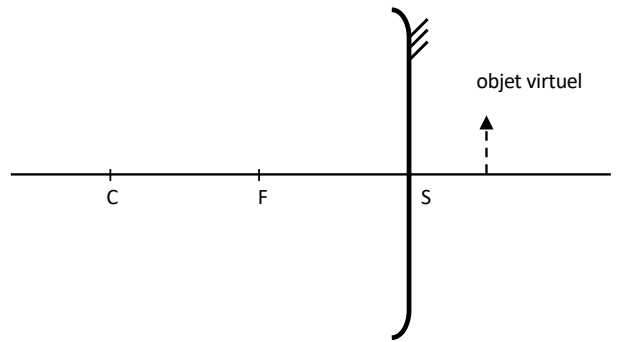
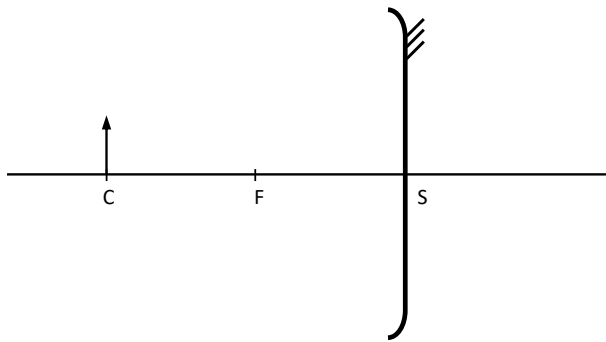
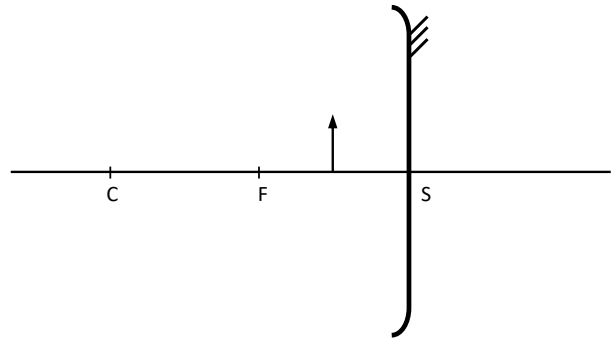
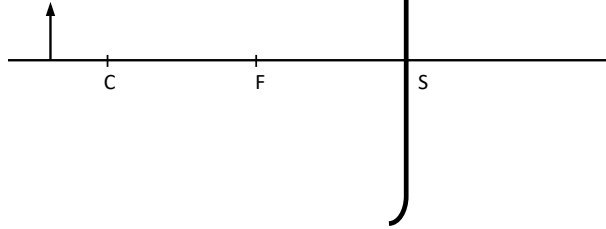
# Miroirs

1. Faire les tracés de rayons ci-dessous.
2. On souhaite concevoir un miroir donnant d'un objet réel placé à 2 cm une image de même sens et deux fois plus grande. Déterminer son rayon de courbure.
3. On forme l'image réelle du Soleil, de diamètre angulaire  $30'$  grâce à un miroir sphérique de rayon de courbure 1800 mm. Où se trouve cette image ? Quelle est sa taille ?
4. Vous disposez d'un miroir concave. En le plaçant à 250 mm de votre œil vous apercevez votre visage avec un grandissement de  $-0.064$ . Déterminer son rayon de courbure. Vous le remplacez par un miroir convexe de même courbure. Qu'observez-vous en le plaçant à la même distance ?

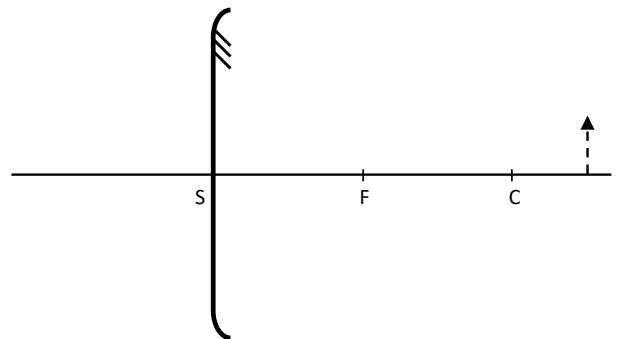
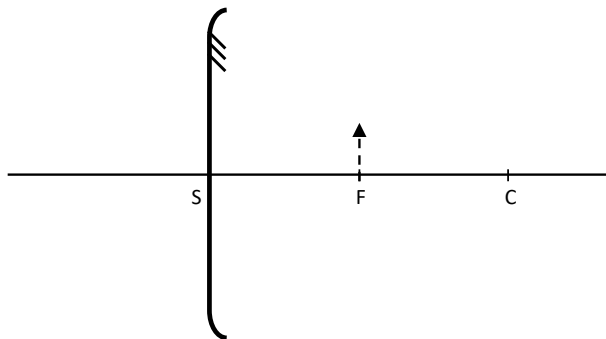
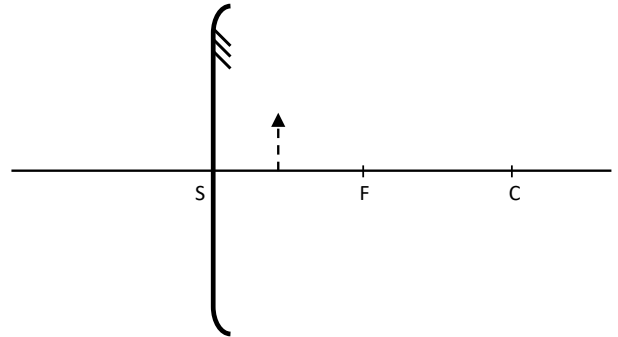
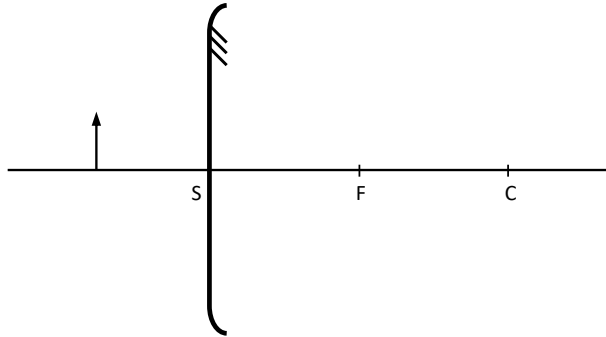


miroir concave

objet réel



miroir convexe



## Télescopes à miroirs (3 séances)

---

### Configuration Cassegrain

Un télescope à deux miroirs de type Cassegrain est constitué d'un miroir primaire concave et d'un miroir secondaire convexe. On appelle  $f$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  les focales du télescope, du miroir primaire et du miroir secondaire. Le télescope est réglé pour un objet à l'infini vu sous un angle  $\theta$  et projette l'image finale sur un capteur matriciel. On considère les caractéristiques suivantes,

- Miroir primaire  $M_1$  concave :  $R_1 = 250$  mm
- Miroir secondaire  $M_2$  convexe :  $R_2 = 100$  mm
- Focale totale = 500 mm et nombre d'ouverture  $N = 5$
- Pupille d'entrée : diaphragme placé à 250 mm en avant de  $M_1$
- Capteur matriciel de 512 x 512 pixels carrés de 20 $\mu$ m de côté
- Coefficient de réflexion de chaque miroir : 98%

1. Faire un schéma de principe du télescope Cassegrain en plaçant les foyers  $F_1$ ,  $F_2$ , le foyer du télescope  $F'$  et le plan principal  $H'$ . En déduire le signe de la focale du télescope.
2. Quelle est la suite des conjugaisons réalisées par les deux miroirs du télescope pour un objet à l'infini vu sous un angle apparent  $\theta$  ? En déduire une relation entre  $f$ ,  $f_1$  et le grandissement transversal du miroir secondaire  $g_{M_2}$ .
3. A l'aide d'une formule de grandissement (pour le miroir secondaire), déterminer la distance entre les deux foyers  $F_1F_2$ , puis la distance entre les deux sommets des miroirs  $S_1S_2$  et la distance entre le miroir primaire et le foyer image  $S_1F'$ .
4. Retrouvez la distance entre les deux sommets des miroirs en dépliant entièrement le système (équivalent dioptrique) et en appliquant la formule de Gullstrand.
5. Représentez le télescope sur un schéma (échelle transverse  $\times 1$  / longitudinale  $\times 1/2$ ). Puis tracer deux rayons, provenant d'un point à l'infini sur l'axe, à travers le système et s'appuyant sur les pupilles. Trouvez graphiquement la position de la pupille de sortie.
6. Calculez la position et le diamètre de la pupille de sortie du système.
7. Quel doit être le rayon minimum du champ de pleine lumière pour couvrir tout le détecteur ? En déduire le champ de pleine lumière dans l'espace intermédiaire et dans l'espace objet.
8. Tracer un faisceau de rayons provenant d'un point à l'infini s'appuyant sur la pupille d'entrée et dont l'image par le système donne un point au bord du champ de pleine lumière.
9. Déterminer les diamètres minima du miroir primaire et de son ouverture circulaire centrale, du miroir secondaire et de sa monture (spécifiée également pour arrêter les rayons parasites). En déduire le taux d'obturation de ce télescope ?
10. Comparez la limite de diffraction (le diamètre de la tâche d'Airy) et la dimension des pixels pour une longueur d'onde de 500 nm. En déduire la résolution dans l'espace objet.
11. Quel est l'éclairement dans le plan image pour un objet étendu placé à l'infini sur l'axe de diamètre angulaire  $1^\circ$  et de luminance uniforme  $L=10\text{kW/m}^2/\text{sr}$  ?





Echelle longitudinale :  $\frac{1}{2}$   
Echelle transversale : 1

# Télescope Cassegrain

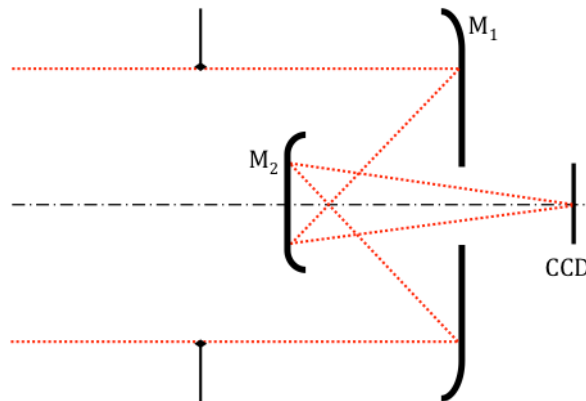


$C_1$



## Configuration Gregory

Un télescope de Grégory est constitué d'un miroir primaire concave  $M_1$  de rayon de courbure **500 mm** et d'un miroir secondaire concave  $M_2$  de rayon de courbure **140 mm**. On veut que la focale du télescope soit en valeur absolue de **1000 mm**. La pupille d'entrée est placée au centre de courbure du miroir  $M_1$  et son diamètre est **100 mm**.



On montre (mais vous devez essayer de retrouver ces résultats) que le grandissement du miroir secondaire est  $-4$ , que la distance entre les miroirs est  $337,5$  mm et que la distance entre le miroir primaire et le foyer image du télescope est  $+12,5$  mm.

1. Sur l'annexe (échelle transverse  $\times 1$  / longitudinale  $\times 1/2$ ) positionnez graphiquement la pupille de sortie (vous pourrez vérifier chez vous par le calcul son diamètre et sa position).
2. Tracer deux rayons provenant d'un objet ponctuel à l'infini sur l'axe s'appuyant sur les deux bords de la pupille d'entrée et traversant l'ensemble du télescope.
3. On souhaite couvrir un champ de pleine lumière objet circulaire de diamètre angulaire  $2^\circ$ . Quelle est la taille du champ image correspondant ?
4. Sur l'annexe tracer deux rayons issus du bord du champ de pleine lumière et traversant l'ensemble du télescope.
5. Déterminer en mesurant à la règle le diamètre du miroir  $M_2$ , le diamètre de  $M_1$  et le diamètre du trou dans  $M_1$  pour obtenir ce champ. En déduire le taux d'obturation.
6. La distance entre les miroirs  $M_1M_2$  peut varier dans le temps à cause de dilatations d'une petite quantité  $\varepsilon$ . En supposant que la distance entre le miroir  $M_1$  et le détecteur reste fixe (pixel à  $20 \mu\text{m}$ ), quelle variation maximale  $\varepsilon$  peut-on tolérer pour que l'image d'un point à l'infini reste nette sur le détecteur ?



Echelle longitudinale :  $\frac{1}{2}$   
Echelle transversale : 1

Télescope Grégory



$C_1$

