



Optique Instrumentale

Sébastien de Rossi

de septembre à décembre

- 16 Cours Magistraux de 1h30
- 13 Travaux Dirigés de 1h30

Equipe pédagogique

- | | |
|----------------------|--|
| • Sébastien de Rossi | enseignant-chercheur LCF (12 CM ; 13 TD) |
| • Guillaume Dupuis | enseignant-chercheur ISMO (4 CM ; 13 TD) |
| • Jeanne Bernard | professeure agrégée IOGS (13 TD) |
| • Alice Fontbonne | chercheuse ONERA (13 TD) |
| • Gonzague Bonnin | doctorant LCF (13 TD) |
| • Nicolas Guénaux | doctorant CEA (13 TD) |

Evaluation

- **1 partiel 3h sur table le 22 octobre**
 - **1 examen 3h sur table le 8 janvier**
- feuille A4 manuscrite recto verso
calculatrice autorisée

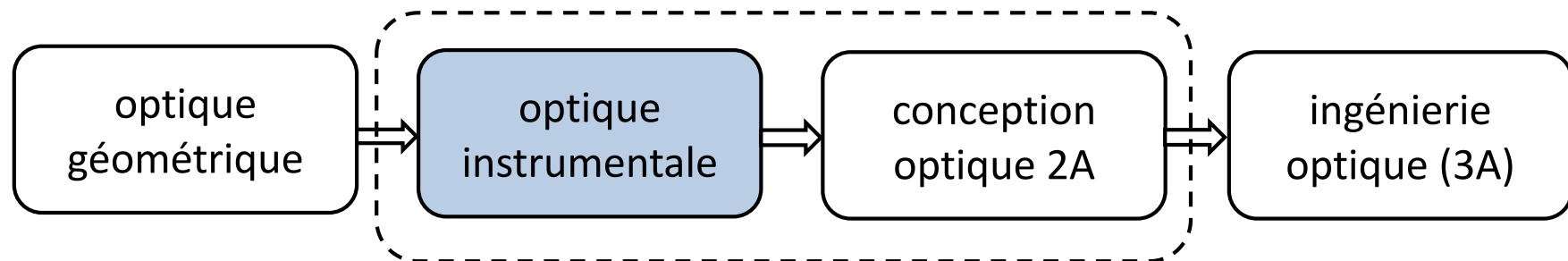
$$note\ finale = sup \left\{ examen ; \frac{examen + partiel}{2} \right\}$$

UE photonique 1 = Examen OI 70%
 + Examen Colorimétrie 10%
 + TP focométrie 20%

Objectifs pédagogiques

Ce cours permet de comprendre la **formation des images** dans les instruments d'optique en se limitant essentiellement au domaine de **l'optique paraxiale**. Il définit les limitations géométriques dans les instruments et fournit des éléments de **photométrie**.

Ce cours sert de prérequis fondamental pour la conception optique abordée en 2^{ème} année.



Documents pédagogiques

<https://lense.institutoptique.fr/optique-instrumentale-s5/>

notes de cours

planches de cours

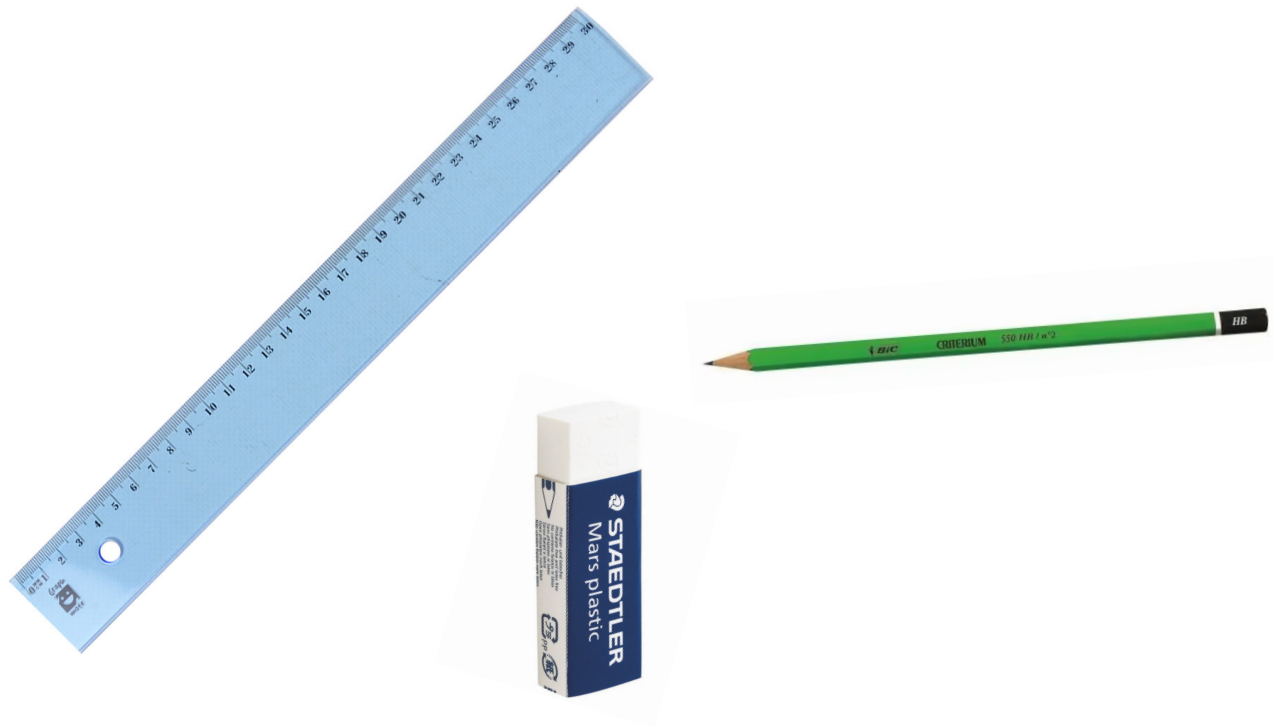
sujets et corrigés des TD

sujets examens passés

...



Matériel conseillé



De l'optique instrumentale historique à l'optique instrumentale moderne...



amélioration de la lunette dioptrique
Galilée, 1609
©Leemage



Extremely Large Telescope
1^{ère} lumière, 2029
©ESO



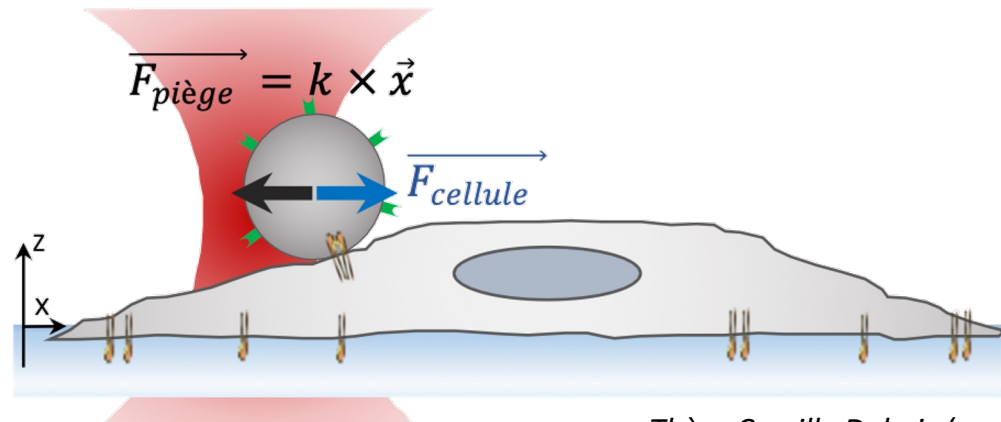
- Biophotonique
- Gaz Quantiques
- Imagerie et Information
- Lasers
- Nanophotonique
- Optique Quantique
- Optique XUV
- Photonique Industrielle



Charles Fabry (1867-1945)
*Directeur de L'Institut d'Optique
de 1919 à 1945*

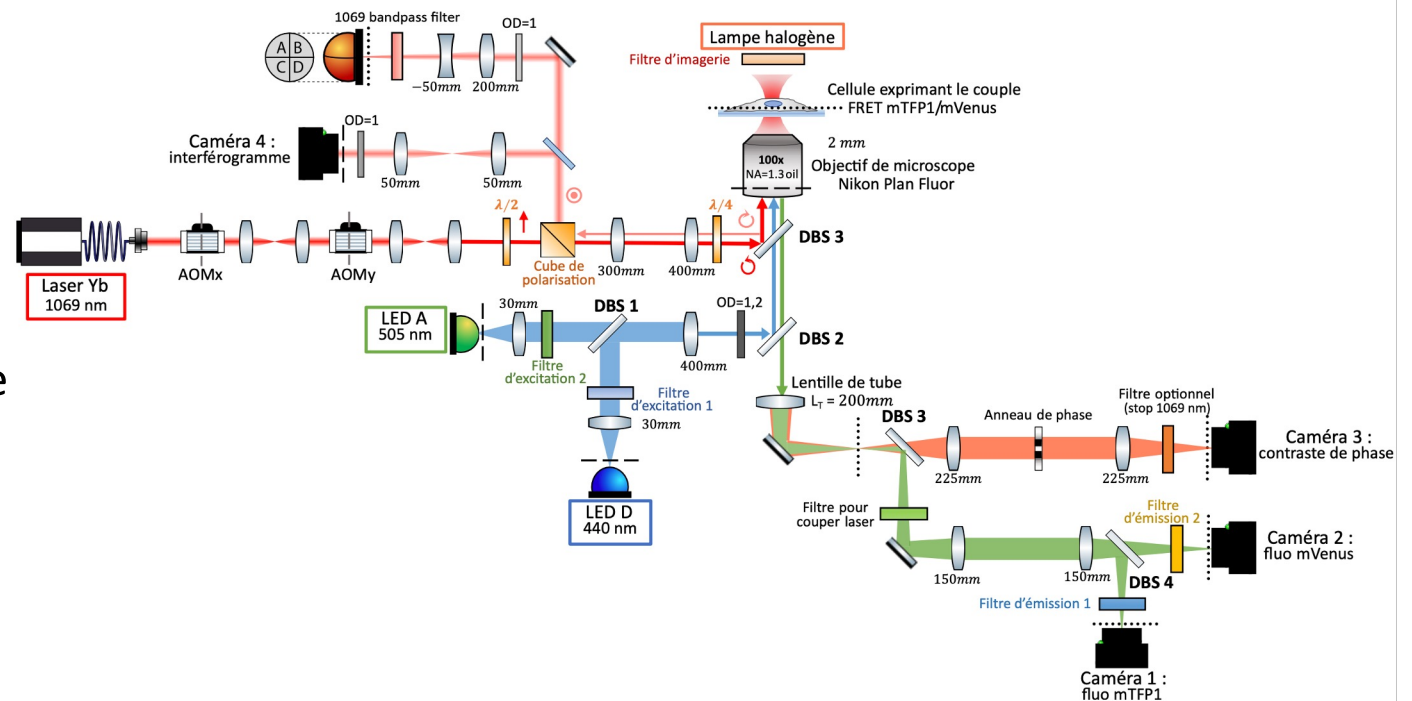


Pinces optiques pour la biomécanique



Thèse Camille Dubois (supop 2021)

- Biophotonique
- Gaz Quantiques
- Imagerie et Information
- Lasers
- Nanophotonique
- Optique Quantique
- Optique XUV
- Photonique Industrielle

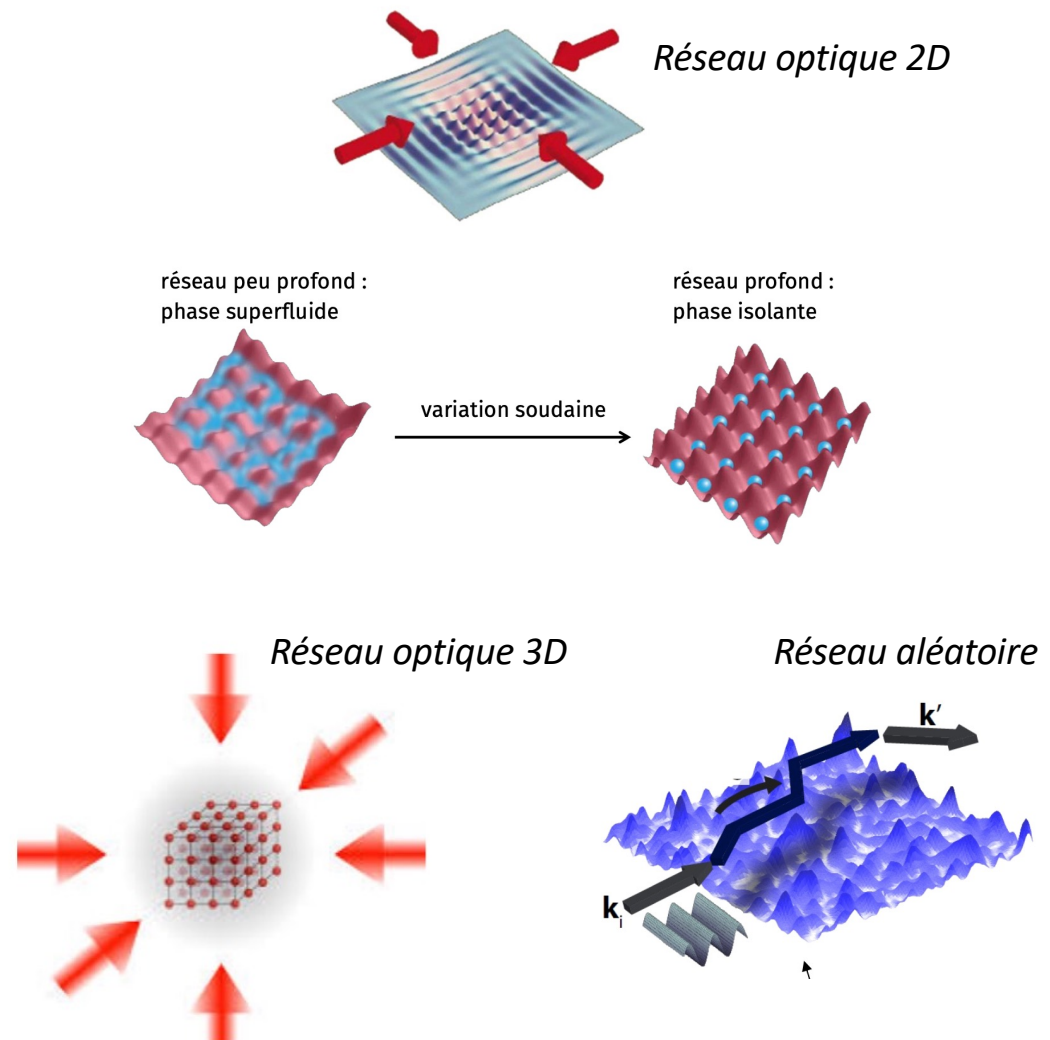




Etudes des propriétés quantiques de particules en interaction (simulateurs quantiques)



- Biophotonique
- **Gaz Quantiques**
- Imagerie et Information
- Lasers
- Nanophotonique
- Optique Quantique
- Optique XUV
- Photonique Industrielle

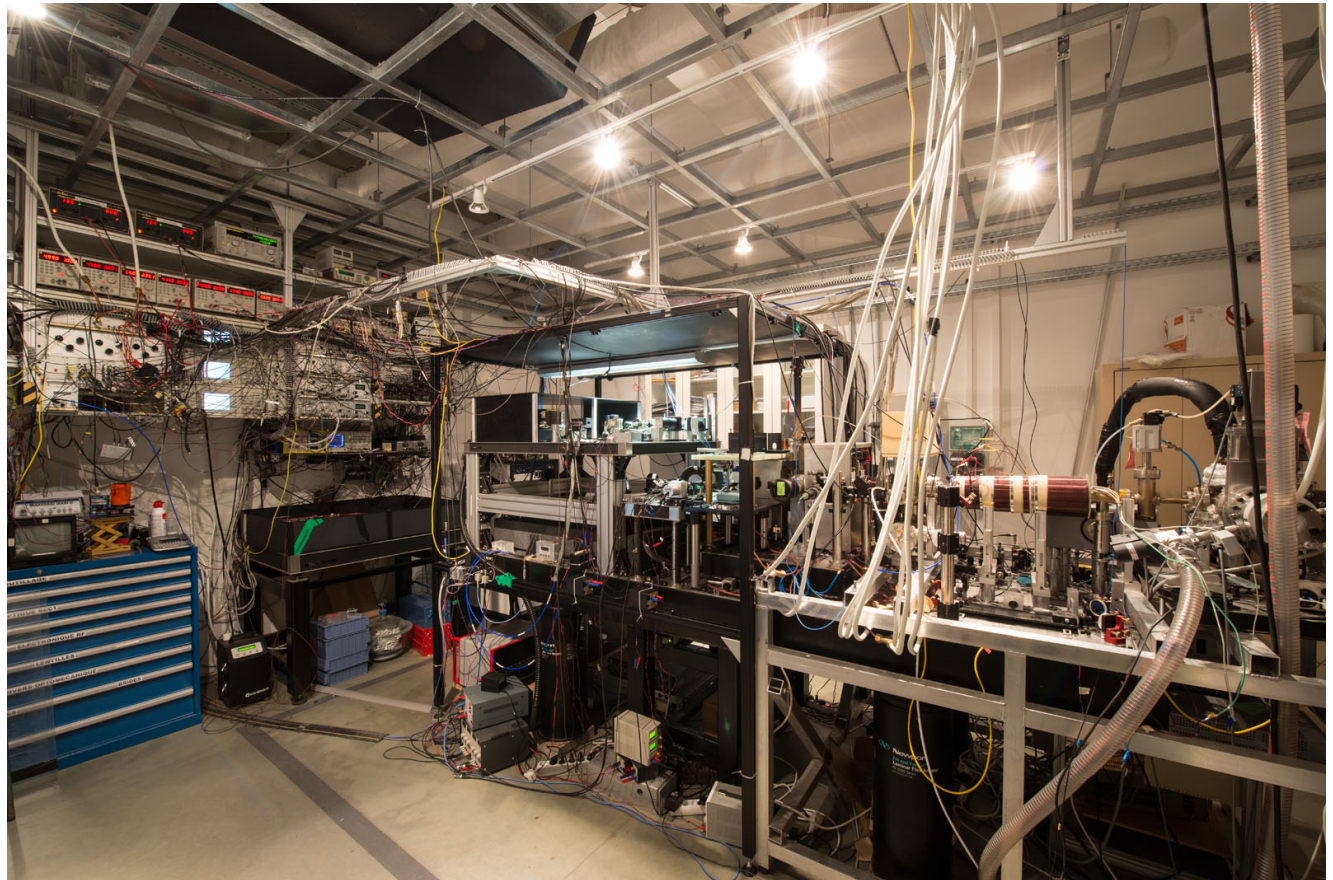




Etudes des propriétés quantiques de particules en interaction (simulateurs quantiques)



- Biophotonique
- **Gaz Quantiques**
- Imagerie et Information
- Lasers
- Nanophotonique
- Optique Quantique
- Optique XUV
- Photonique Industrielle

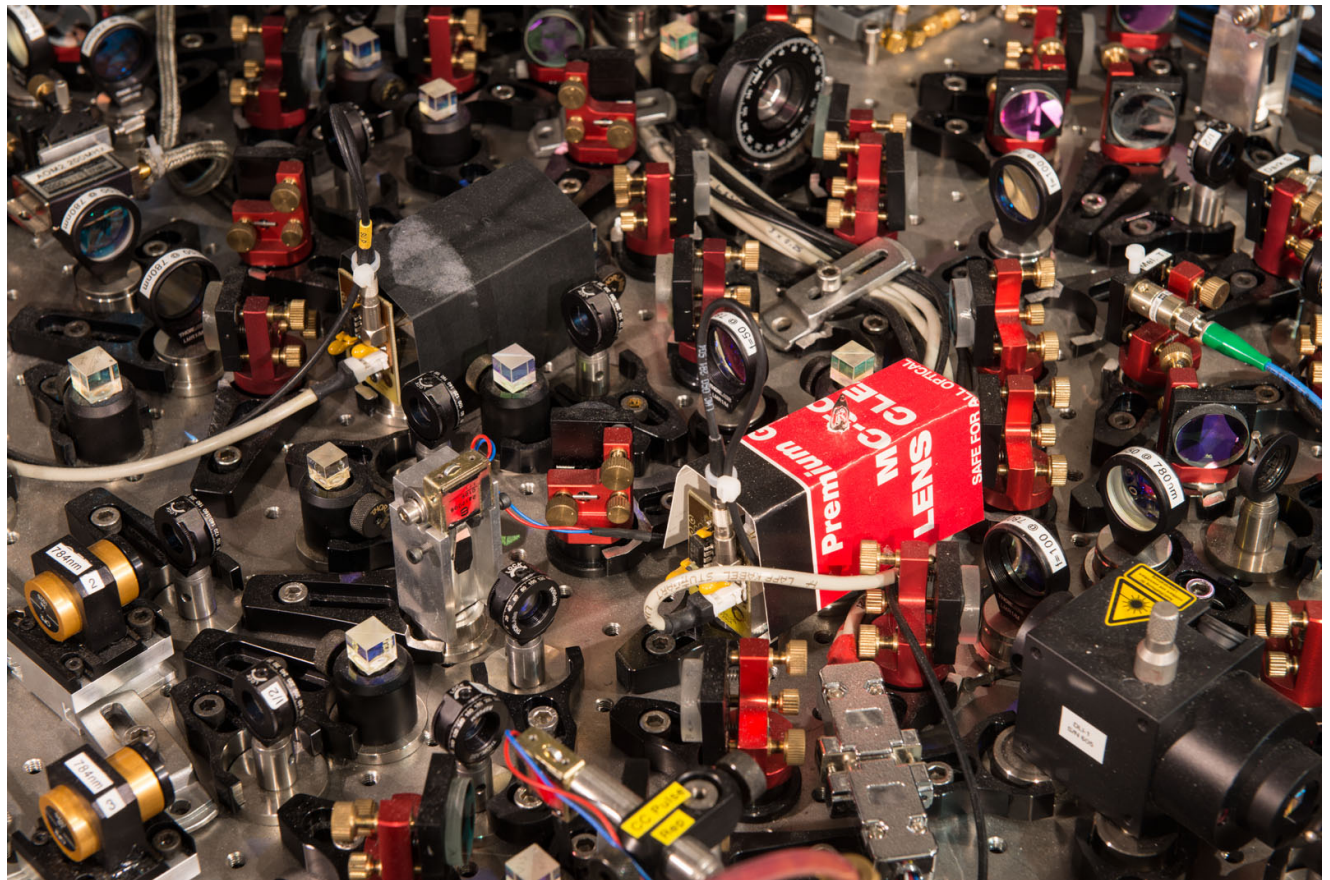




Etudes des propriétés quantiques de particules en interaction (simulateurs quantiques)



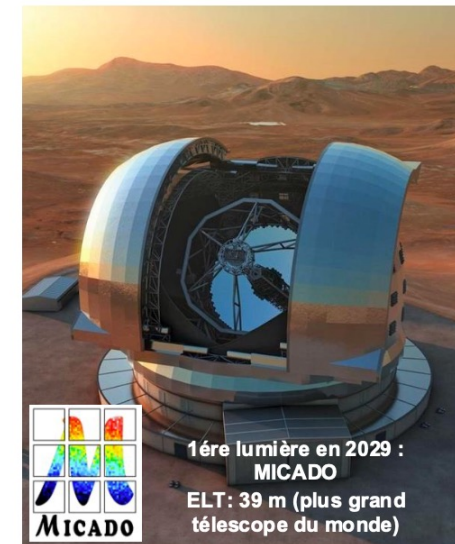
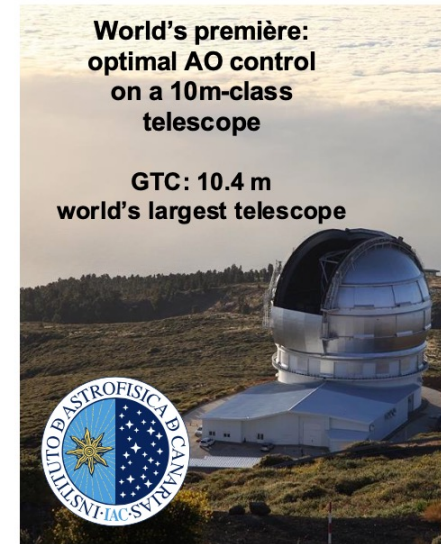
- Biophotonique
- **Gaz Quantiques**
- Imagerie et Information
- Lasers
- Nanophotonique
- Optique Quantique
- Optique XUV
- Photonique Industrielle





- Biophotonique
- Gaz Quantiques
- **Imagerie et Information**
- Lasers
- Nanophotonique
- Optique Quantique
- Optique XUV
- Photonique Industrielle

Contrôle commande haute performance pour l'optique adaptative

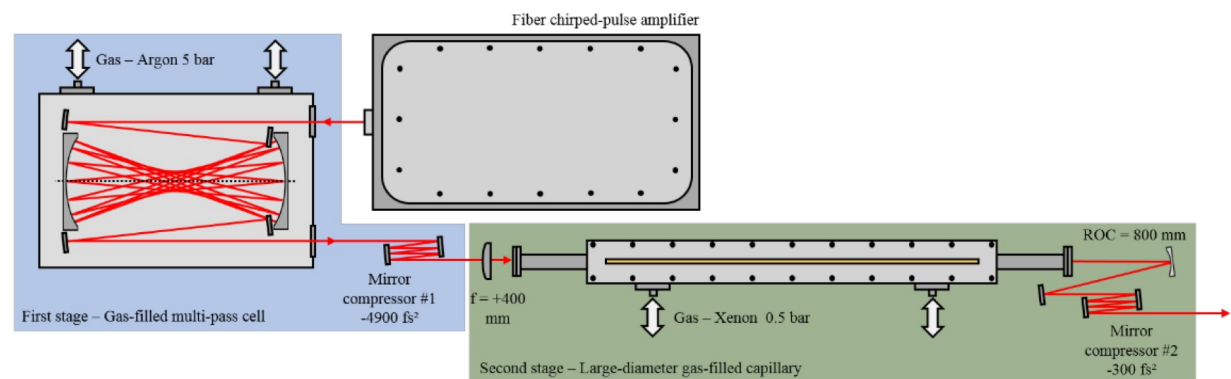
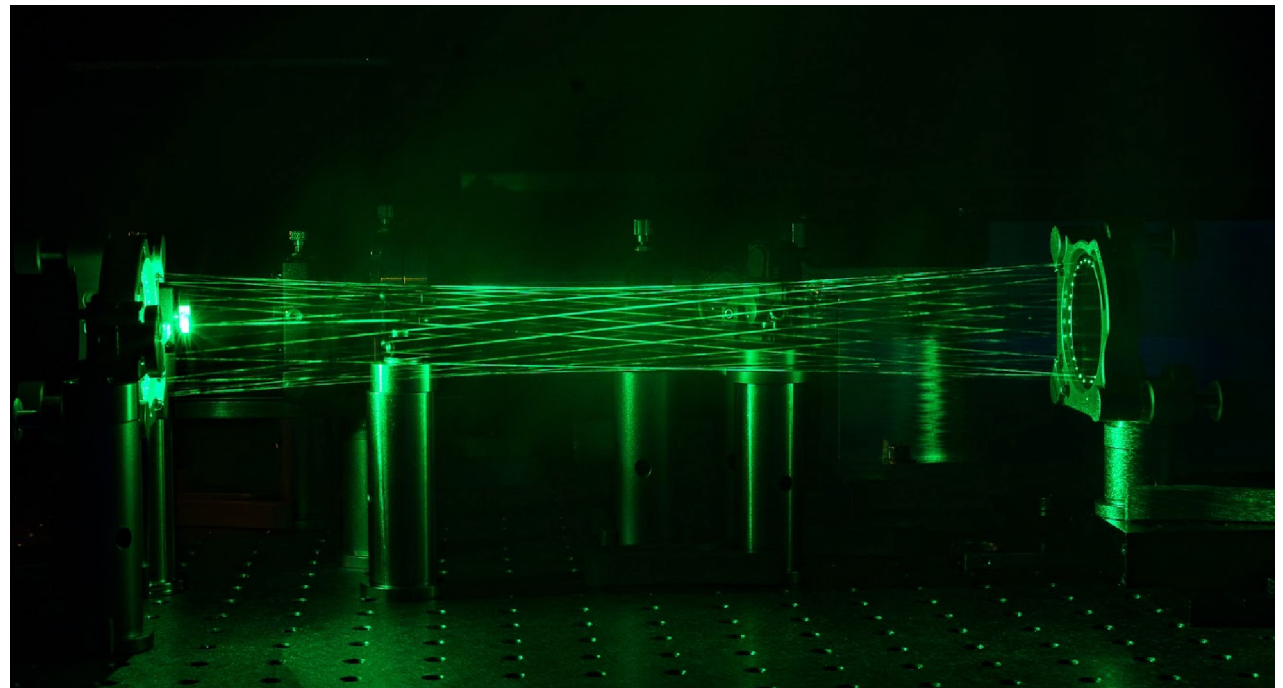




Développement de nouvelles sources

puissance – énergie – temps – spectre

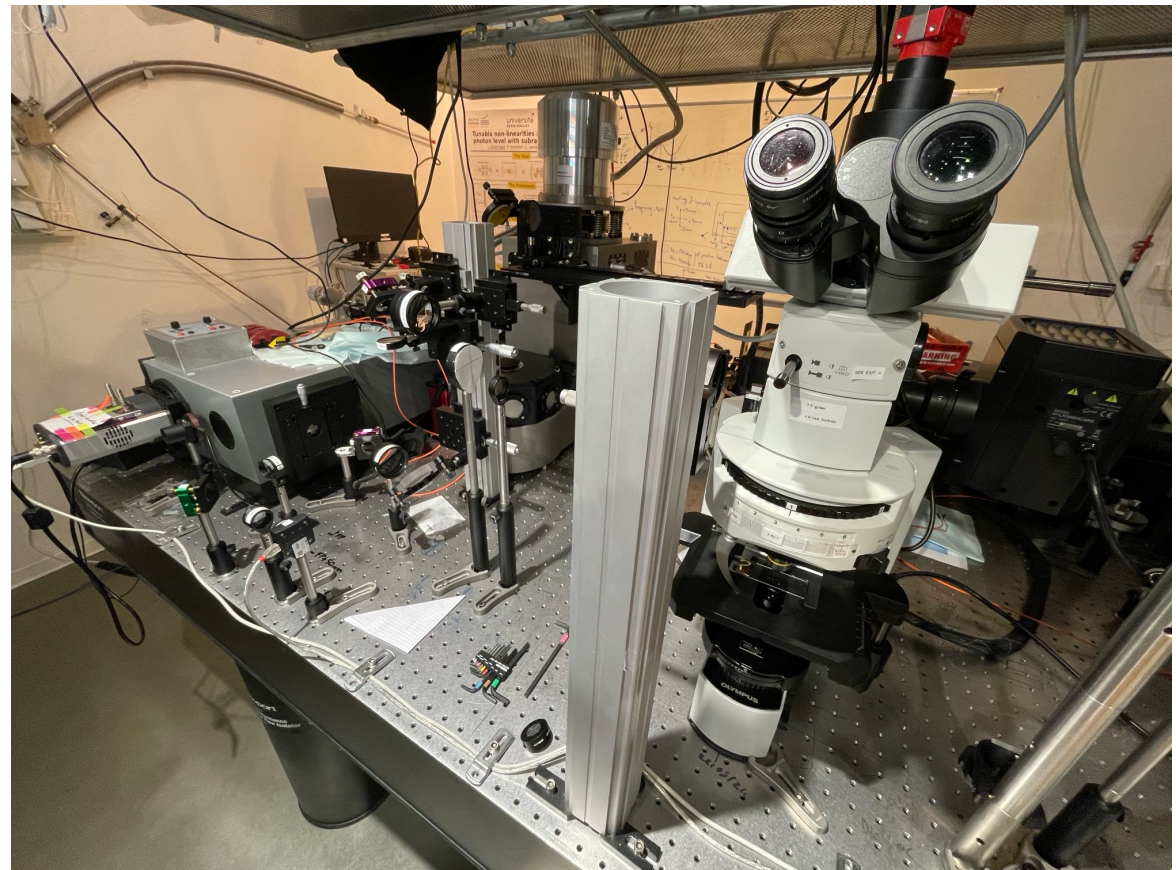
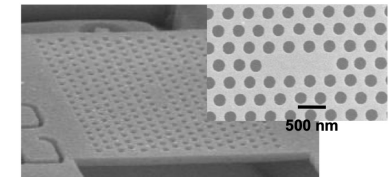
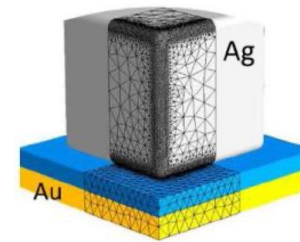
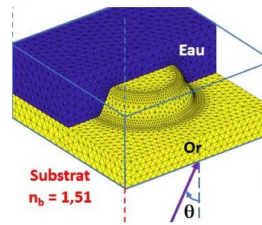
- Biophotonique
- Gaz Quantiques
- Imagerie et Information
- **Lasers**
- Nanophotonique
- Optique Quantique
- Optique XUV
- Photonique Industrielle





Contrôler l'émission de lumière avec des nano-dispositifs

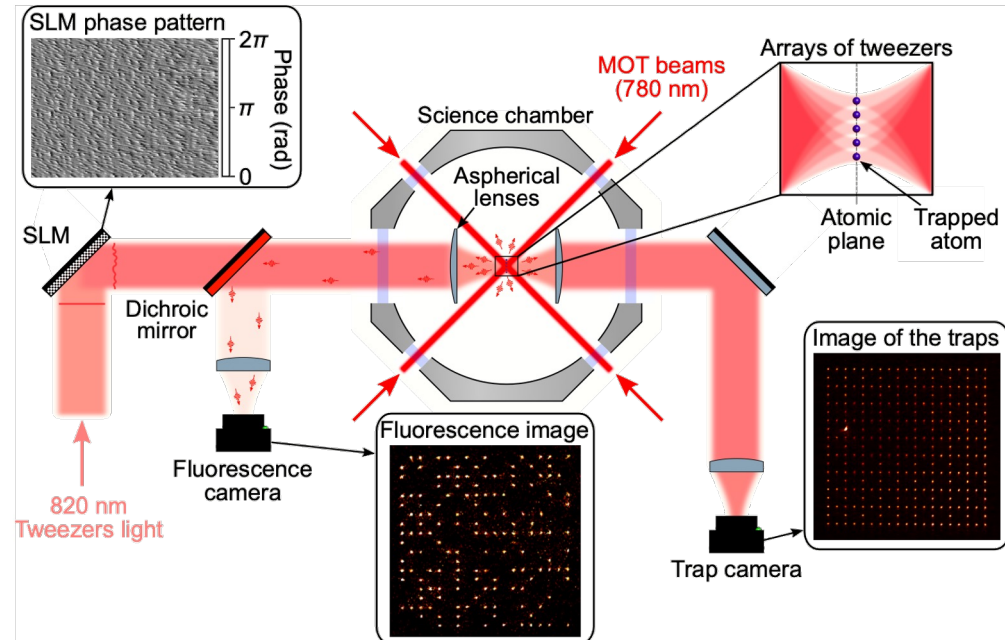
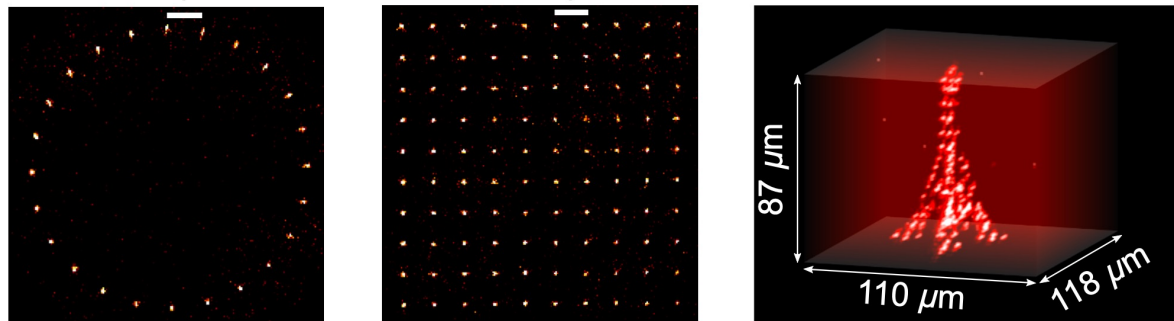
- Biophotonique
- Gaz Quantiques
- Imagerie et Information
- Lasers
- **Nanophotonique**
- Optique Quantique
- Optique XUV
- Photonique Industrielle





- Biophotonique
- Gaz Quantiques
- Imagerie et Information
- Lasers
- Nanophotonique
- **Optique Quantique**
- Optique XUV
- Photonique Industrielle

Pinces optiques pour les calculateurs quantiques



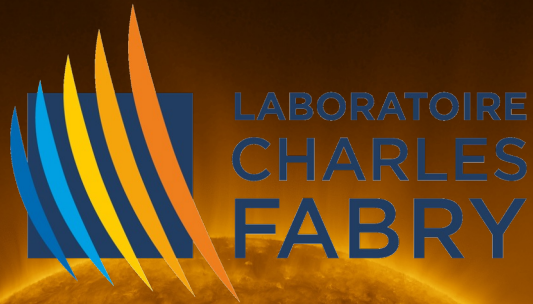
Thèse Guillaume Borner (supop 2020)



- Biophotonique
- Gaz Quantiques
- Imagerie et Information
- Lasers
- Nanophotonique
- **Optique Quantique**
- Optique XUV
- Photonique Industrielle

Pinces optiques pour les calculateurs quantiques





- Biophotonique
- Gaz Quantiques
- Imagerie et Information
- Lasers
- Nanophotonique
- Optique Quantique
- **Optique XUV**
- Photonique Industrielle

mars 2025

Voir le Soleil dans l'extrême ultraviolet



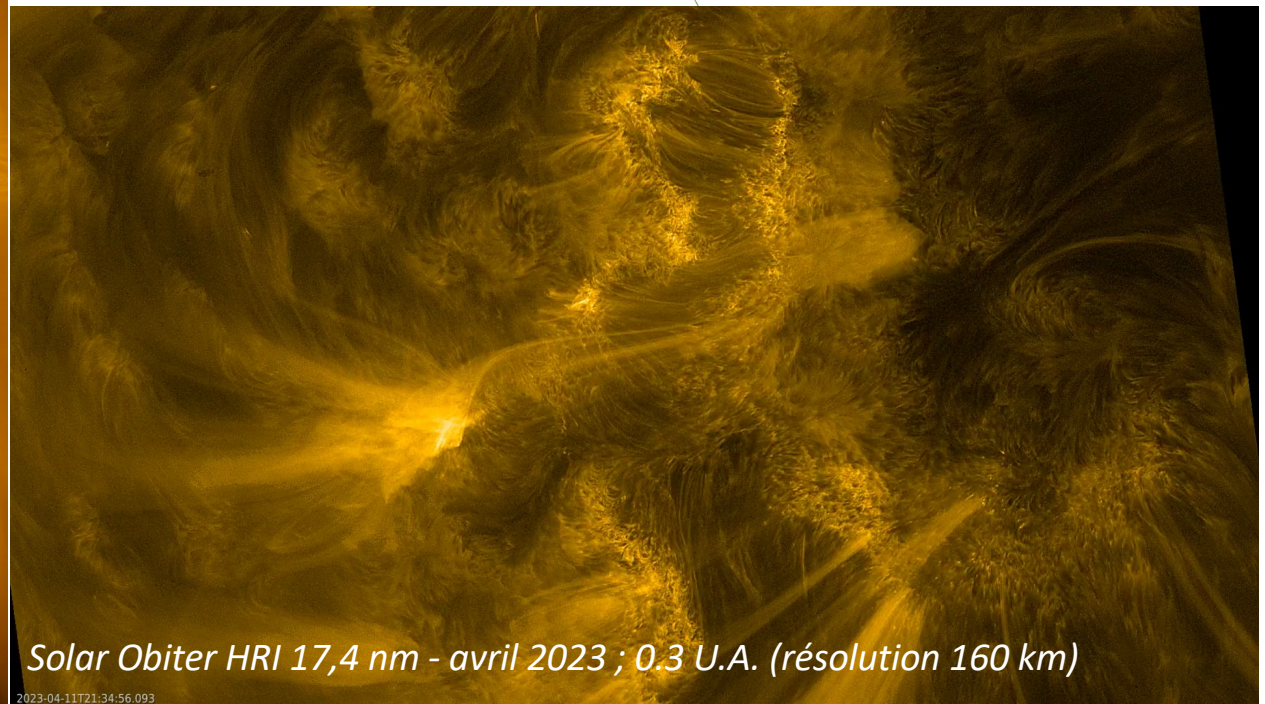
SOHO 1995-2025



STEREO 2006



SOLAR ORBITER 2020



Solar Obiter HRI 17,4 nm - avril 2023 ; 0.3 U.A. (résolution 160 km)

2023-04-11T21:34:56.093



lancement 2029

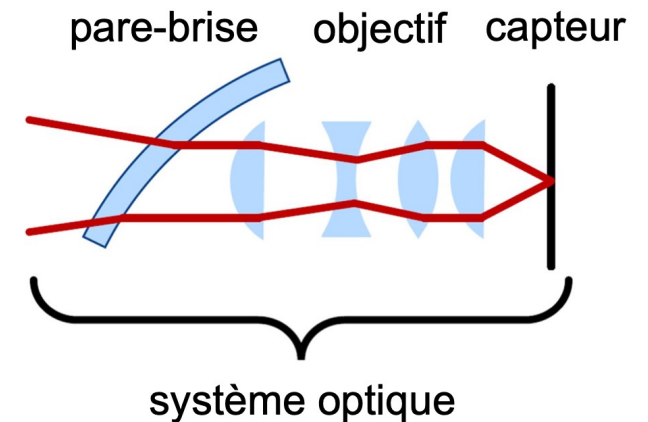
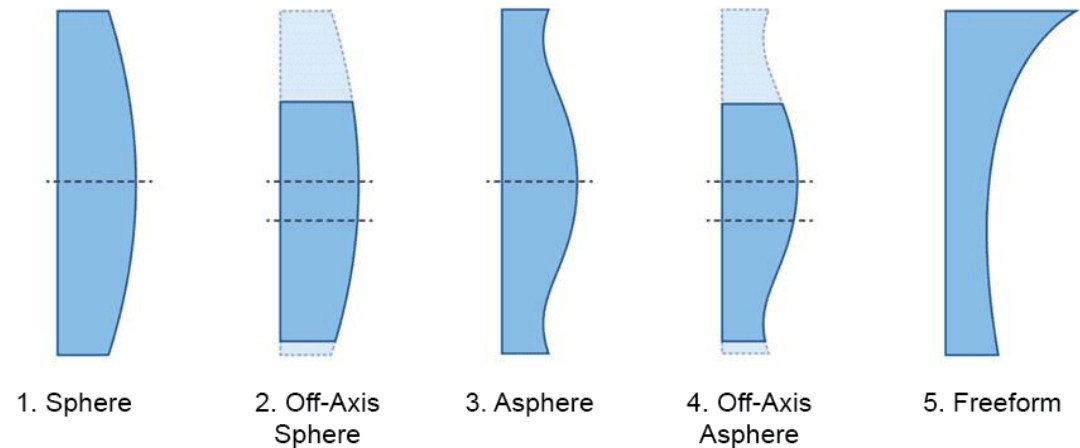


lancement 2031

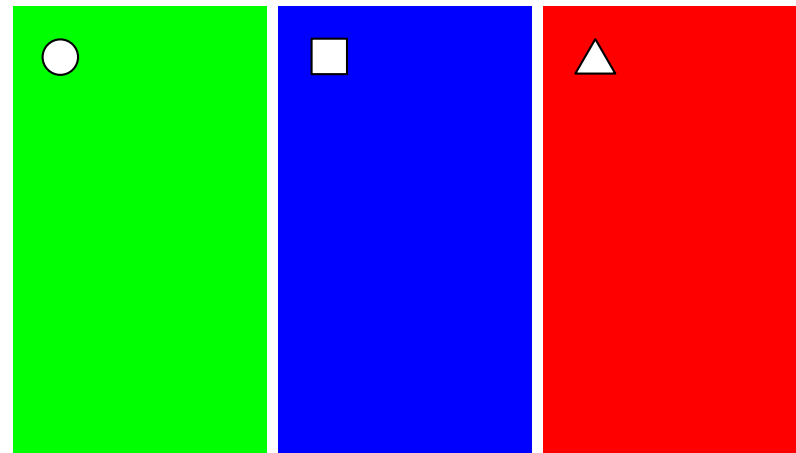
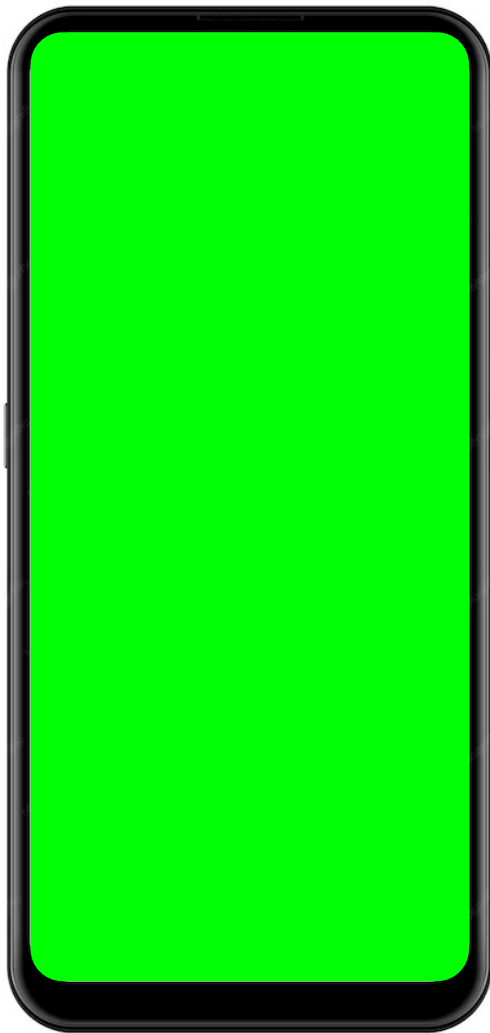


- Biophotonique
- Gaz Quantiques
- Imagerie et Information
- Lasers
- Nanophotonique
- Optique Quantique
- Optique XUV
- **Photonique Industrielle**

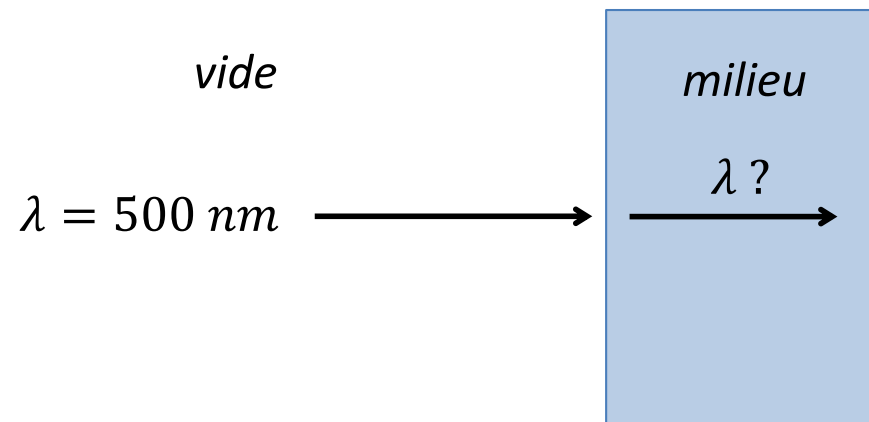
Optiques de forme libre *Freeforms Optics*



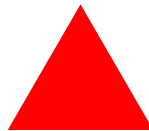
Votez avec votre téléphone



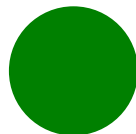
Quelle est la longueur d'onde dans le milieu d'indice $n = 2$?



500 nm

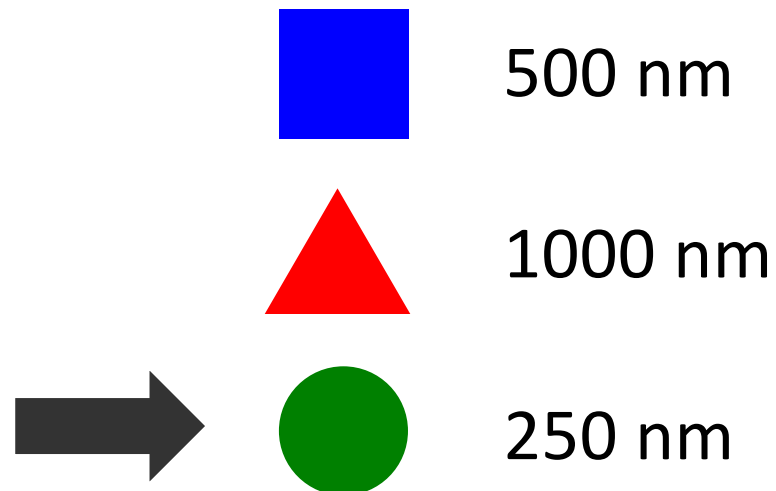
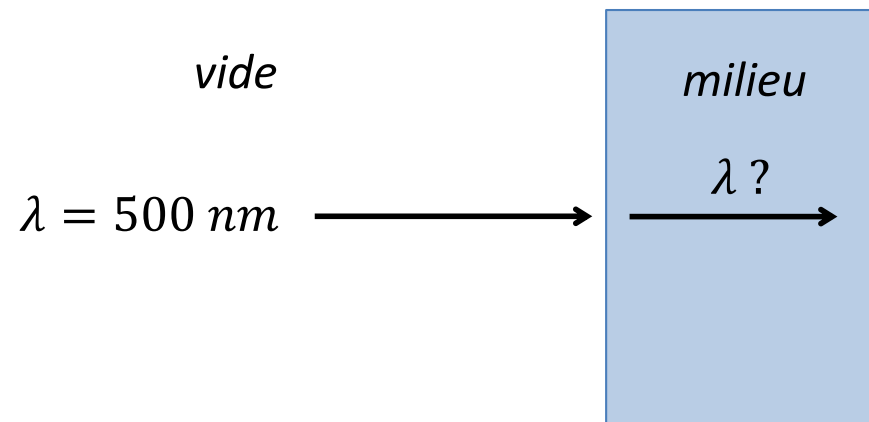


1000 nm



250 nm

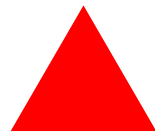
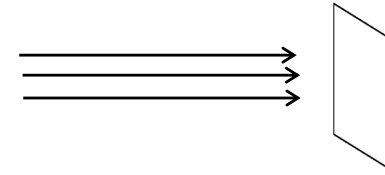
Quelle est la longueur d'onde dans le milieu d'indice $n = 2$?



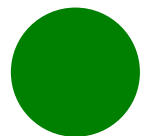
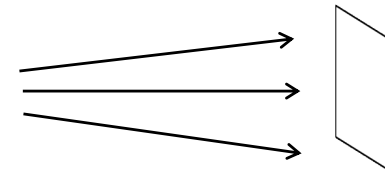
Comment arrivent les rayons sur un écran
provenant d'une source ponctuelle placée à l'infini ?



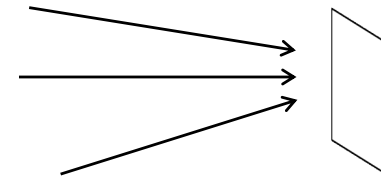
parallèles



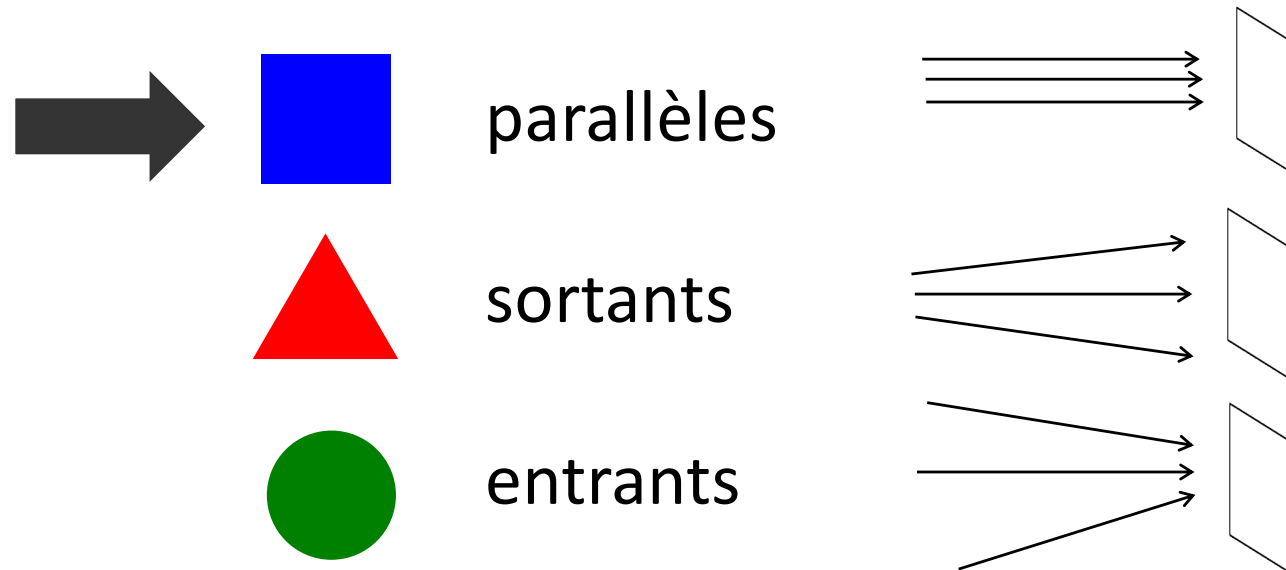
sortants



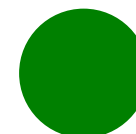
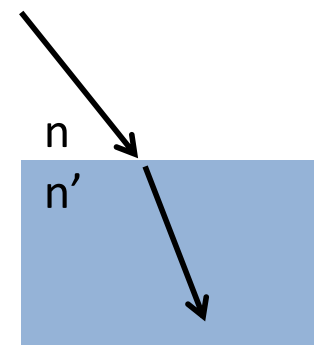
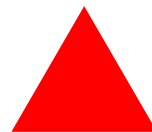
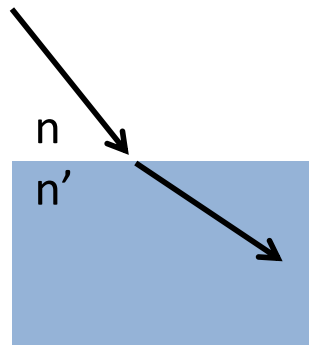
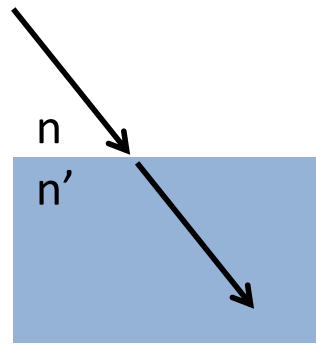
entrants



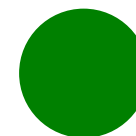
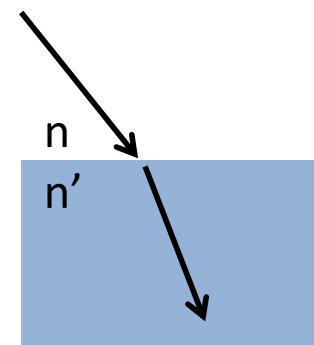
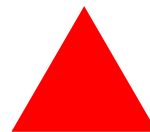
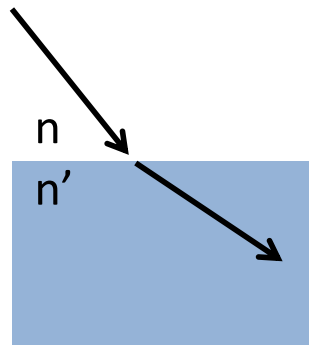
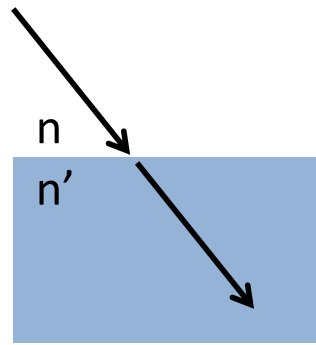
Comment arrivent les rayons sur un écran
provenant d'une source ponctuelle placée à l'infini ?



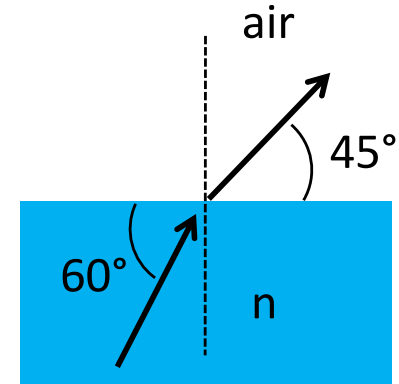
Un rayon traverse un dioptre plan séparant deux milieux d'indice n et $n' < n$. Quel est le bon trajet ?



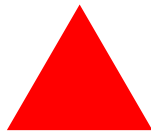
Un rayon traverse un dioptre plan séparant deux milieux d'indice n et $n' < n$. Quel est le bon trajet ?



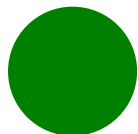
Que vaut l'indice du milieu n dans la configuration suivante ?



$$\sqrt{2}$$

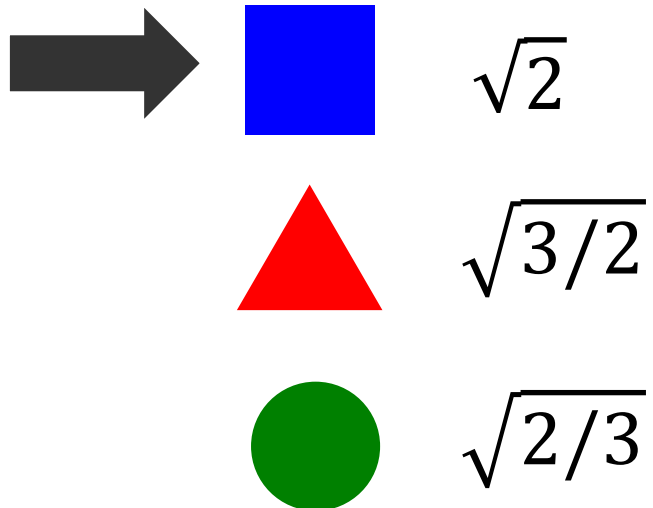
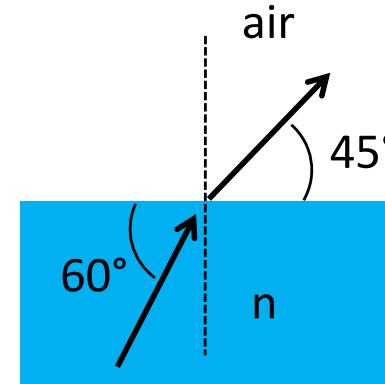


$$\sqrt{3/2}$$



$$\sqrt{2/3}$$

Que vaut l'indice du milieu n dans la configuration suivante ?

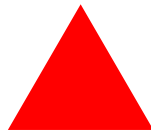


Un rayon lumineux arrive sur une lame de verre à faces parallèles d'indice n avec un angle d'incidence i .

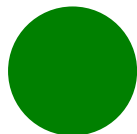
Quel est l'angle i' d'émergence du rayon après avoir traversé toute la lame ?



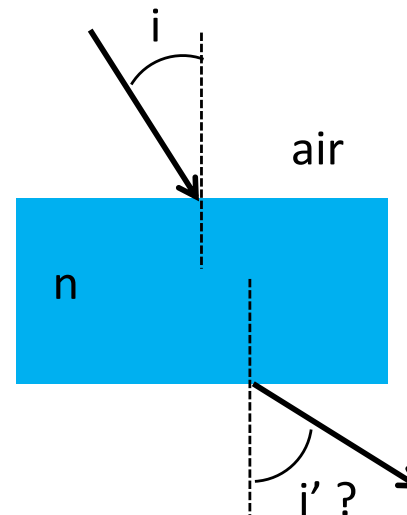
$$i' < i$$



$$i' = i$$

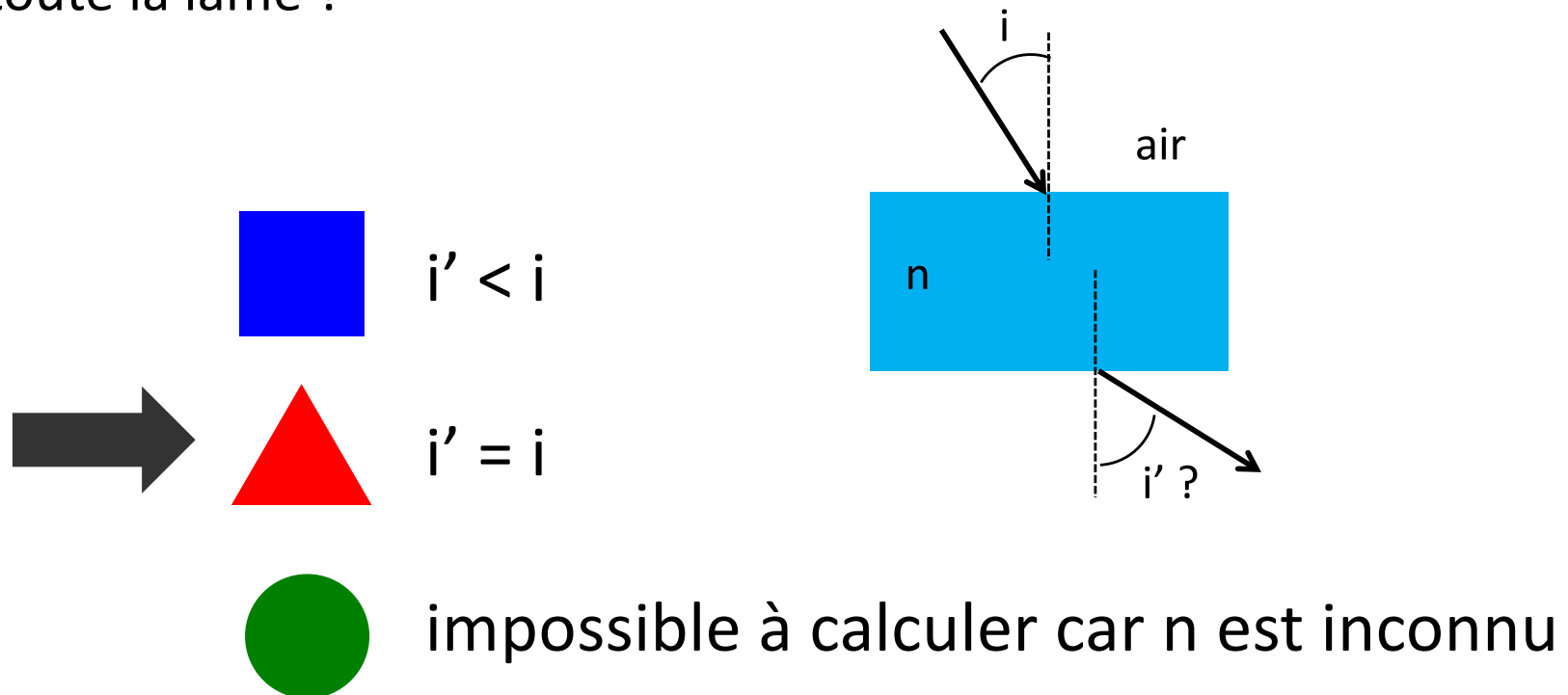


impossible à calculer car n est inconnu

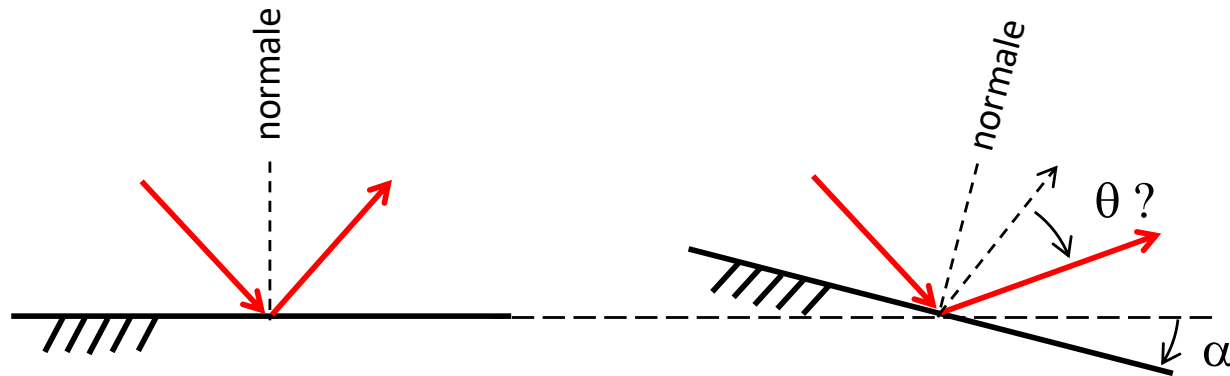


Un rayon lumineux arrive sur une lame de verre à faces parallèles d'indice n avec un angle d'incidence i .

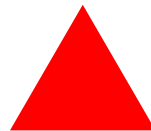
Quel est l'angle i' d'émergence du rayon après avoir traversé toute la lame ?



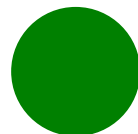
Que vaut l'angle θ ?



$\alpha/2$

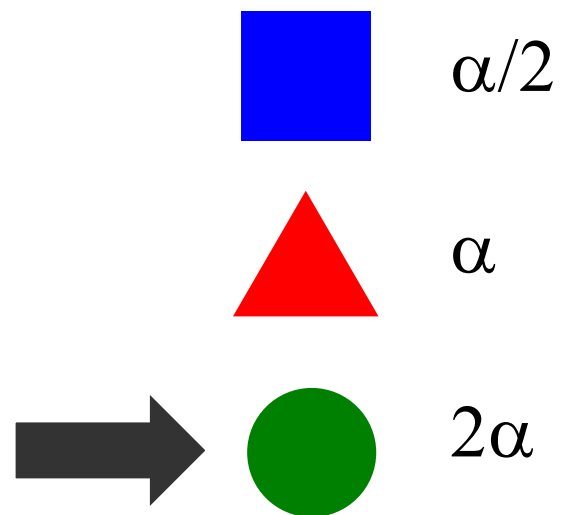
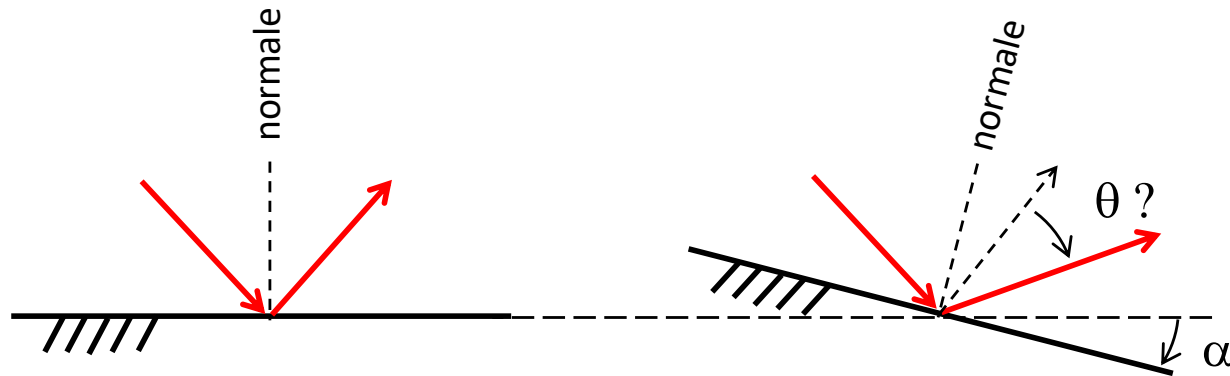


α



2α

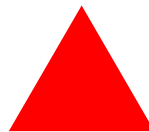
Que vaut l'angle θ ?



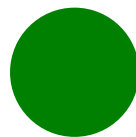
En incidence quasi normale quel % de lumière visible est réfléchi à une interface air-verre ($n=1,5$) ?



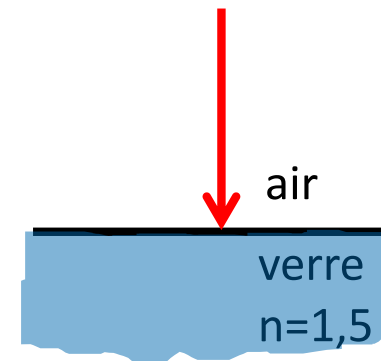
~ 50%



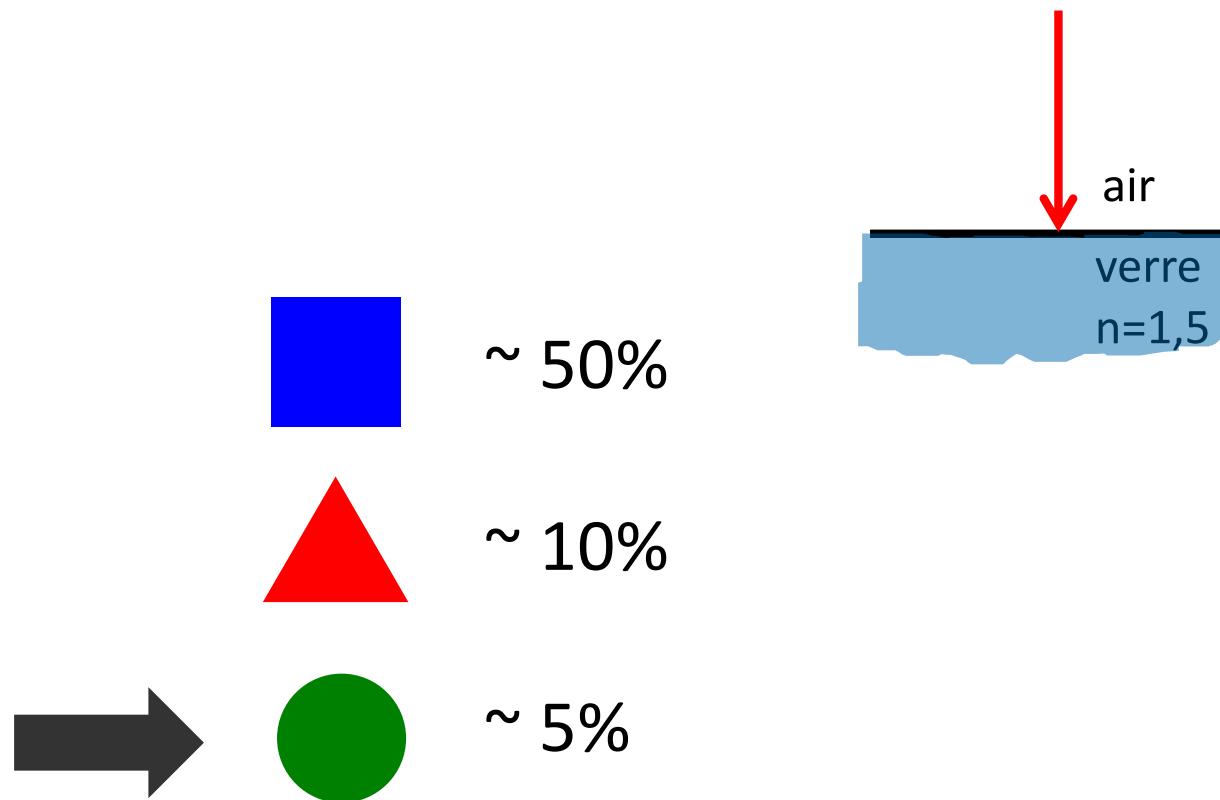
~ 10%



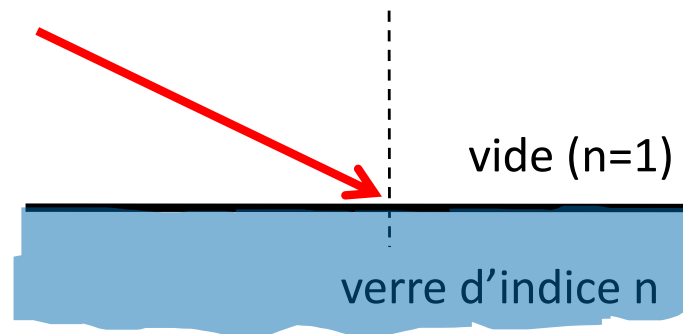
~ 5%



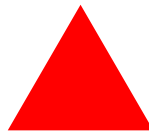
En incidence quasi normale quel % de lumière visible est réfléchi à une interface air-verre ($n=1,5$) ?



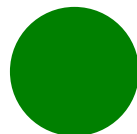
Une interface vide-verre peut-elle réfléchir 100% de la lumière ?



jamais

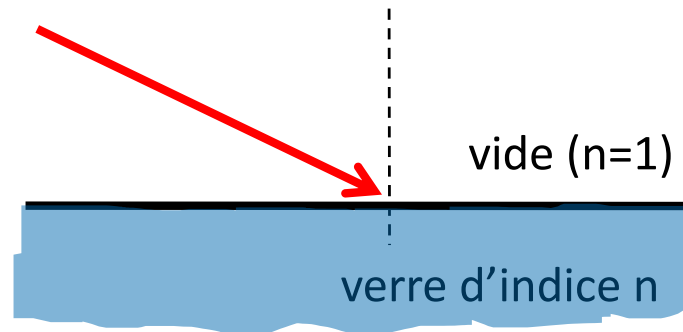


possible si $n > 1$

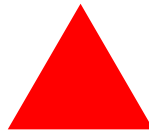


possible si $n < 1$

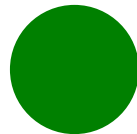
Une interface vide-verre peut-elle réfléchir 100% de la lumière ?



jamais

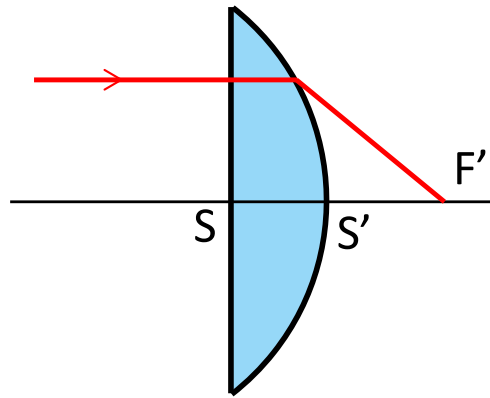


possible si $n > 1$

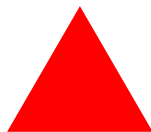


possible si $n < 1$

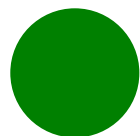
Dans cette situation (objet à gauche),
que vaut la distance focale image de cette lentille ?



$S'F'$

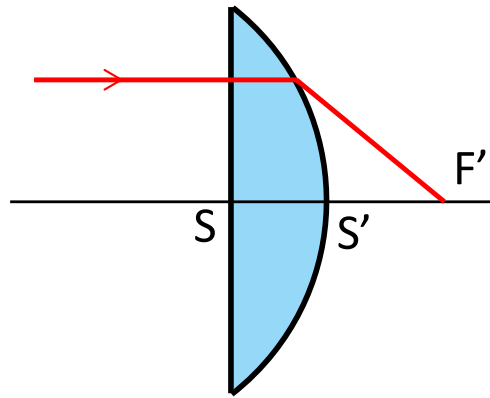


SF'

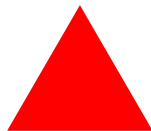


OF' (O milieu de SS')

Dans cette situation (objet à gauche),
que vaut la distance focale image de cette lentille ?



$S'F'$

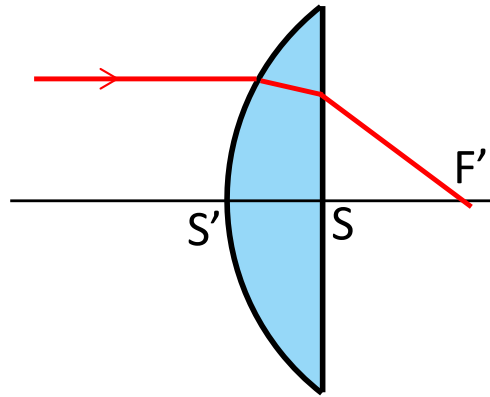


SF'

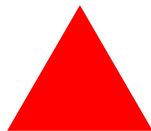


OF' (O milieu de SS')

Dans cette situation (objet à gauche),
que vaut la distance focale image de cette lentille ?



$S'F'$

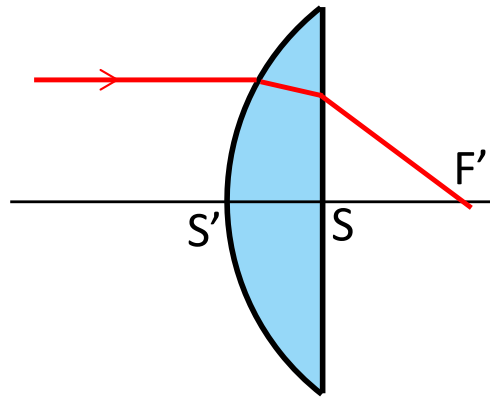


SF'



OF' (O milieu de SS')

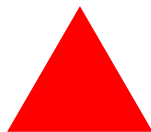
Dans cette situation (objet à gauche),
que vaut la distance focale image de cette lentille ?



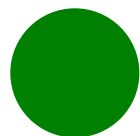
➡ à suivre



$S'F'$



SF'



OF' (O milieu de SS')

cours 2

11 septembre

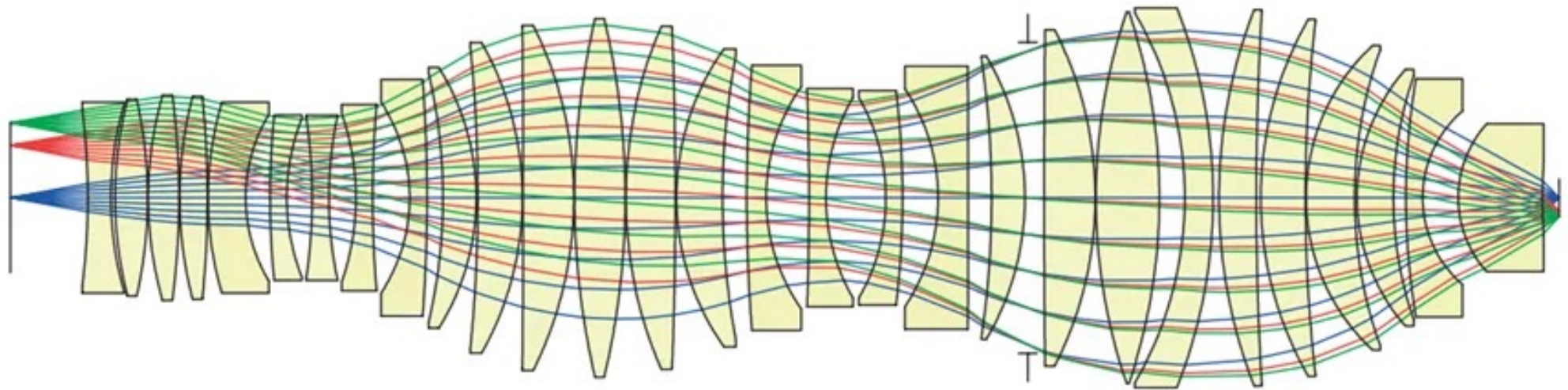
Systèmes centrés dans les conditions paraxiales

Plans principaux

Distance focale

Points nodaux

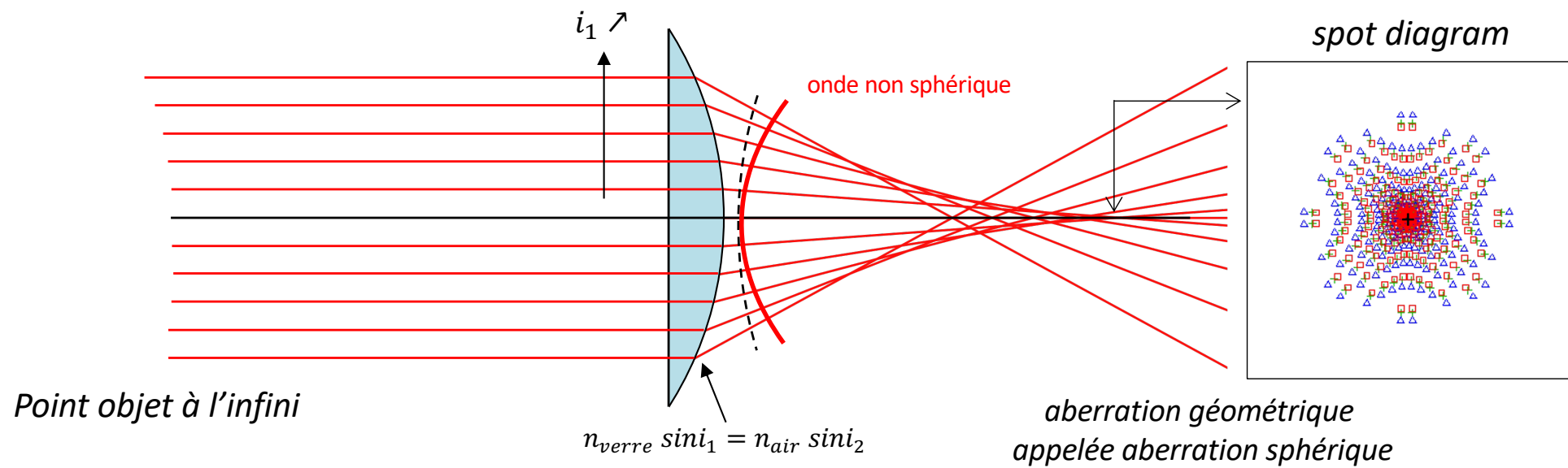
Système centré



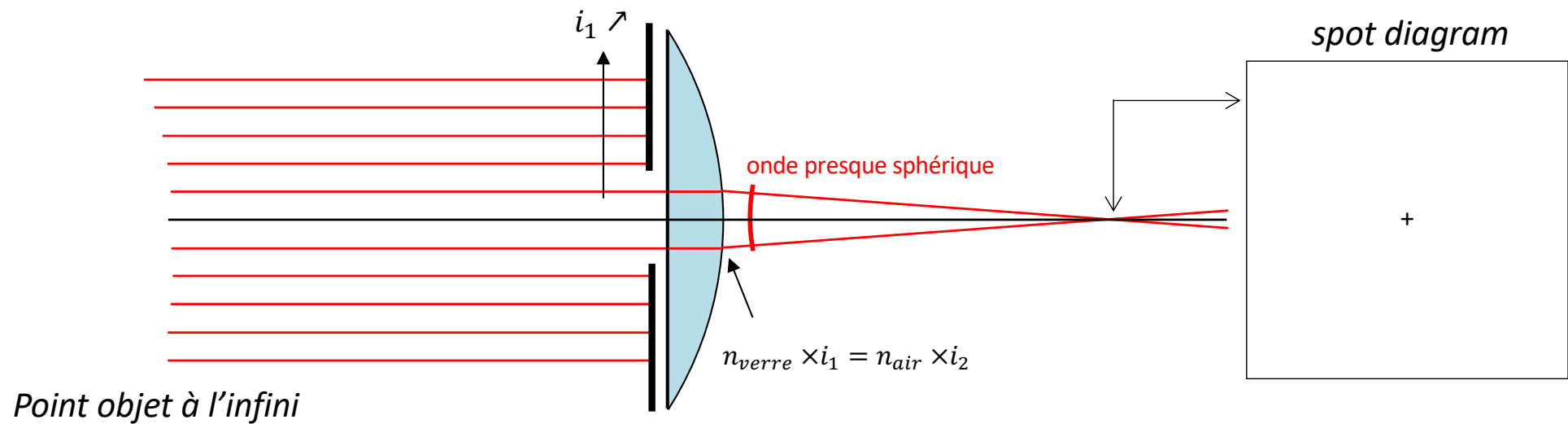
Exemple : objectif à 29 lentilles pour la photolithographie à 193 nm



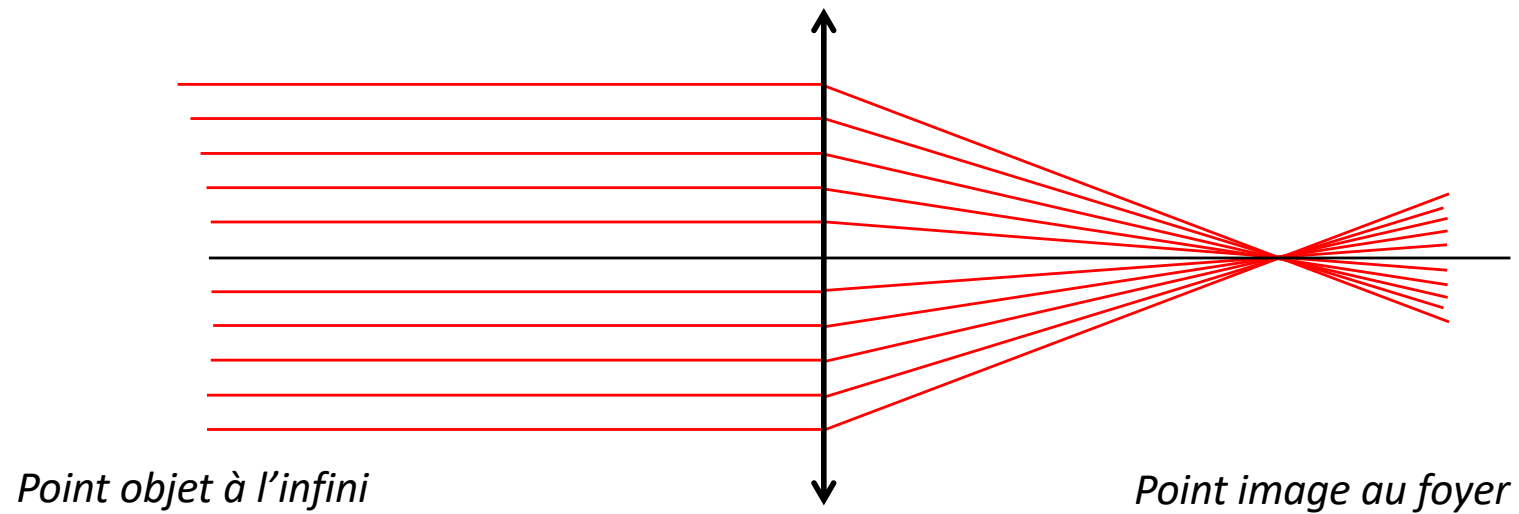
lentille plan-convexe – *vrai tracé de rayons*

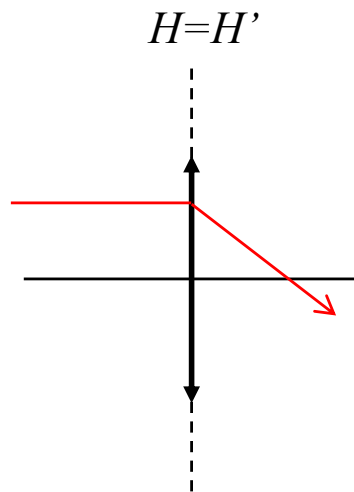


lentille plan-convexe – *régime paraxial*

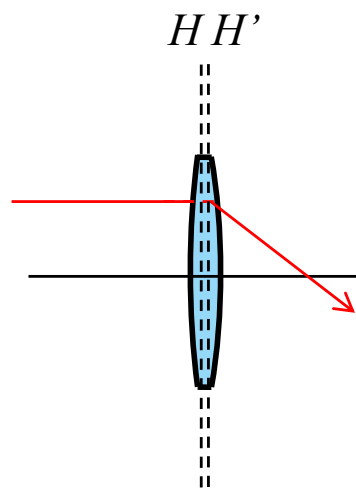


lentille mince

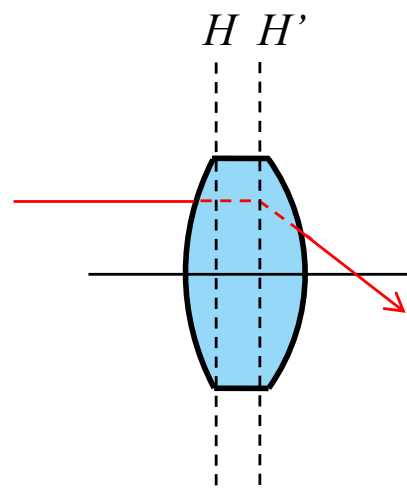




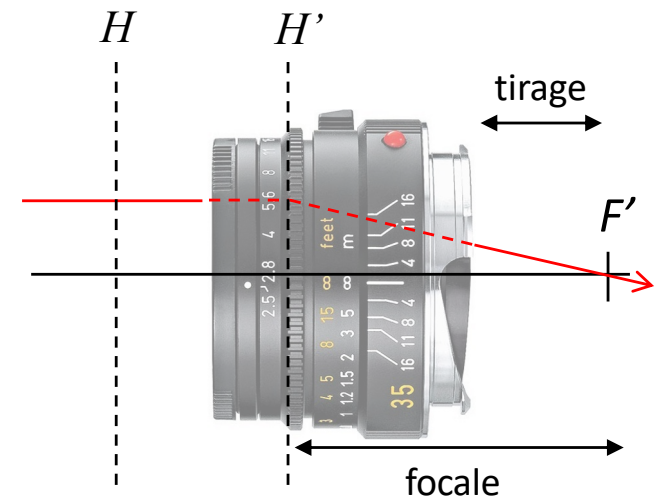
lentille mince
courbure $\gg$ épaisseur



lentille quasi-mince

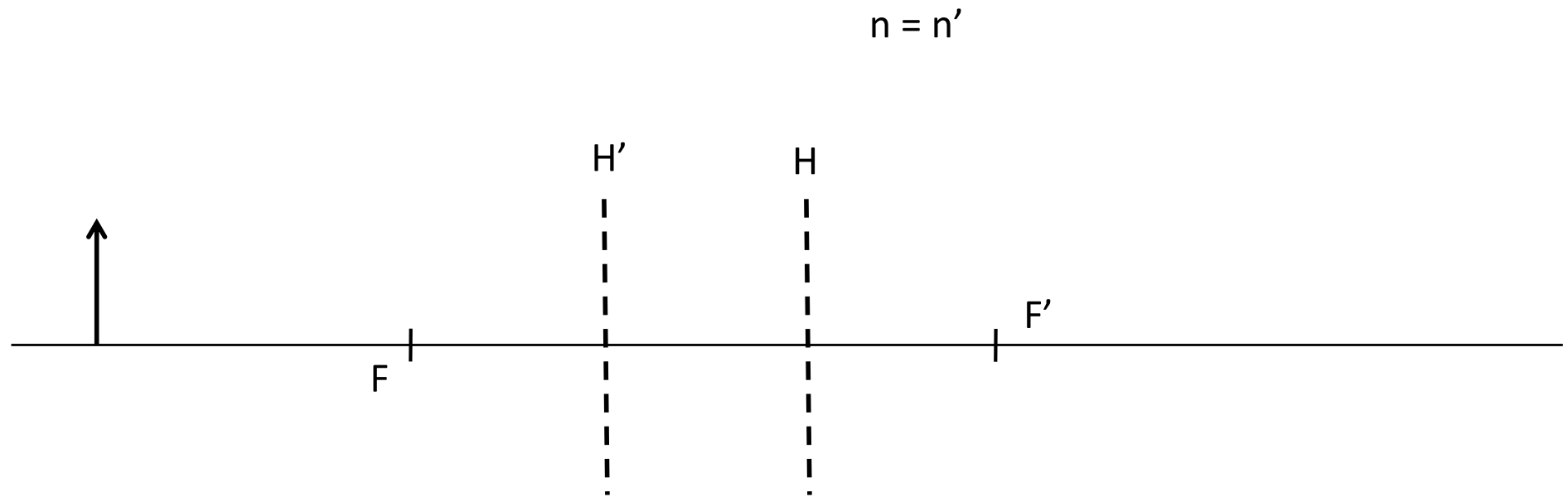


lentille épaisse



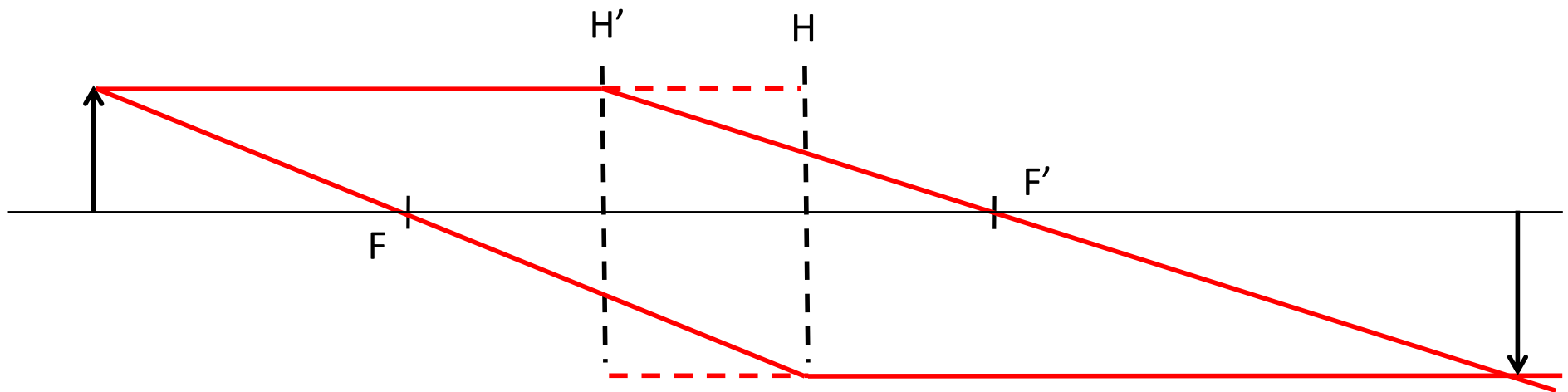
système épais

exemple



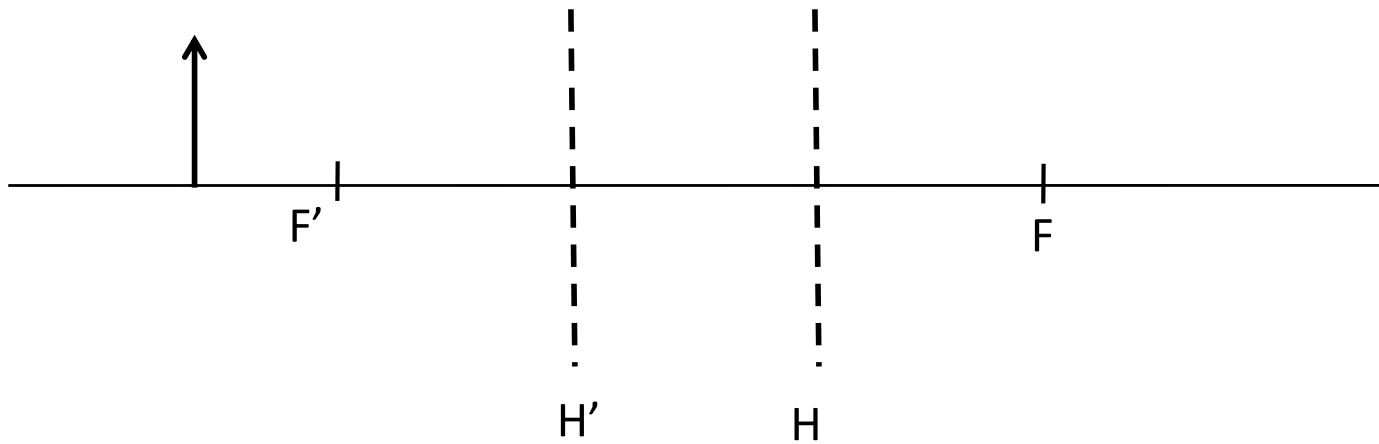
exemple

$$n = n'$$

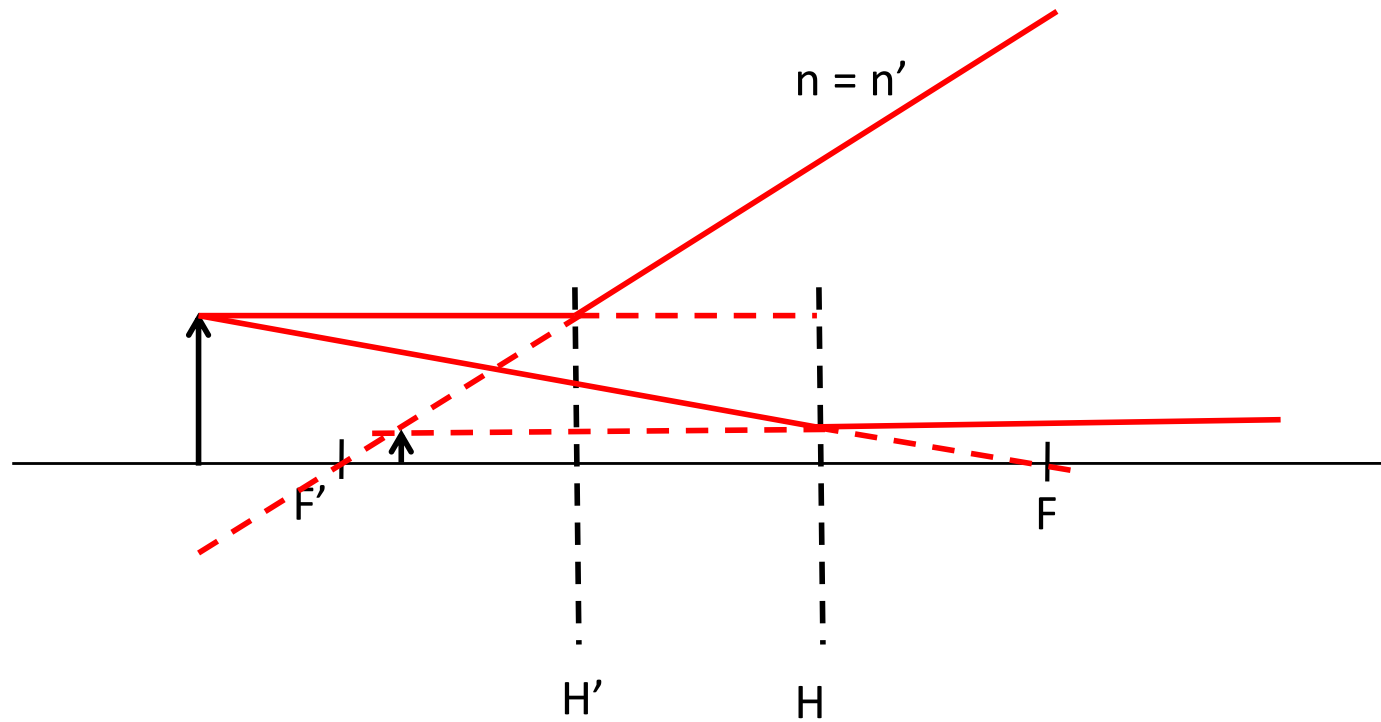


exemple

$$n = n'$$

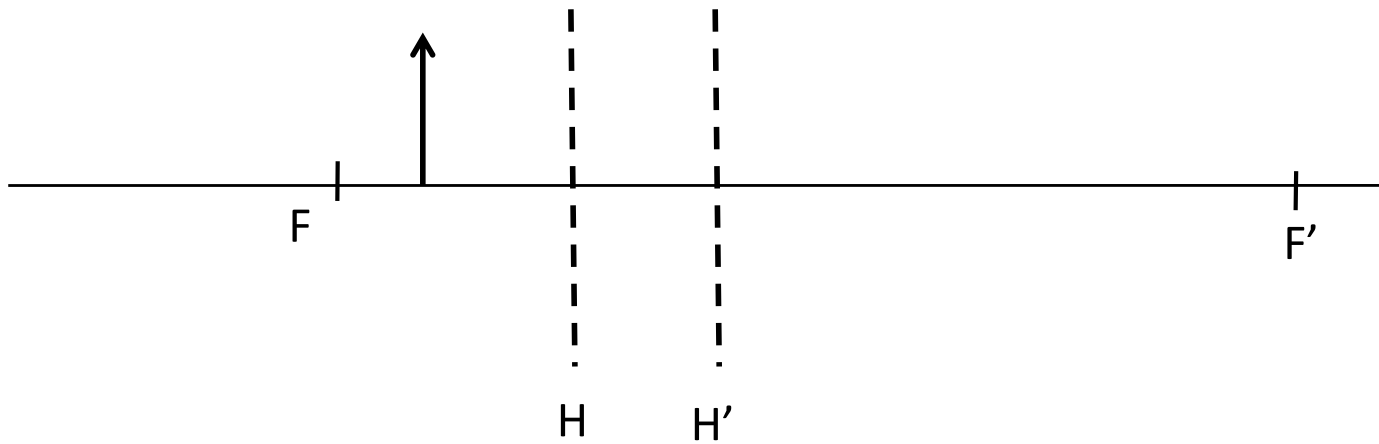


exemple

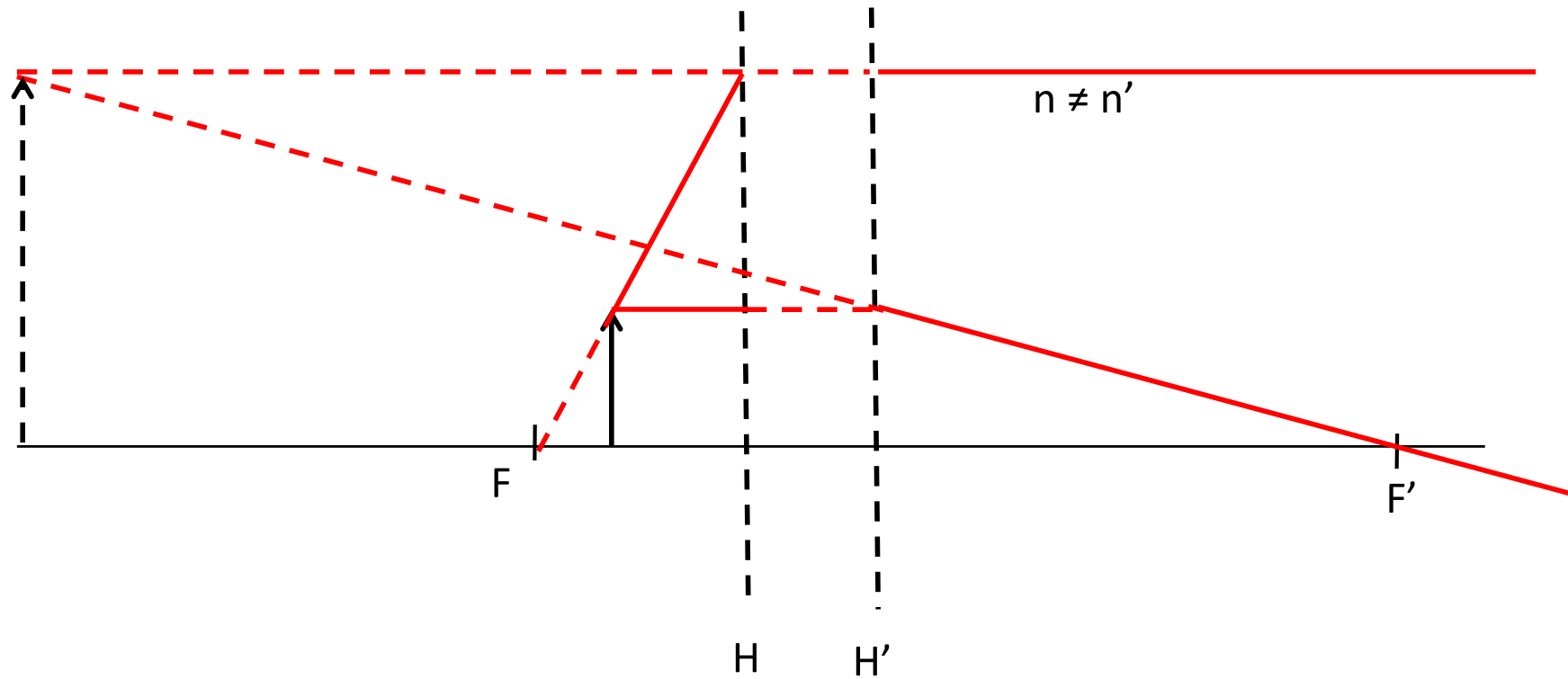


exemple

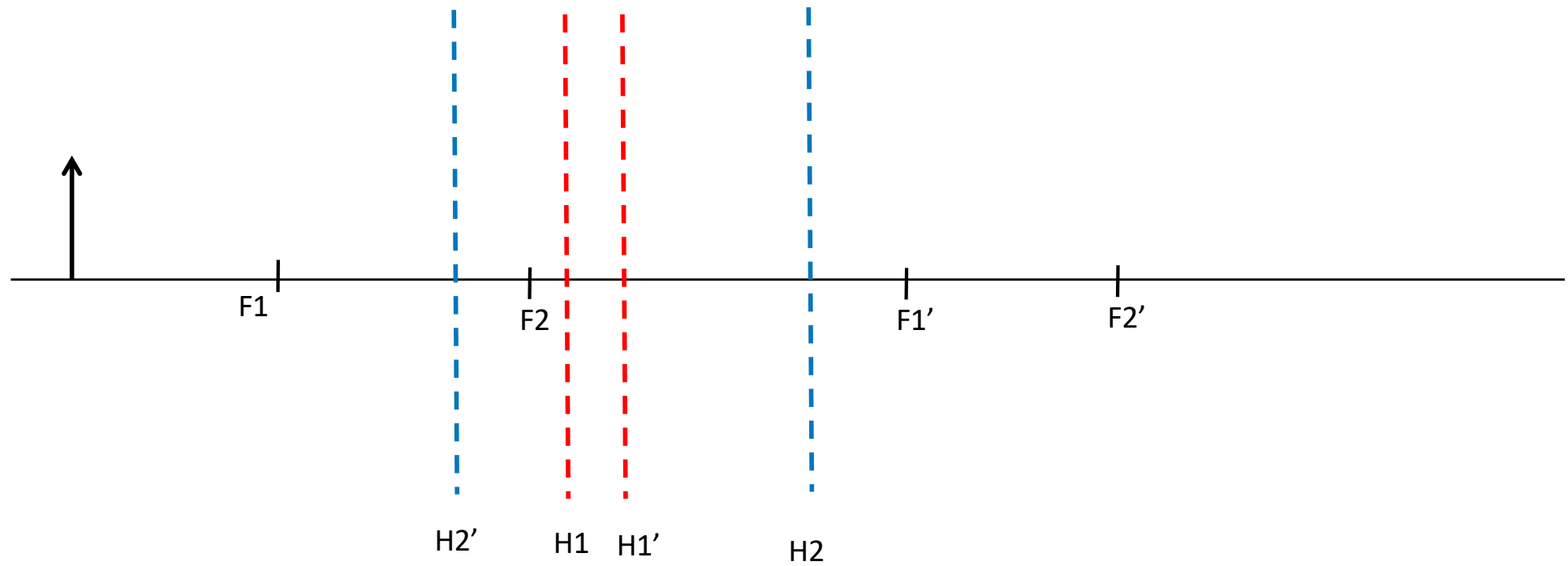
$$n \neq n'$$



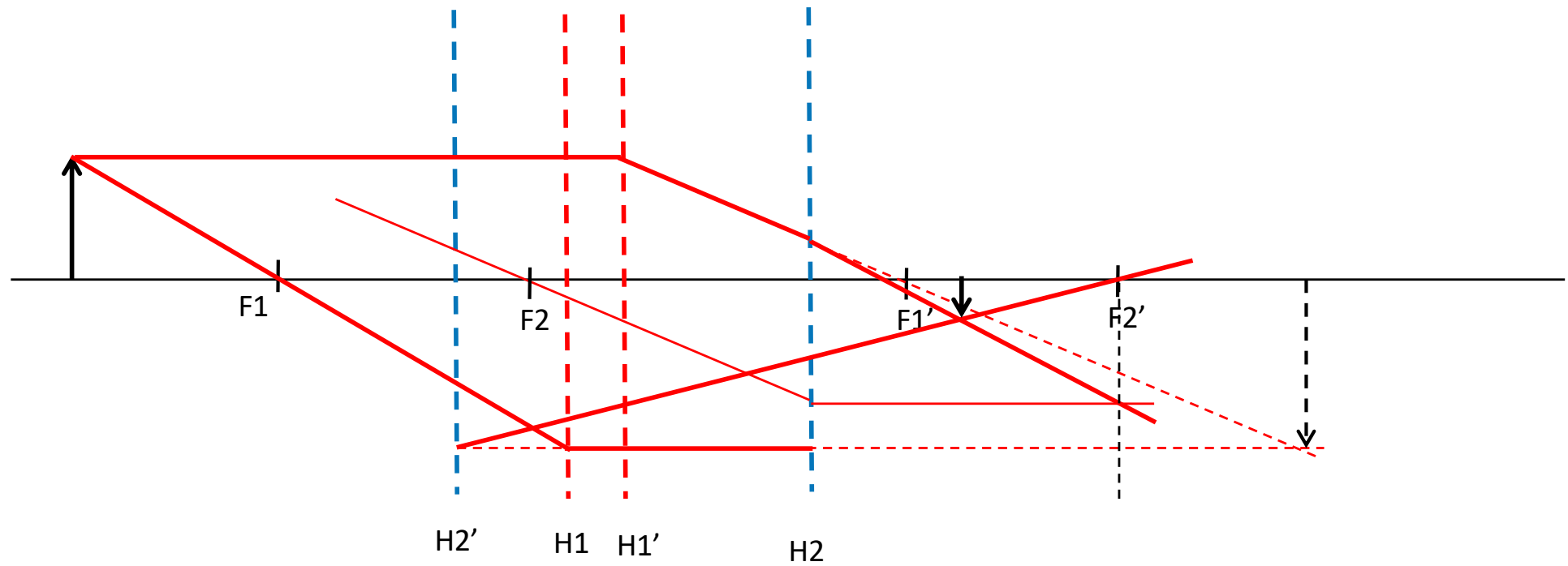
exemple



exemple



exemple



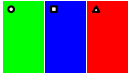
cours 3

16 septembre

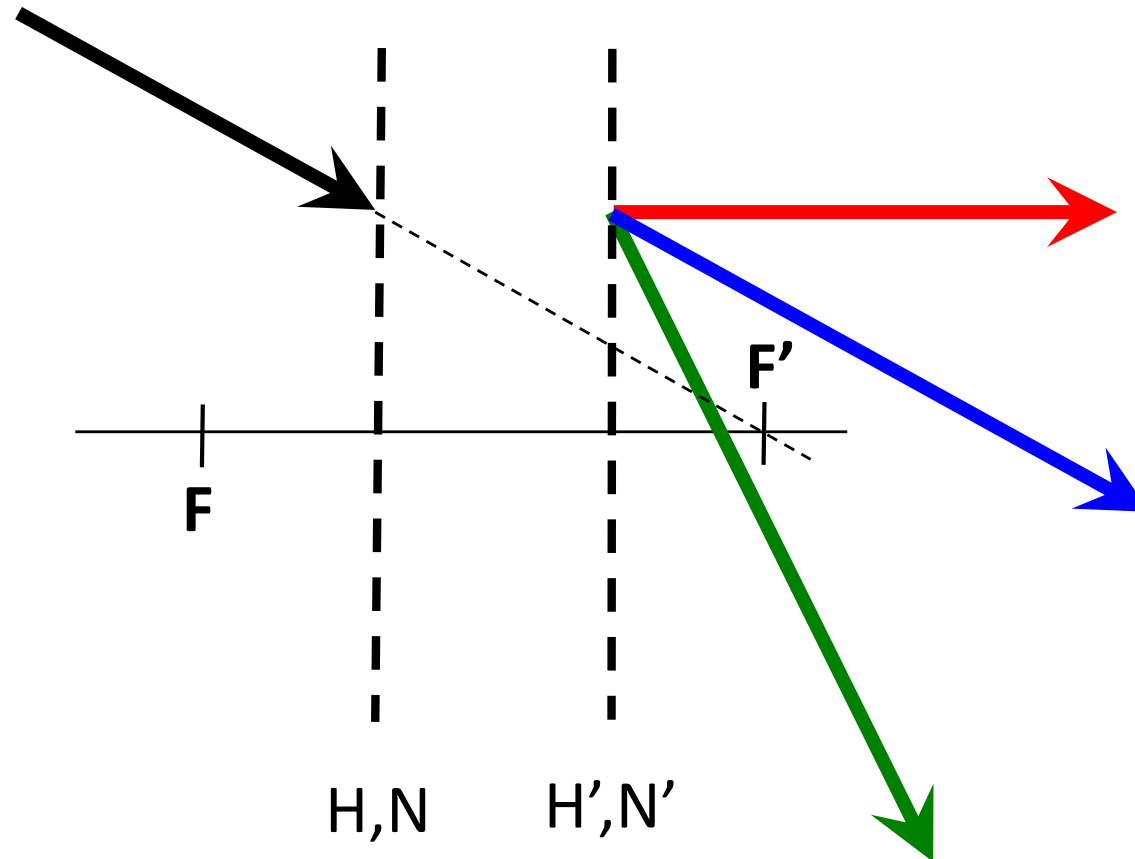
Optique paraxiale des systèmes centrés

Révisions 

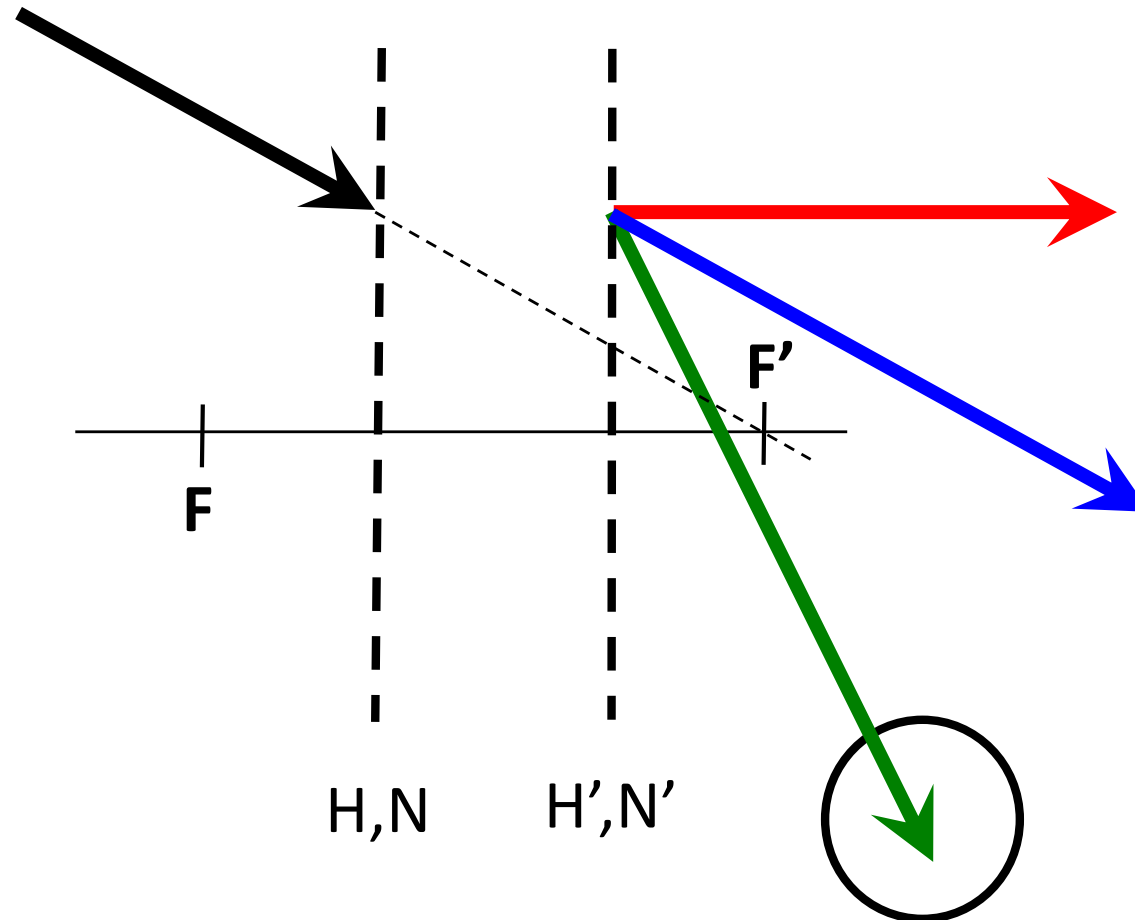
- Formule de conjugaison
- Grandissements transversal/longitudinal
- Puissance
- Invariant de Lagrange
- Focale d'un dioptré sphérique
- Focale d'un miroir sphérique

Suite ... 

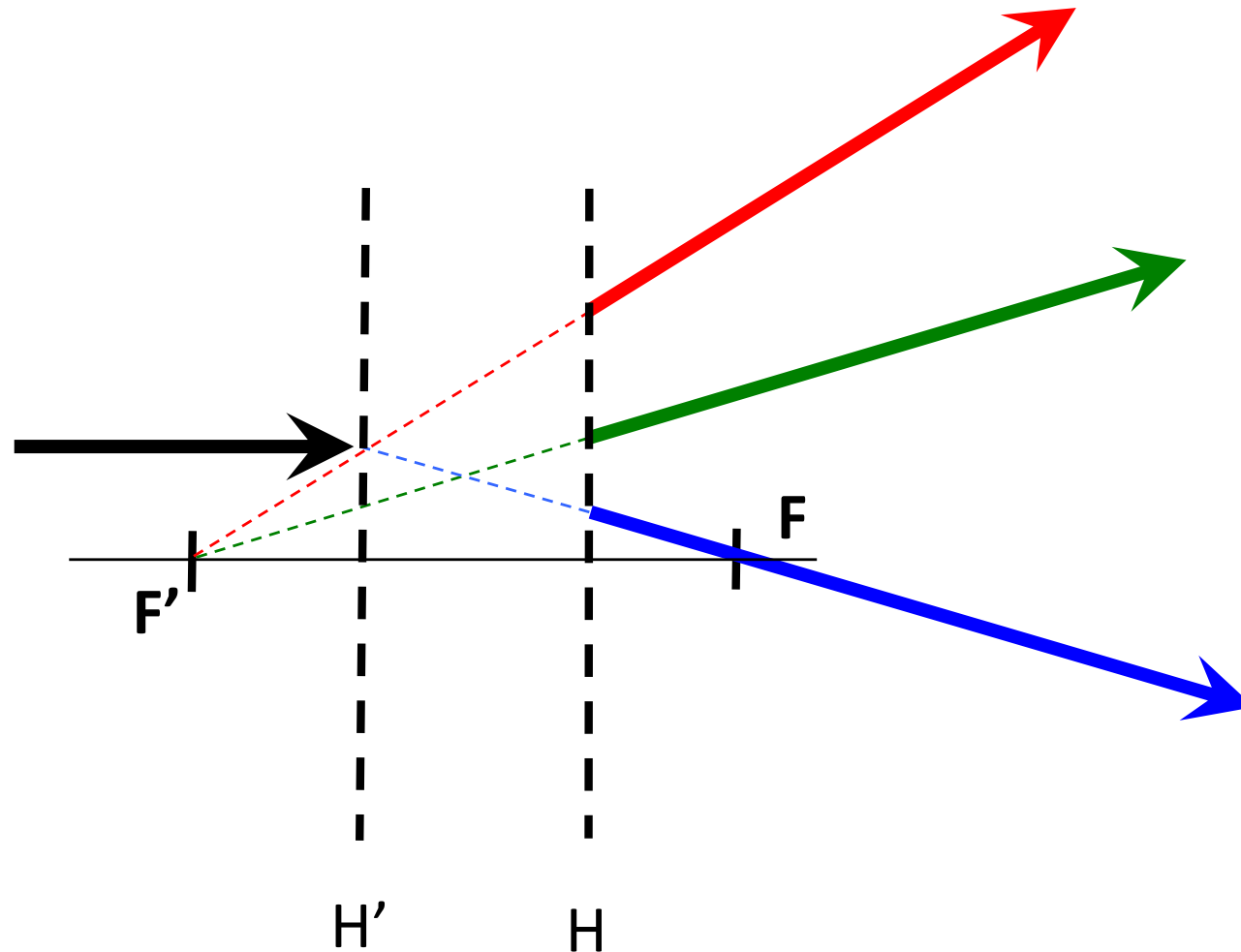
Quel est le bon rayon émergent ?



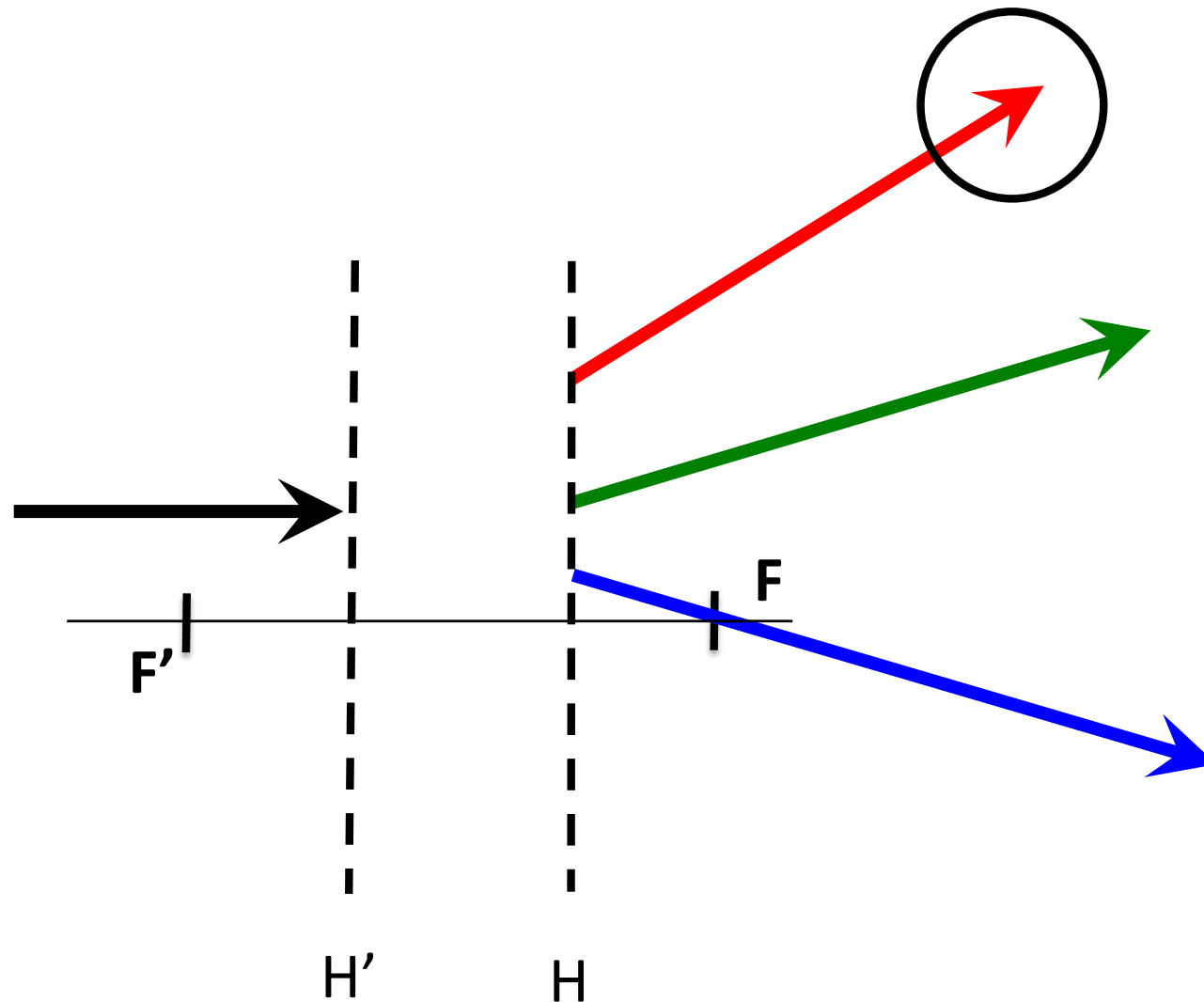
Quel est le bon rayon émergent ?



Quel est le bon rayon émergent ?



Quel est le bon rayon émergent ?



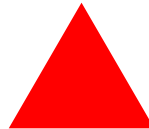
La focale image de tout le système est-elle ...



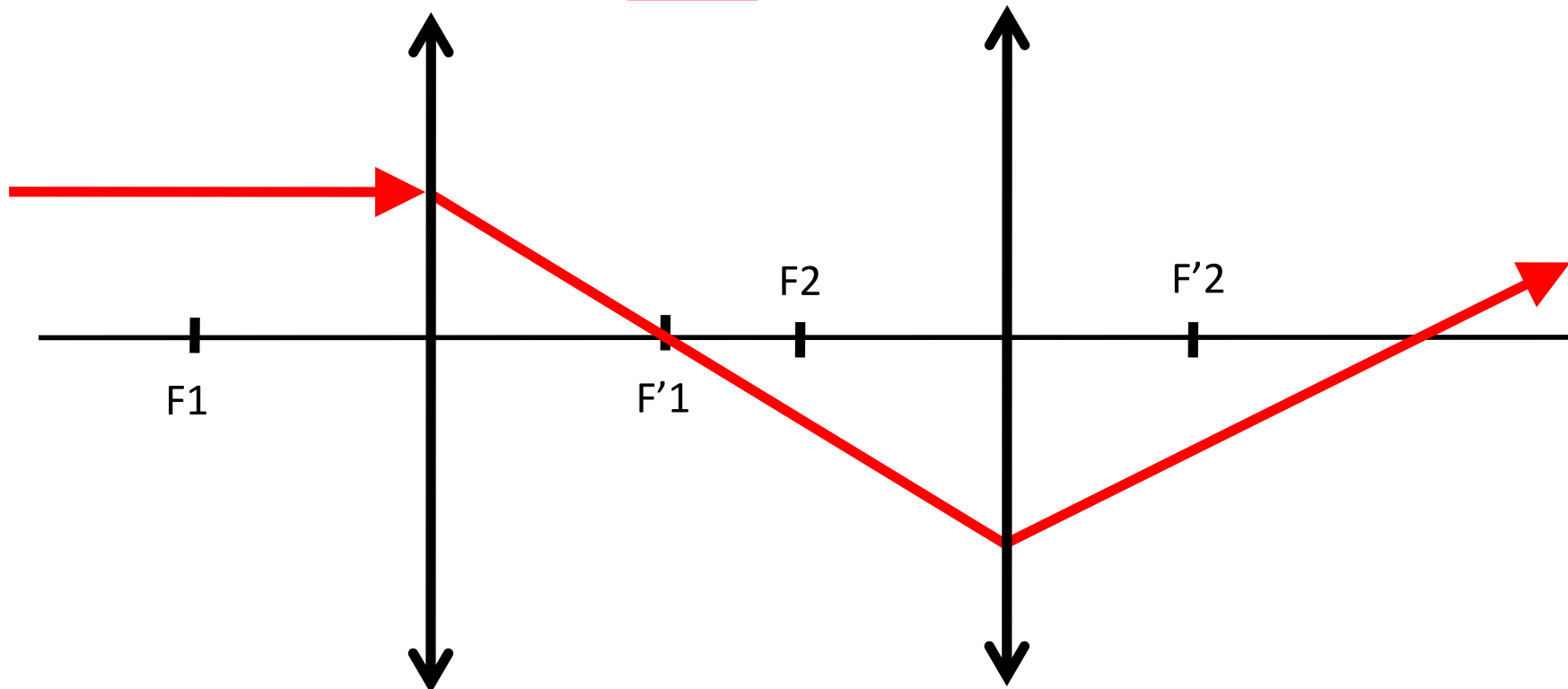
Positive



Négative



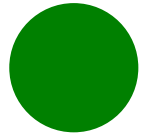
Infinie



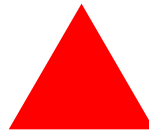
La focale image de tout le système est-elle ...



Positive

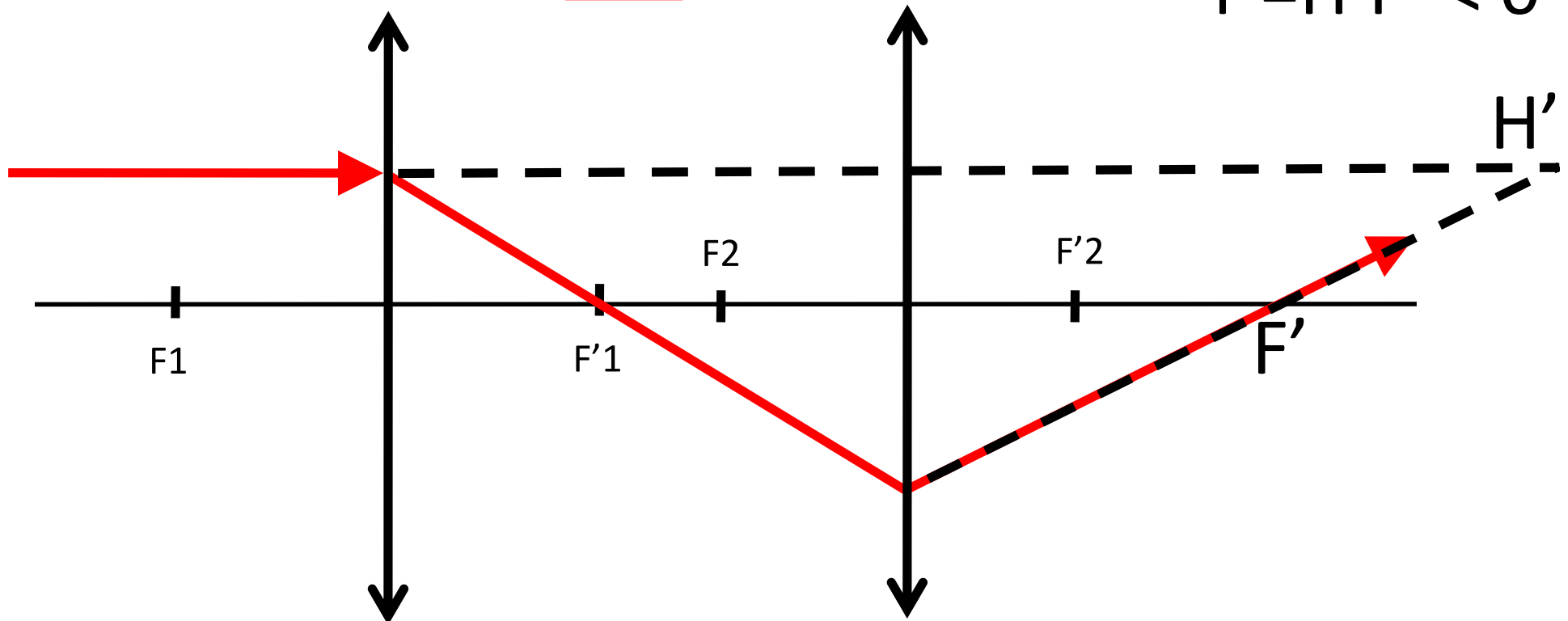


Négative

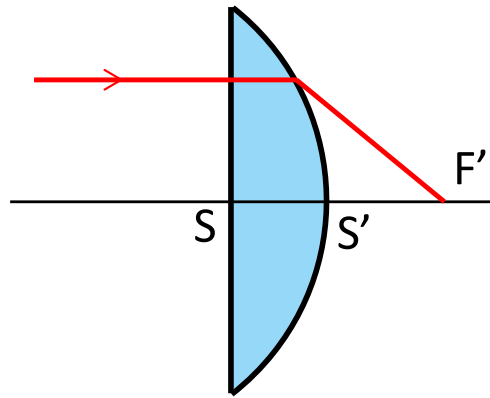


Infinie

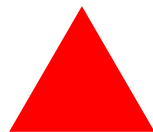
$$f' = \overline{H'H'} < 0$$



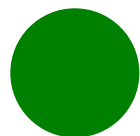
Dans cette situation (objet à gauche),
que vaut la distance focale image de cette lentille ?



$S'F'$

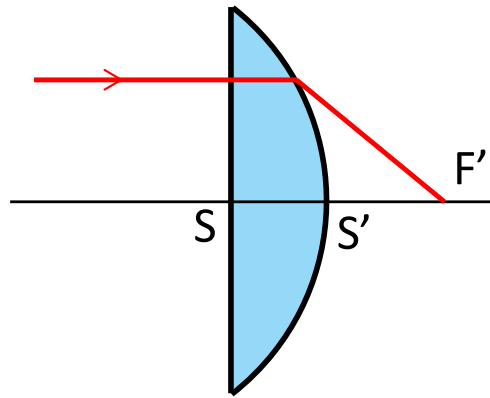


SF'

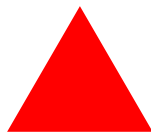


OF' (O milieu de SS')

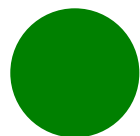
Dans cette situation (objet à gauche),
que vaut la distance focale image de cette lentille ?



$S'F'$

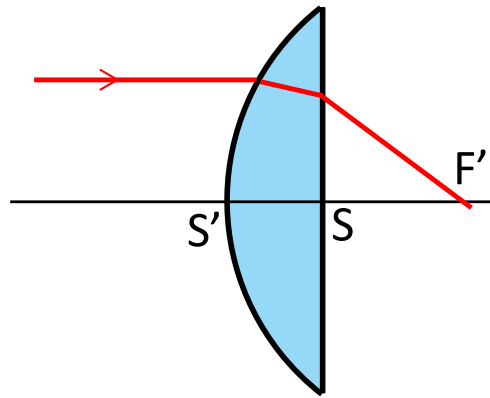


SF'

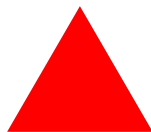


OF' (O milieu de SS')

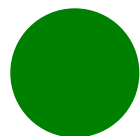
Dans cette situation (objet à gauche),
que vaut la distance focale image de cette lentille ?



$S'F'$

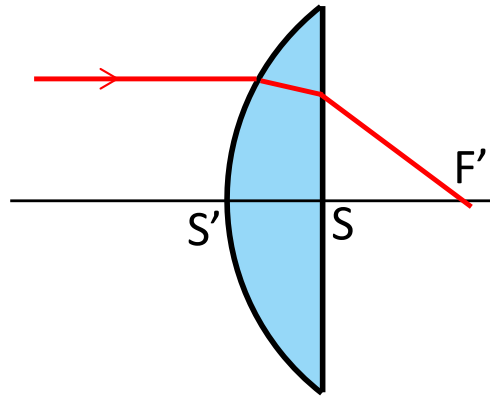


SF'

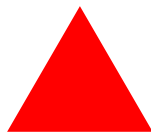


XF' (X entre S et S')

Dans cette situation (objet à gauche),
que vaut la distance focale image de cette lentille ?



$S'F'$

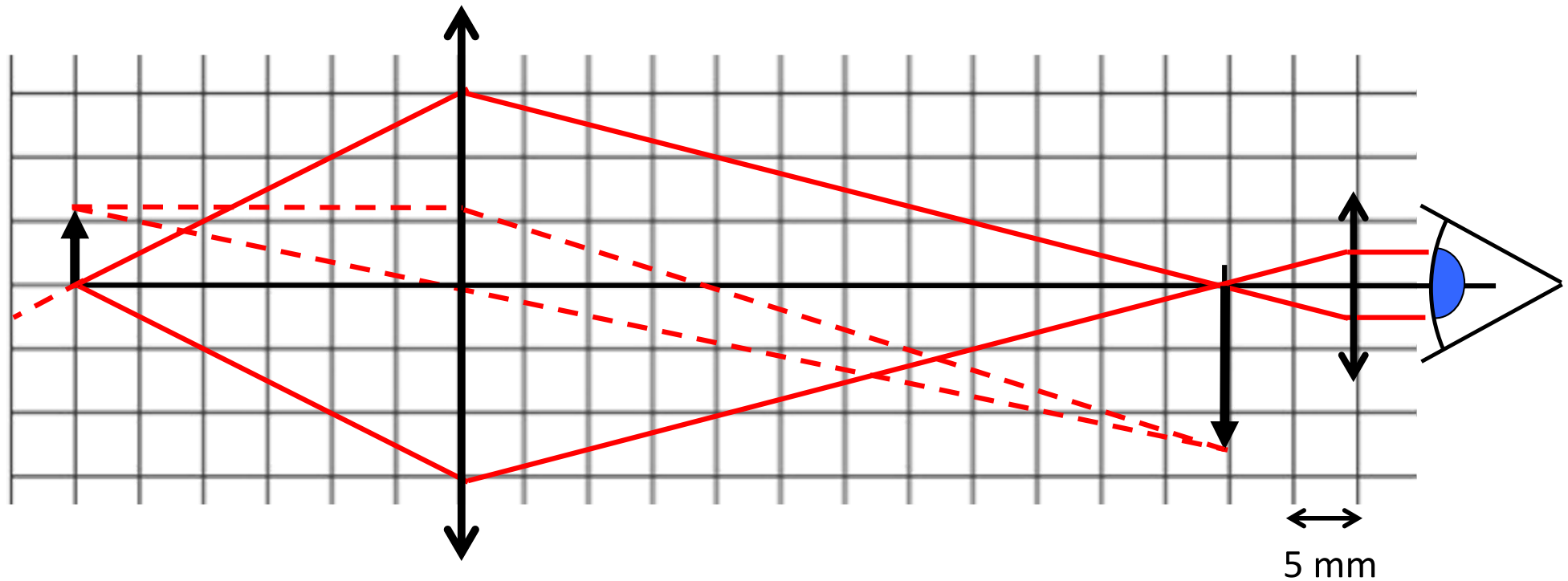


SF'



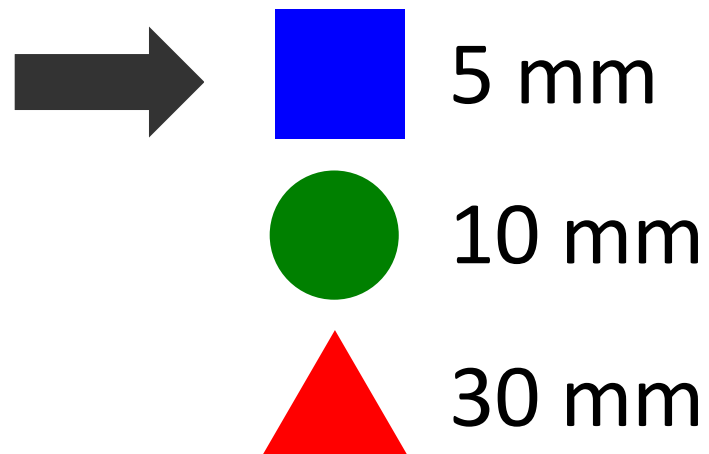
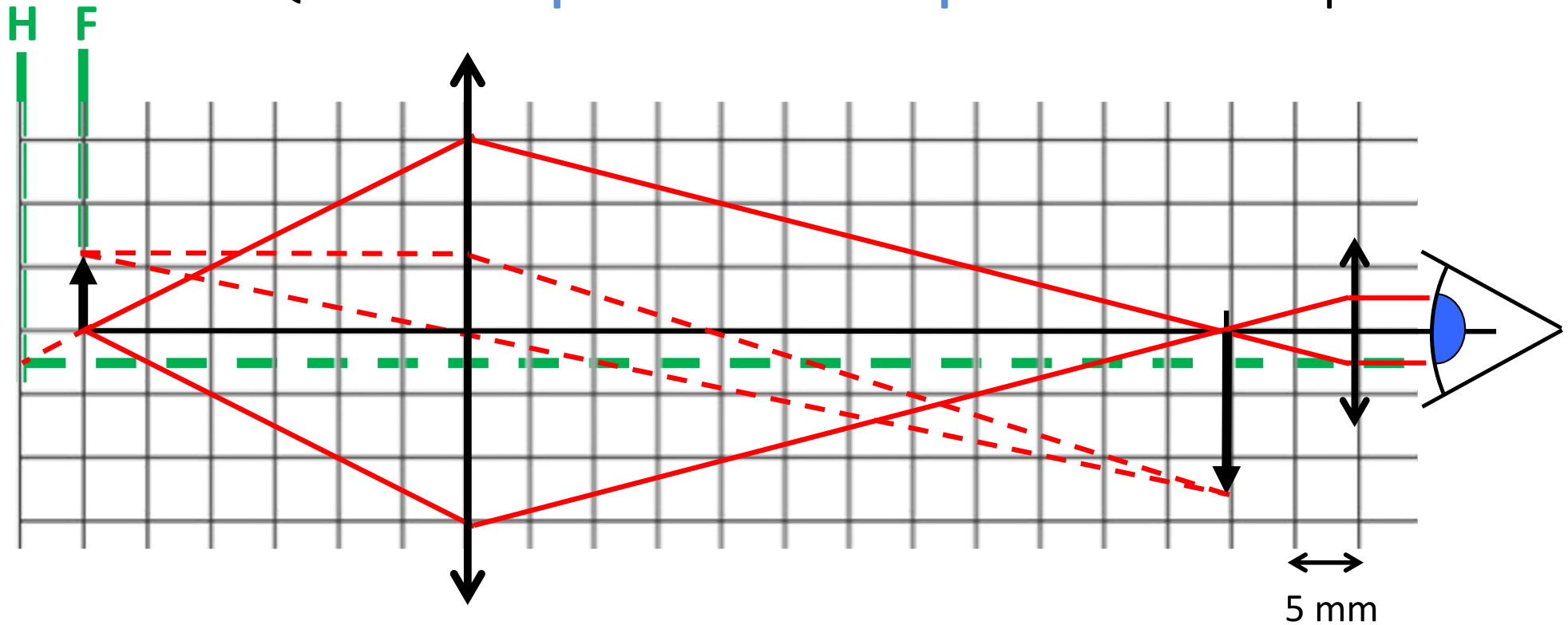
XF' (X entre S et S')

Que vaut la **distance focale** de ce microscope ?

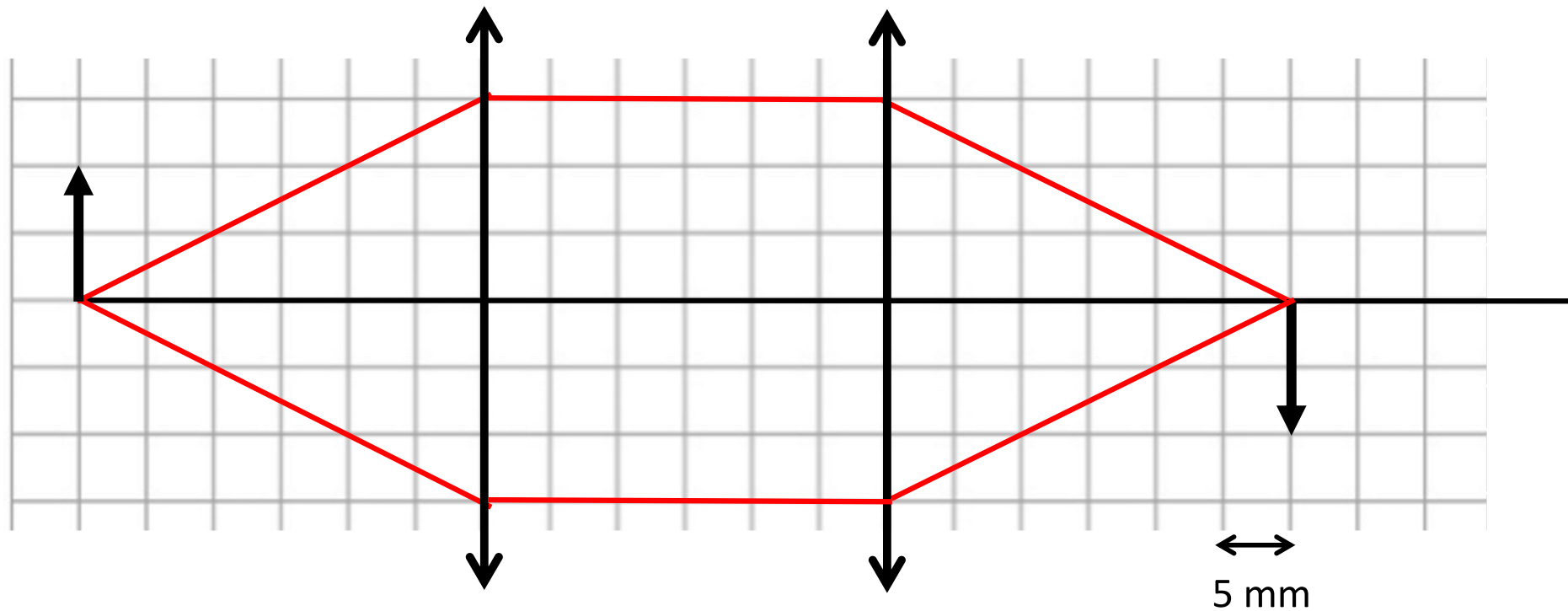


- 5 mm
- 10 mm
- 30 mm

Que vaut la **distance focale** de ce microscope ?

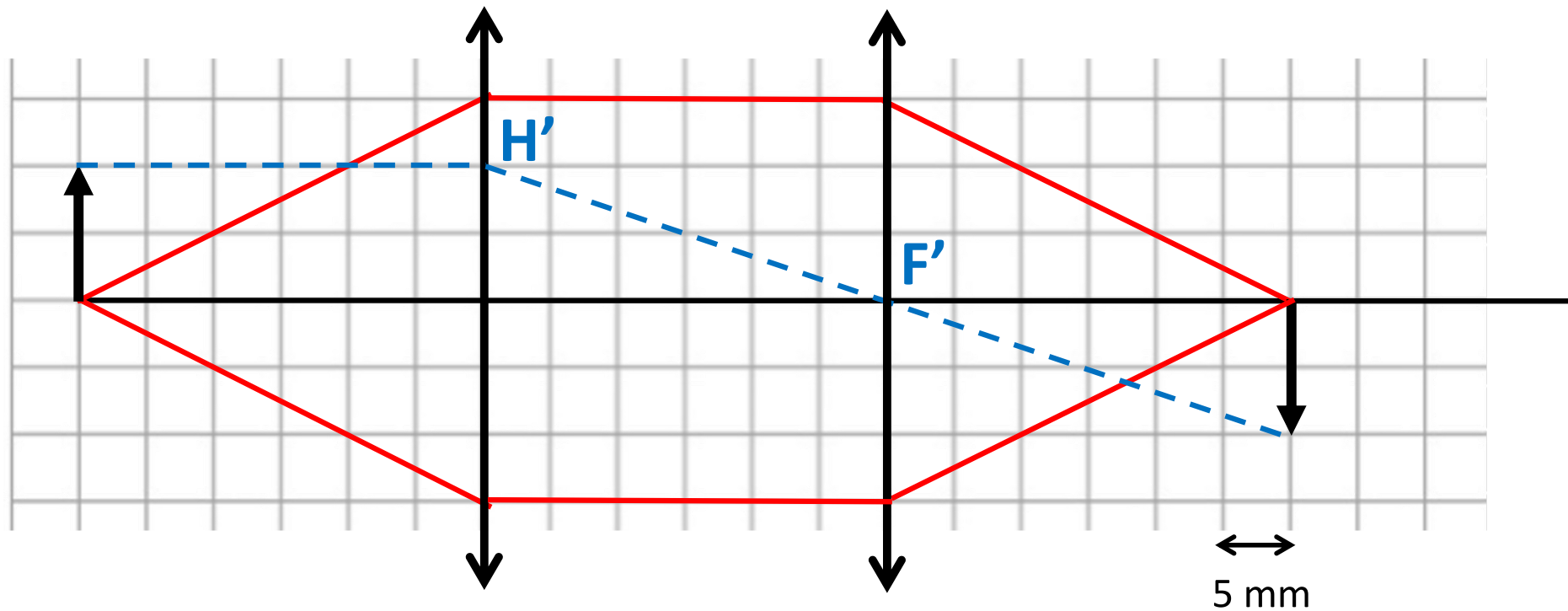


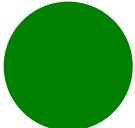
Que vaut la **distance focale** de cet objectif ?



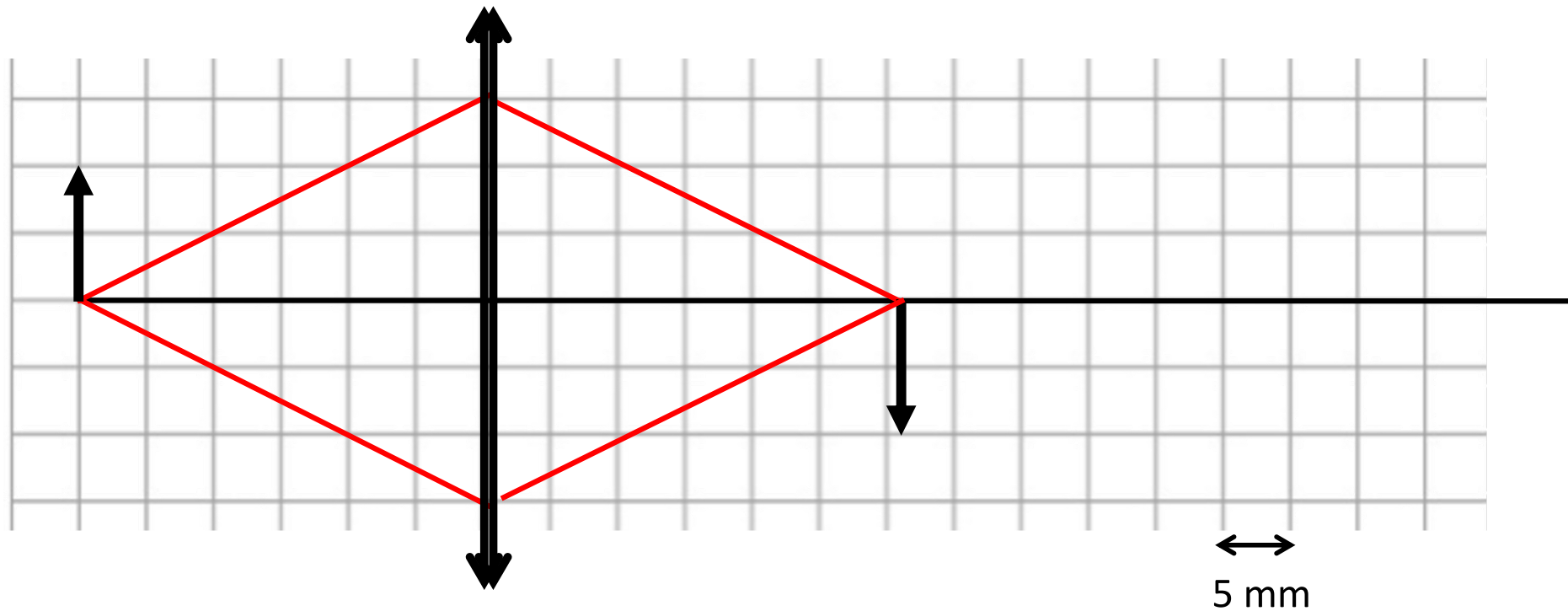
-  15 mm
-  30 mm
-  22,5 mm

Que vaut la **distance focale** de cet objectif ?

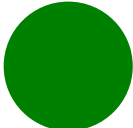


-  15 mm
-  30 mm
-  22,5 mm

Que vaut la **distance focale** de cet objectif ?

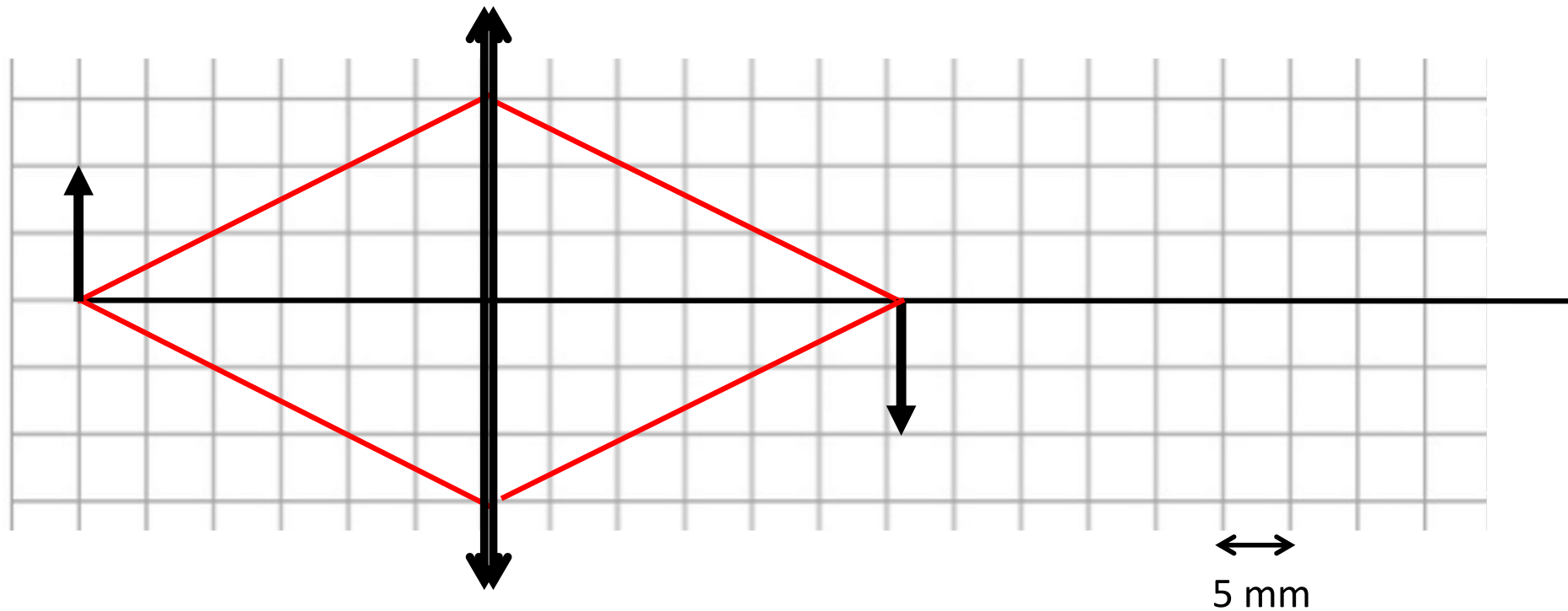


 15 mm

 30 mm

 60 mm

Que vaut la **distance focale** de cet objectif ?

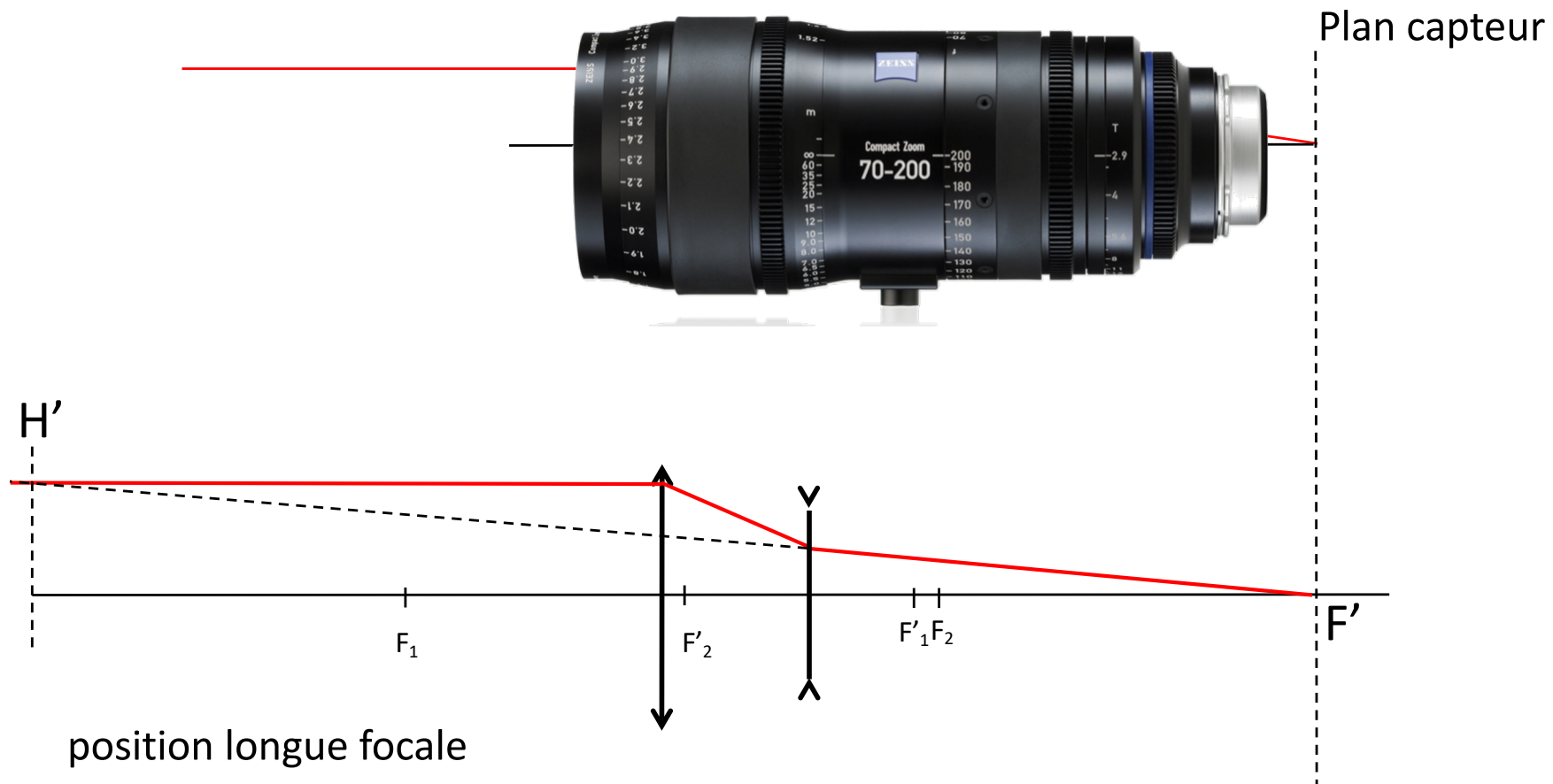


- ➔
- 15 mm
 - 30 mm
 - ▲ 60 mm

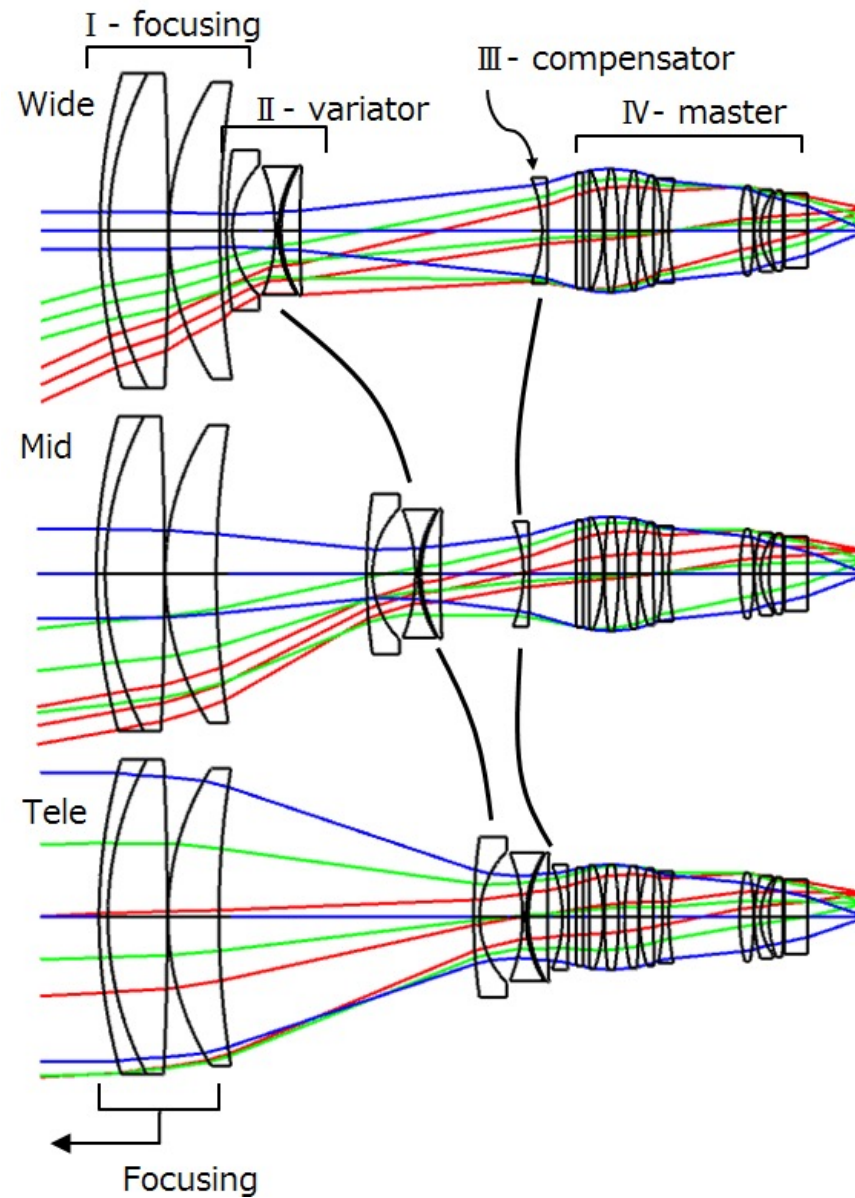
Objectif à focale variable (le zoom)



Objectif à focale variable (le zoom)



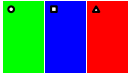
Objectif à focale variable (le zoom)

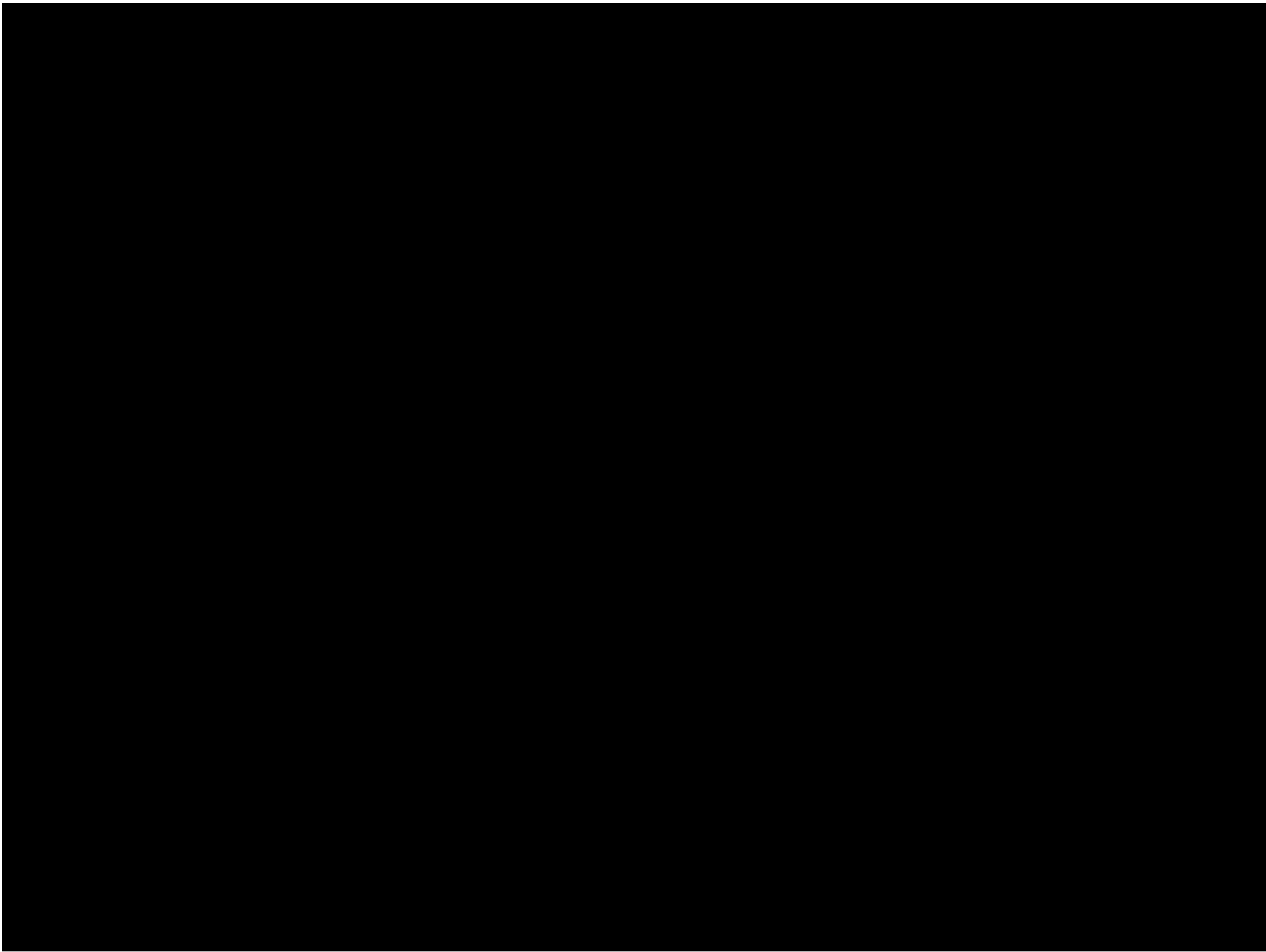


Optique paraxiale des systèmes centrés

Révisions 

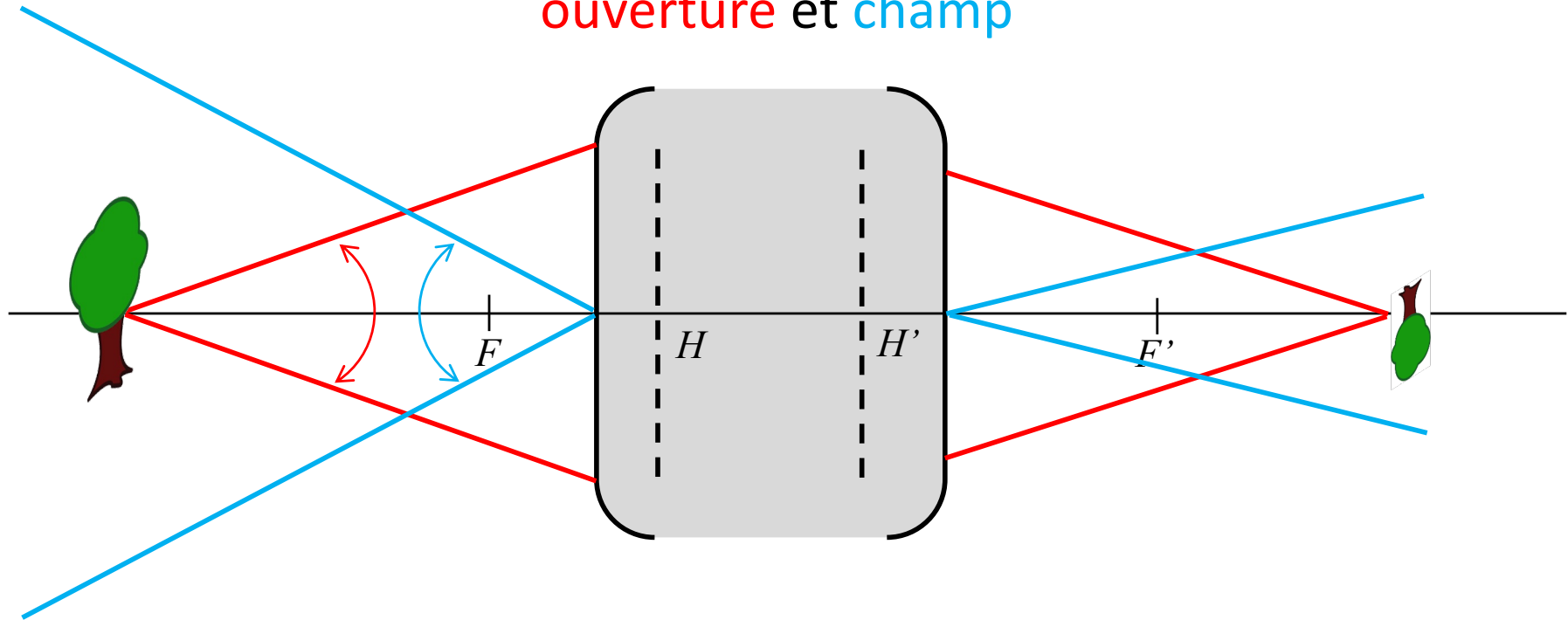
- Formule de conjugaison
- Grandissements transversal/longitudinal
- Puissance
- Invariant de Lagrange
- Focale d'un dioptré sphérique
- Focale d'un miroir sphérique

Suite ... 



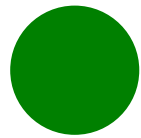
Limitation des faisceaux

ouverture et champ

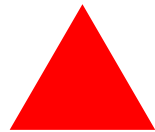


L'**angle d'ouverture** objet (respectivement image) correspond à l'angle du rayon le plus incliné qui entre dans (respectivement sort de) l'instrument pour le point de l'objet placé sur l'axe optique. L'ouverture conditionne le flux transmis, la qualité de l'image et la profondeur de champ du système. Si l'objet est à l'infini, l'ouverture est définie par le diamètre du cylindre de rayons qui entrent dans le système. Le **champ** objet correspond à la taille maximale de l'objet qui peut être imagé par le système optique. On peut définir ce champ par une unité métrique si l'objet est à distance finie ou par une unité angulaire si l'objet est à l'infini. Nous aborderons en détail tous ces aspects.

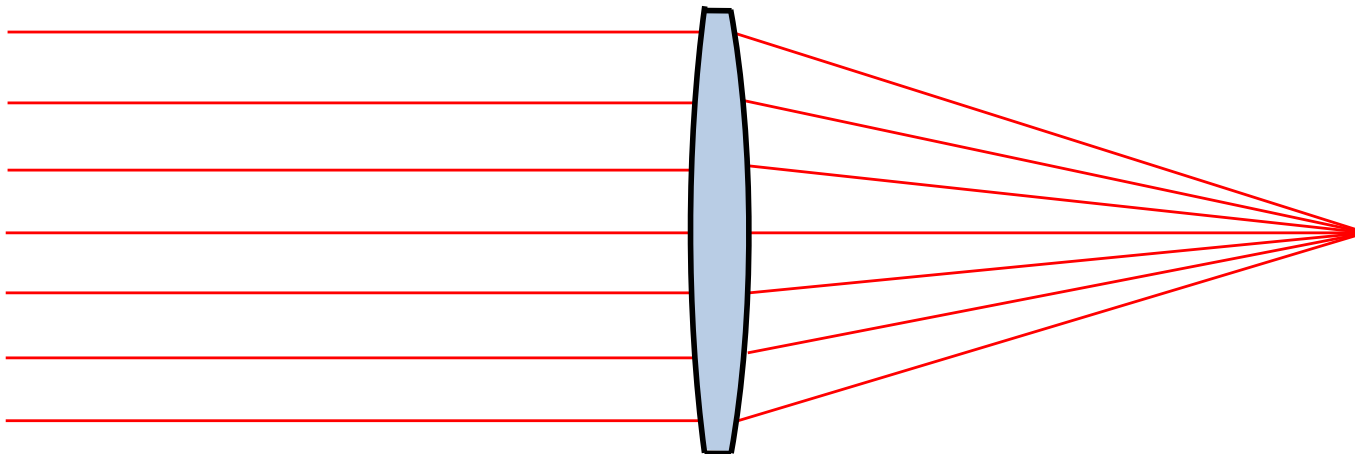
Dans ce schéma les rayons varient avec



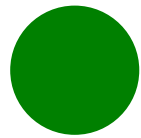
avec le champ



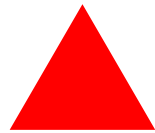
avec l'ouverture



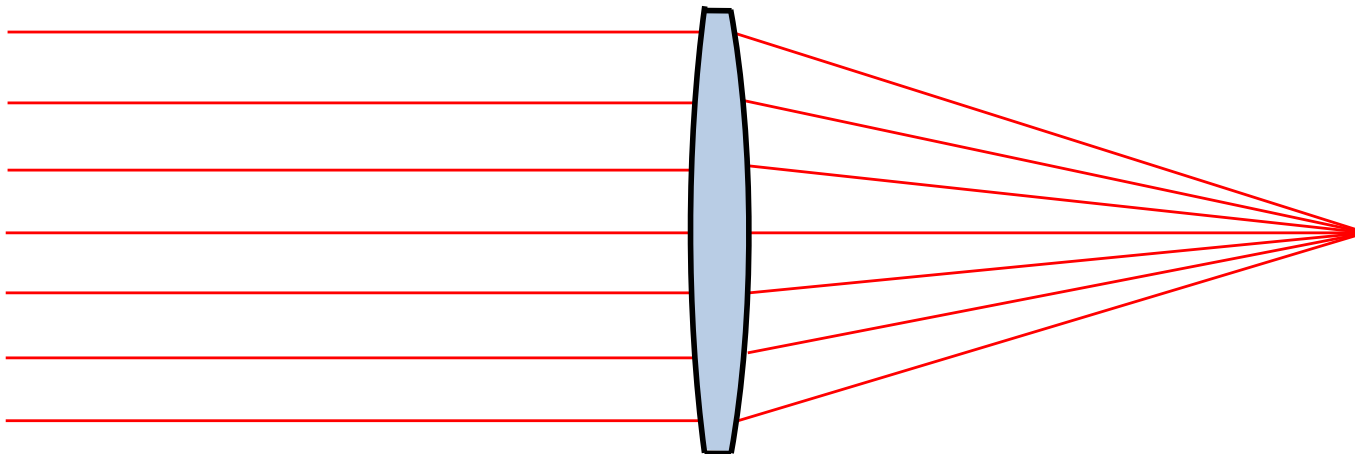
Dans ce schéma les rayons varient avec



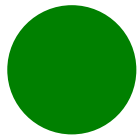
avec le champ



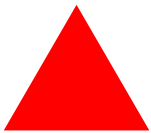
avec l'ouverture



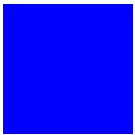
Quel élément limite le champ dans un sténopé ?



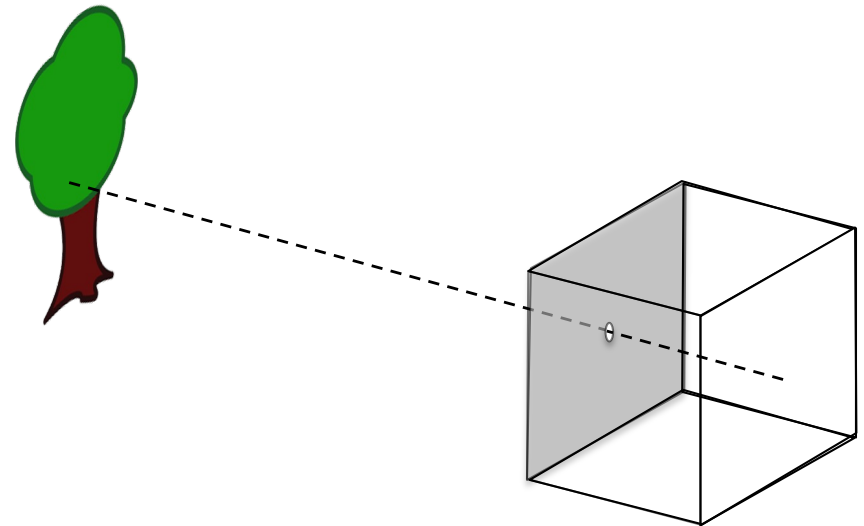
La taille du trou



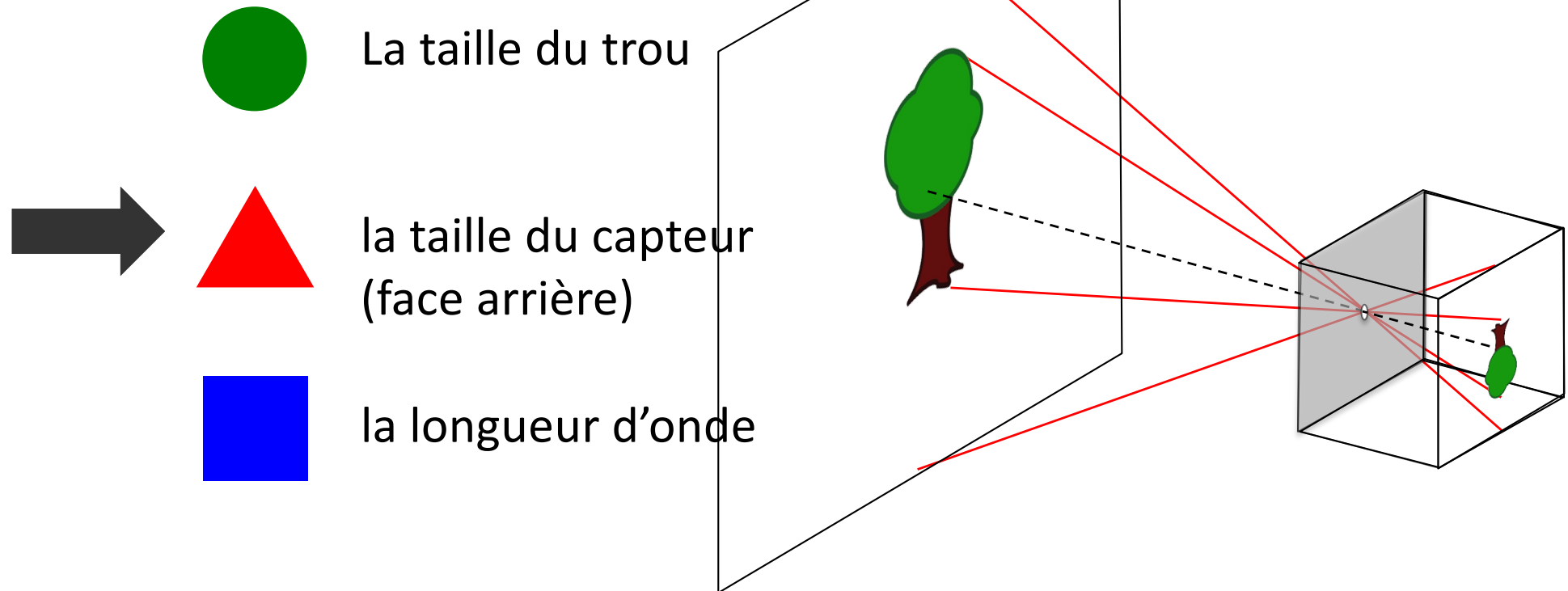
la taille du capteur
(face arrière)



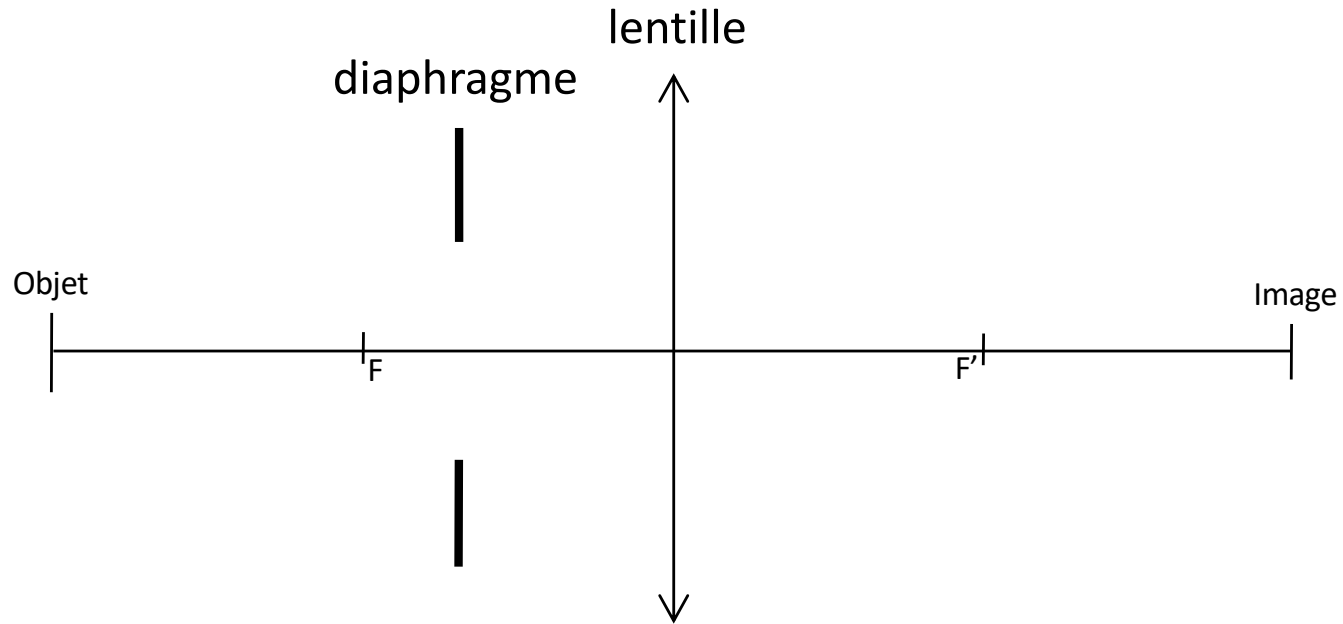
la longueur d'onde



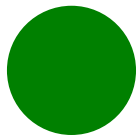
Quel élément limite le champ dans un sténopé ?



Quel élément limite l'ouverture ?



le diaphragme

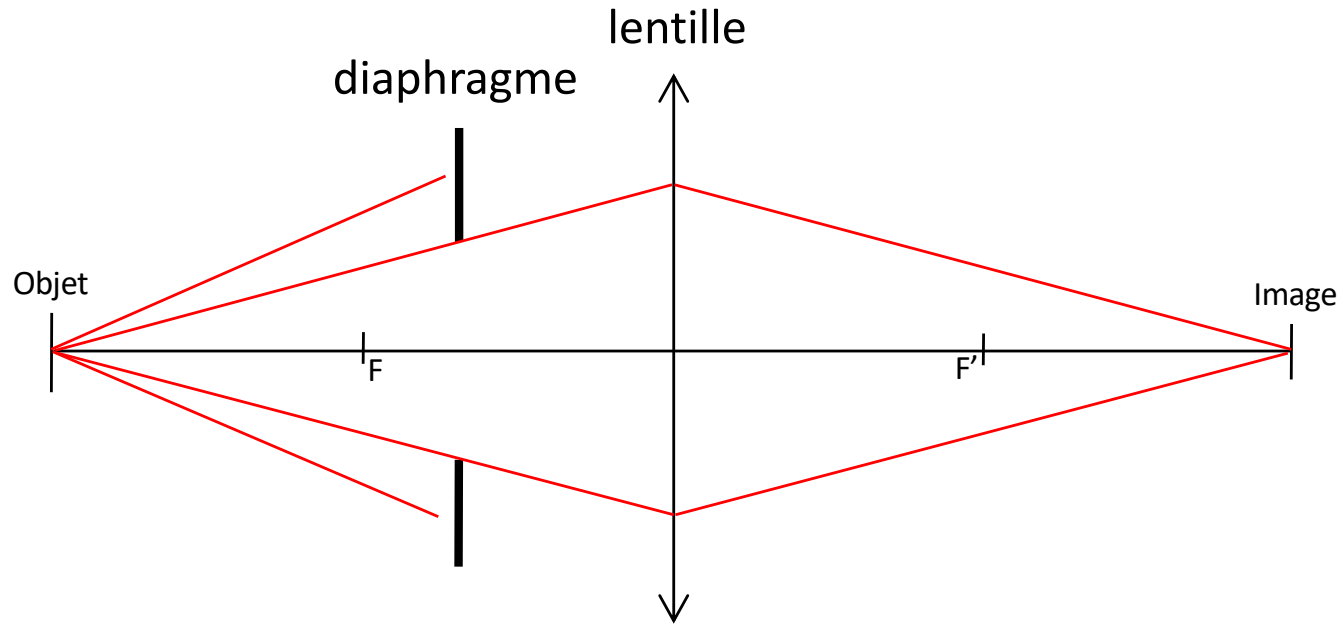


la lentille

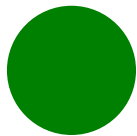


les deux

Quel élément limite l'ouverture ?



le diaphragme

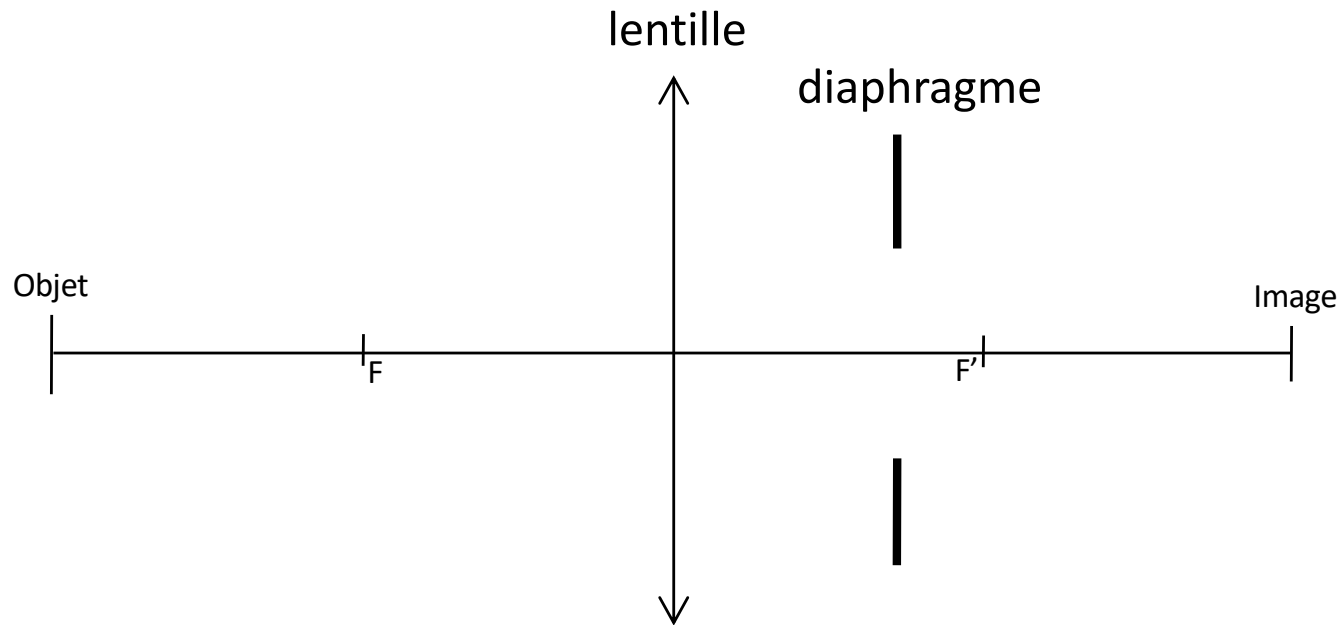


la lentille

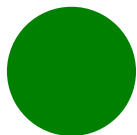


les deux

Quel élément limite l'ouverture ?



le diaphragme

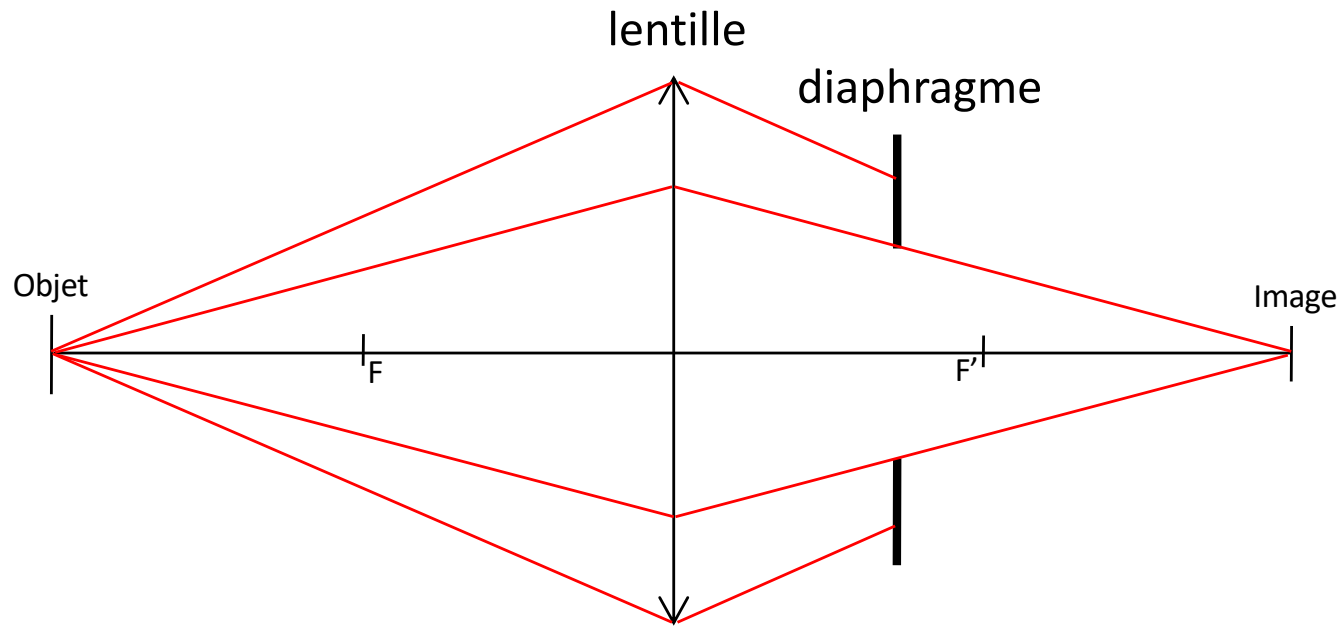


la lentille

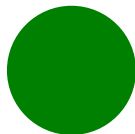


les deux

Quel élément limite l'ouverture ?



le diaphragme

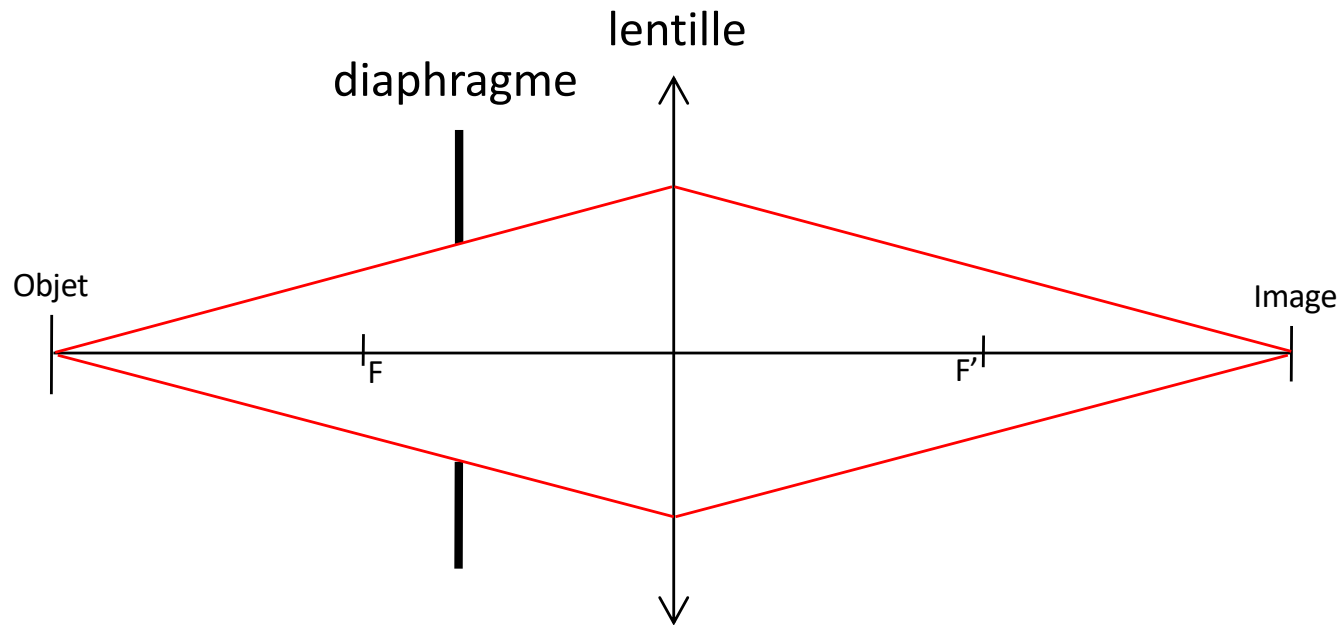


la lentille

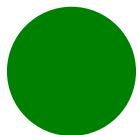


les deux

Quel élément limite l'ouverture des rayons dans l'espace de sortie ?



le diaphragme

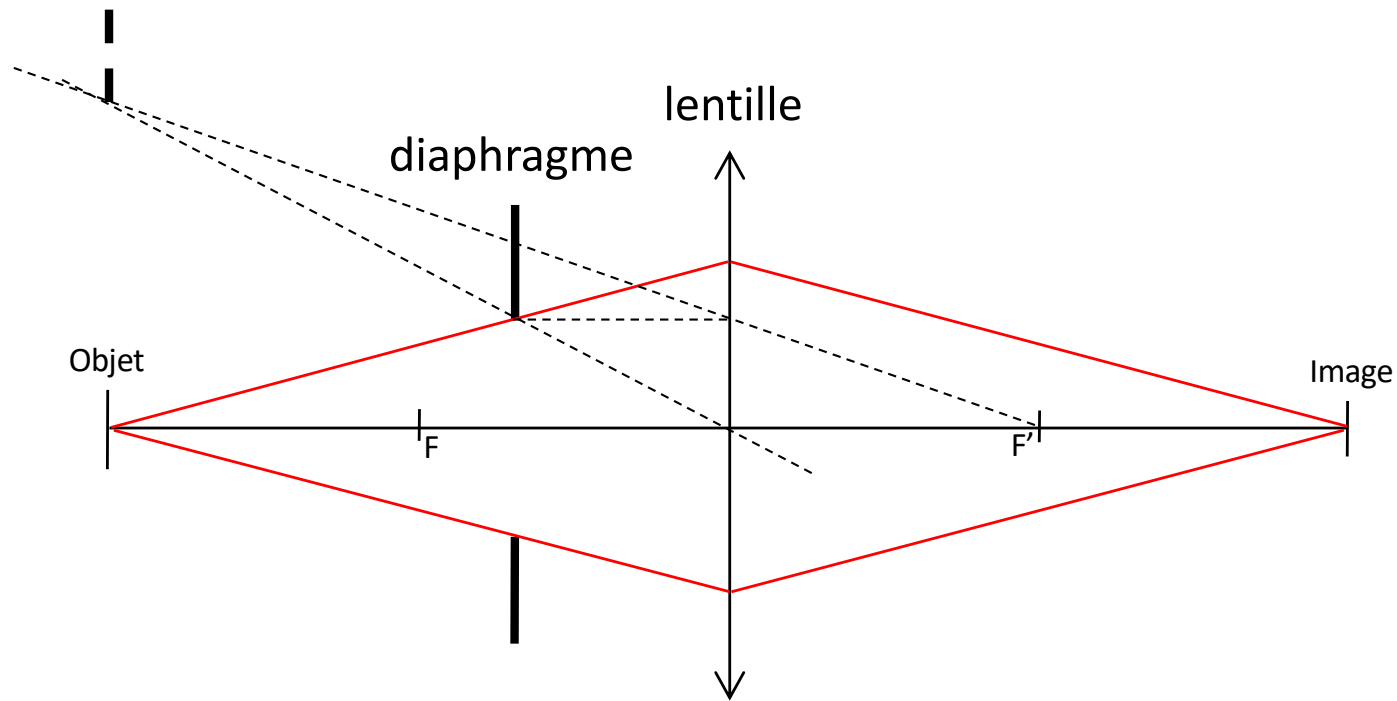


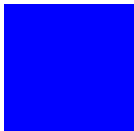
la lentille

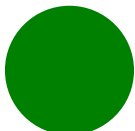


l'image du diaphragme par la lentille

Quel élément limite l'ouverture des rayons dans l'espace de sortie ?



  le diaphragme

 la lentille

  l'image du diaphragme par la lentille

cours 4

17 septembre

Optique paraxiale des systèmes centrés

Diaphragme d'ouverture

Pupille d'entrée, pupille de sortie

Ouverture numérique

Nombre d'ouverture

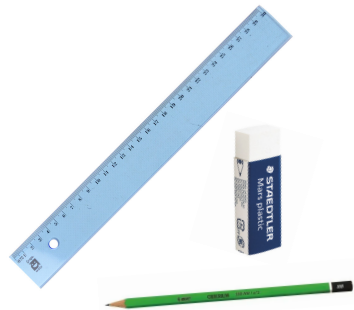
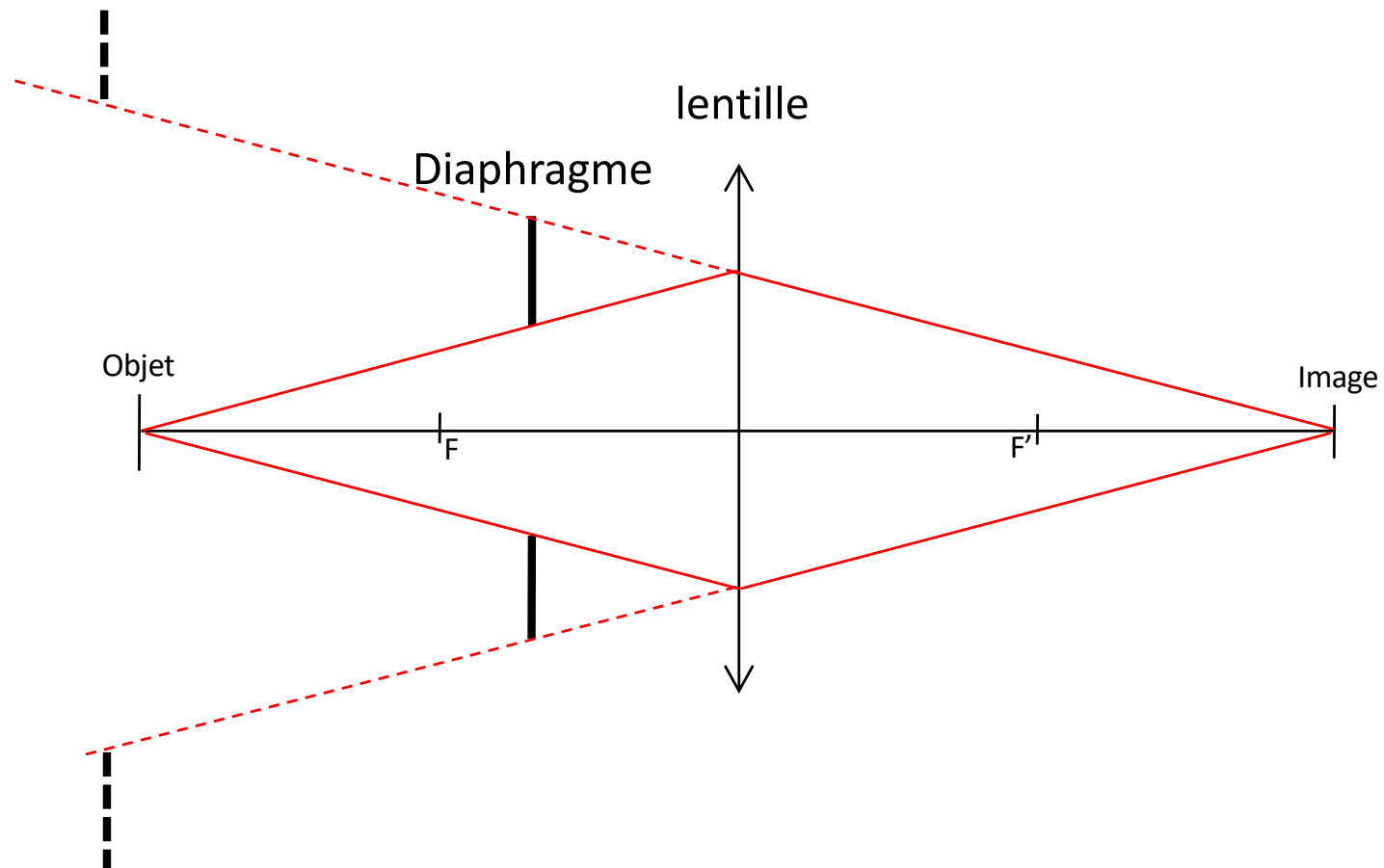


Image du diaphragme par la lentille



L'ouverture est (ici) limitée par le diaphragme

L'élément physique dans un système optique (lentille, miroir, diaphragme) qui limite l'ouverture des rayons pour un point objet sur l'axe s'appelle le **diaphragme d'ouverture (DO)** (ou la pupille du système)

En anglais, *aperture stop*

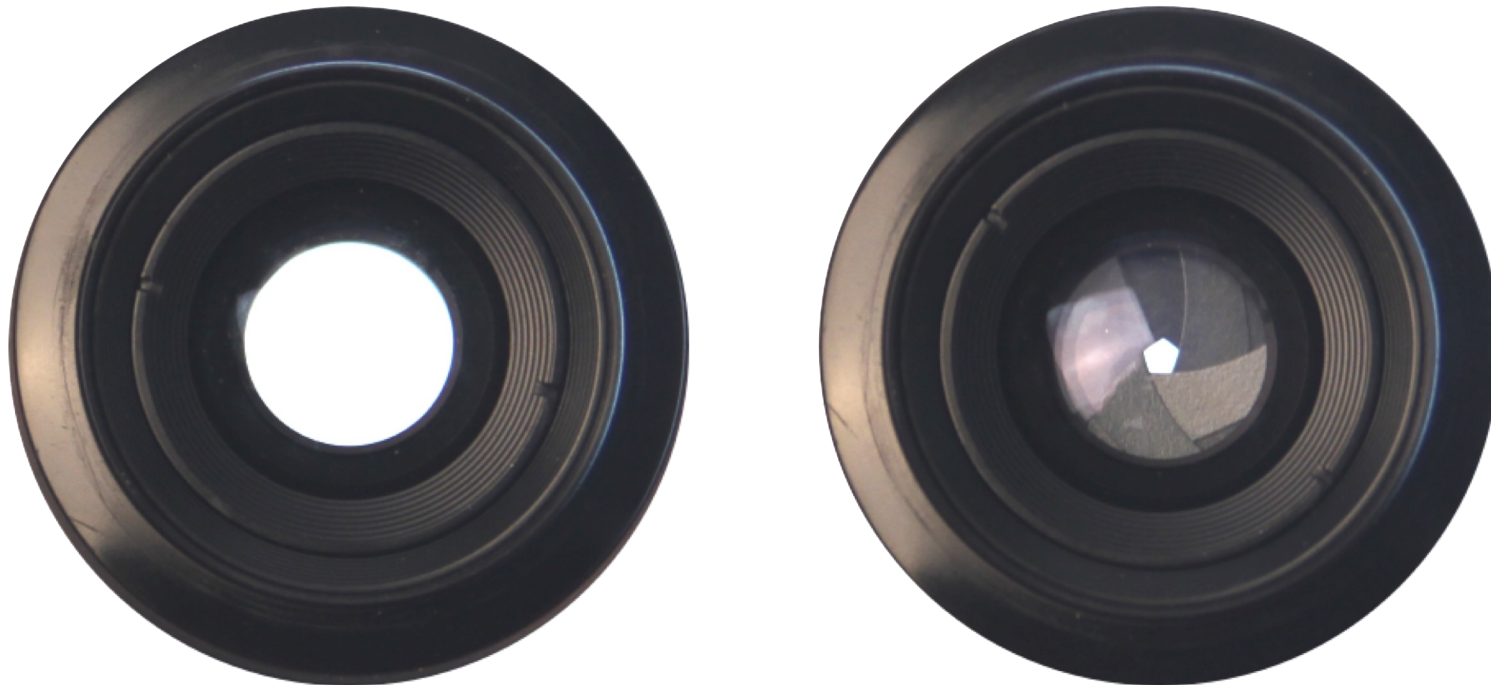
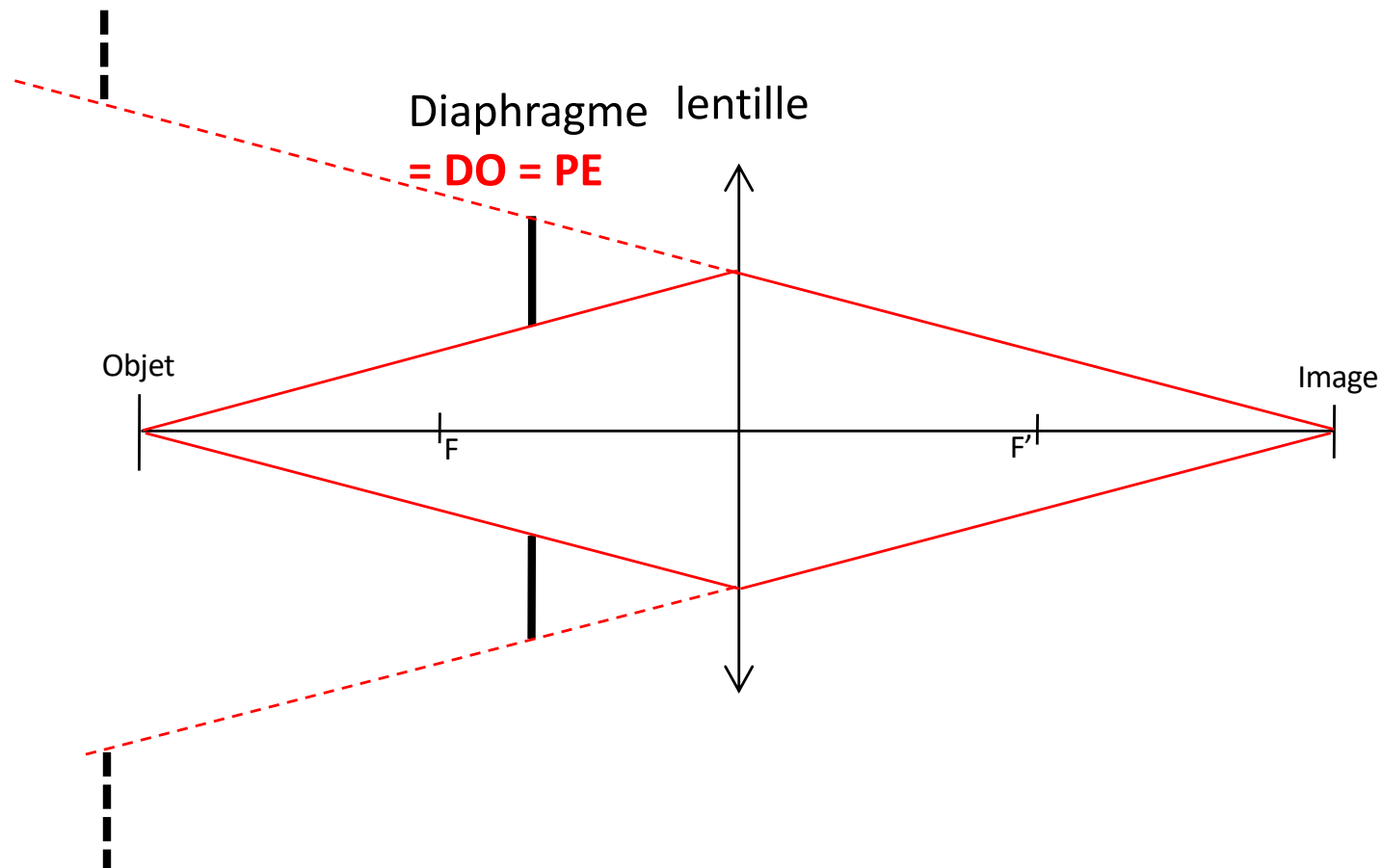
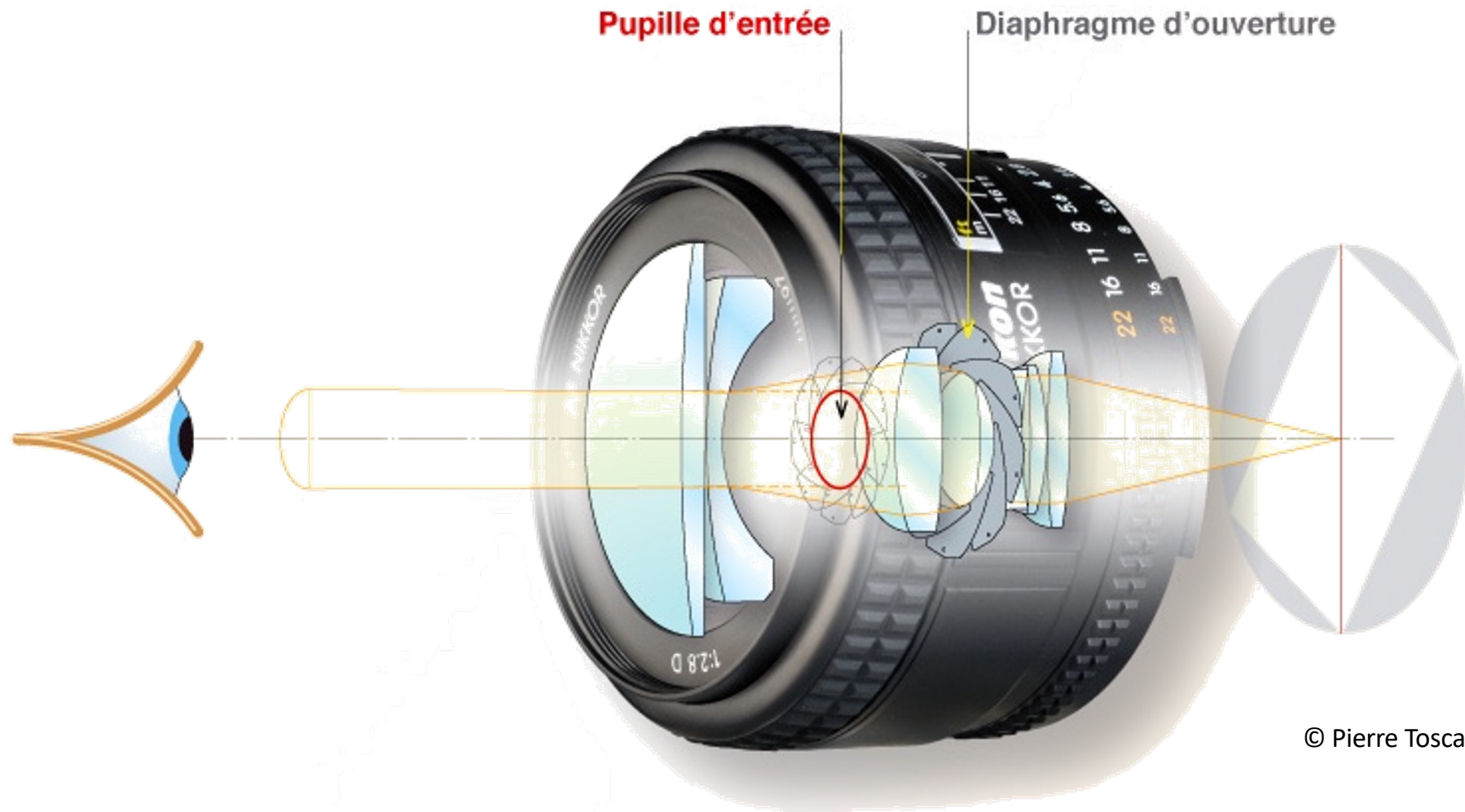
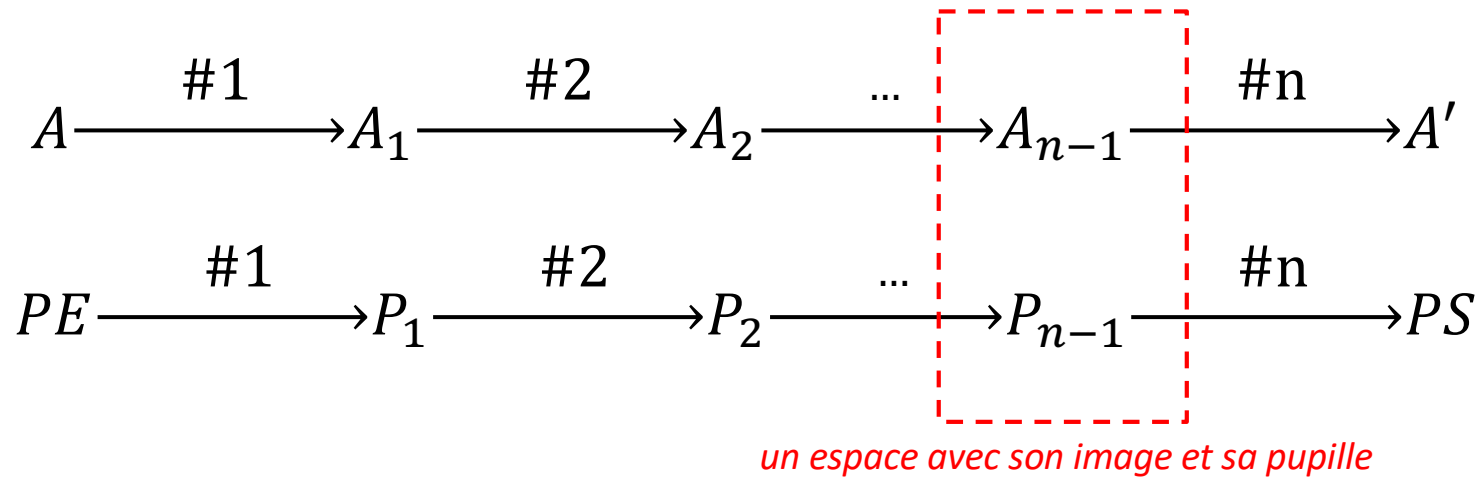


Image du diaphragme par la lentille = **PS**



Le diaphragme est la pupille d'entrée (ici $PE = DO$)
Son conjugué dans l'espace de sortie est la pupille de sortie (PS)



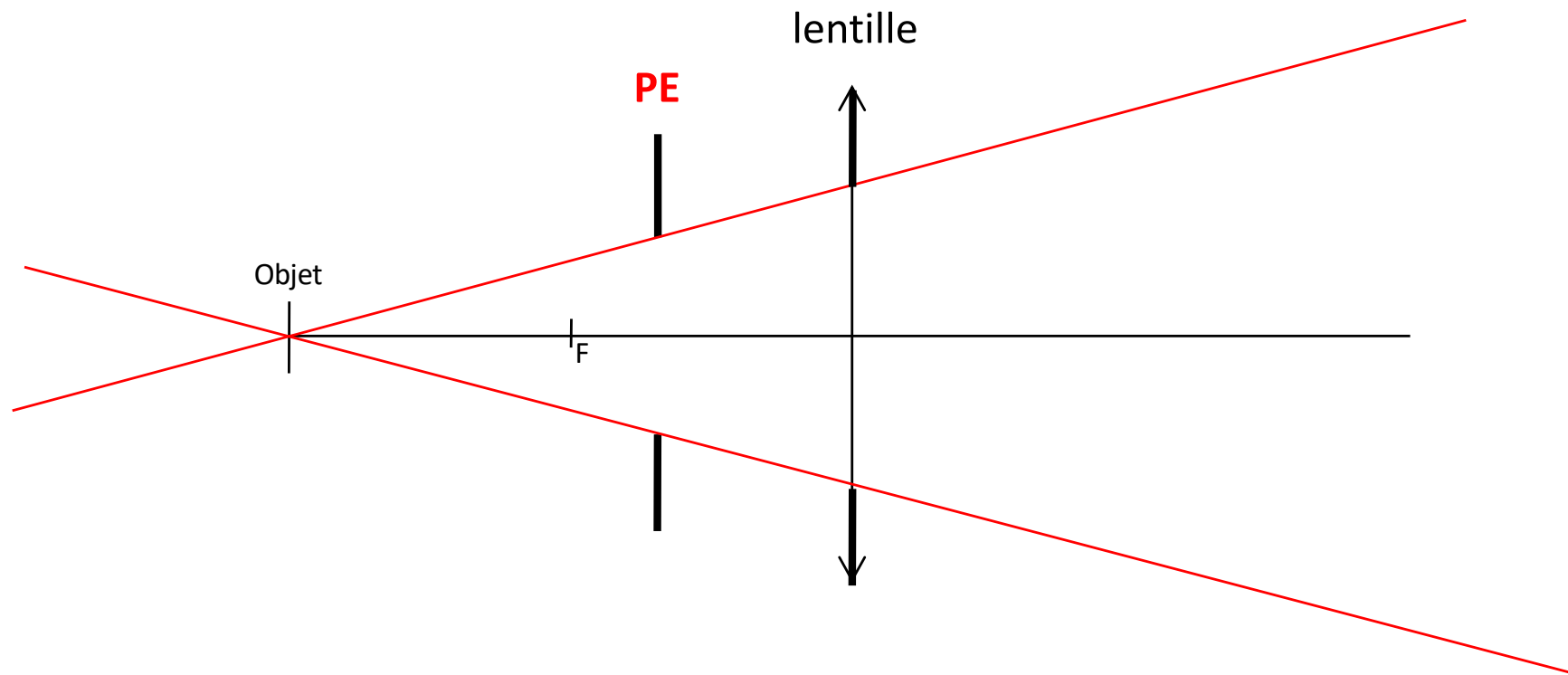


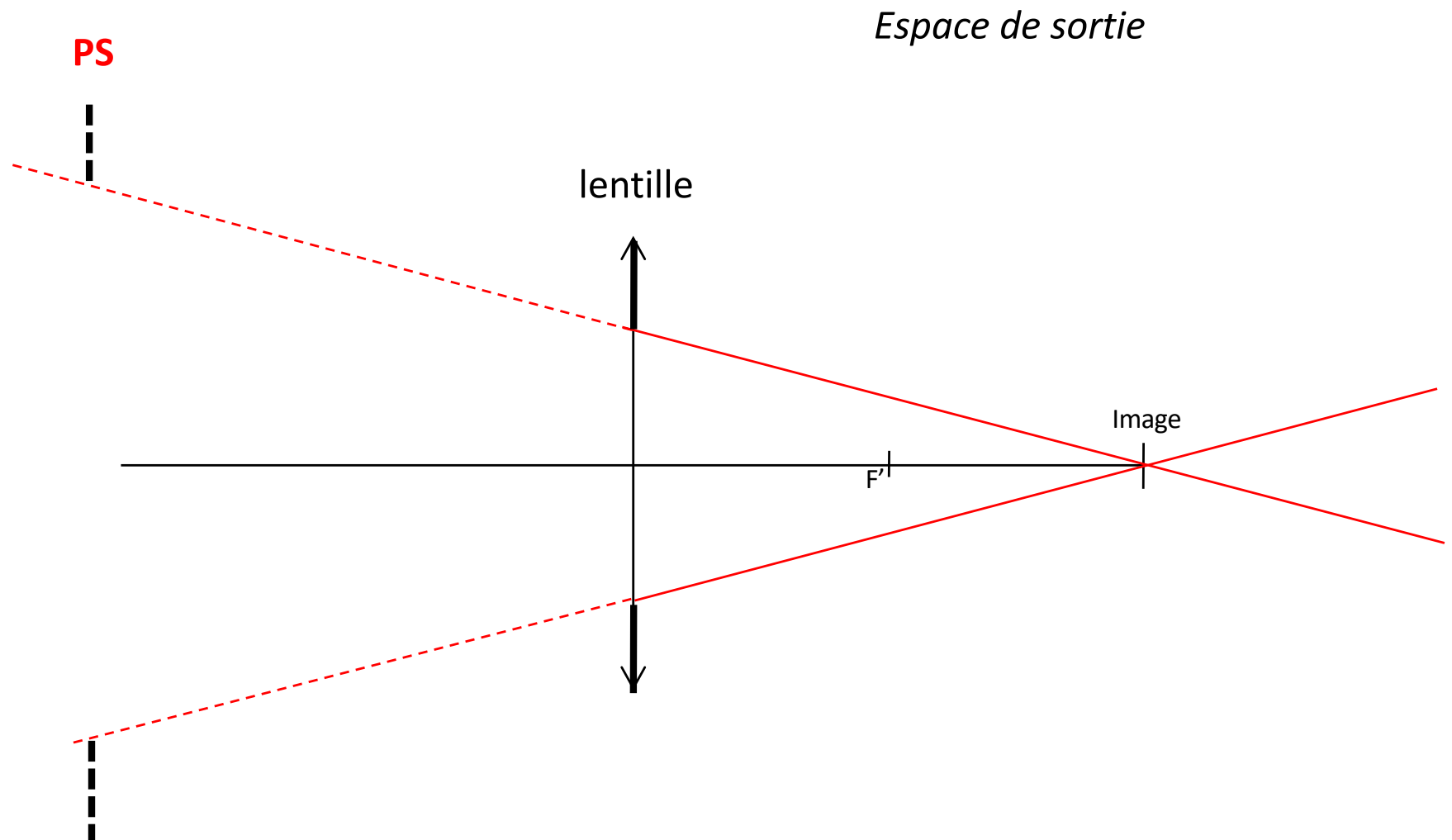
Il y a autant de pupilles que d'espaces, mais une seule est le diaphragme d'ouverture.

Dans un espace donné la pupille est l'élément, ou l'image ou l'antécédent d'un élément, vu sous le plus petit angle du point sur l'axe de l'image associée.

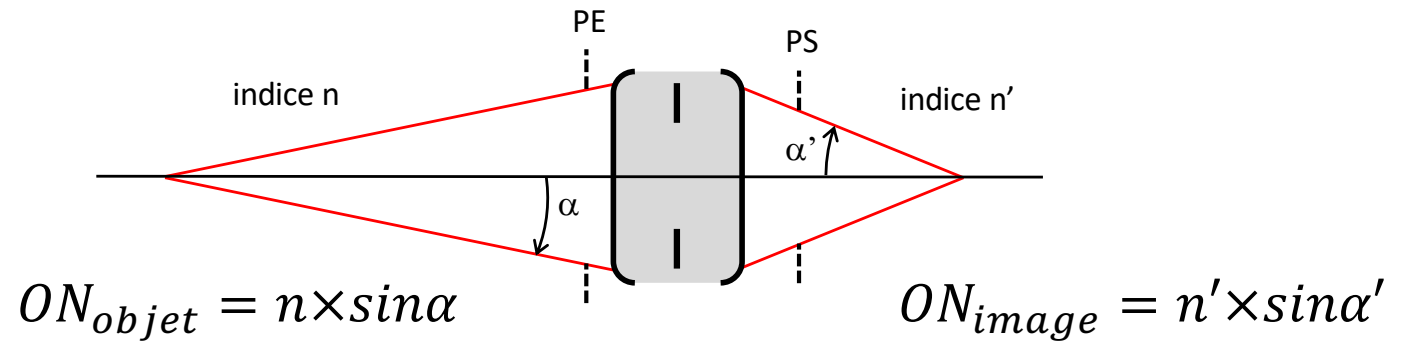
Pour déterminer la pupille il peut être judicieux de traiter le S.O. dans un de ses **espaces** (celui par exemple qui demande le moins de conjugaisons pour ramener tous les éléments dans cet espace).

Espace d'entrée





Ouverture Numérique (*numerical aperture*)

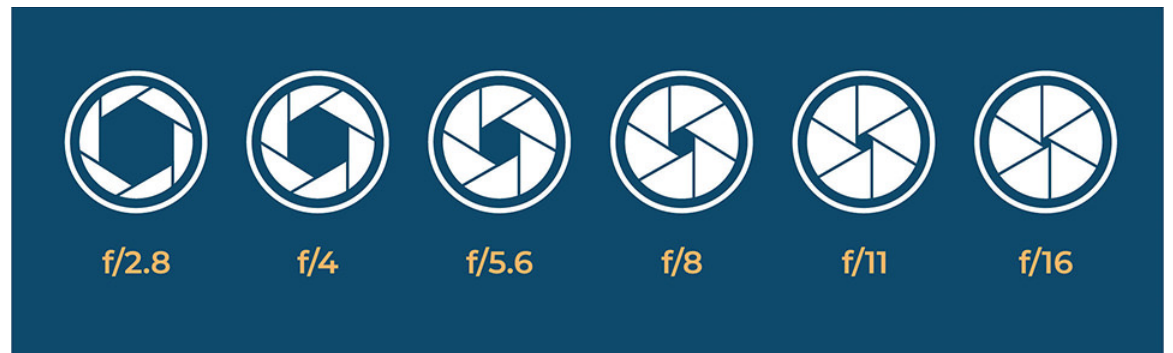


Dans un objectif de microscope la conjugaison objet-image est optimisée pour une seule position de l'objet. **L'ouverture numérique** objet est fixe et est donc inscrite sur le corps de l'objectif.

Nombre d'Ouverture (*f-number*)



$$N = \frac{\text{distance focale}}{\text{diamètre pupille d'entrée}}$$



tracés pupilles

(fichier à part)

Entrainement aux constructions géométriques des pupilles

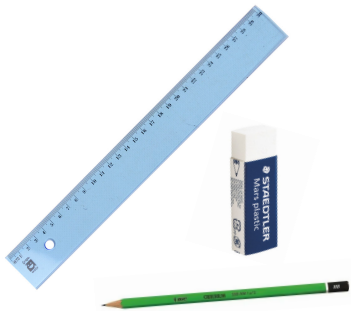
- Si le diaphragme d'ouverture (DO) n'est pas mentionné, il faut le déterminer.
- Positionner les pupilles d'entrée et de sortie.
- Tracer deux rayons s'appuyant sur les deux bords de la pupille d'entrée, et traversant tout l'instrument provenant de l'objet ponctuel (A) positionné sur l'axe.
- A_∞ signifie que le point est positionné à l'infini sur l'axe.

cours 5

23 septembre

Optique paraxiale des systèmes centrés

Révisions 

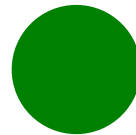




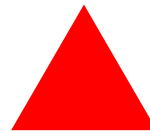
Que voyez-vous ?



La pupille de sortie



La pupille du système



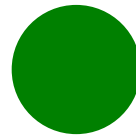
La pupille d'entrée



Que voyez-vous ?



La pupille de sortie



La pupille du système



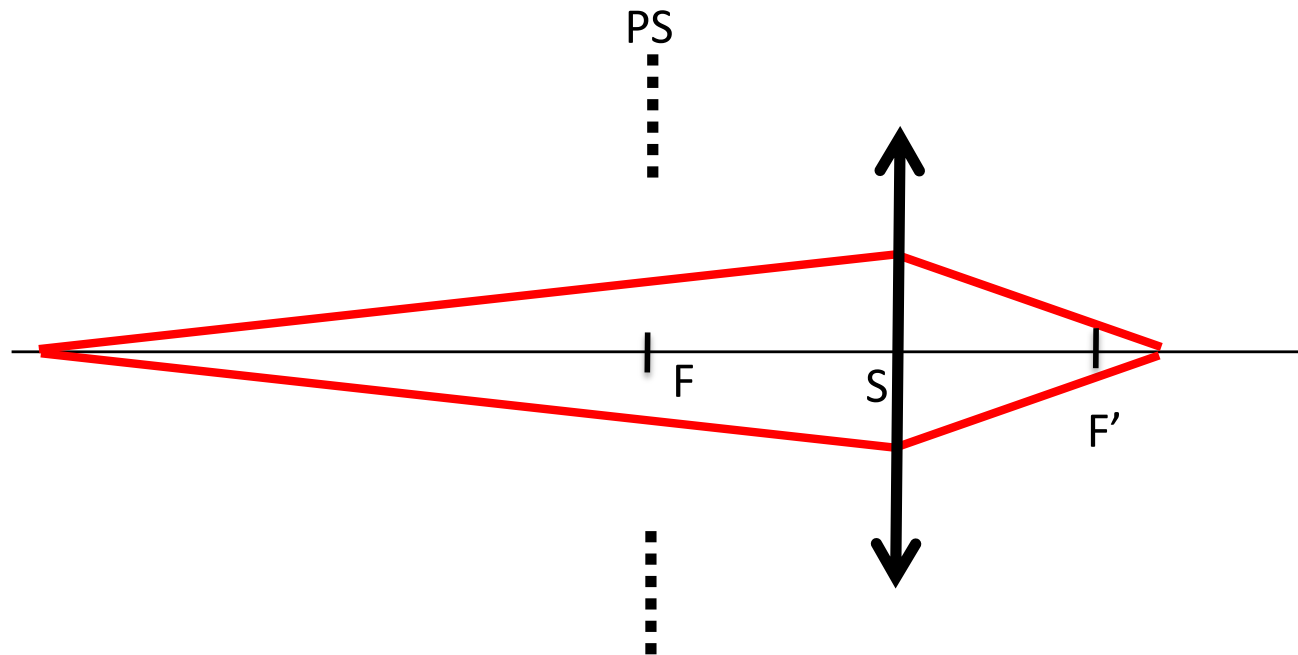
La pupille d'entrée

Où est la pupille d'entrée ?

● à l'infini

▲ en F'

■ entre F et S

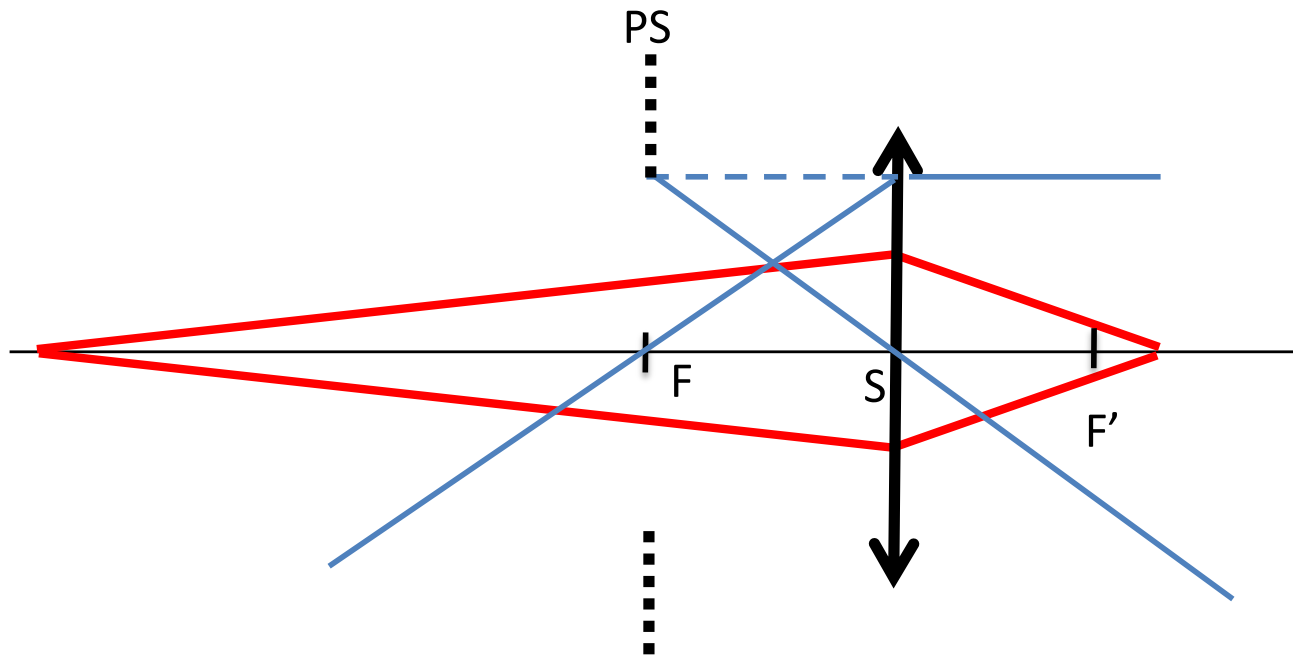


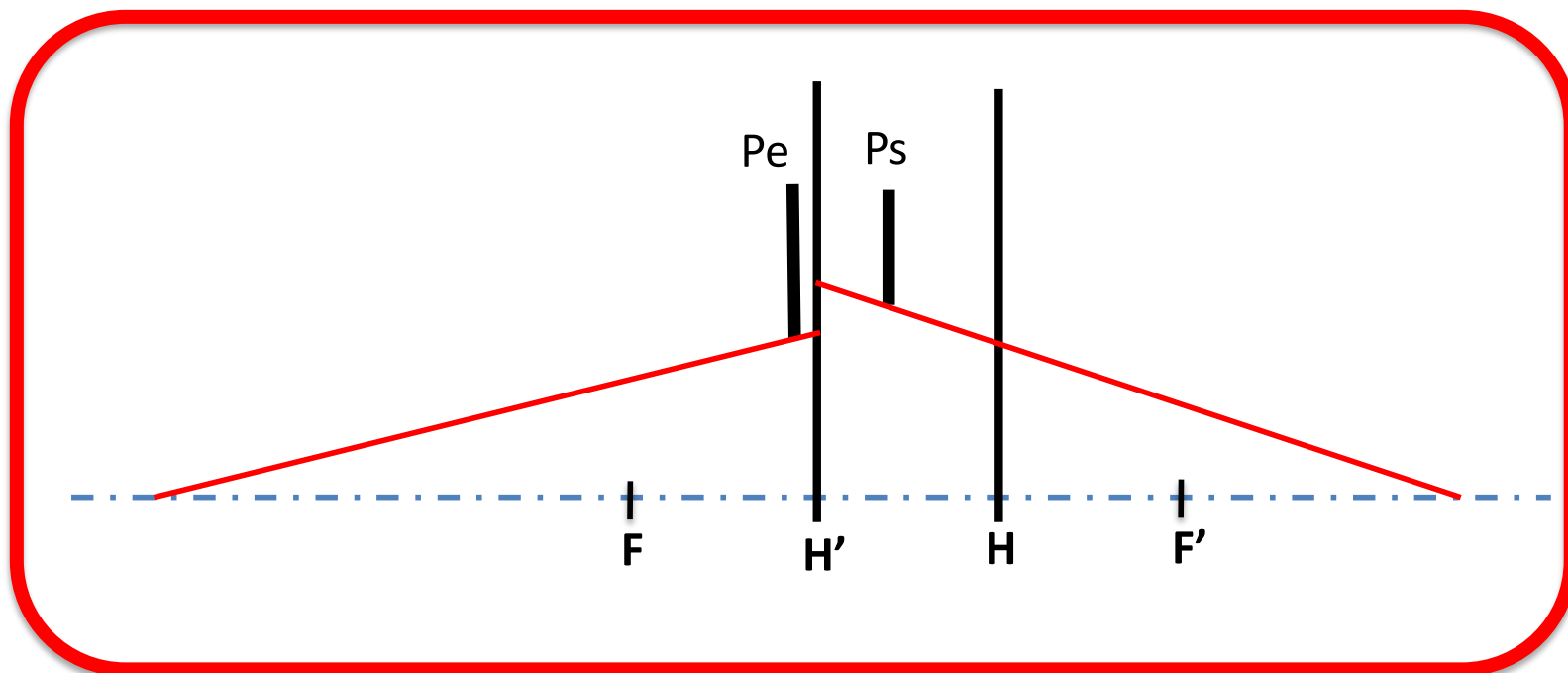
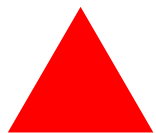
Où est la pupille d'entrée ?

● à l'infini

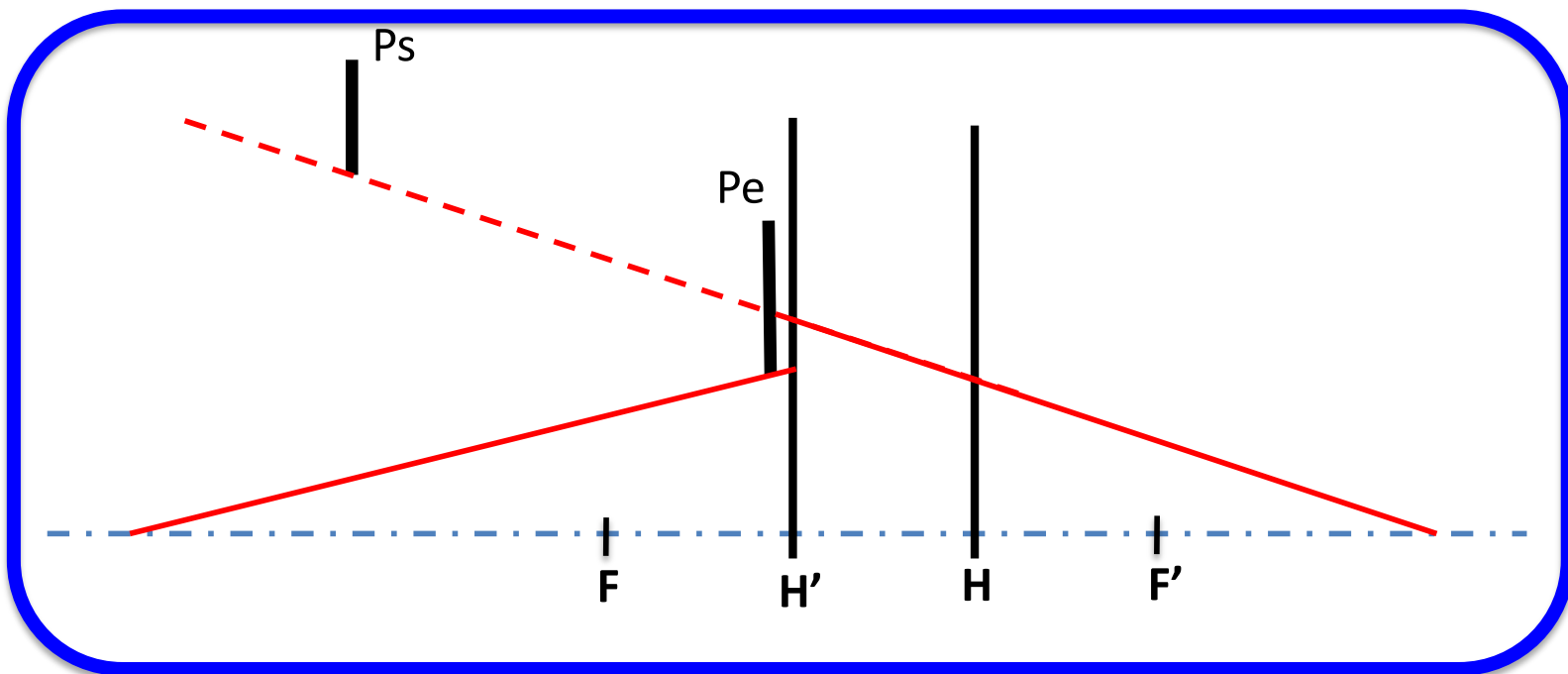
▲ en F'

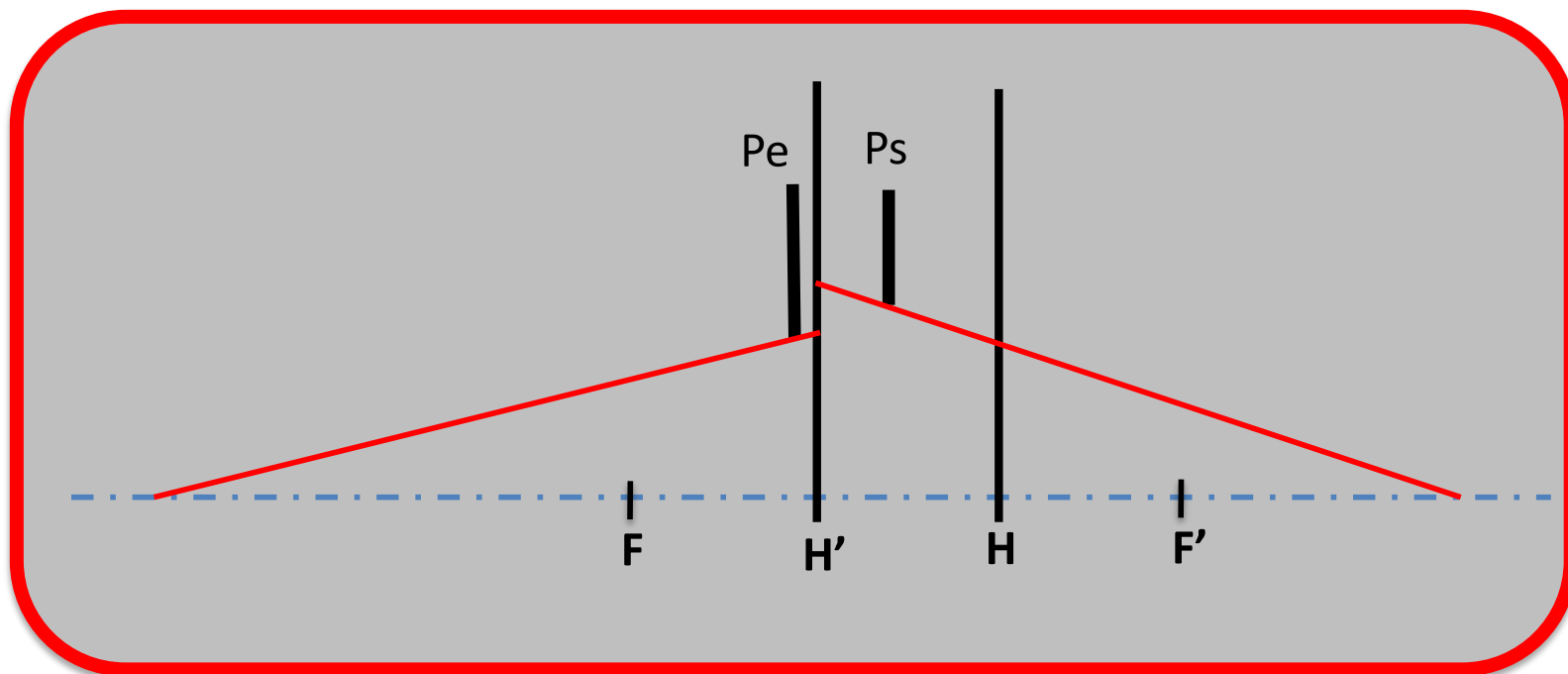
➡ ■ entre F et S



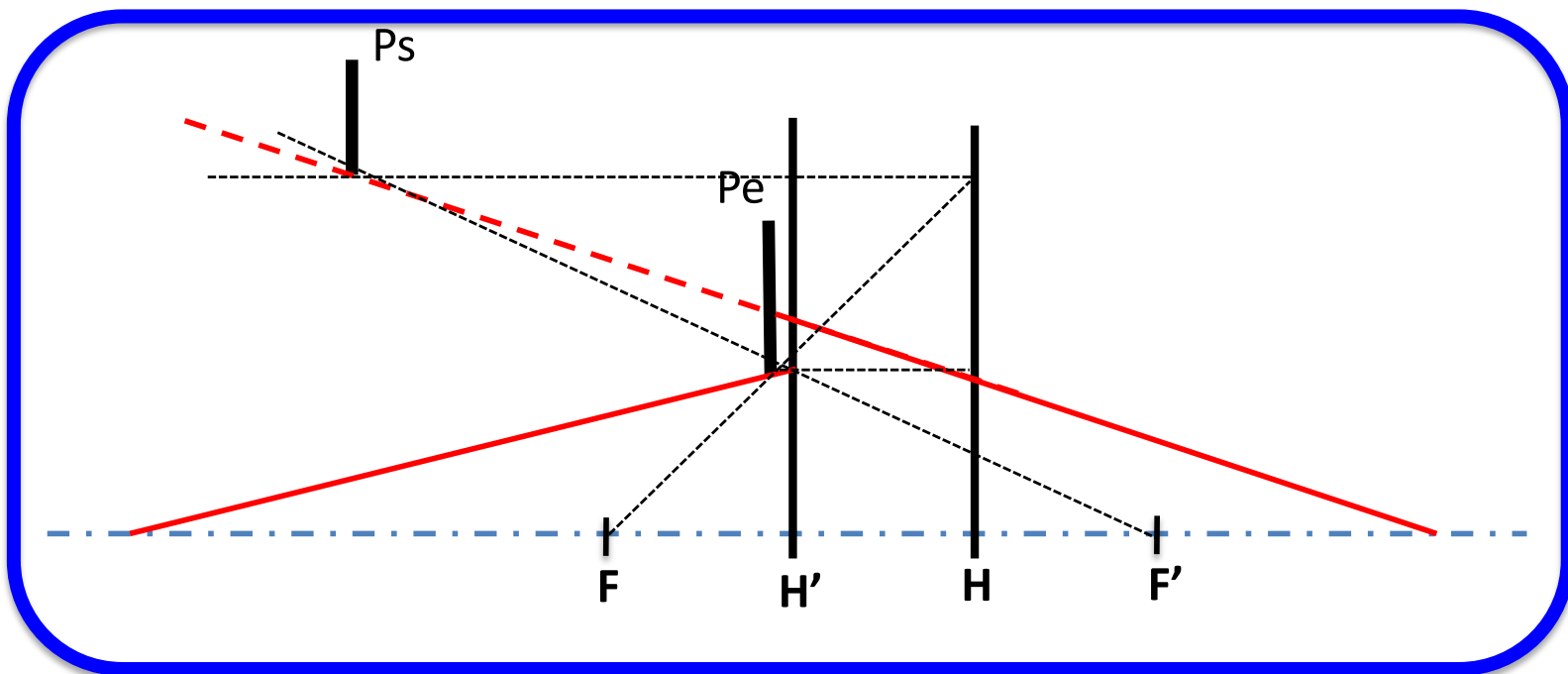


Quel schéma est vrai ?



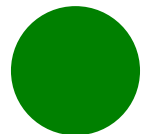


Quel schéma est vrai ?



Une lentille mince, de diamètre 10 mm, fait l'image d'un objet avec un grandissement de -5.

Quel est le diamètre de la pupille de sortie ?

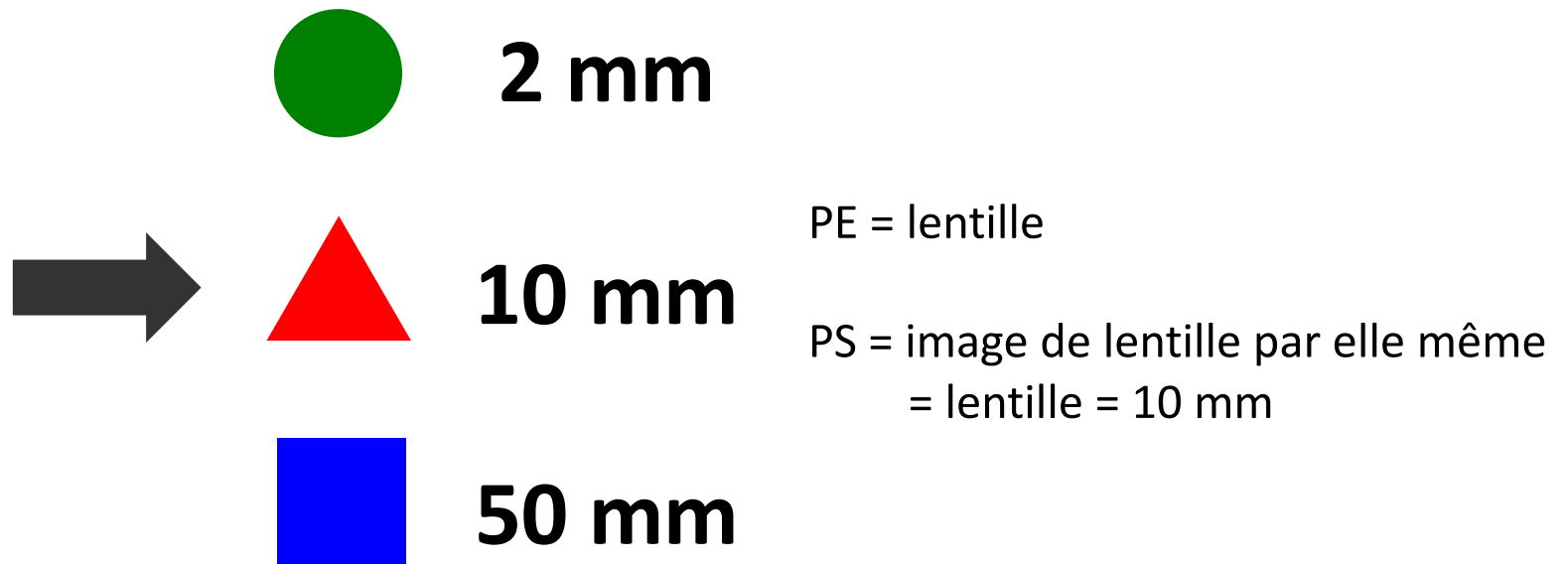
 **2 mm**

 **10 mm**

 **50 mm**

Une lentille mince, de taille 10 mm, fait l'image d'un objet avec un grandissement de -5.

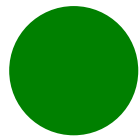
Quel est le diamètre de la pupille de sortie ?



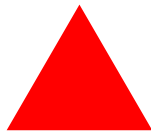
Une lentille mince convergente de focale 25 cm conjugue un objet de taille 10 cm en une image de taille 1 cm.

La pupille d'entrée est à 50 cm en avant de la lentille et son diamètre est de 1 cm.

Quelle est la taille de la pupille de sortie ?



1 mm



10 cm

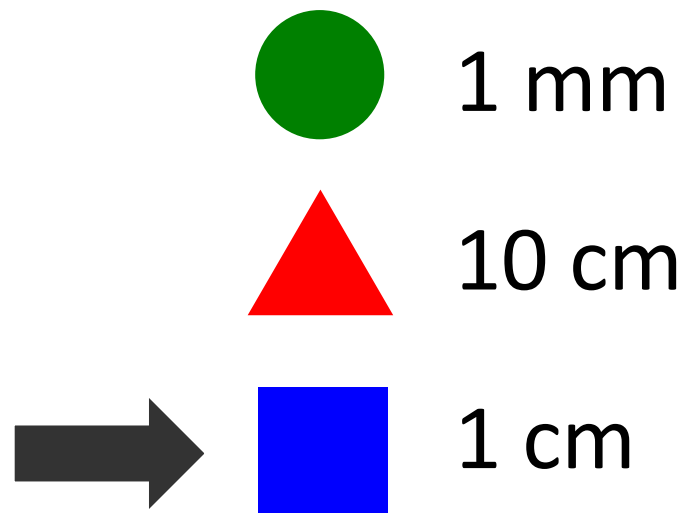


1 cm

Une lentille mince convergente de focale 25 cm conjugue un objet de taille 10 cm en une image de taille 1 cm.

La pupille d'entrée est à 50 cm en avant de la lentille et son diamètre est de 1 cm.

Quelle est la taille de la pupille de sortie ?



tracés pupilles

(fichier à part)