




Optique Instrumentale

Sébastien de Rossi

Mise à jour après chaque séance : 26 septembre 2024

- 21h de cours septembre-décembre
- 1 séance introductive 3h 
- 11 Travaux Dirigés d'1h30

Equipe pédagogique

- | | |
|----------------------|----------------------|
| • Sébastien de Rossi | enseignant-chercheur |
| • Guillaume Dupuis | enseignant-chercheur |
| • Alice Fontbonne | chercheuse ONERA |
| • Agnès Vinoy | doctorante |
| • Gonzague Bonnin | doctorant |
| • Nicolas Guénaux | doctorant |

Soutien logistique du LEnsE

Thierry Avignon et Cédric Lejeune

Evaluation

- **1 partiel 3h sur table le 24 octobre**
- **1 examen 3h sur table le 16 janvier**

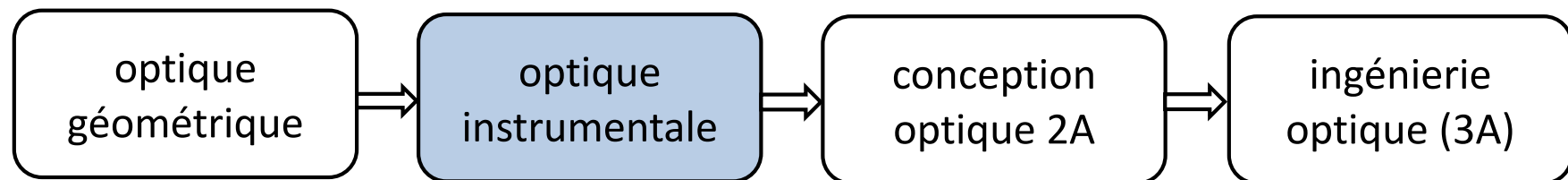
$$note\ finale = \sup \left\{ examen ; \frac{examen + partiel}{2} \right\}$$

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

lense.institutoptique.fr/optique-instrumentale-s5/

notes de cours

planches de cours

sujets et corrigés des TDs

sujets examens passés

...

textbook

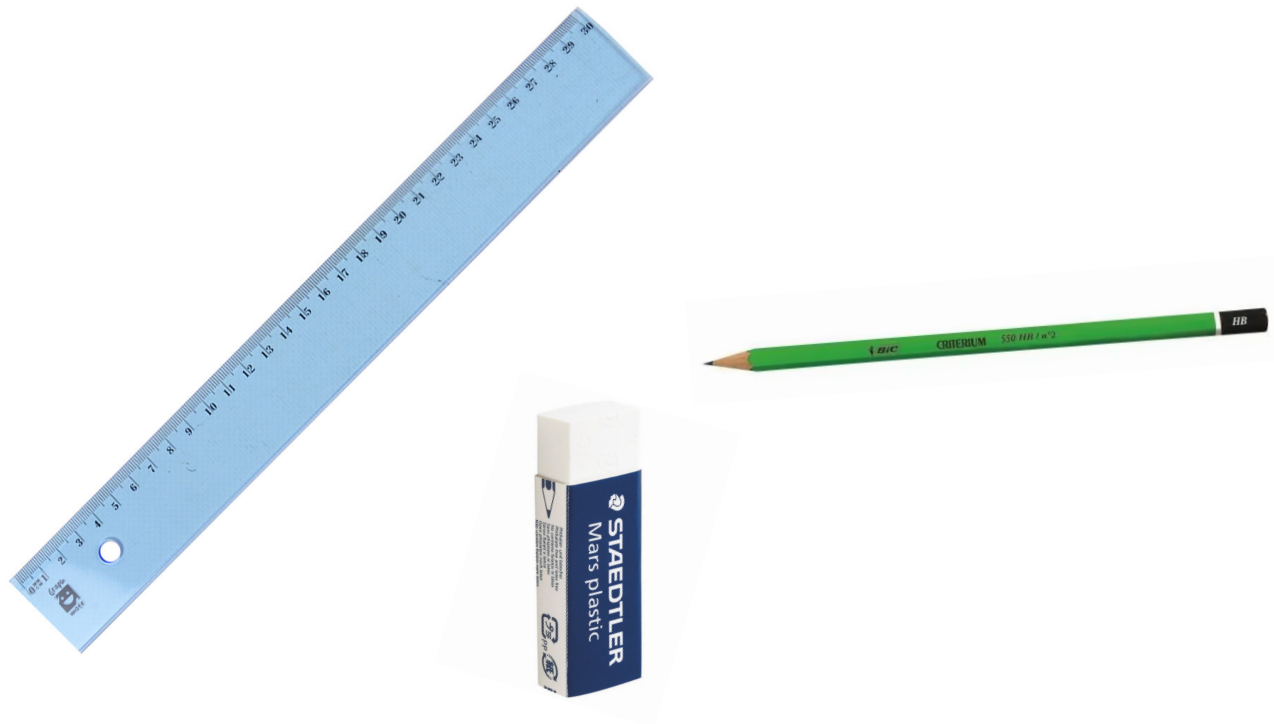
slides

tutorials

past exams



Matériel conseillé



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



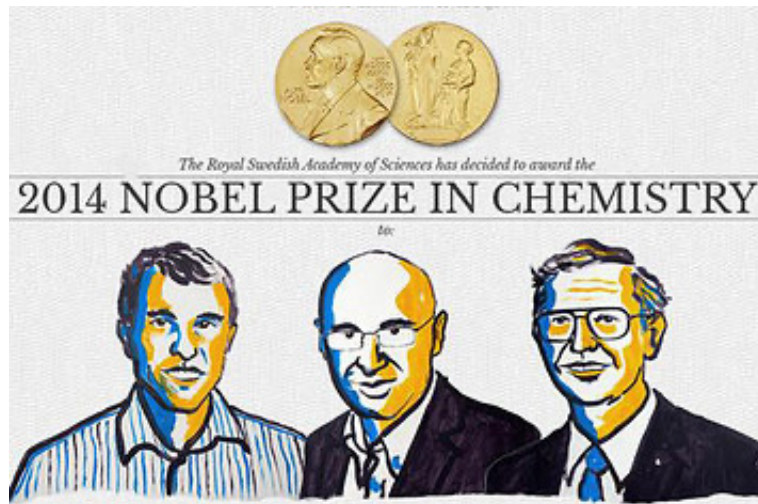
amélioration de la lunette dioptrique

Galilée, 1609

©Leemage

Voir le vivant à l'échelle nanométrique

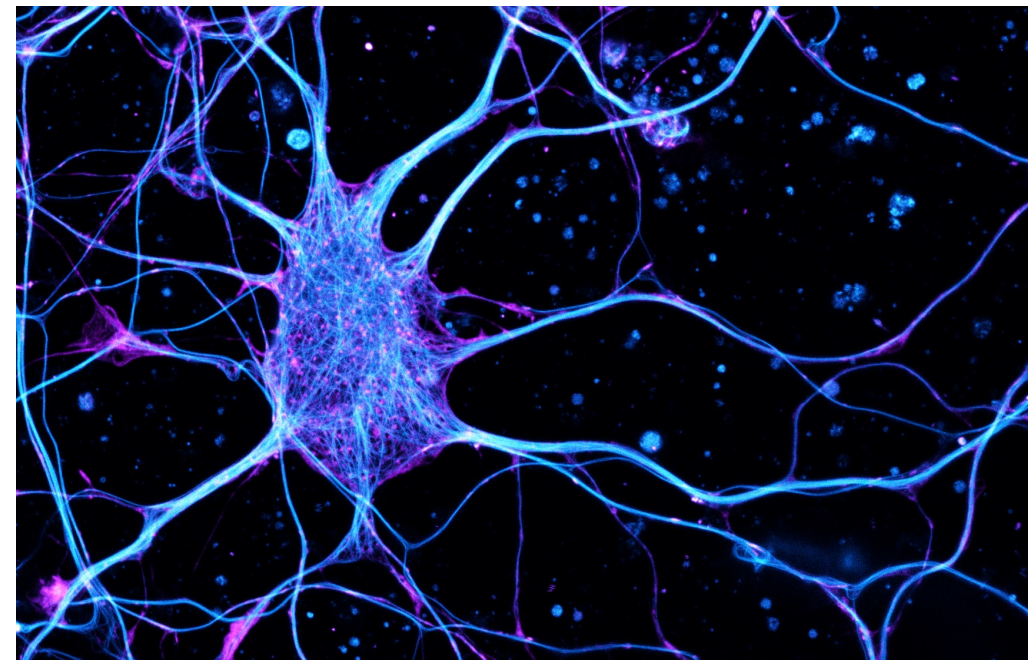
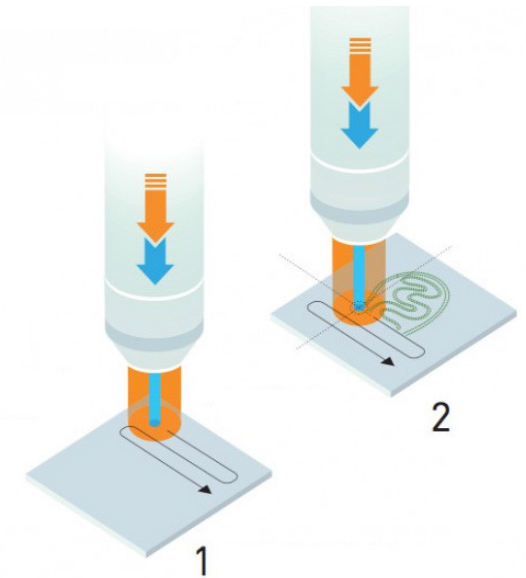
Techniques de microscopie à fluorescence



A : Excitation

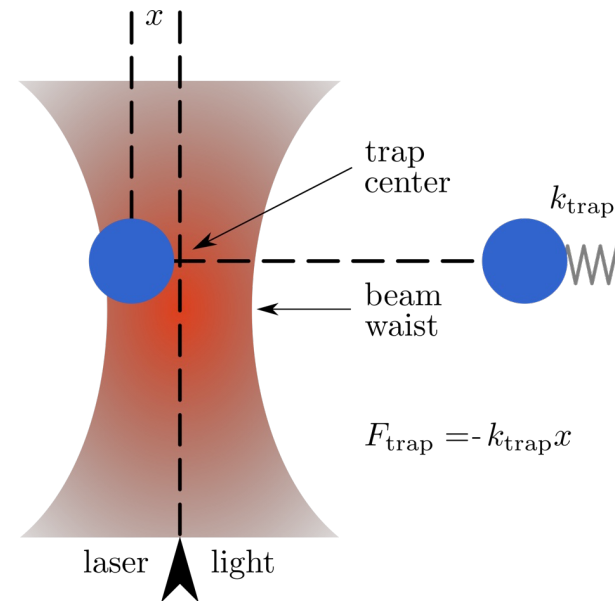
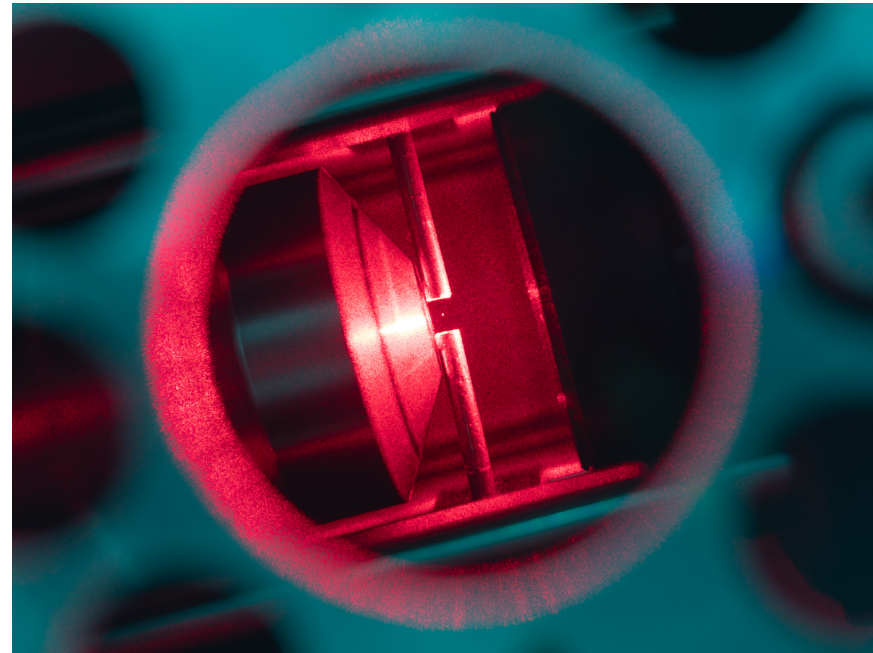
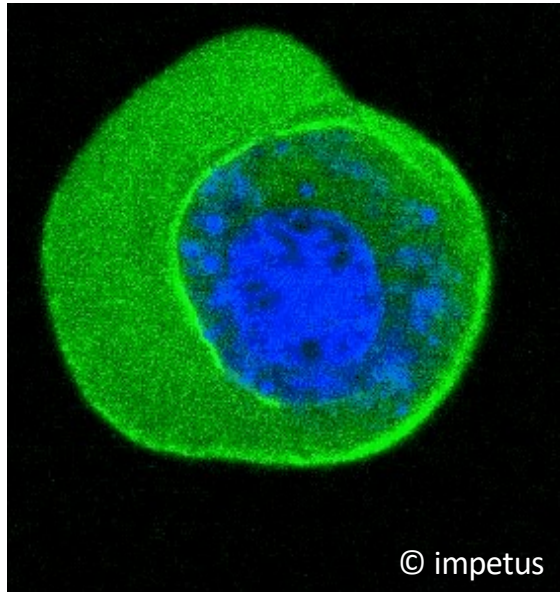
B : Annulation

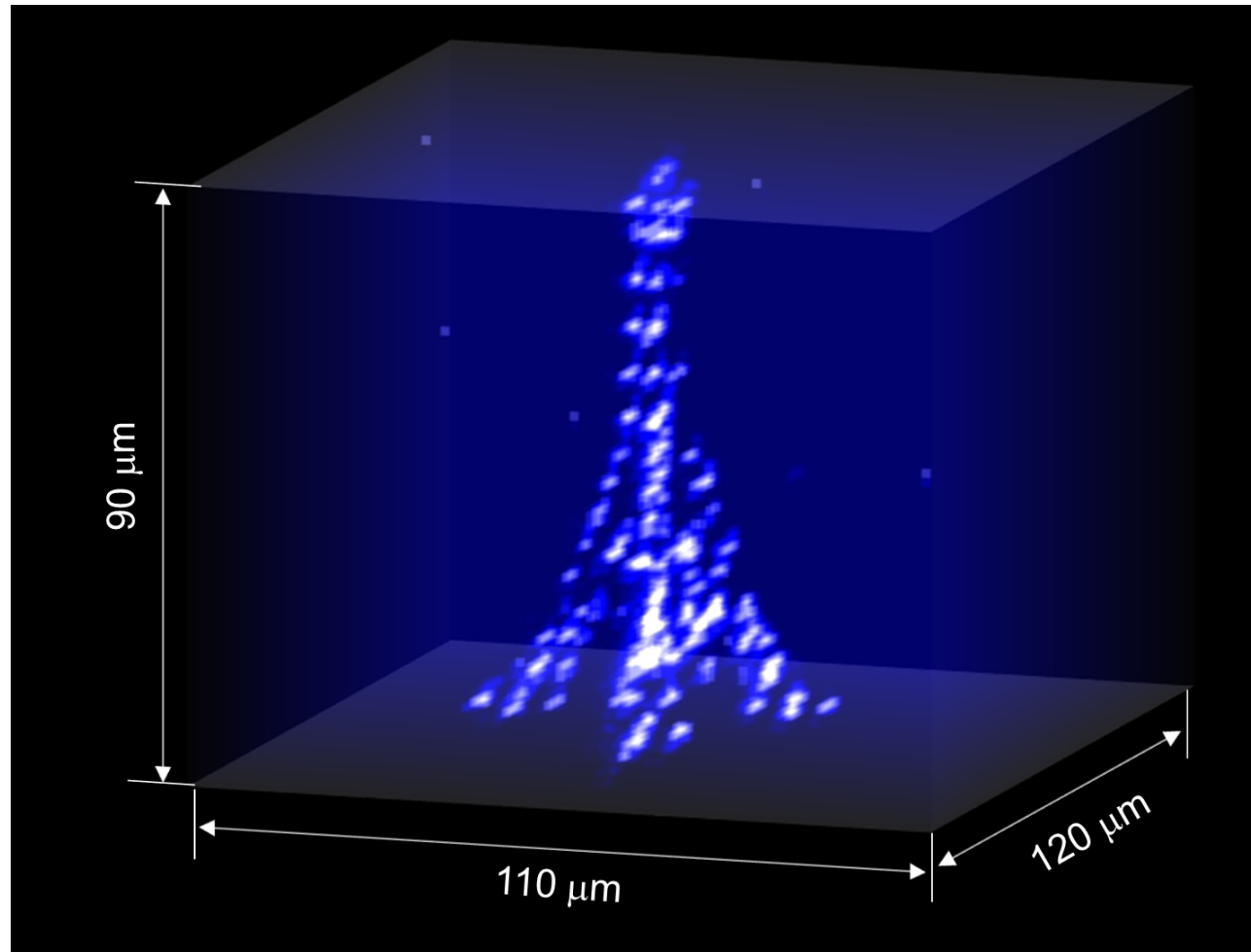
Résultante :
 $A-B \sim \lambda_{nm}$



pinces optiques pour les sciences du vivant

© impetus

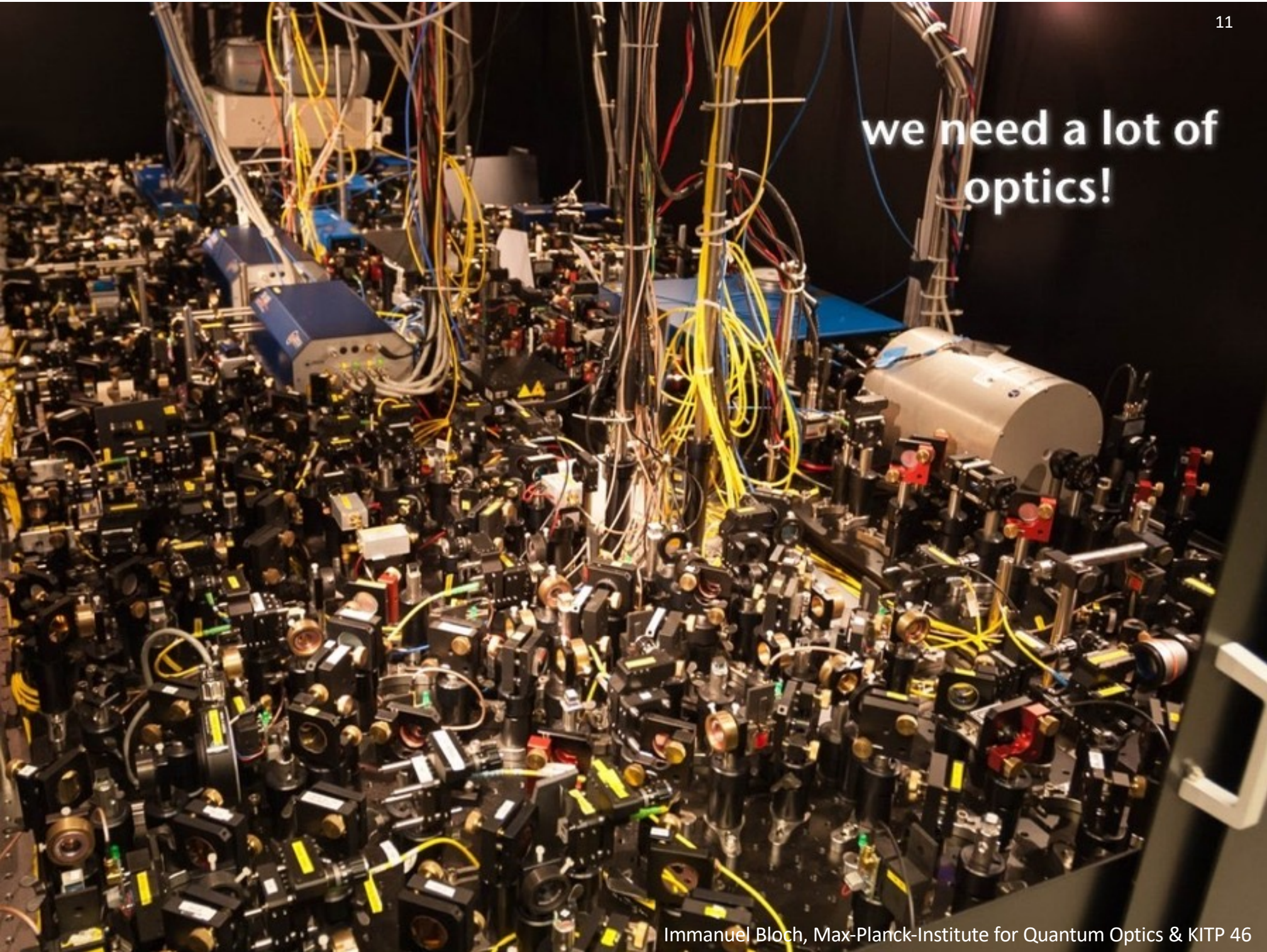




pinces optiques pour les calculateurs quantiques

© IOGS/LCF groupe optique quantique
<https://atom-tweezers-io.org>

 **PASQAL** start-up IOGS/LCF

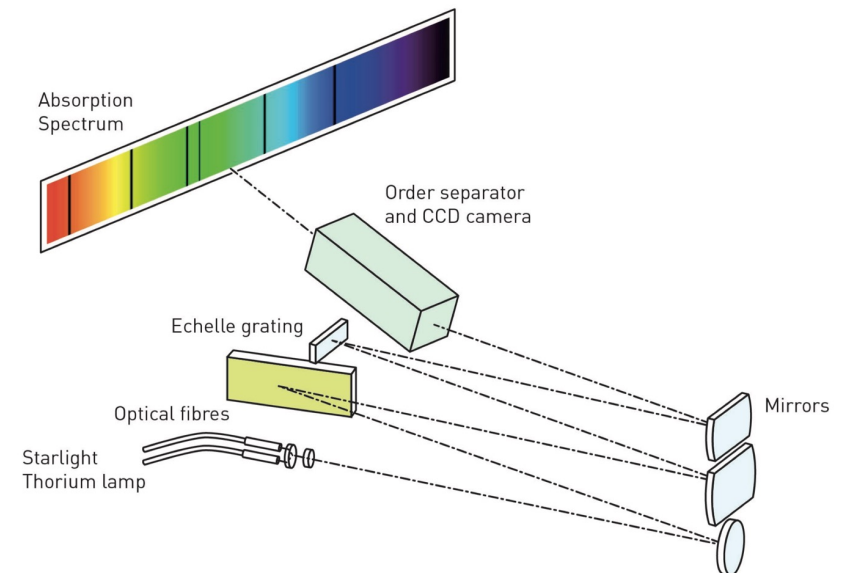
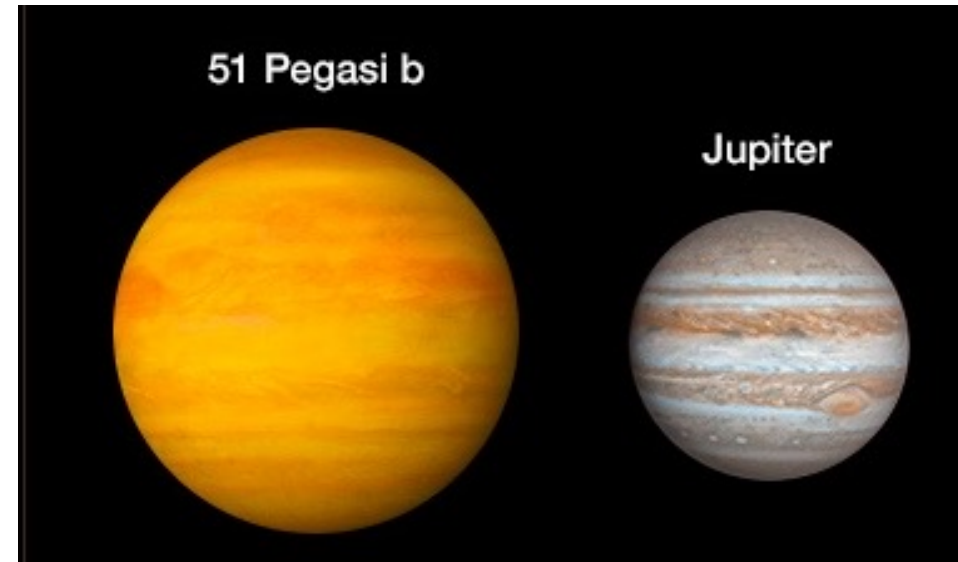
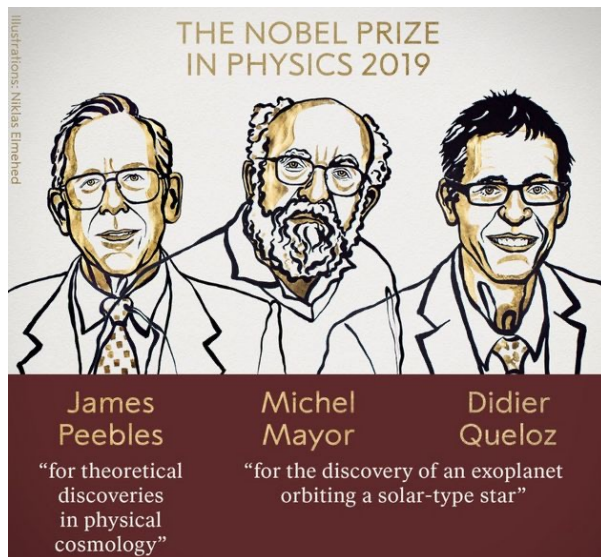
A photograph of a highly complex optical setup, likely for quantum optics. The scene is filled with a dense array of black metal mounts, lenses, mirrors, and fiber optic cables. The cables are bundled and run vertically through the center of the setup. The overall appearance is that of a meticulously arranged and intricate piece of scientific equipment.

we need a lot of
optics!

1^{ère} détection d'une exoplanète (51 AL)

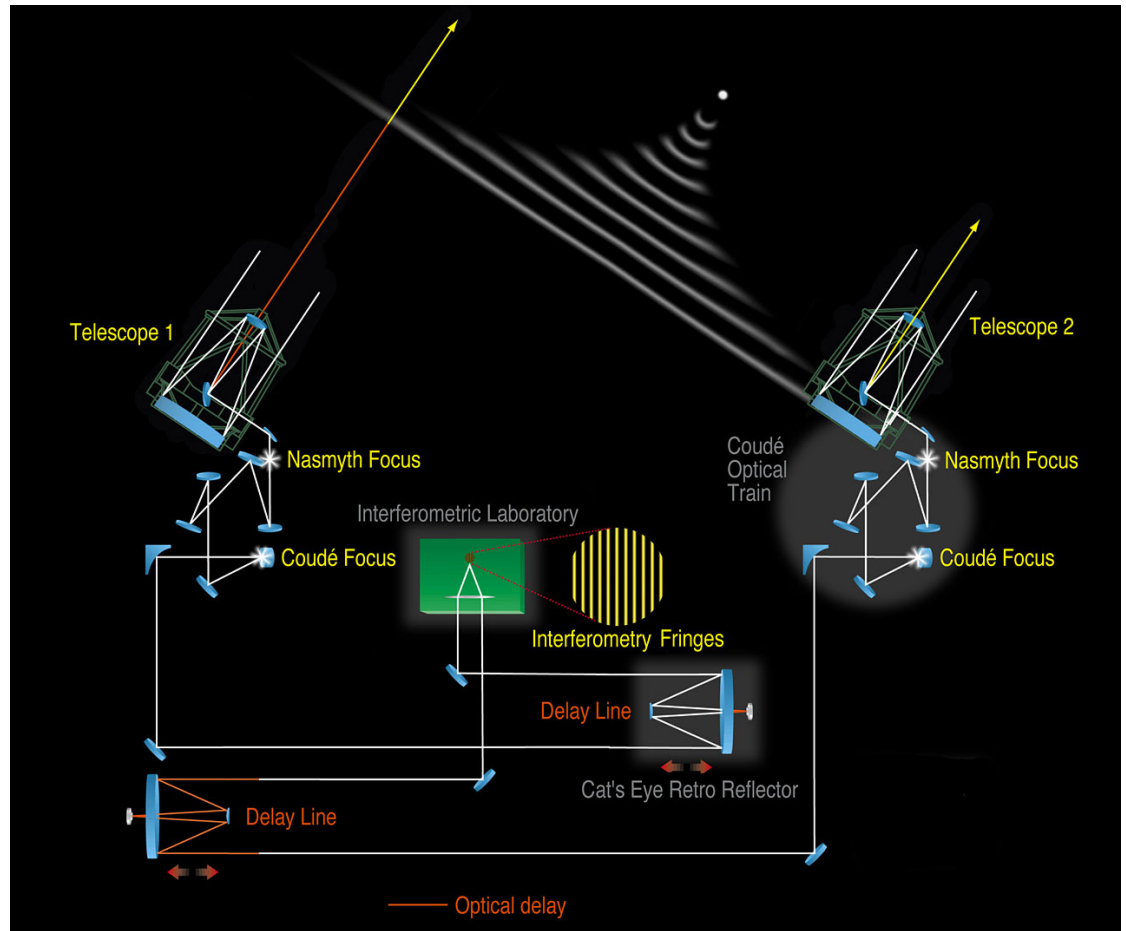
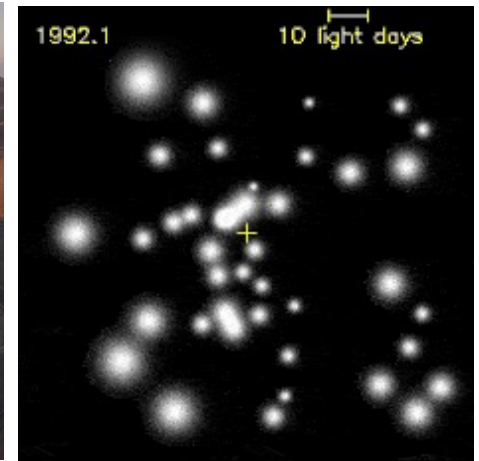
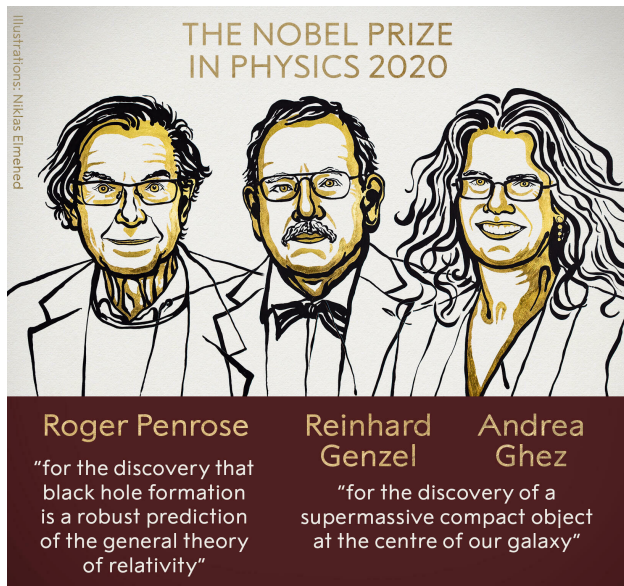
Observatoire de Haute Provence
1995

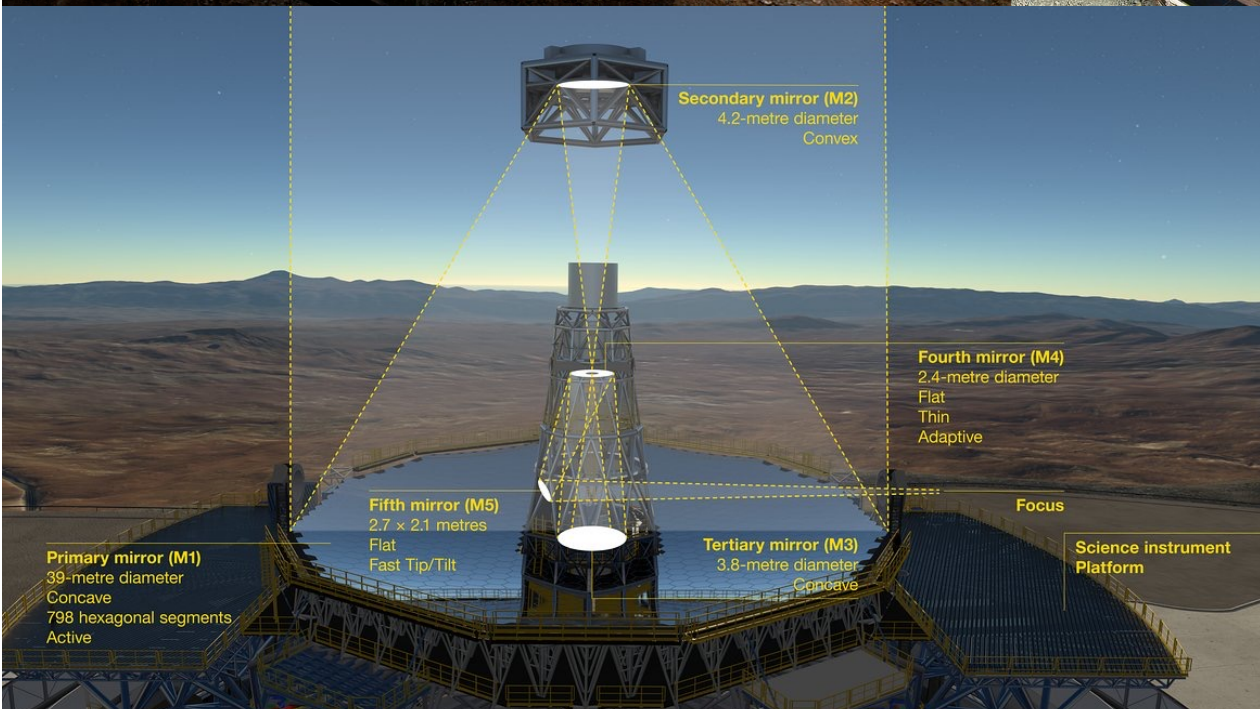
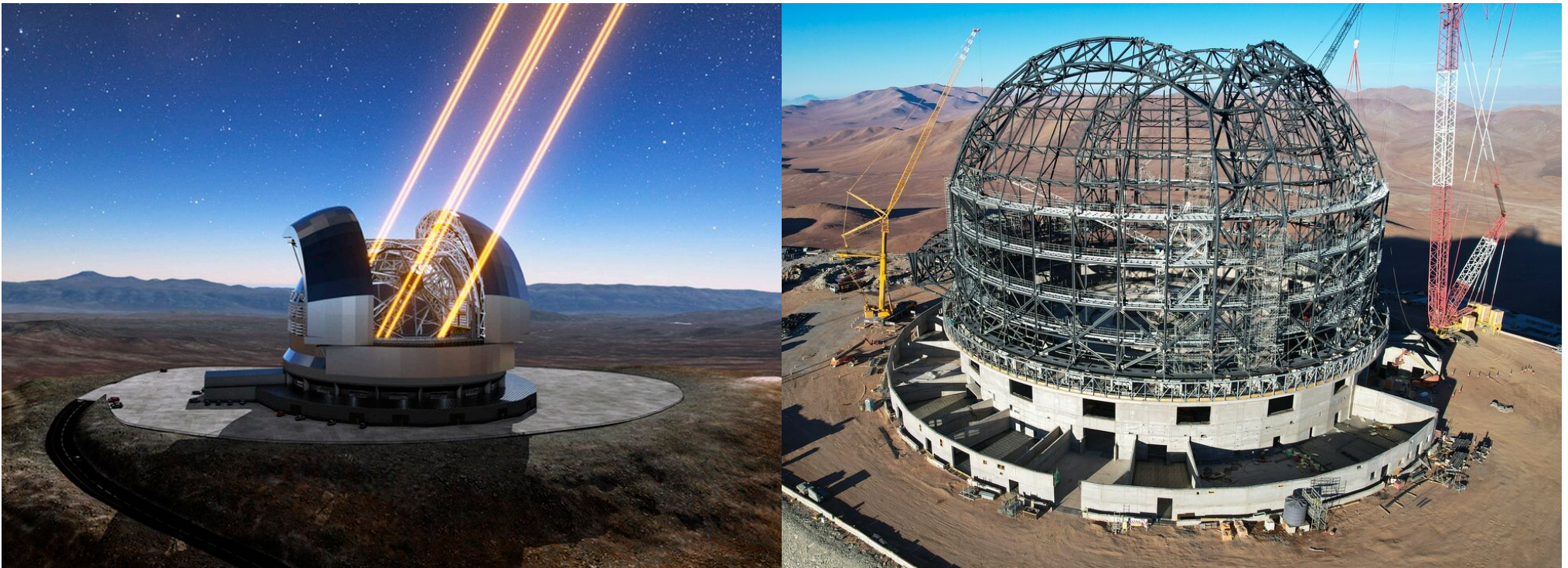
*spectroscopie des vitesses radiales
de l'étoile hôte
(effet Doppler)*



détection directe du trou noir central de notre galaxie(26673 AL)

*Imagerie très haute résolution
par interférométrie
et optique adaptative
Very Large Telescope*





Extremely Large Telescope

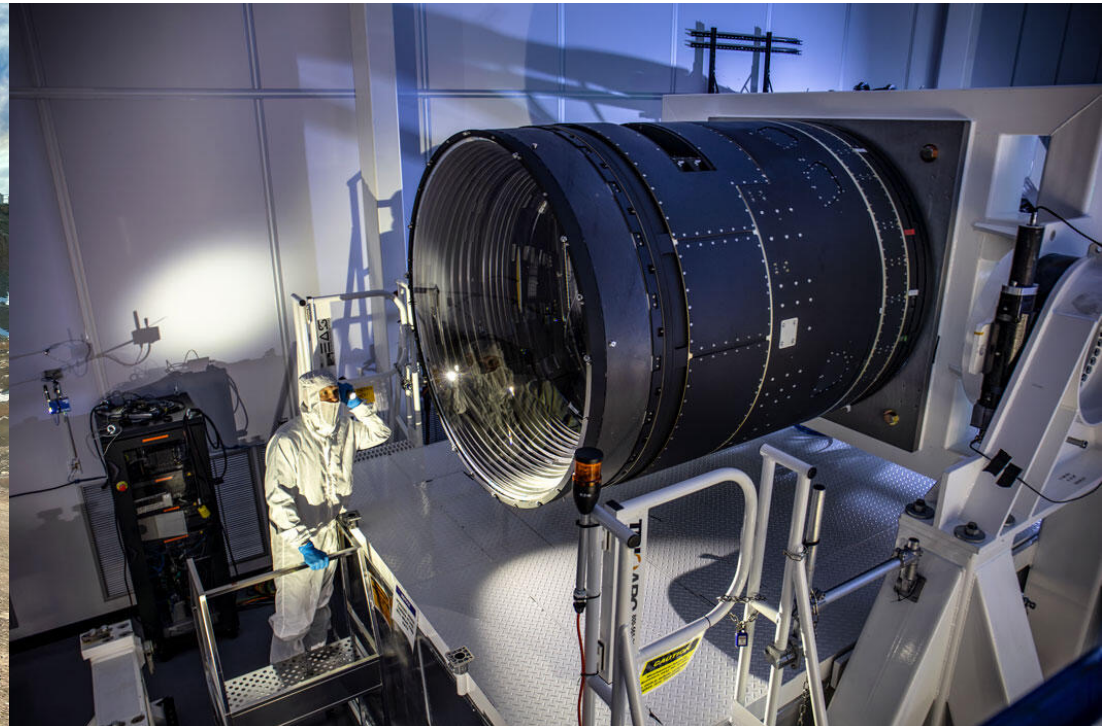
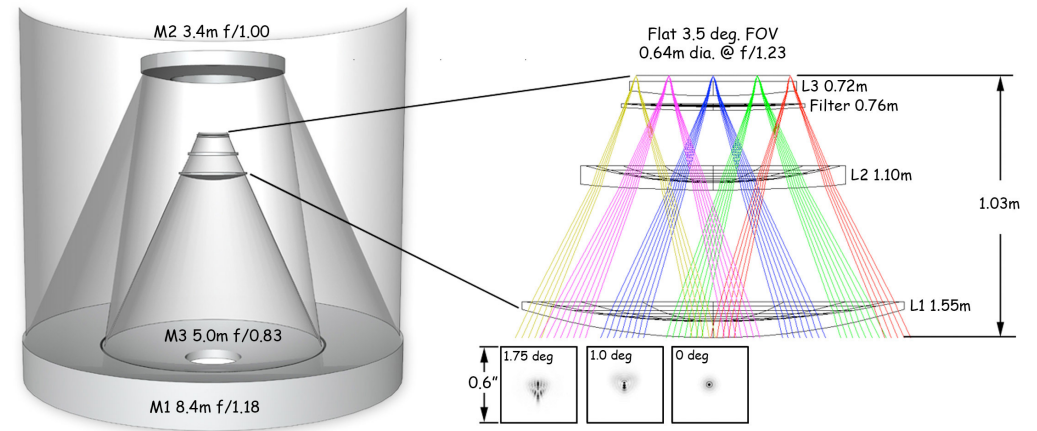
European Southern Observatory

1^{ère} lumière 2027

Vera C. Rubin Observatory

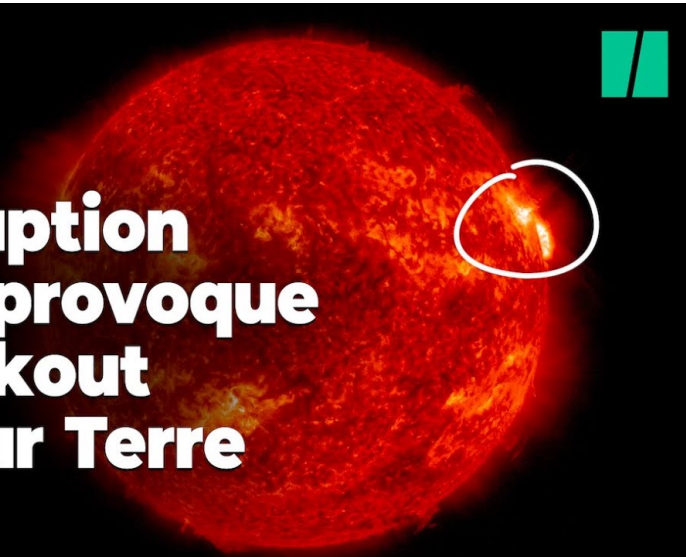
Arizona University

1^{ère} lumière 2025



ESPACE

**Une éruption
solaire provoque
un blackout
radio sur Terre**



**10 AU 13 MAI
TEMPÊTE SOLAIRE DU SIÈCLE!**

**PRÉPAREZ-VOUS POUR LE PLUS
GRAND CHANGEMENT DE NOTRE VIE**



**ALERT
DANGEROUS
SOLAR FLARES
ARE COMING**

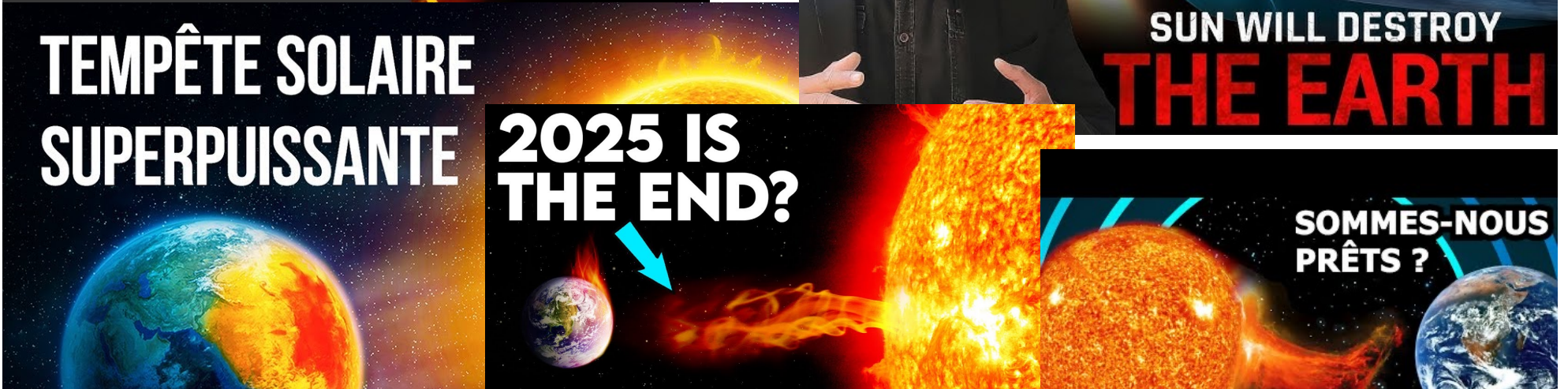


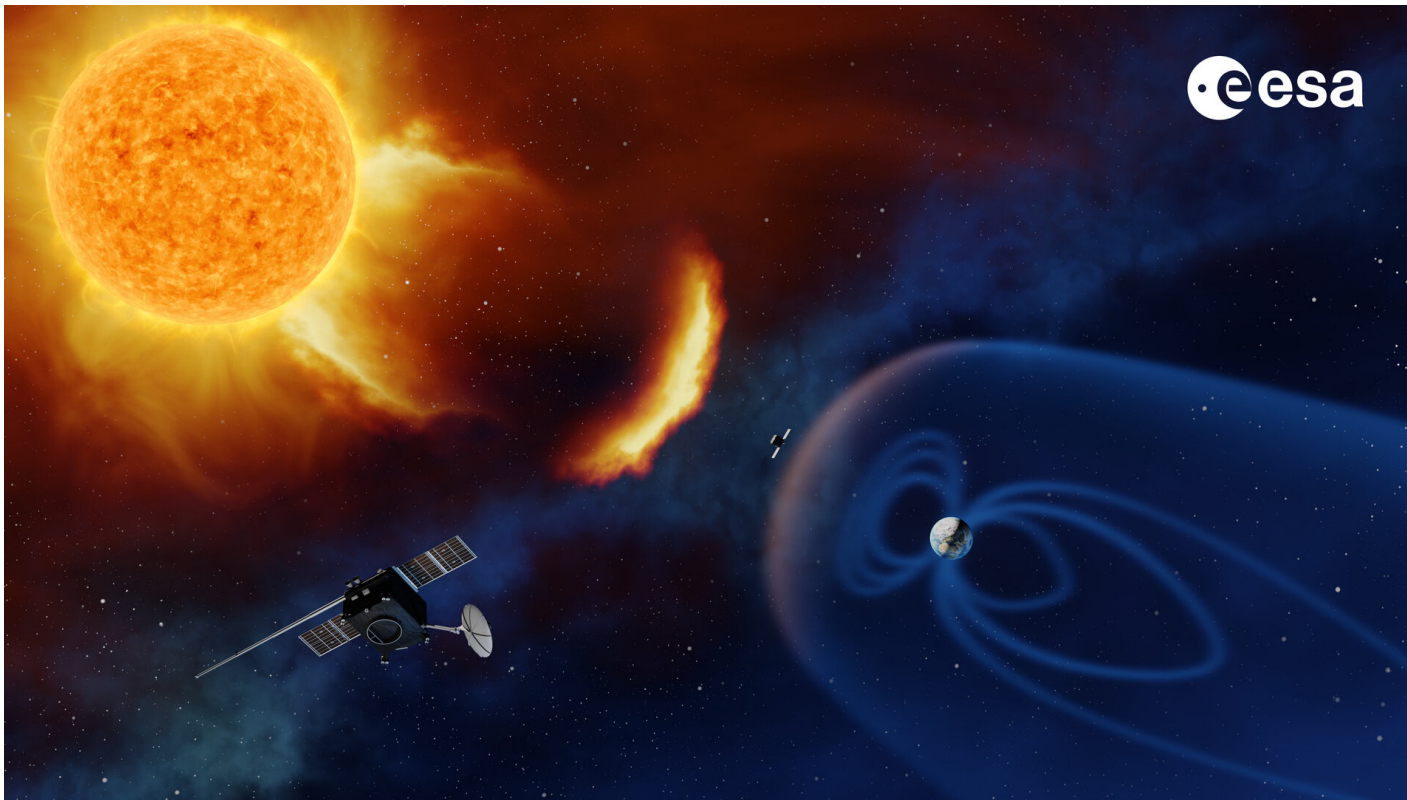
**SUN WILL DESTROY
THE EARTH**

**TEMPÊTE SOLAIRE
SUPERPUISSANTE**

**2025 IS
THE END?**

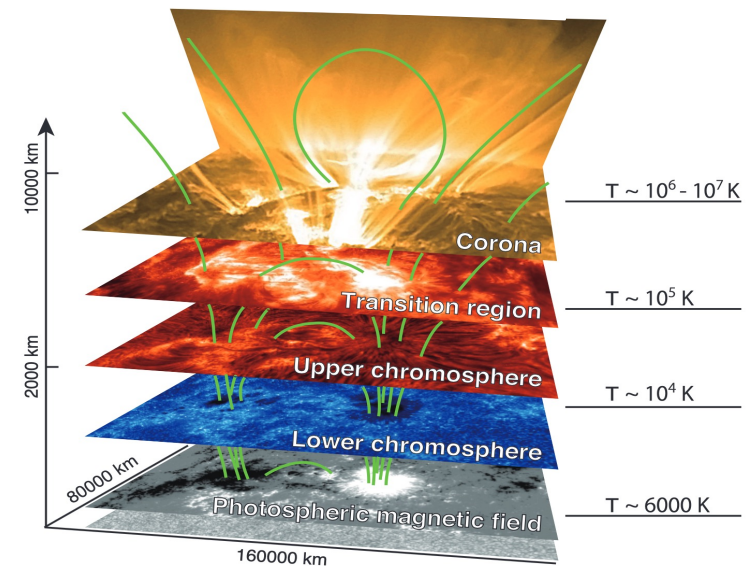
**SOMMES-NOUS
PRÊTS ?**





Comment la masse et l'énergie sont-elles transférées à travers l'atmosphère solaire ?

Comment se forme le vent solaire ?

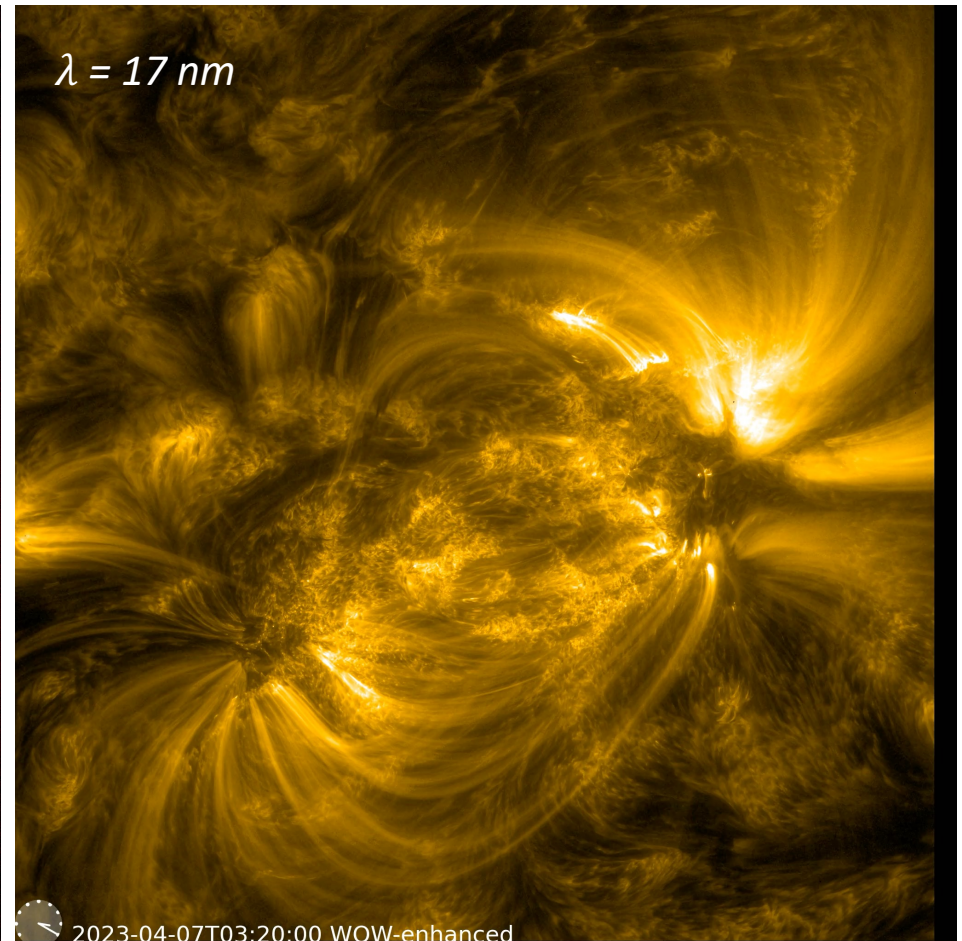
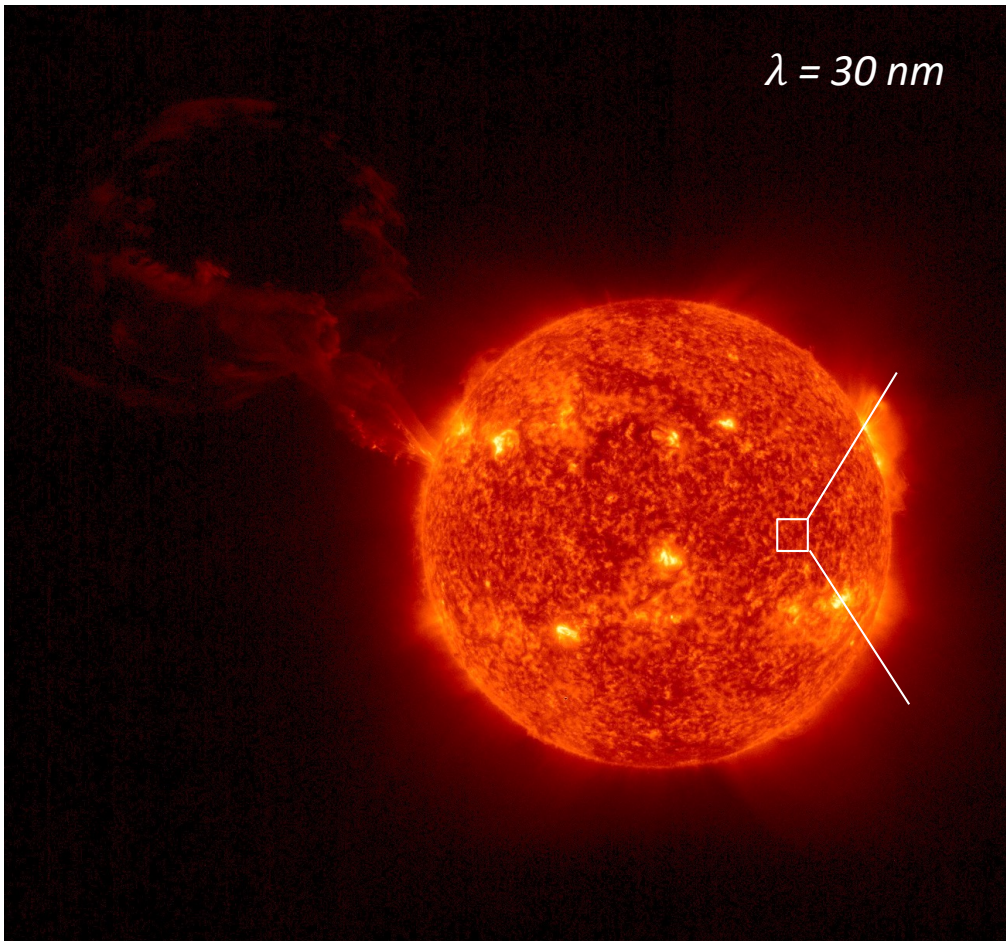


Imagerie du Soleil dans l'extrême ultraviolet

*fabrication des miroirs et des revêtements
de télescopes spatiaux
activité du groupe Optique XUV
www.lcf.institutoptique.fr/groupe-de-recherche/optique-xuv*

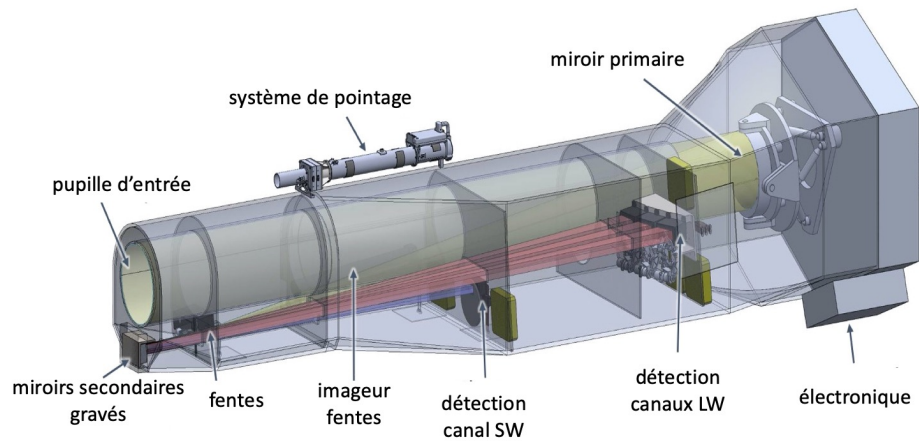


SOLAR ORBITER (2020)



Imagerie du Soleil dans l'extrême ultraviolet

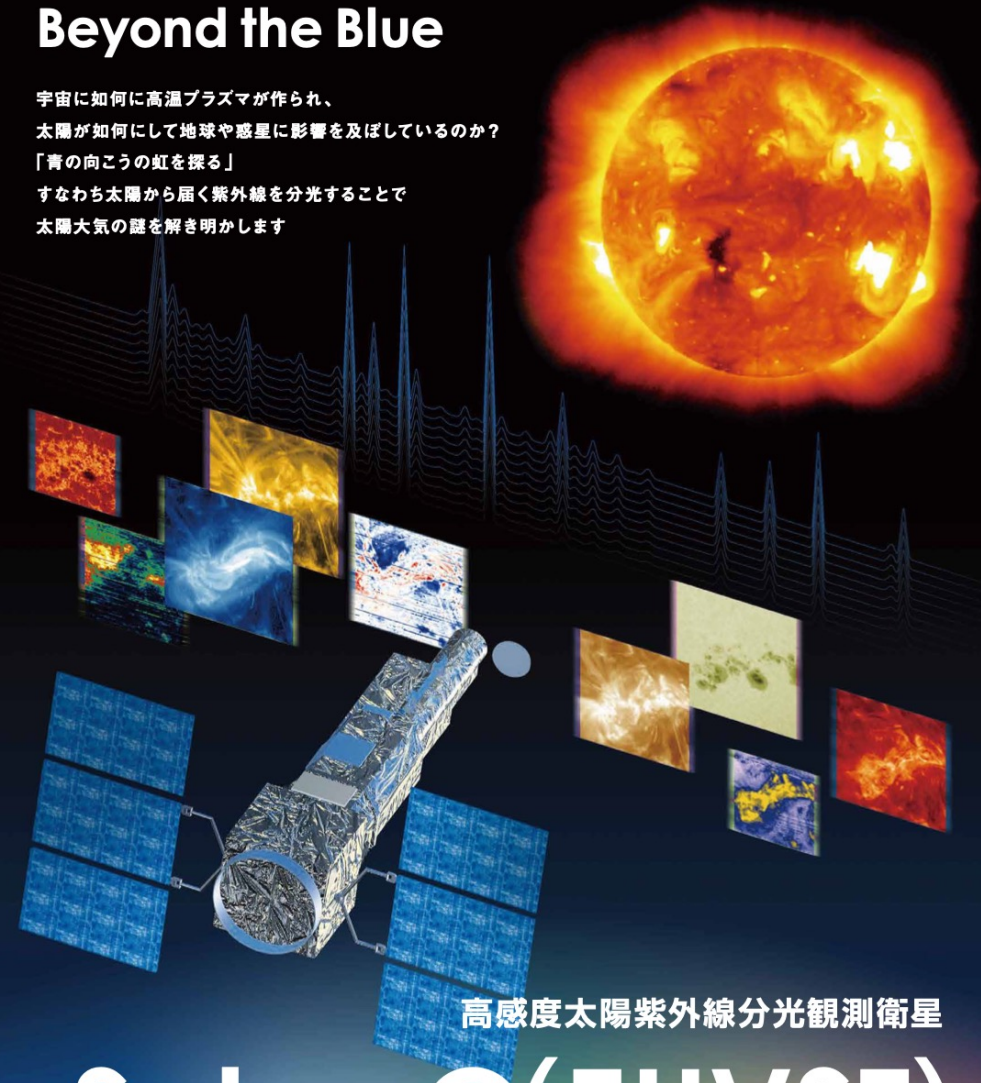
*fabrication des miroirs et des revêtements
de télescopes spatiaux
activité du groupe Optique XUV
www.lcf.institutoptique.fr/groupe-de-recherche/optique-xuv*



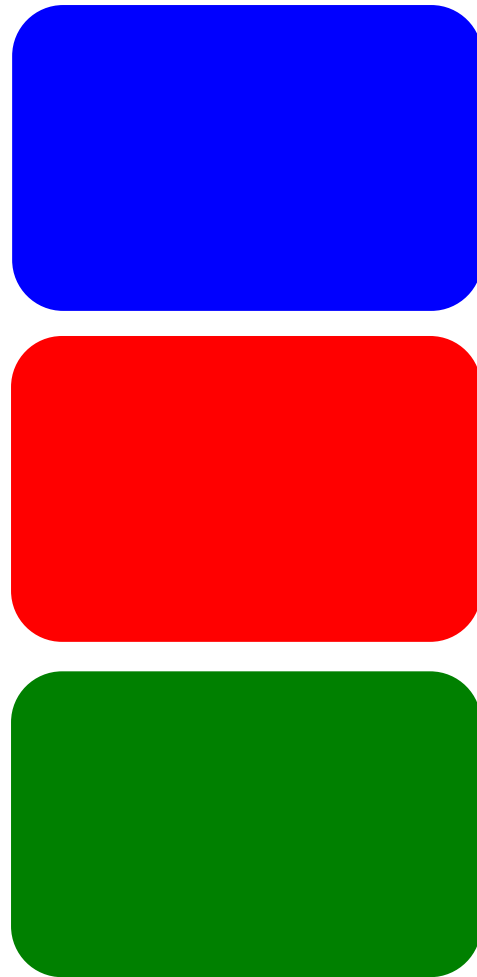
lancement novembre 2028

Exploring the Rainbow Beyond the Blue

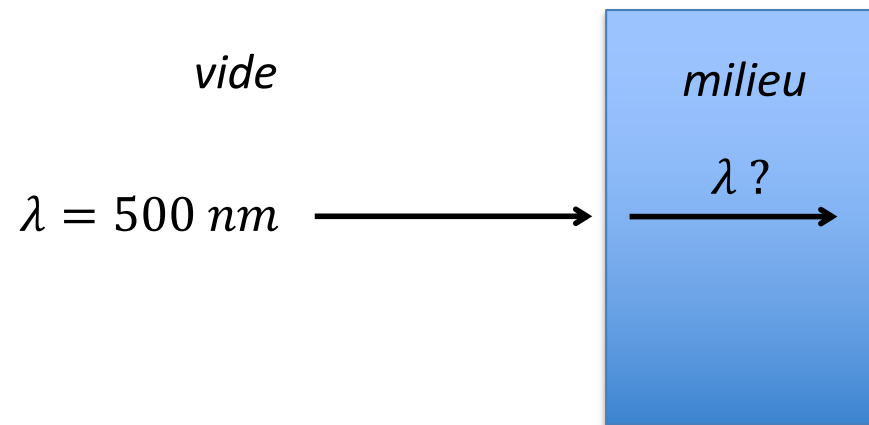
宇宙に如何に高温プラズマが作られ、
太陽が如何にして地球や惑星に影響を及ぼしているのか？
「青の向こうの虹を探る」
すなわち太陽から届く紫外線を分光することで
太陽大気の謎を解き明かします



Solar-C (EUVST)



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



1

500 nm

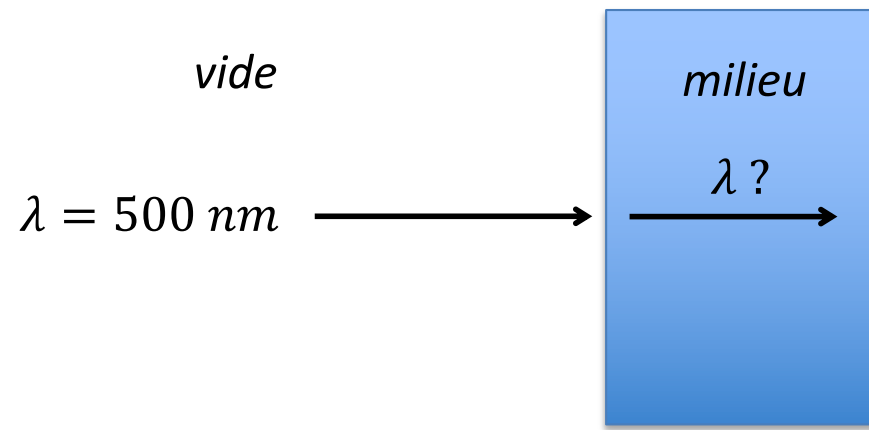
2

1000 nm

3

250 nm

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

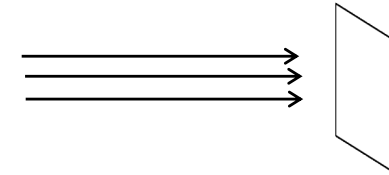


- 1 500 nm
- 2 1000 nm
- 3 250 nm

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

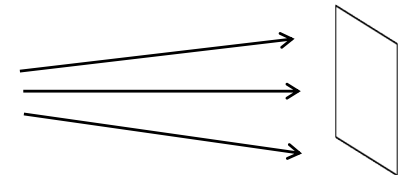
1

parallèles



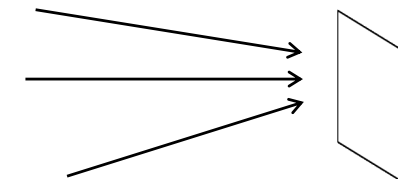
2

sortants

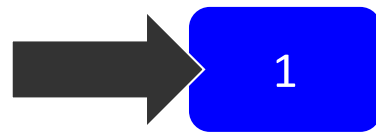


3

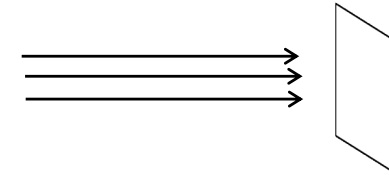
entrants



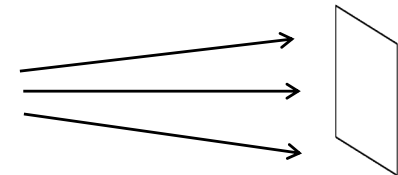
Comment arrivent les rayons sur un écran provenant d'une source ponctuelle placée à l'infini ?



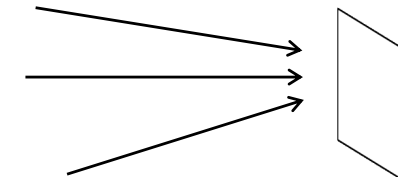
parallèles



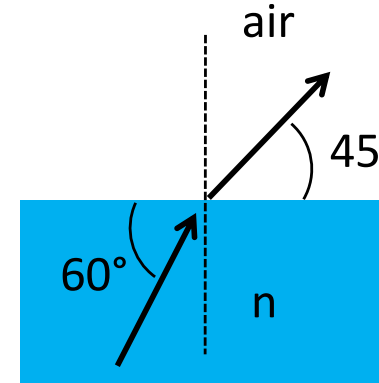
sortants



entrants



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



1

$\sqrt{2}$

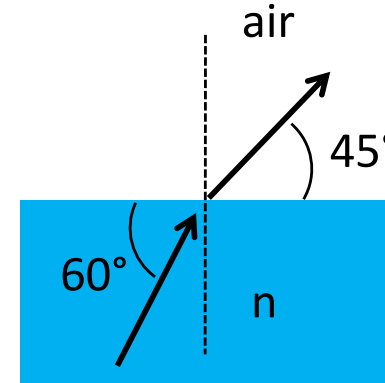
2

$\sqrt{3/2}$

3

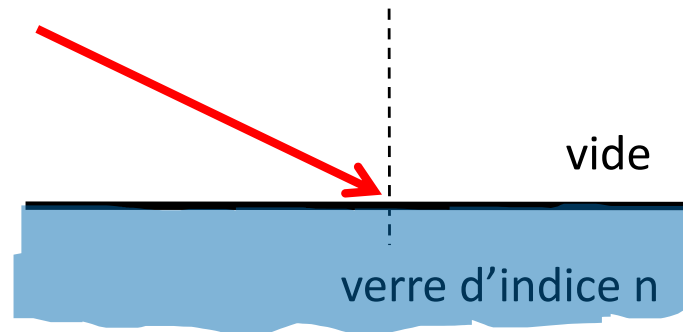
$\sqrt{2/3}$

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



- **1** $\sqrt{2}$
- 2** $\sqrt{3/2}$
- 3** $\sqrt{2/3}$

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



1

toujours

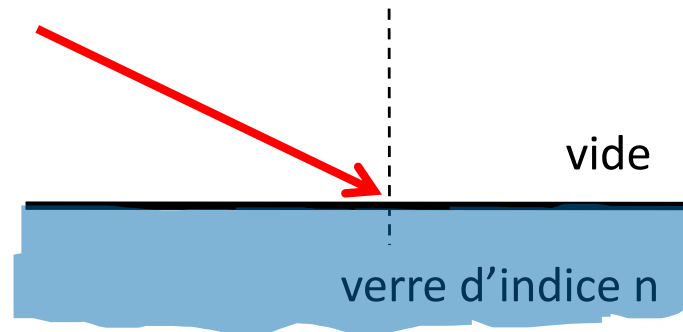
2

jamais

3

possible si $n < 1$

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



- 1 toujours
- 2 jamais
- 3 possible si $n < 1$

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

1

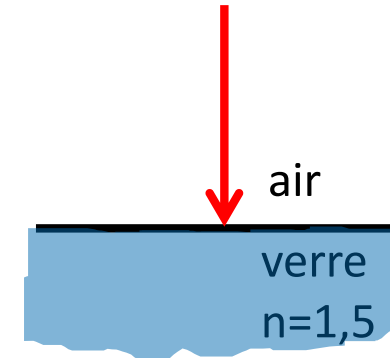
~ 50%

2

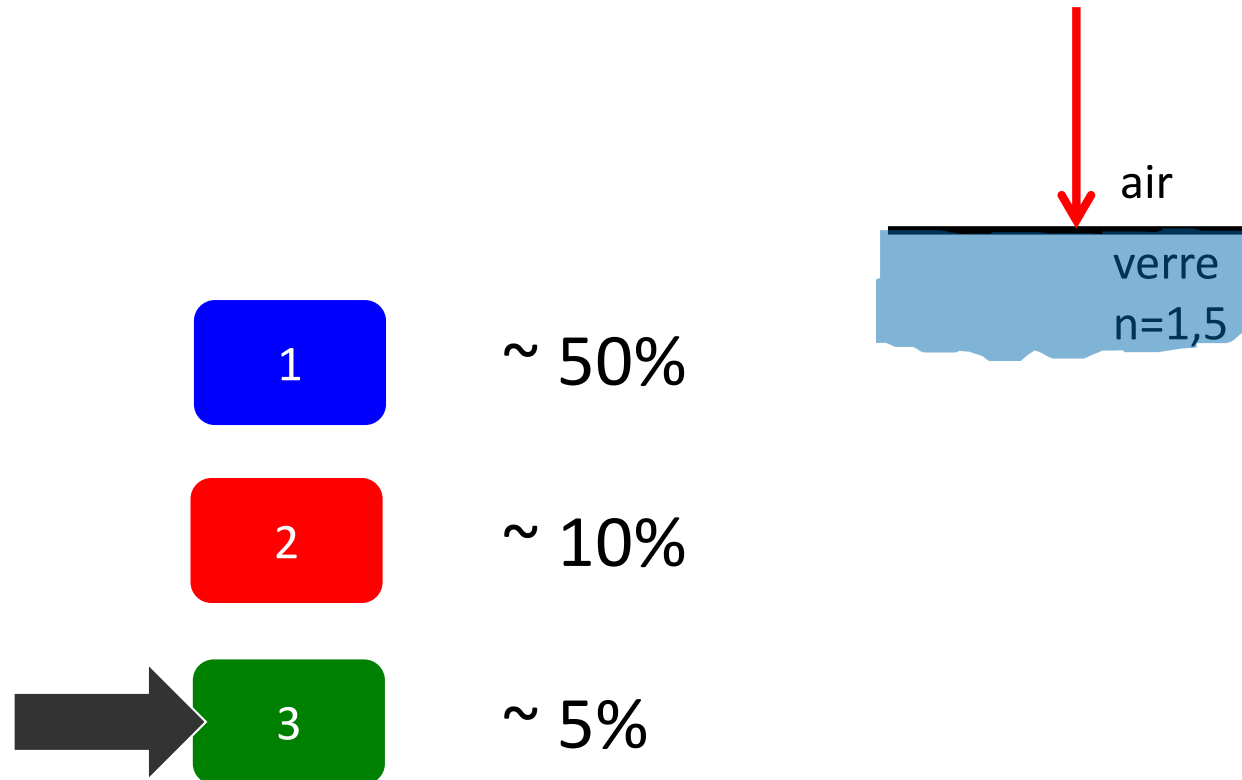
~ 10%

3

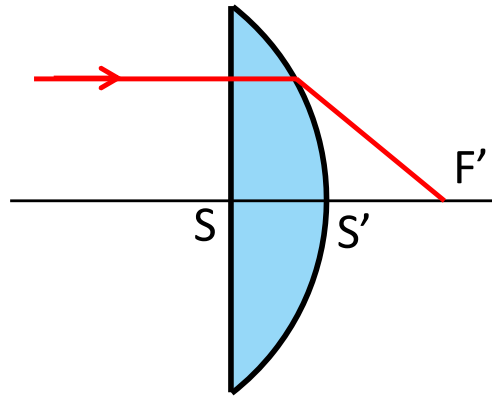
~ 5%



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



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



1

 $S'F'$

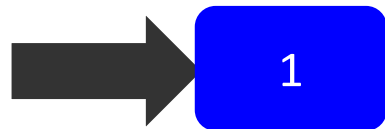
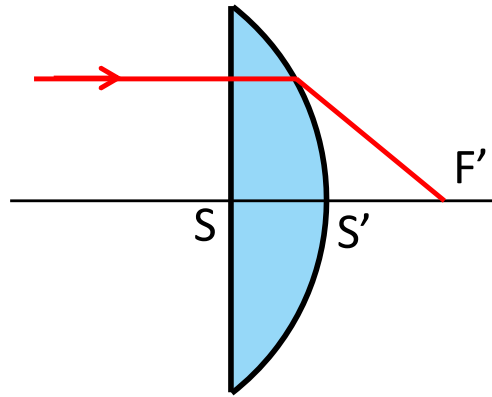
2

 SF' (O milieu de SS')

3

 OF'

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



$S'F'$

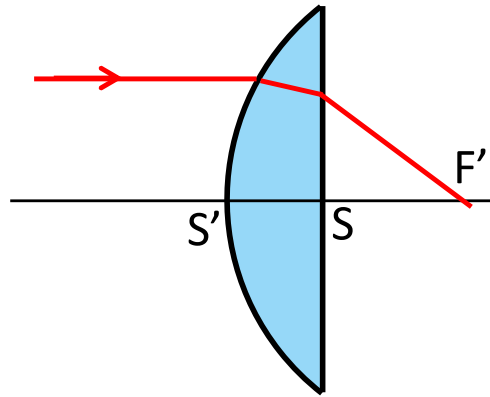


SF' (O milieu de SS')



OF'

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



1

 $S'F'$

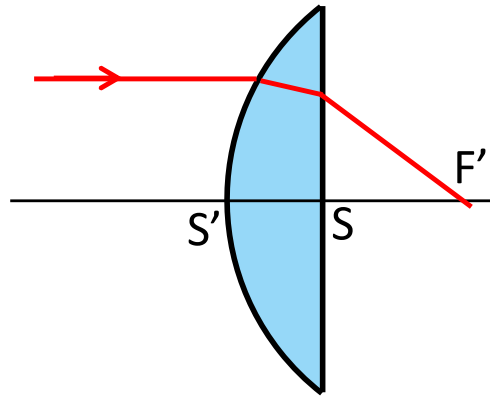
2

 SF'

3

 OF' (O milieu de SS')

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



➔ à suivre

1

$S'F'$

2

SF'

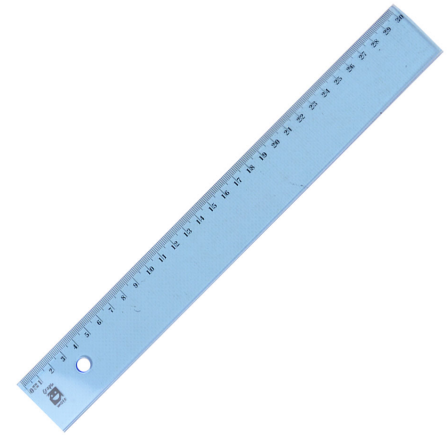
3

OF' (O milieu de SS')

SEMAINE PROCHAINE

1^{er} TD : tracés de rayons dans les lentilles minces
N'oubliez pas votre règle ... !

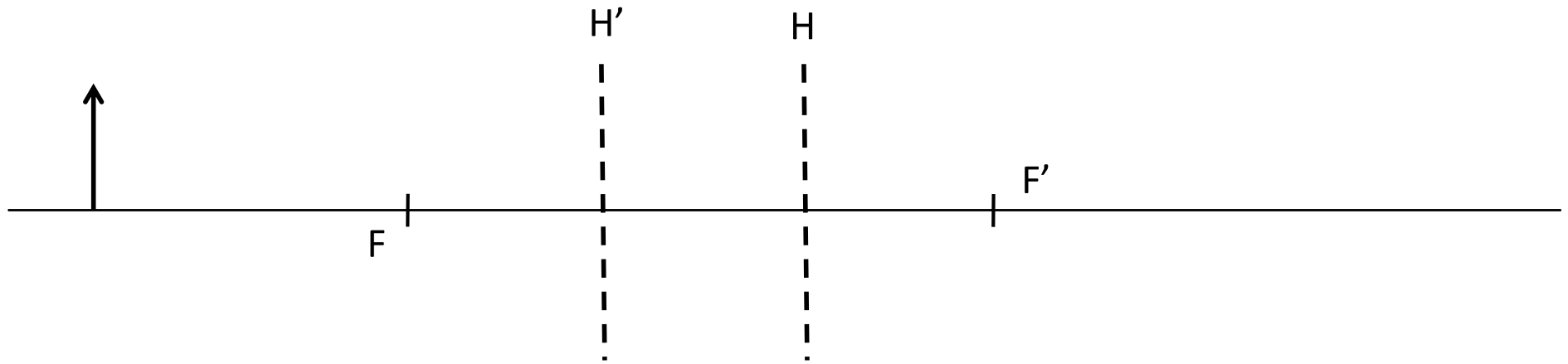
2 cours mercredi 14h/jeudi 9h **Amphi**
N'oubliez pas vos cartons **RVB, règle ... !**



cours 2

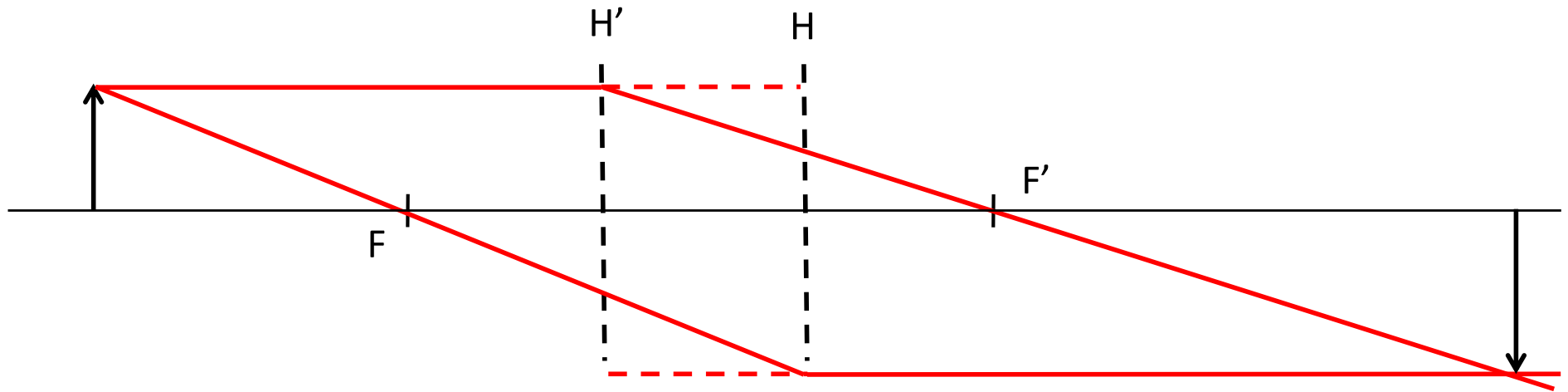
exemple

$n = n'$



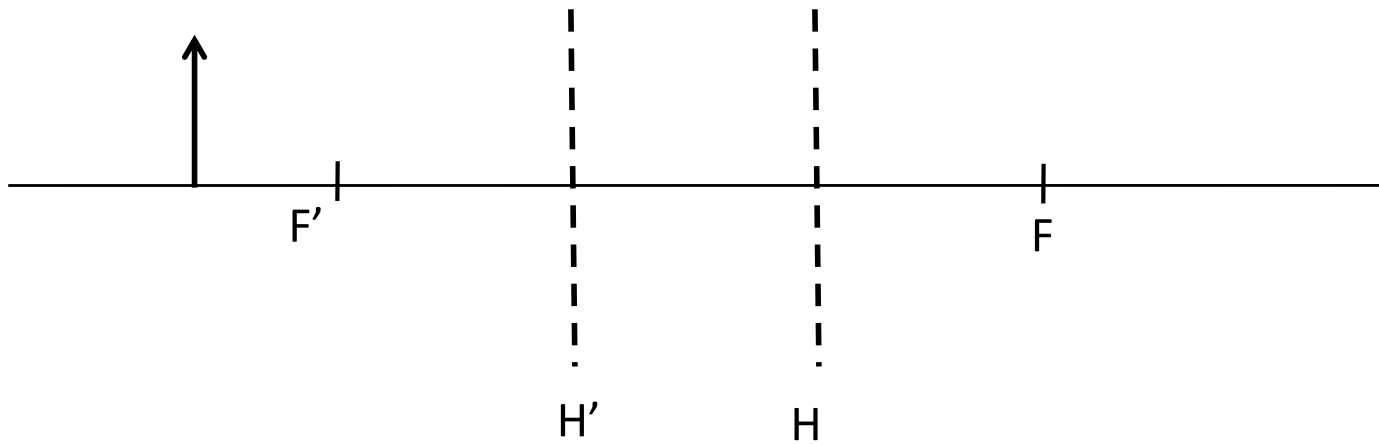
exemple

$$n = n'$$

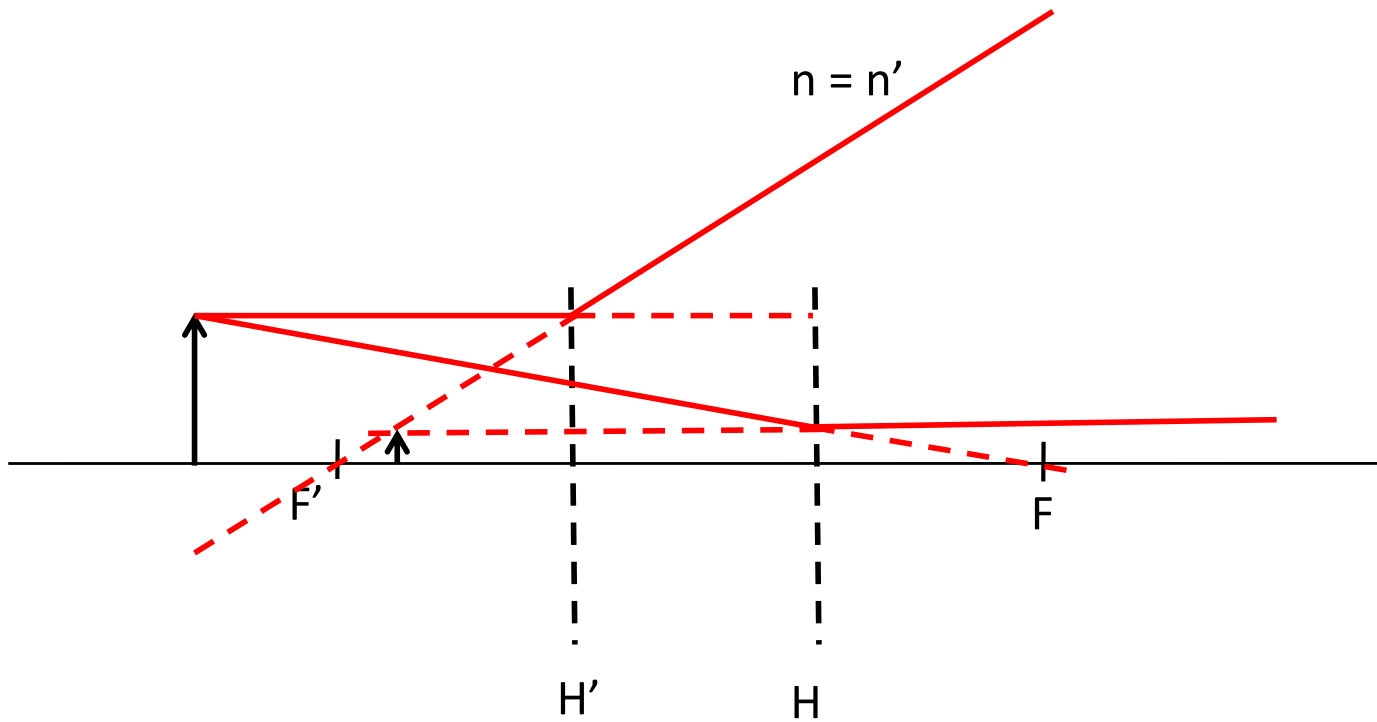


exemple

$$n = n'$$

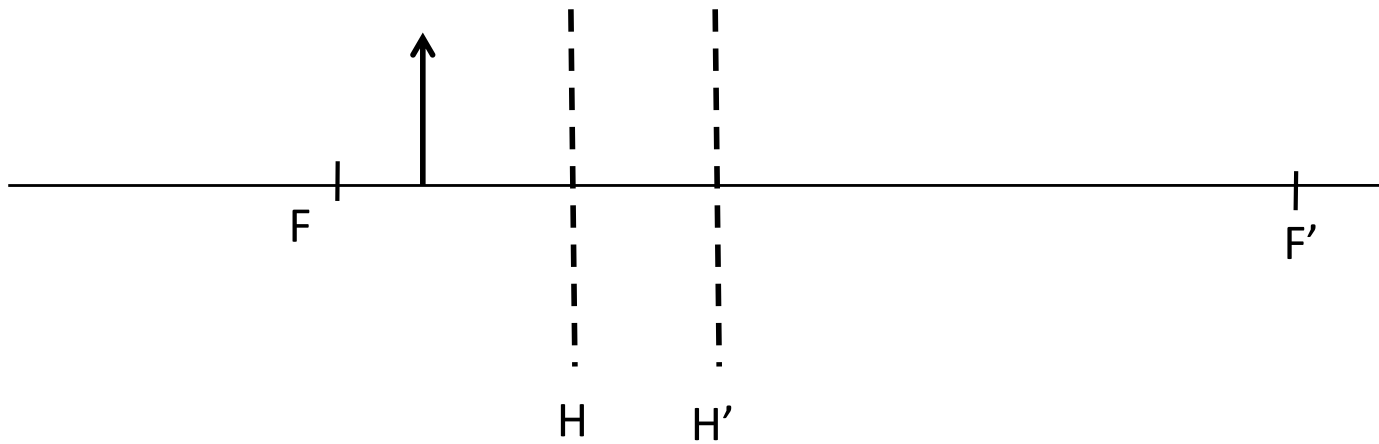


exemple

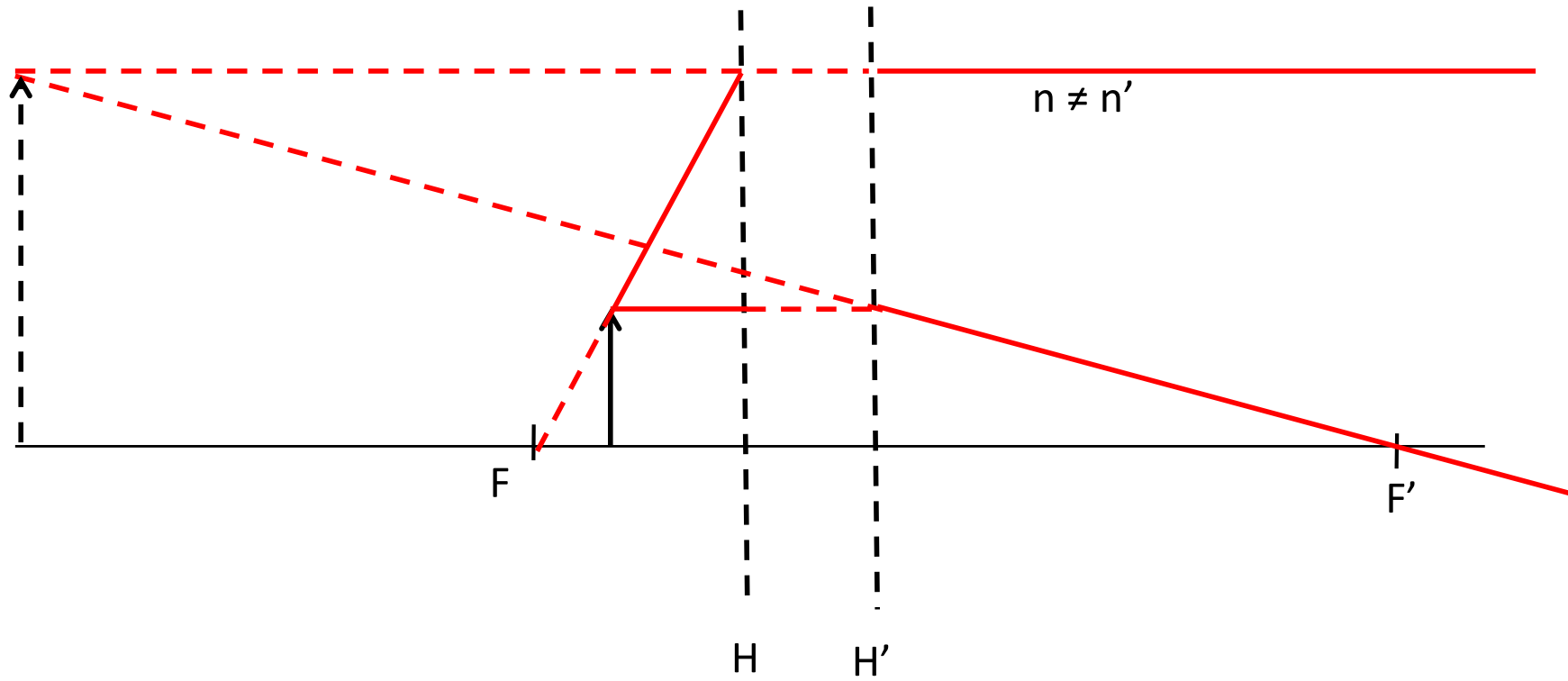


exemple

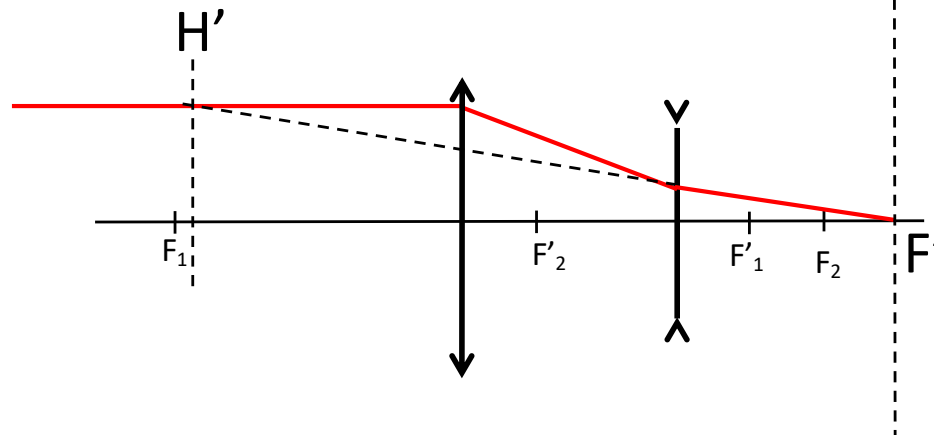
$n \neq n'$



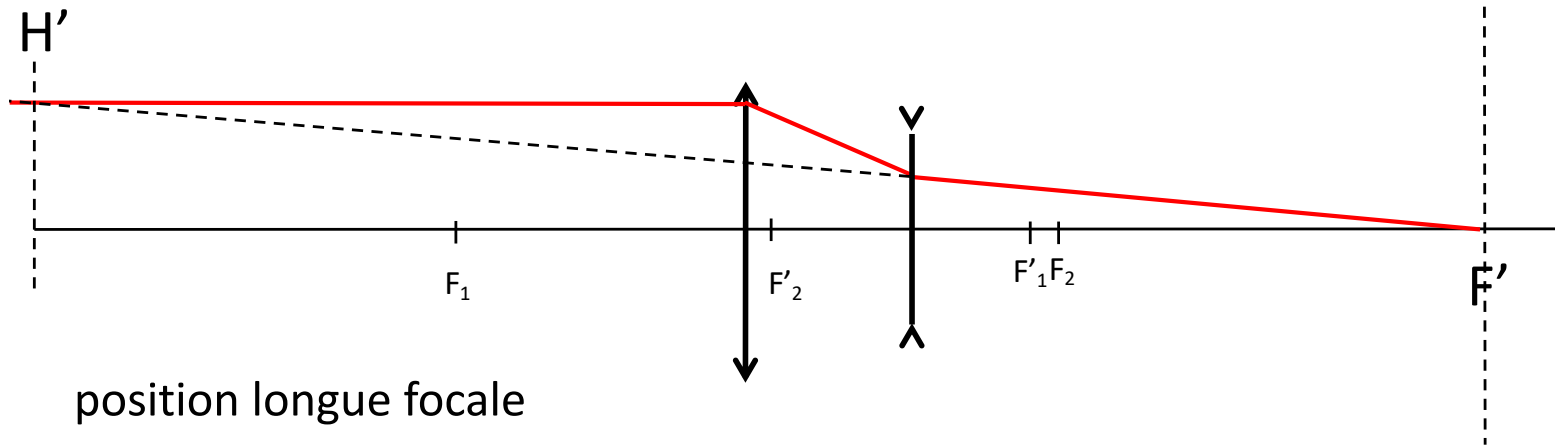
exemple



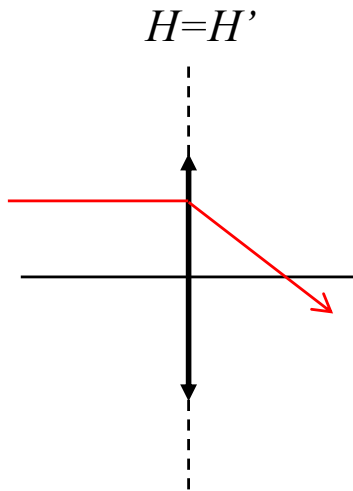
Objectif à focale variable (le zoom)



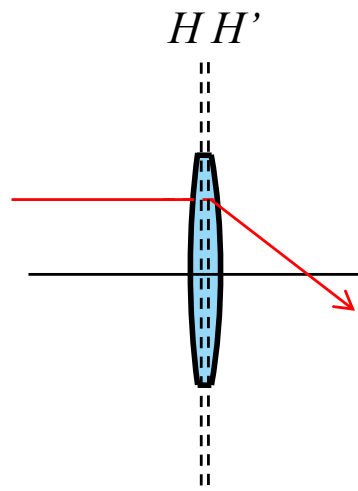
Objectif à focale variable (le zoom)



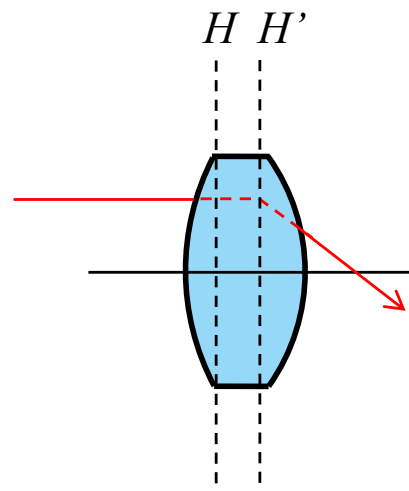
cours 3



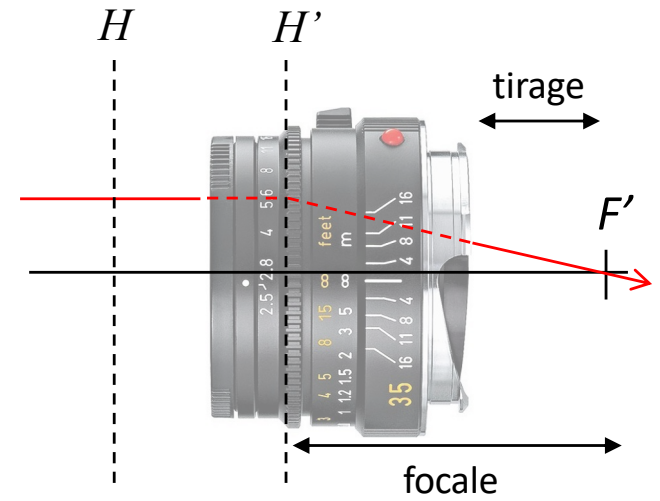
lentille mince
courbure \gg épaisseur



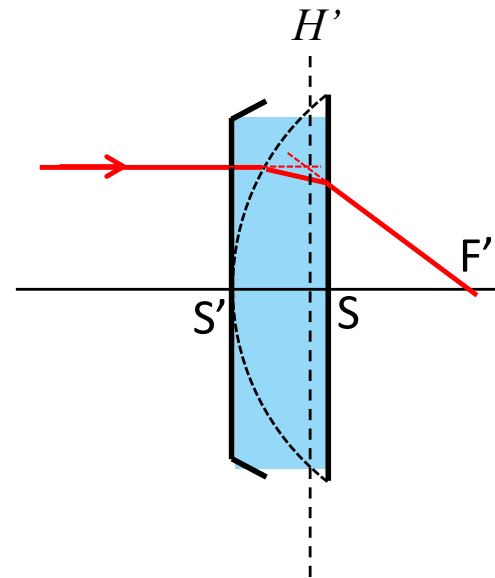
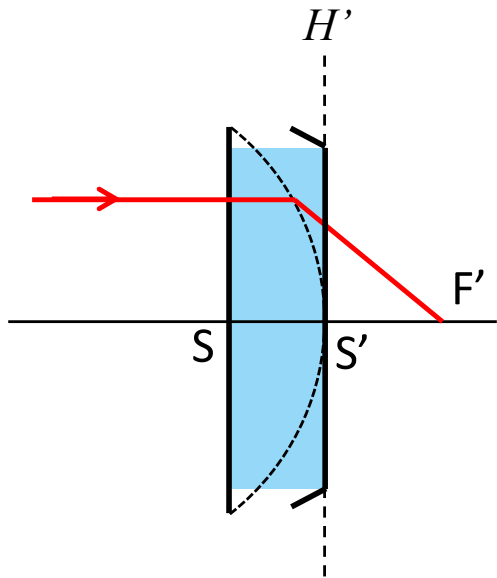
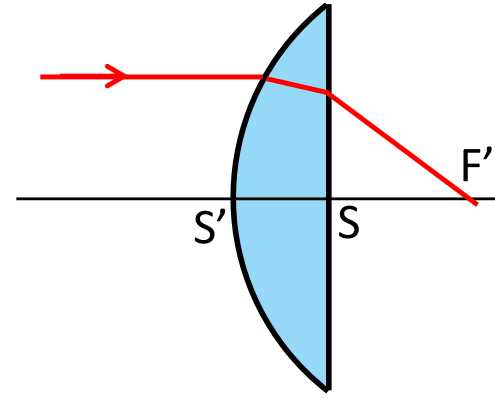
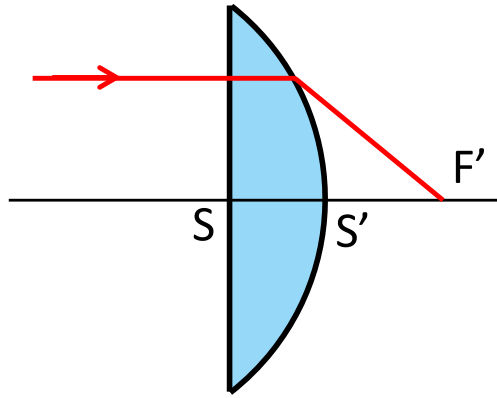
lentille quasi-mince



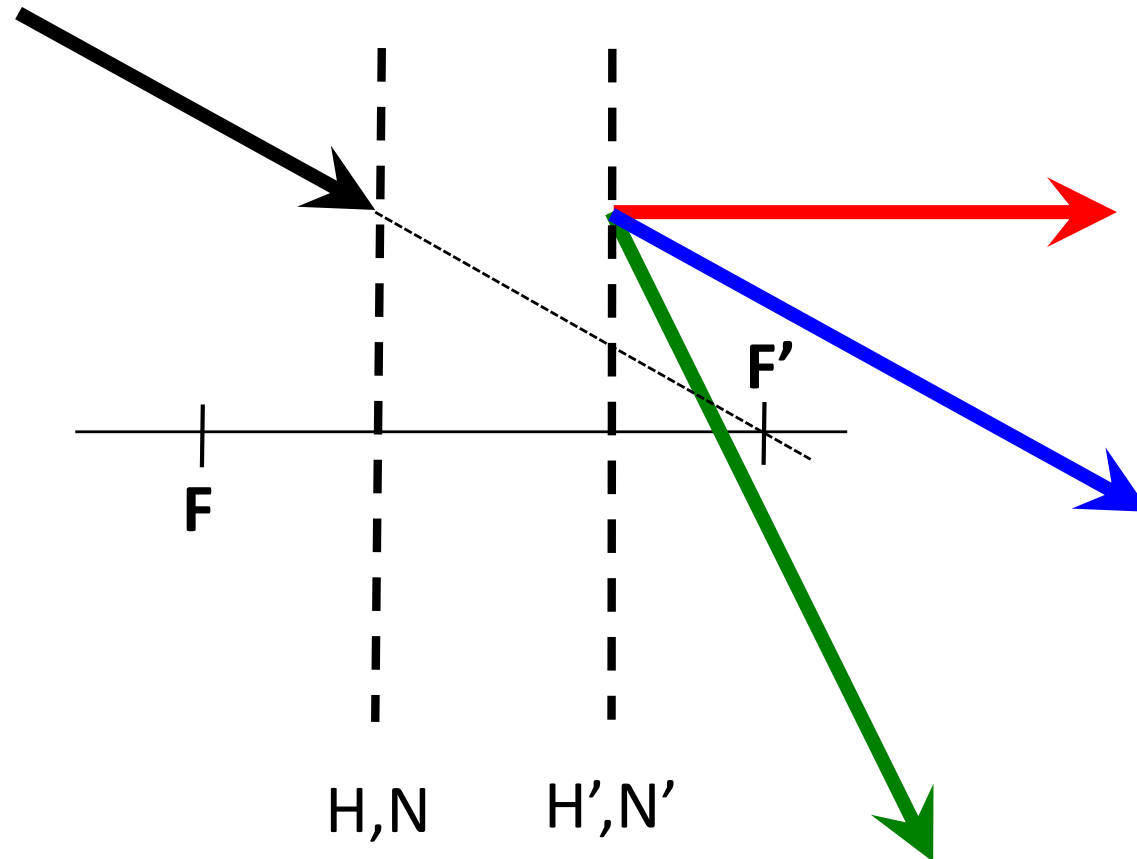
lentille épaisse



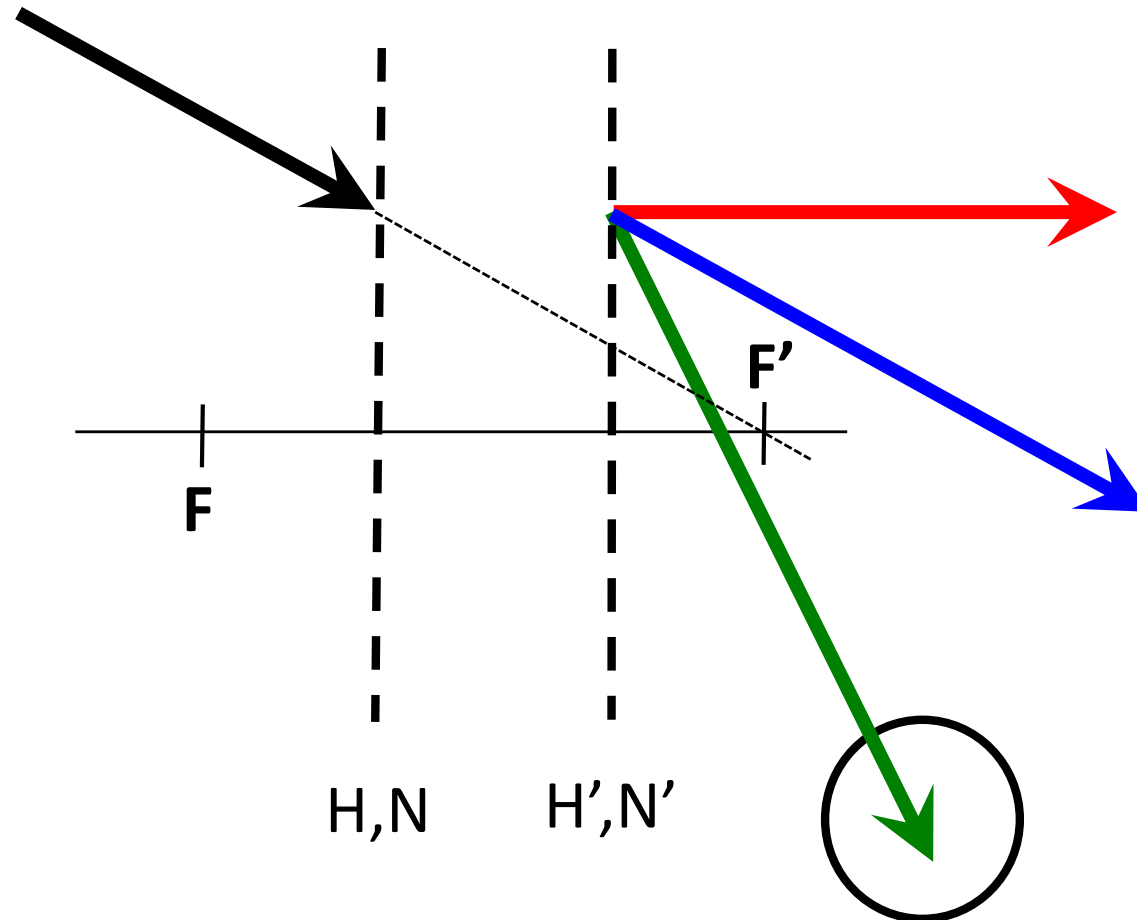
système épais



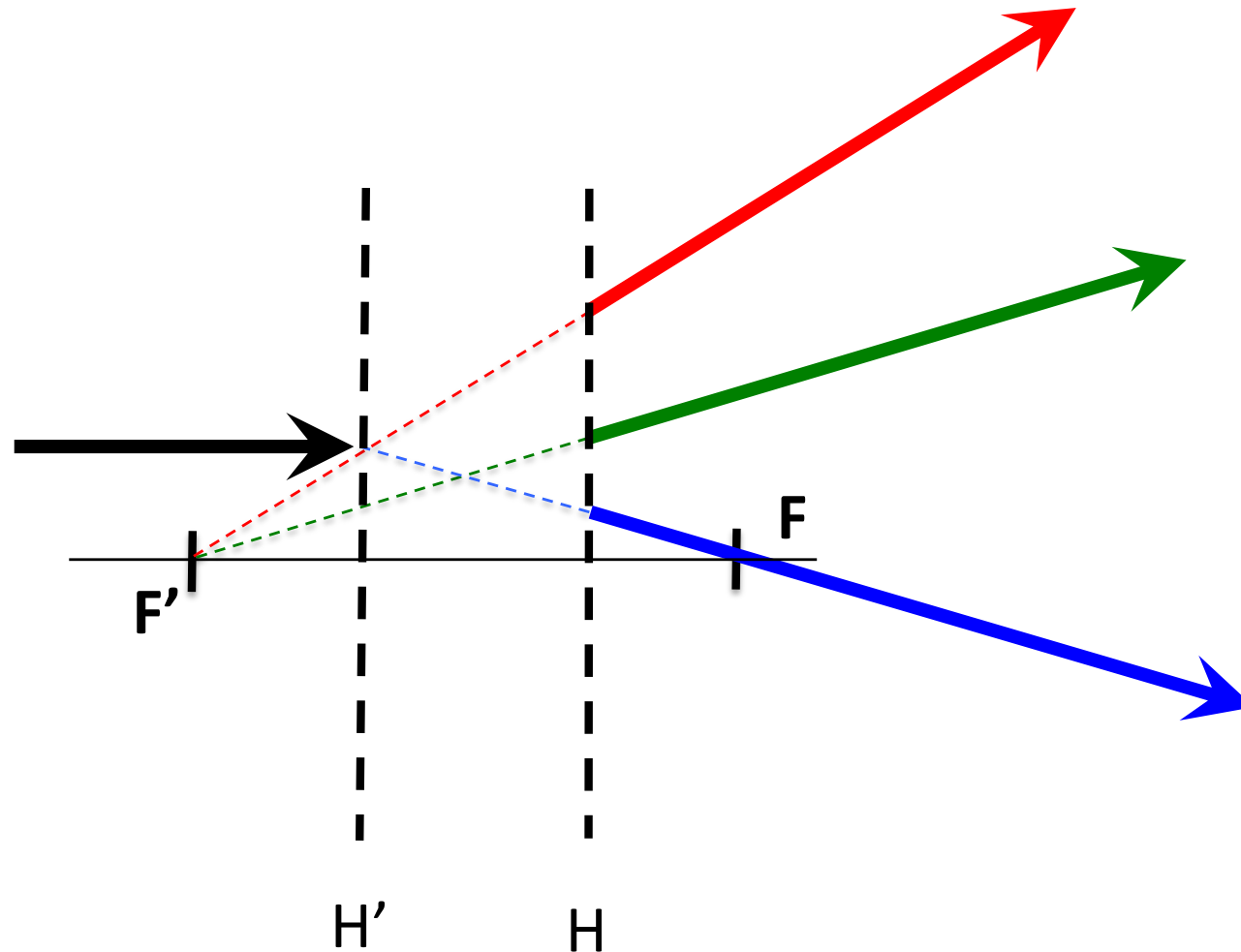
Quel est le bon rayon émergent ?



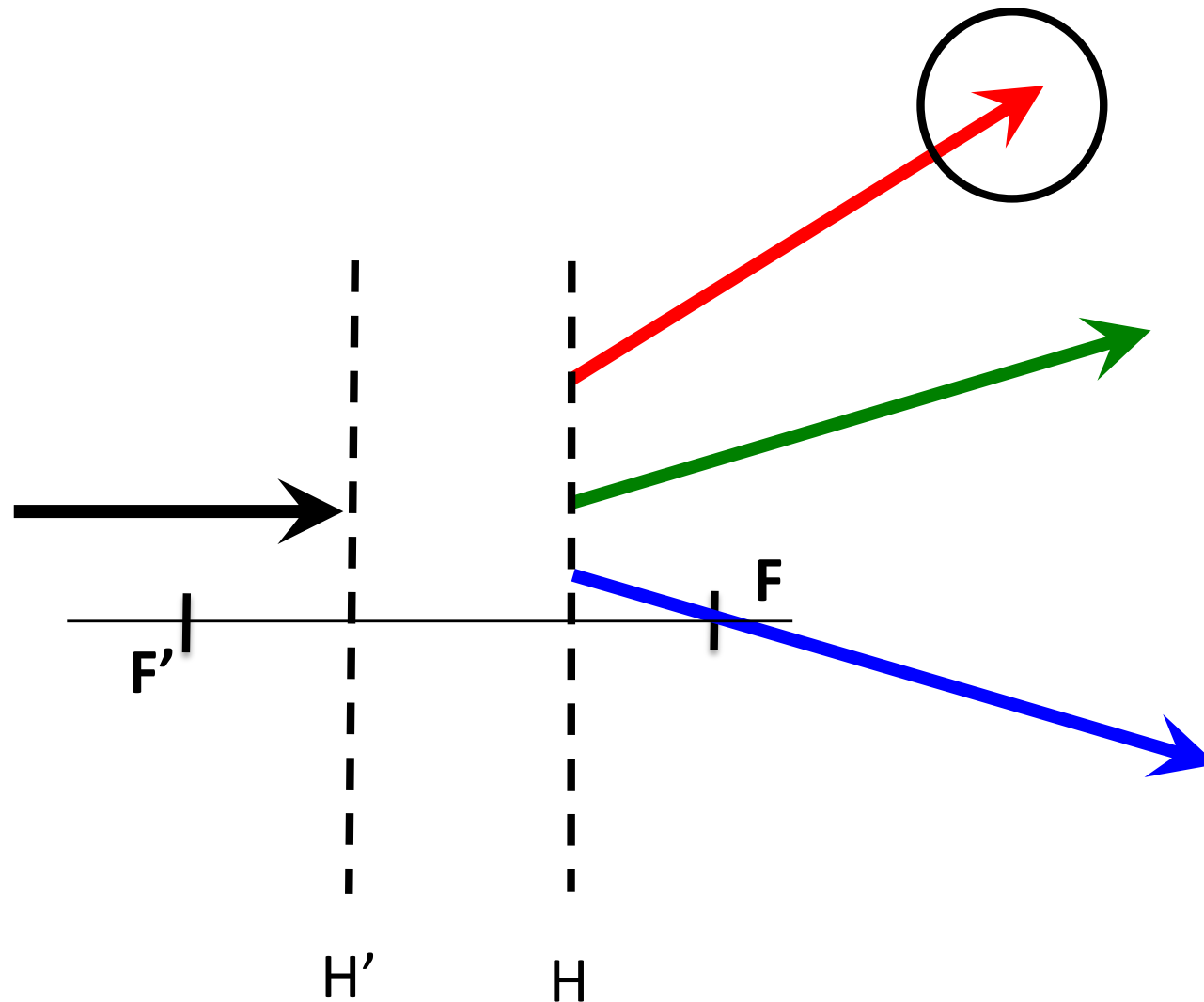
Quel est le bon rayon émergent ?



Quel est le bon rayon émergent ?



Quel est le bon rayon émergent ?



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



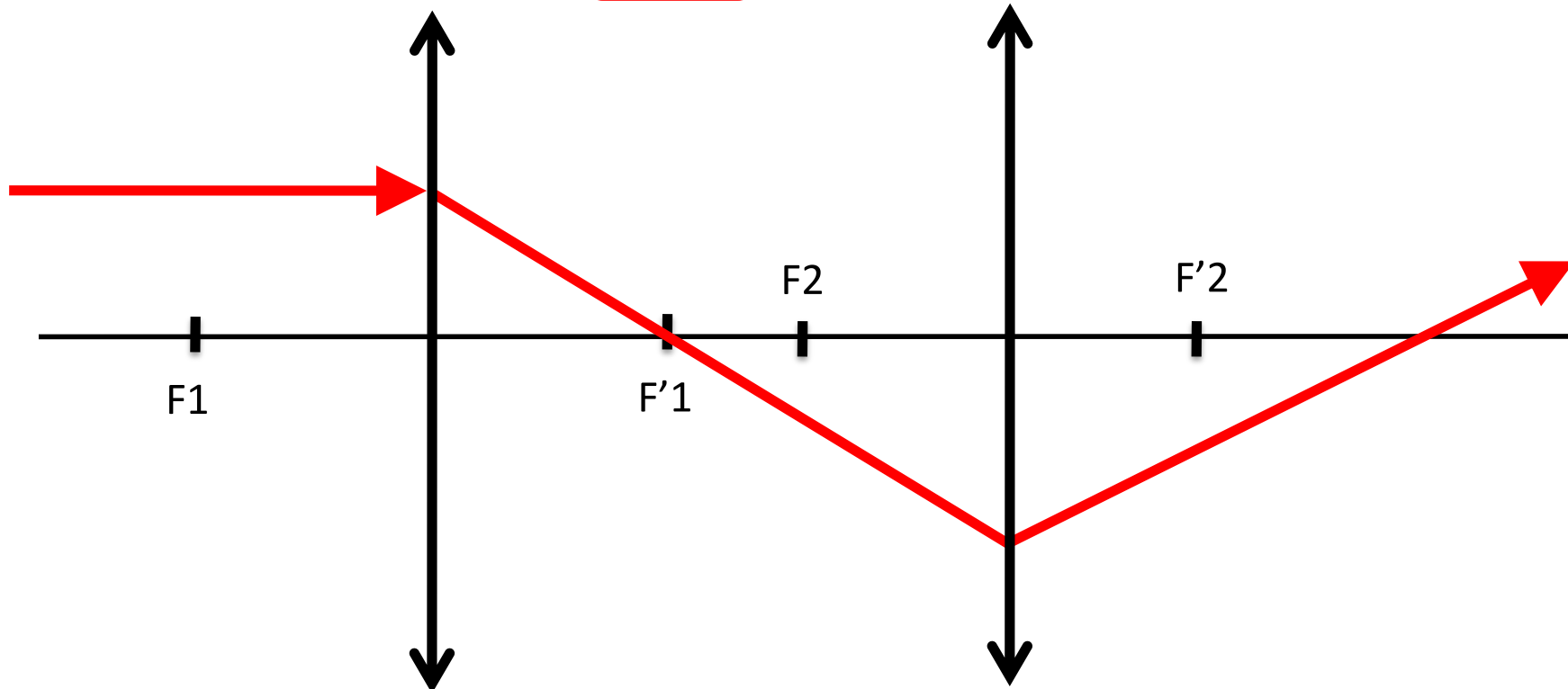
Positive



Négative



Infinie



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



Positive

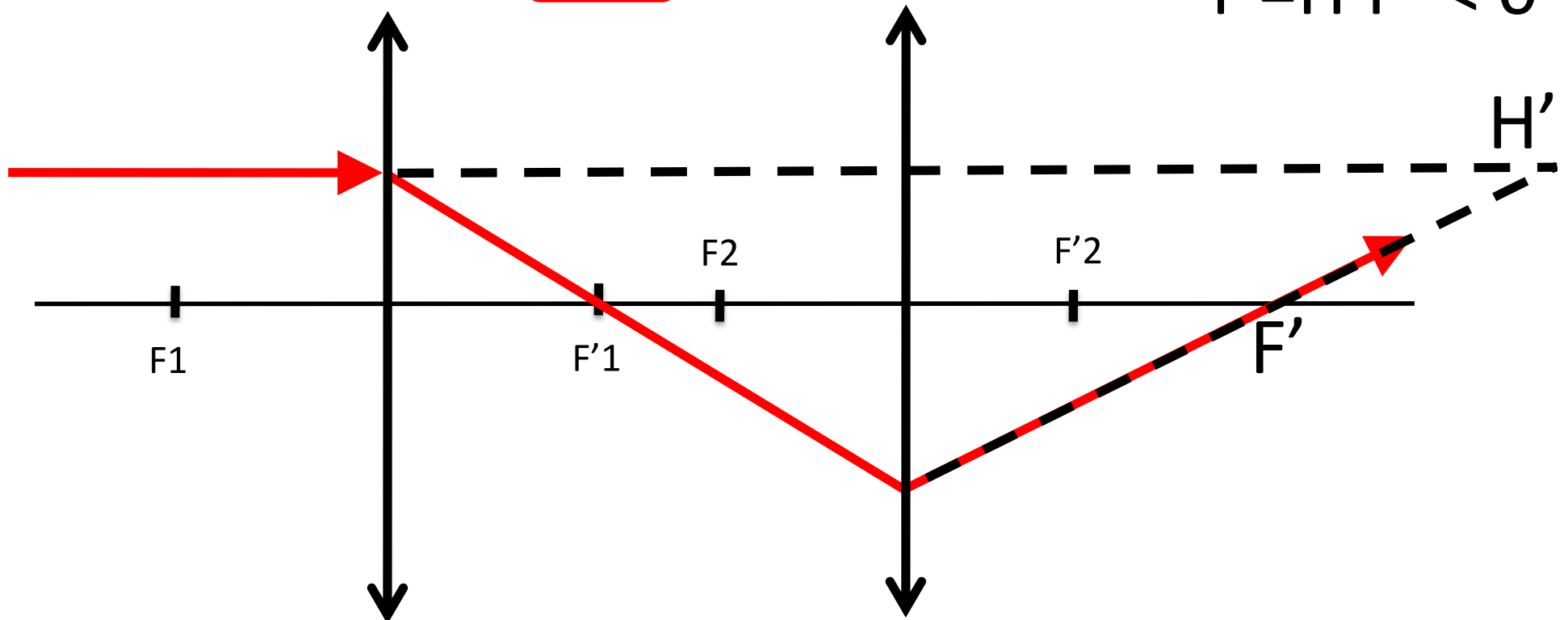


Négative

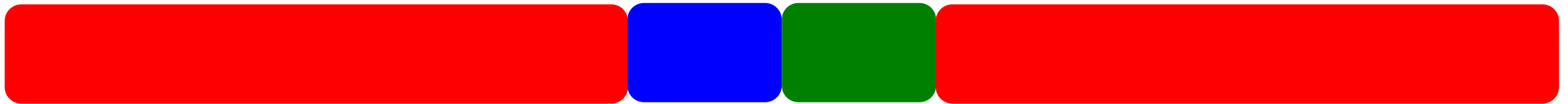
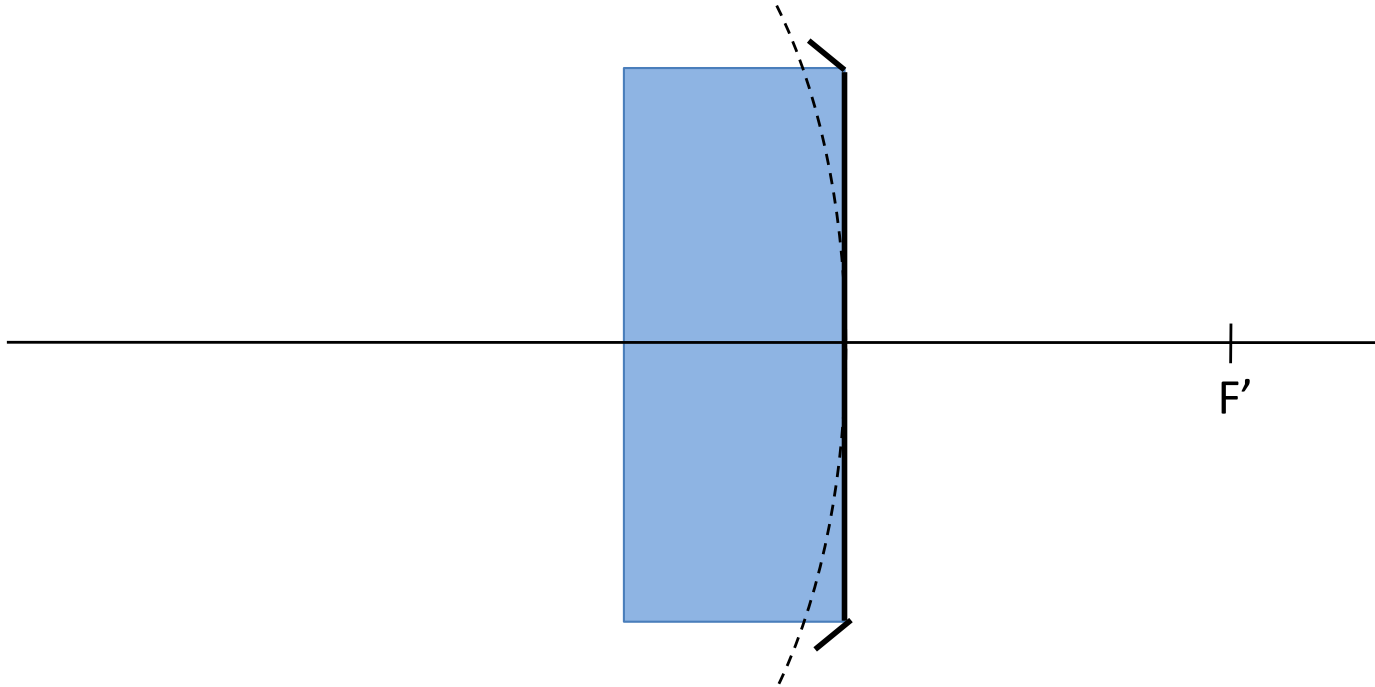


Infinie

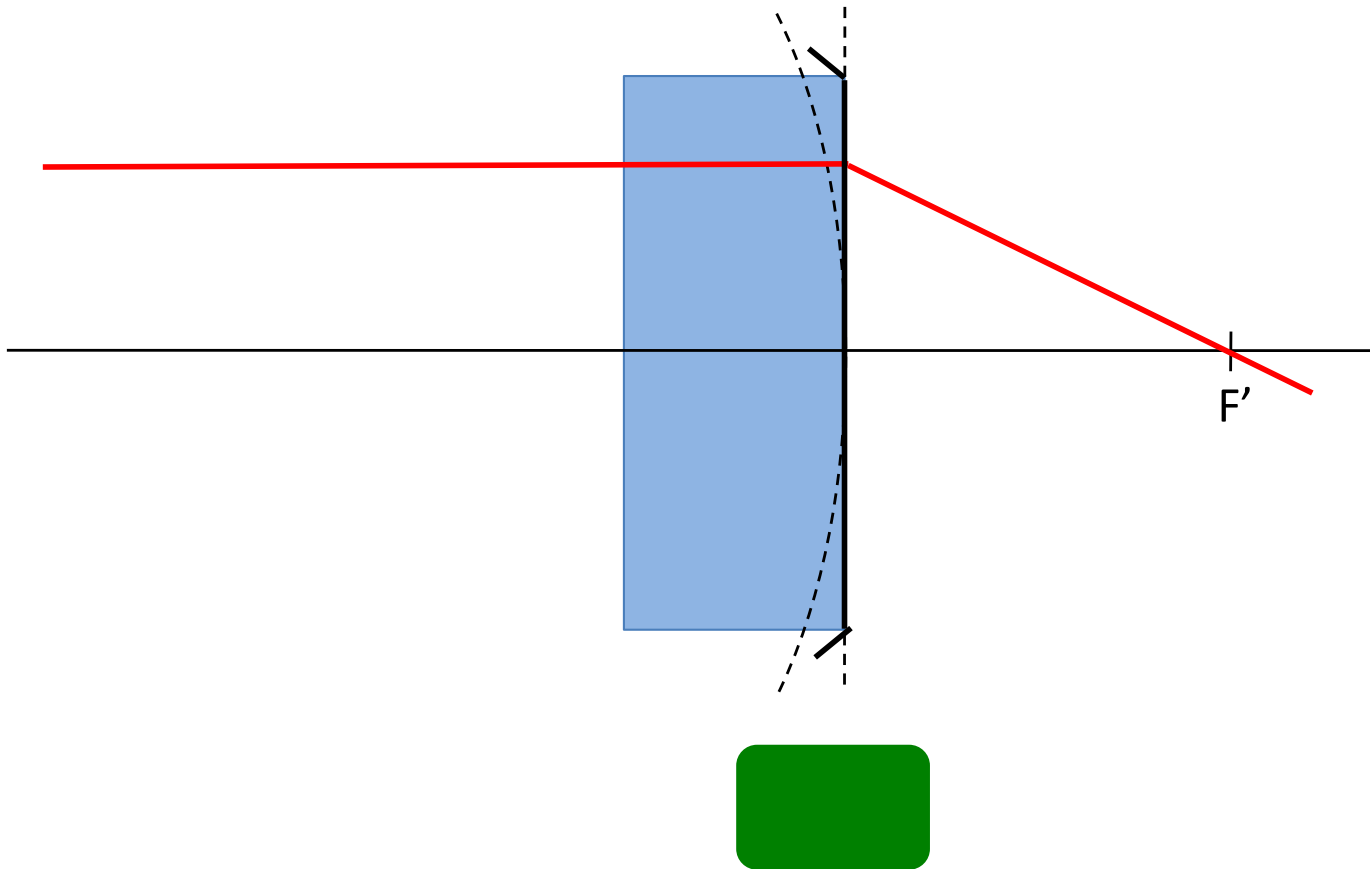
$$f' = \overline{H'F'} < 0$$



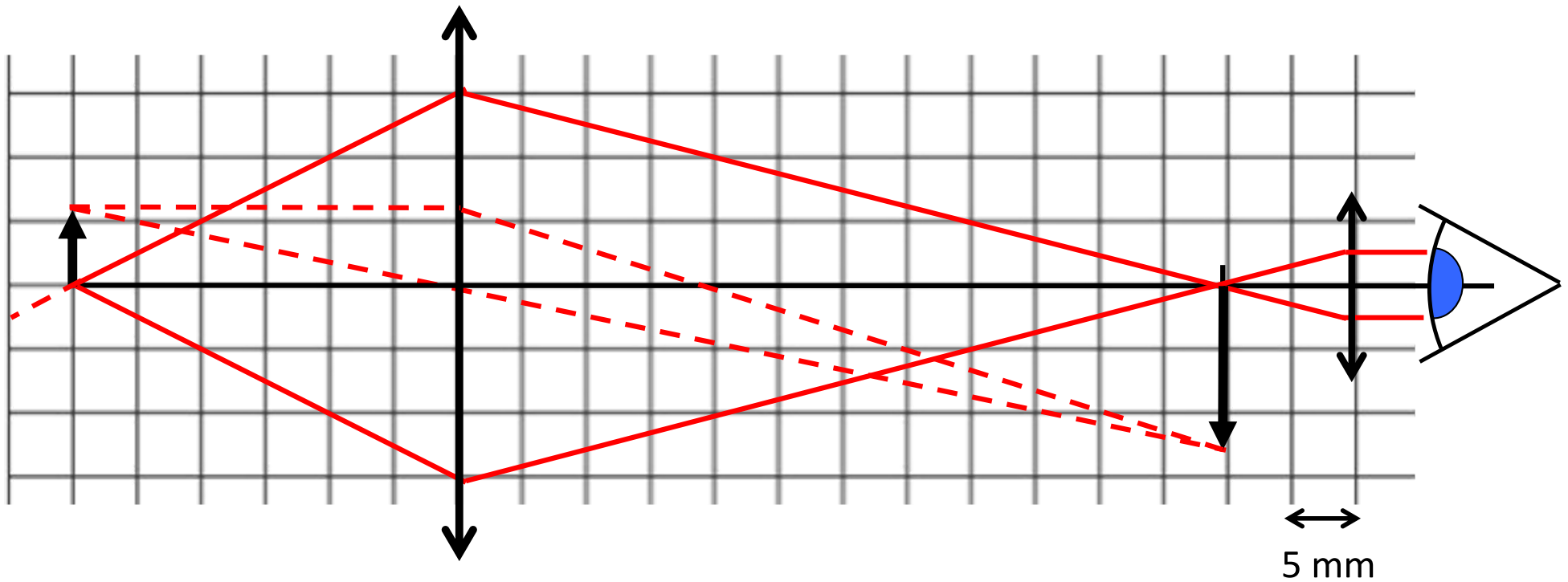
Où se trouve le plan principal image dans cette lentille plan-convexe ?



Où se trouve le plan principal image dans cette lentille plan-convexe ?

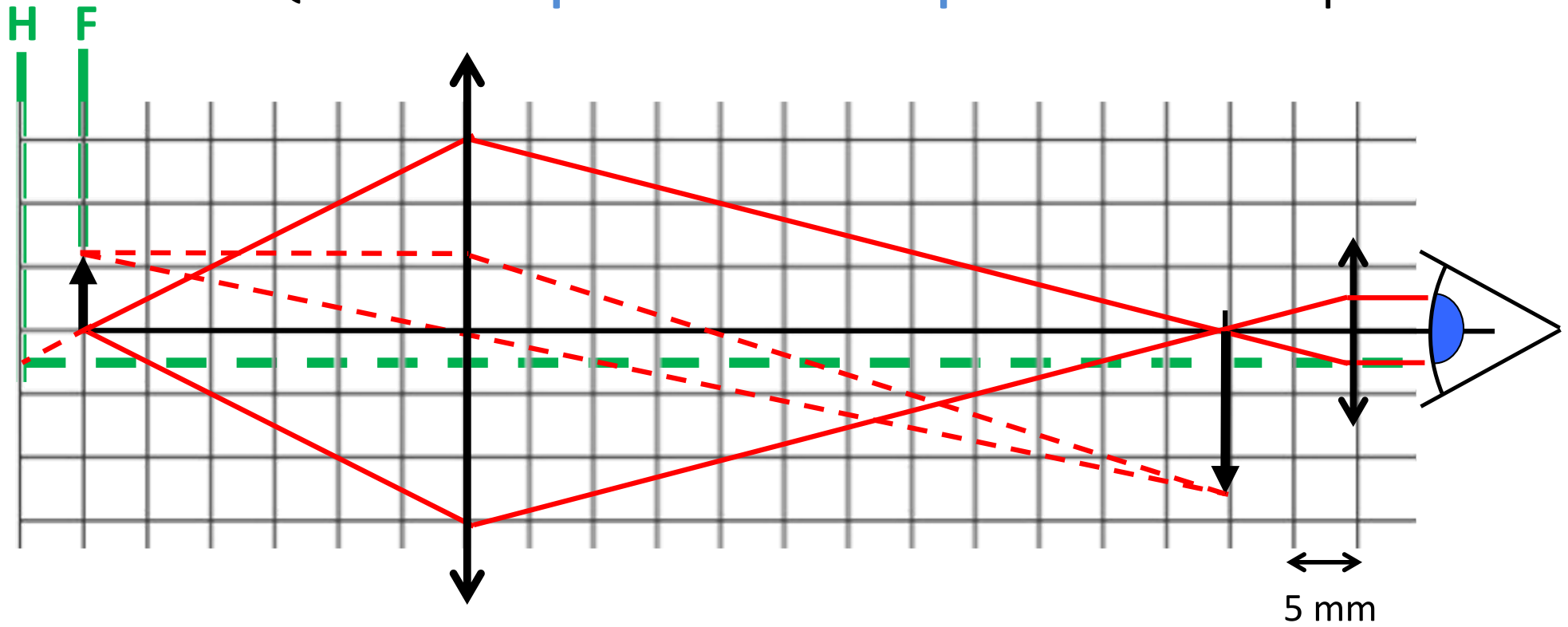






Que vaut la **distance focale** de ce microscope ?



- 5 mm
- 10 mm
- 30 mm

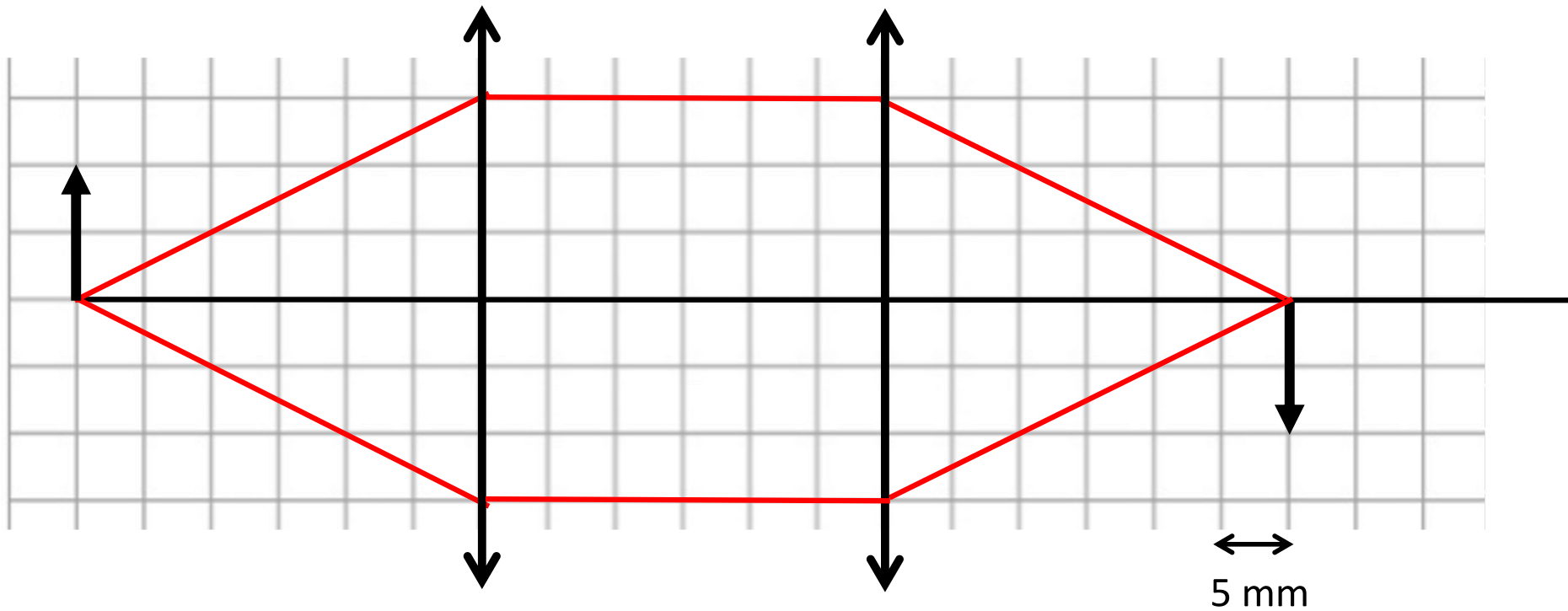
Que vaut la **distance focale** de ce microscope ?



-   5 mm
-  10 mm
-  30 mm

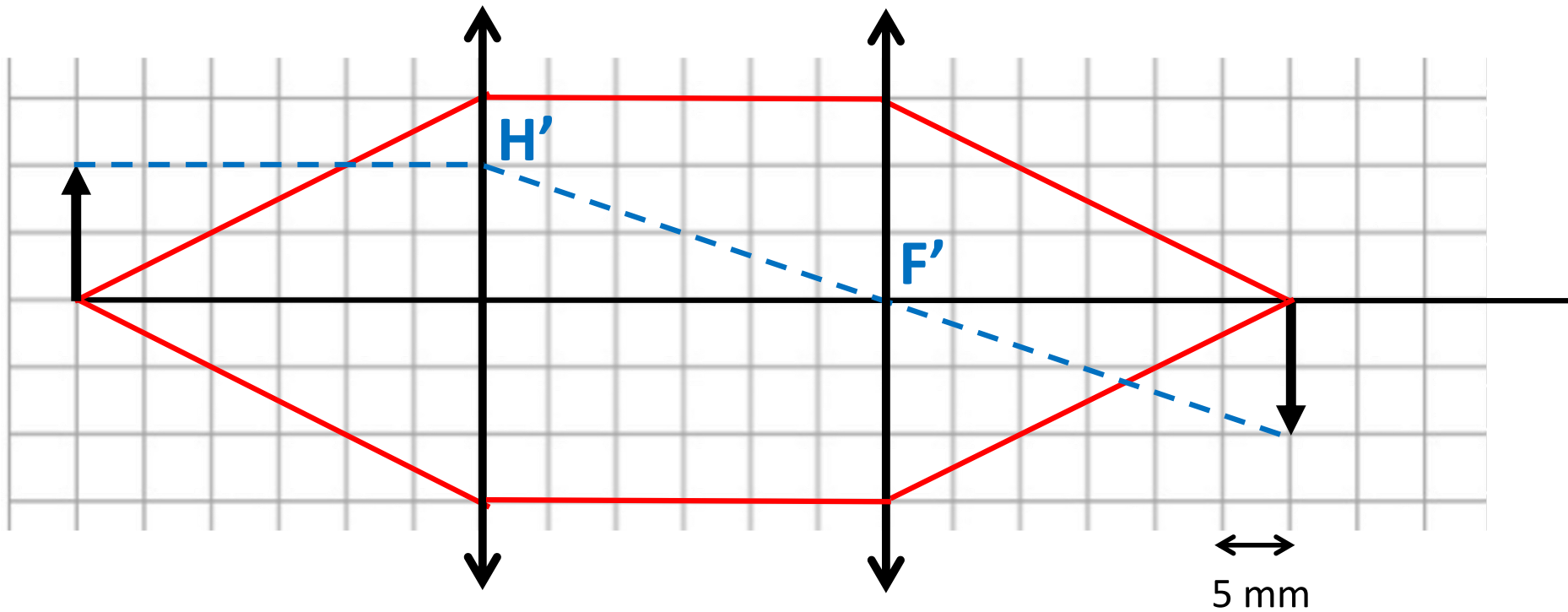
cours 4


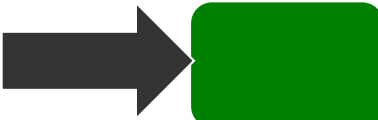

Que vaut la **distance focale** de cet objectif ?



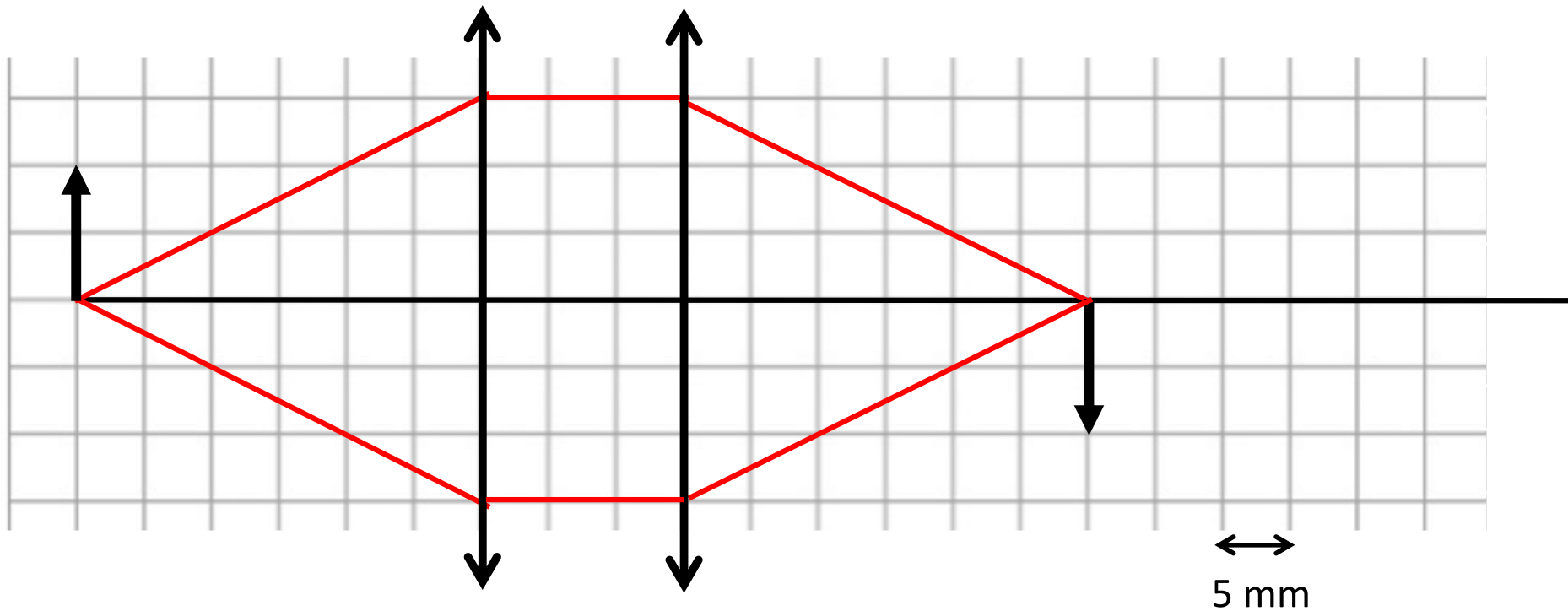
- 15 mm
- 30 mm
- 60 mm

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



-  15 mm
-  30 mm
-  60 mm

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



Elle diminue

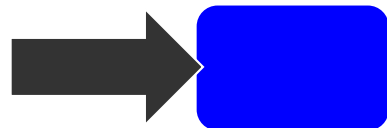
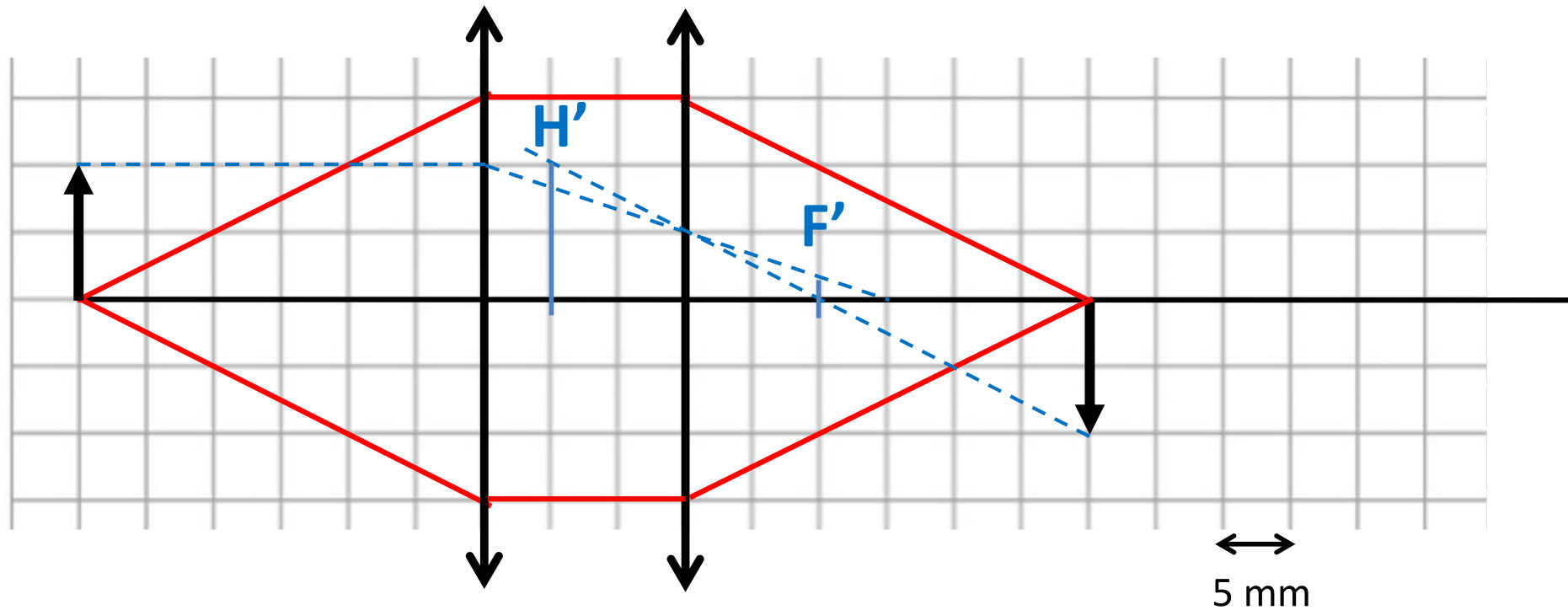


Elle augmente



Elle ne varie pas

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



Elle diminue

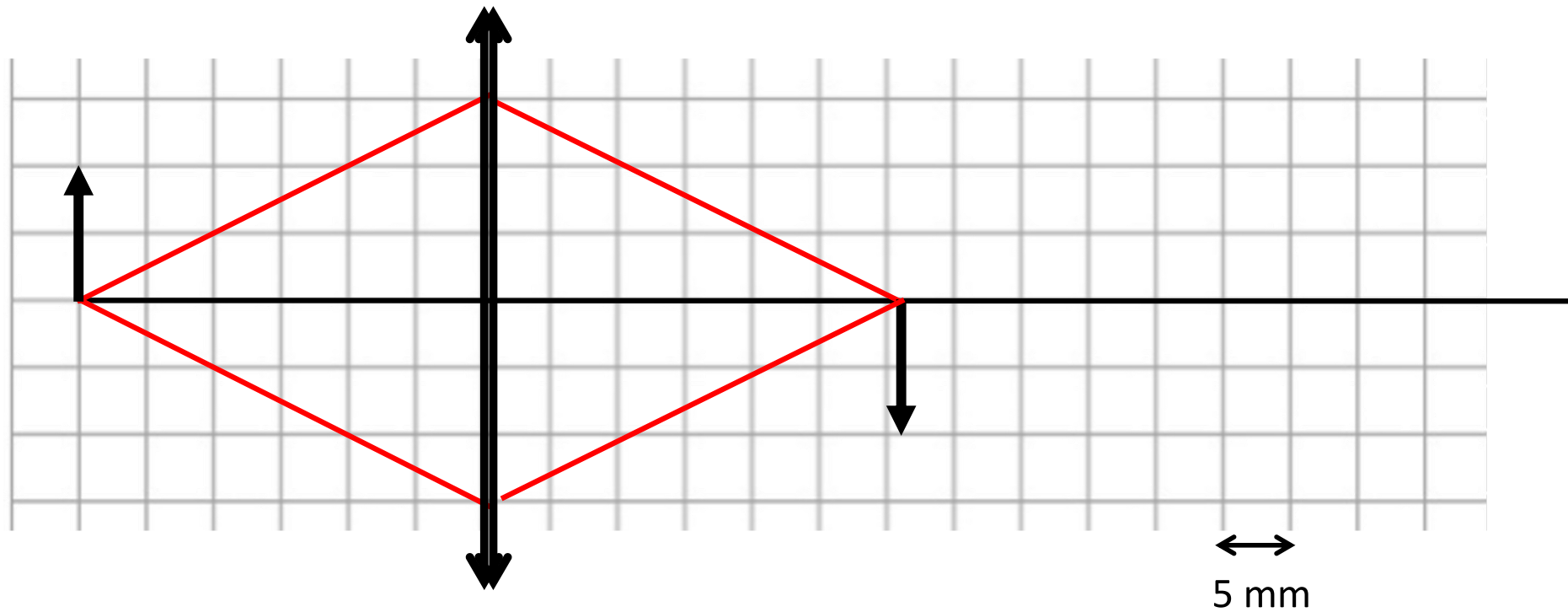


Elle augmente



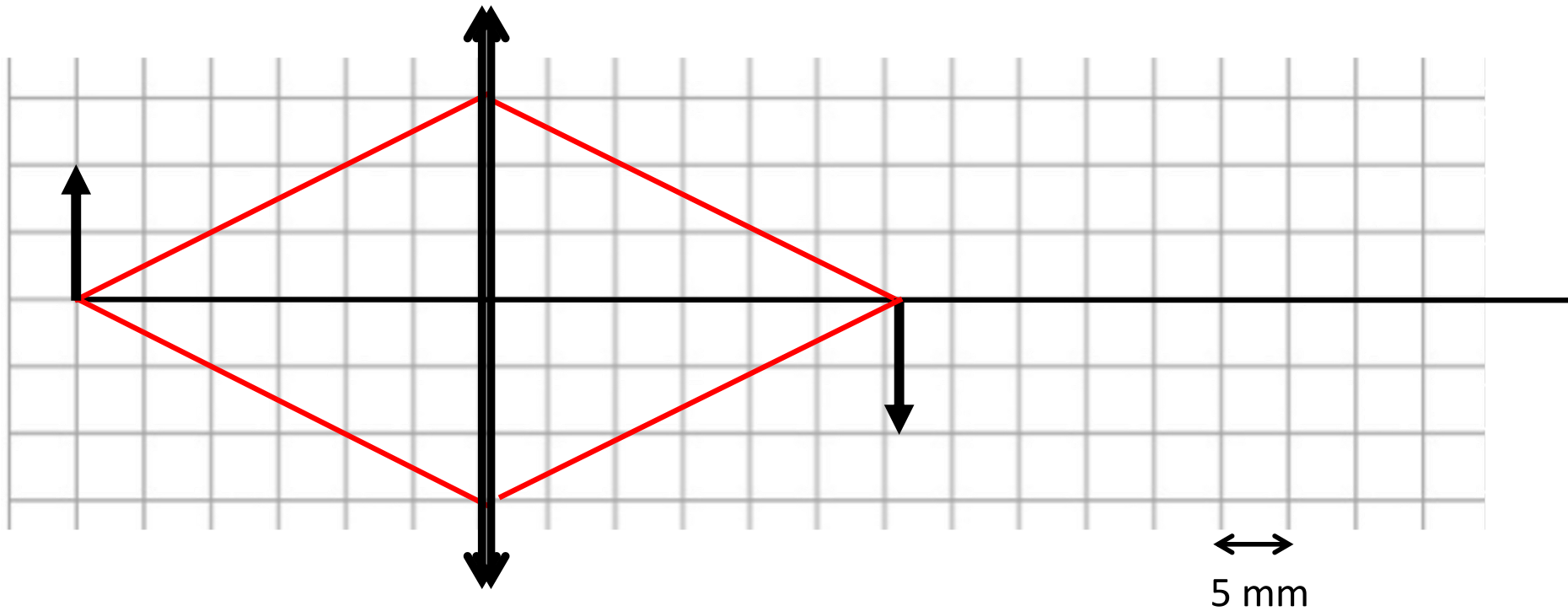
Elle ne varie pas





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



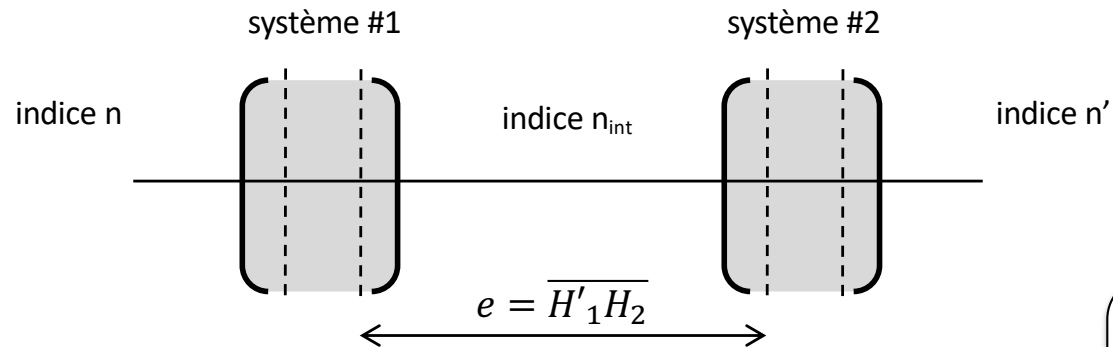
- 15 mm
- 30 mm
- 60 mm

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



-   15 mm
-  30 mm
-  60 mm

Formule de Gullstrand



$$P = \frac{n'}{f'} = P_1 + P_2 - \frac{e}{n_{int}} \times P_1 \times P_2$$

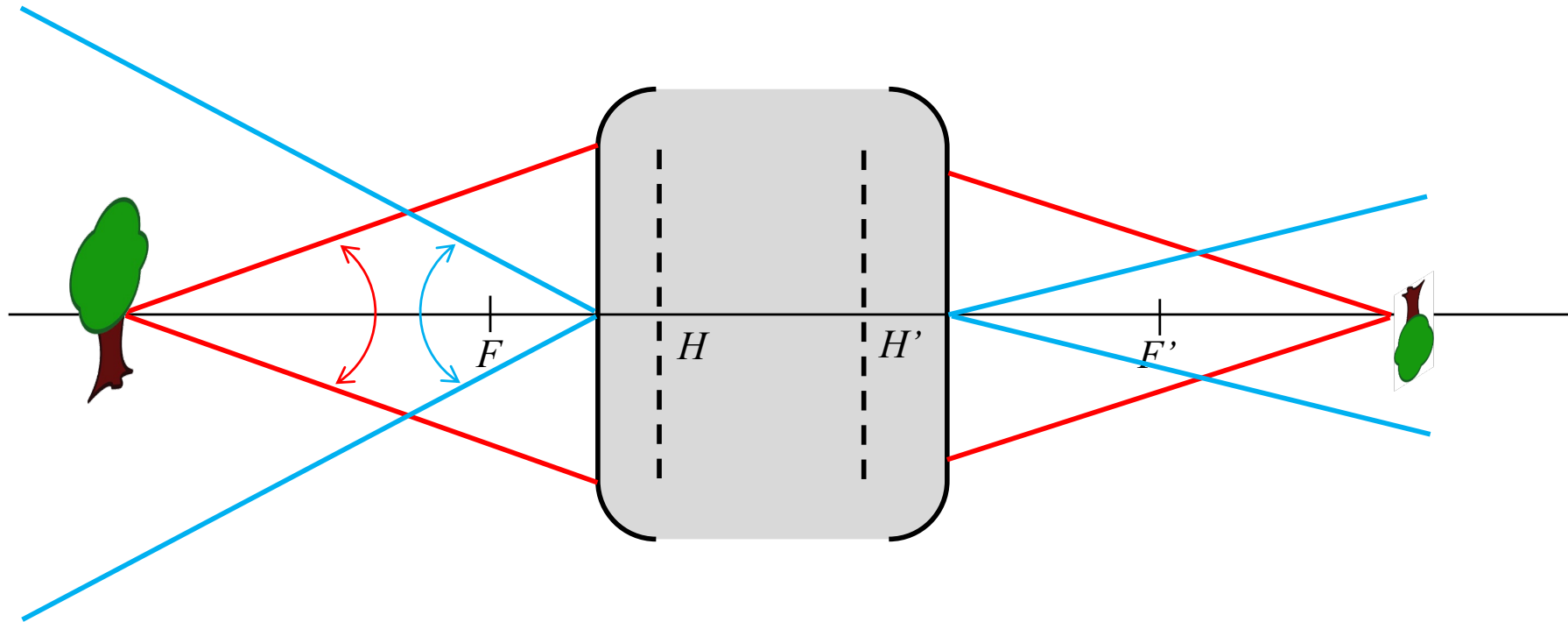
puissance

$$P = -\frac{n}{f} = +\frac{n'}{f'}$$

Même indice

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{e}{f'_1 \times f'_2}$$

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.

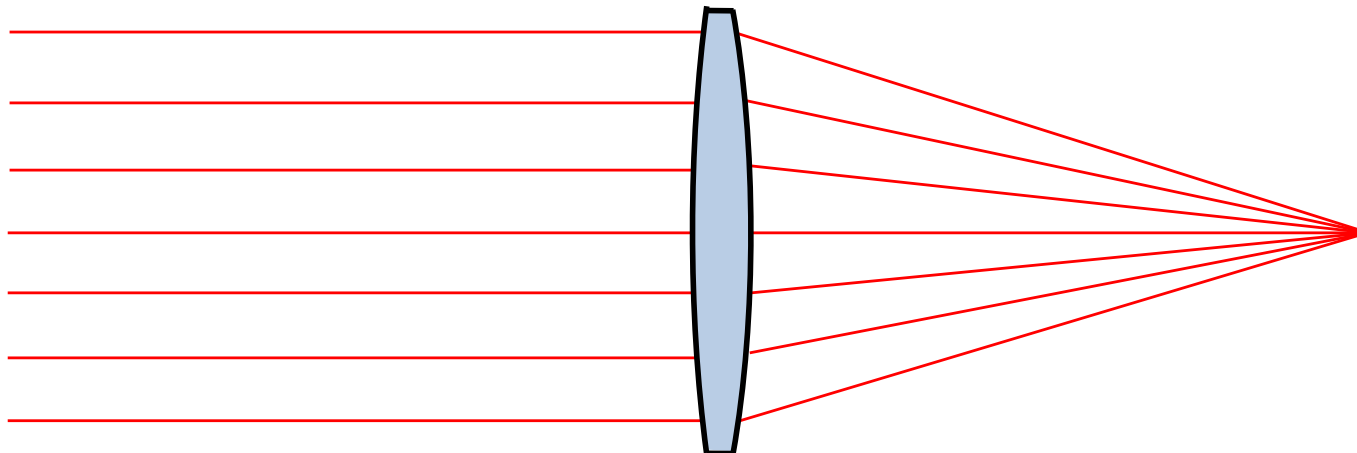
Dans ce schéma les rayons varient avec



avec le champ



avec l'ouverture



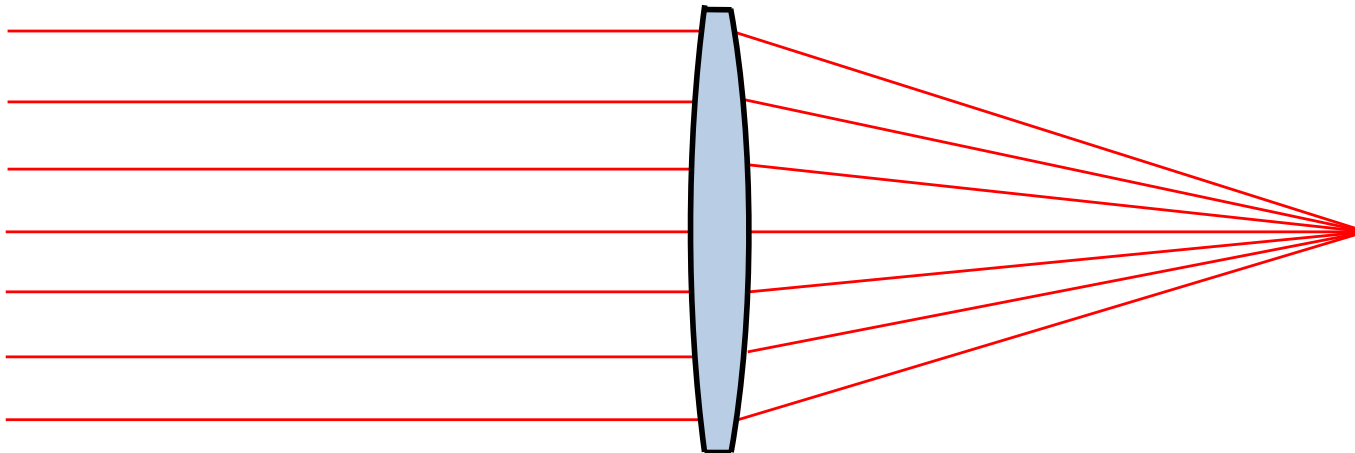
Dans ce schéma les rayons varient avec



avec le champ



avec l'ouverture



Quel élément limite le champ dans un sténopé ?



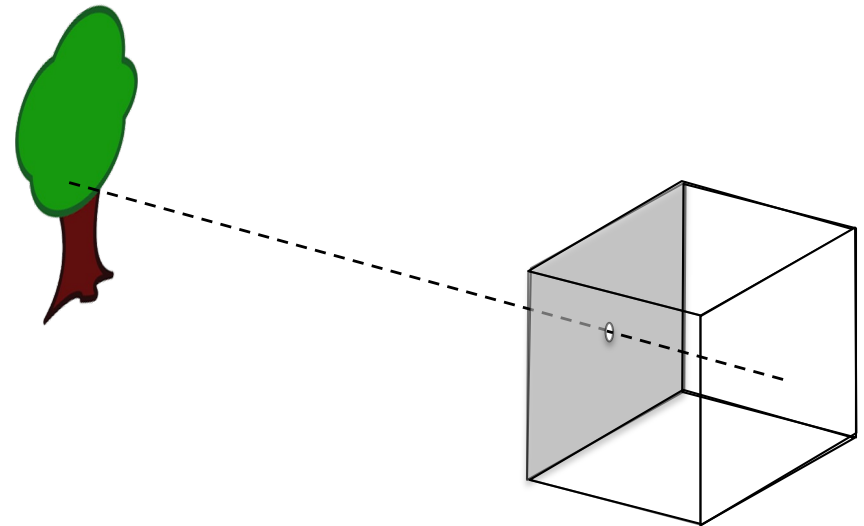
La taille du trou



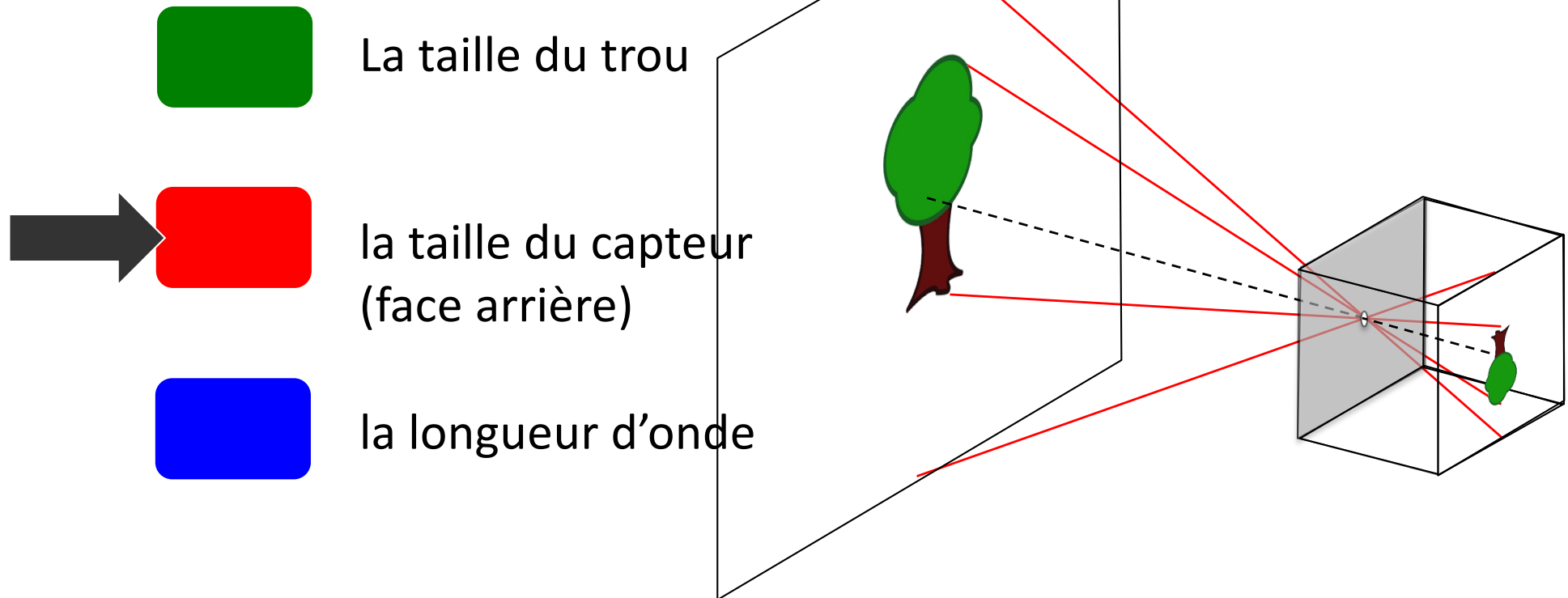
la taille du capteur
(face arrière)



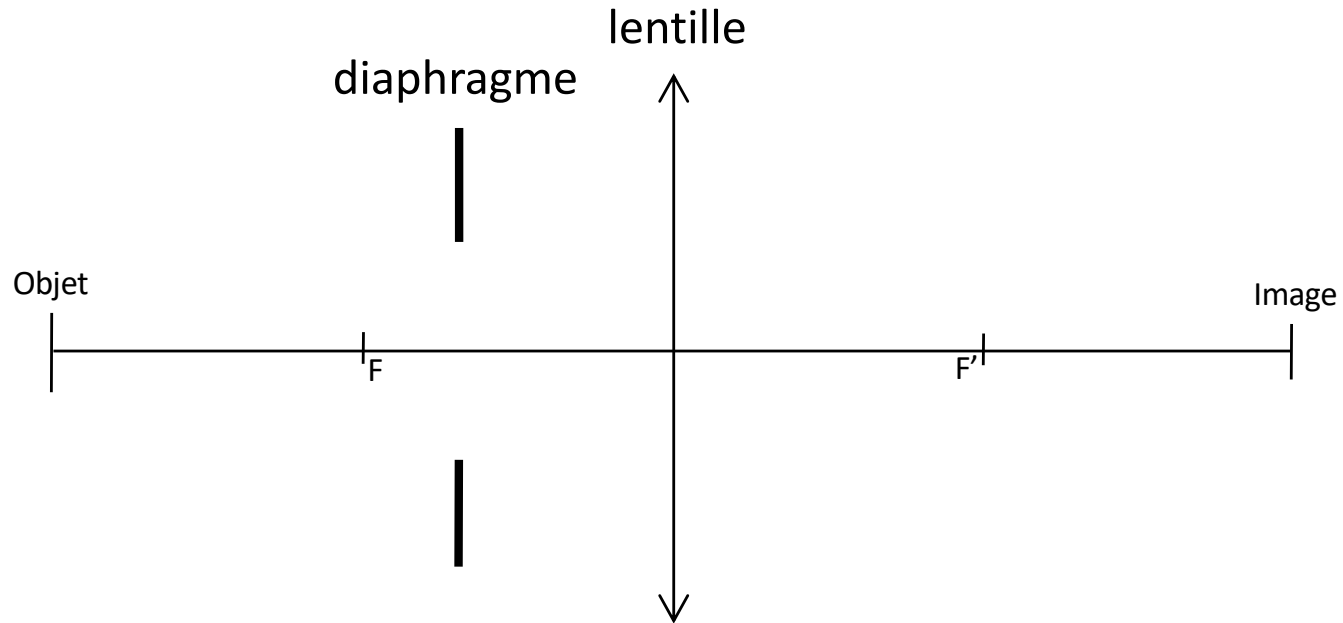
la longueur d'onde



Quel élément limite le champ dans un sténopé ?



Quel élément limite l'ouverture ?



le diaphragme

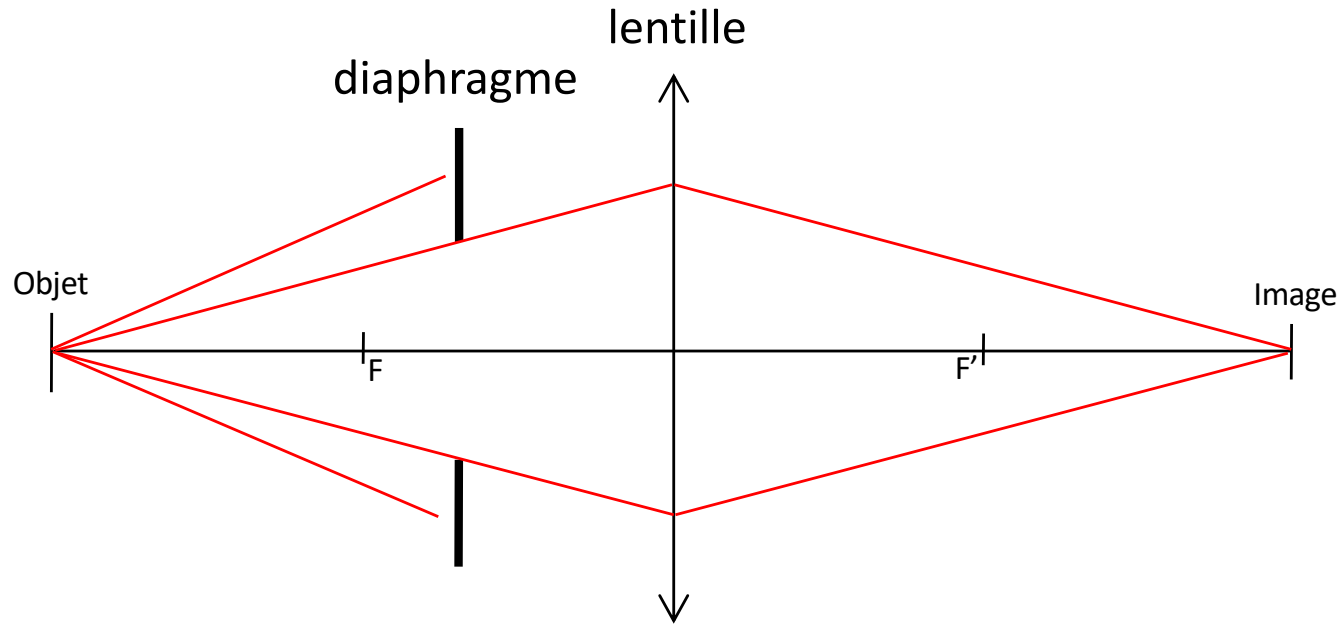


la lentille



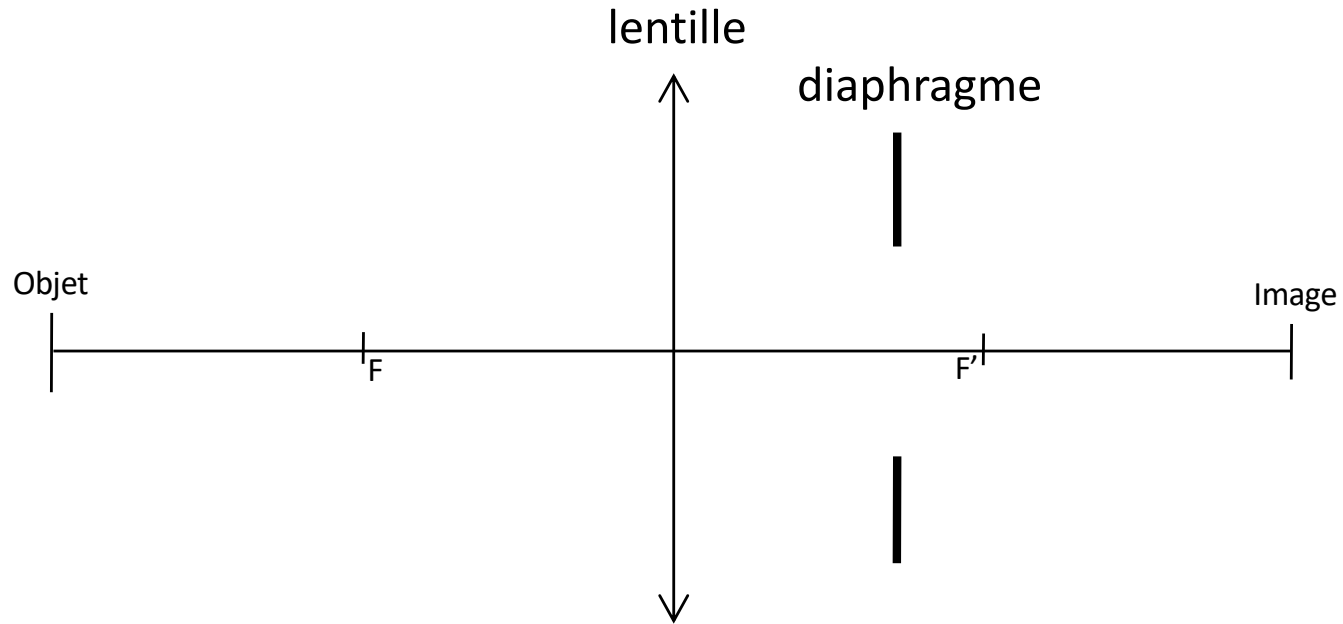
les deux

Quel élément limite l'ouverture ?



-   le diaphragme
-  la lentille
-  les deux

Quel élément limite l'ouverture ?



le diaphragme

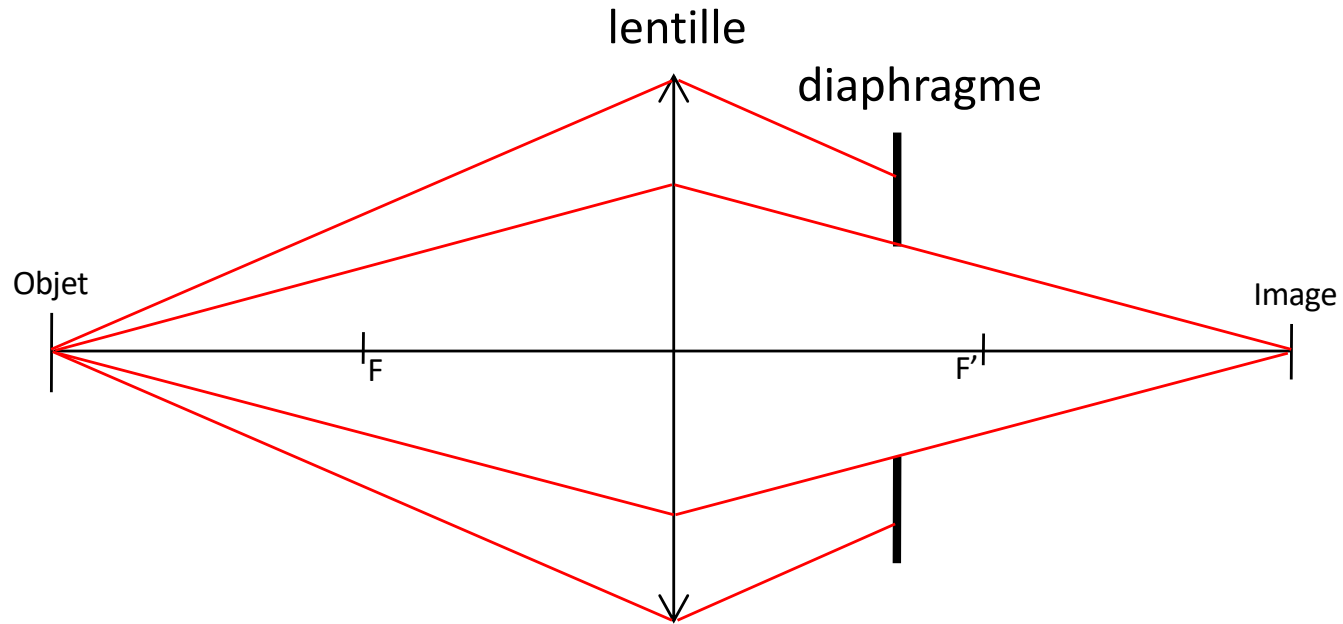


la lentille



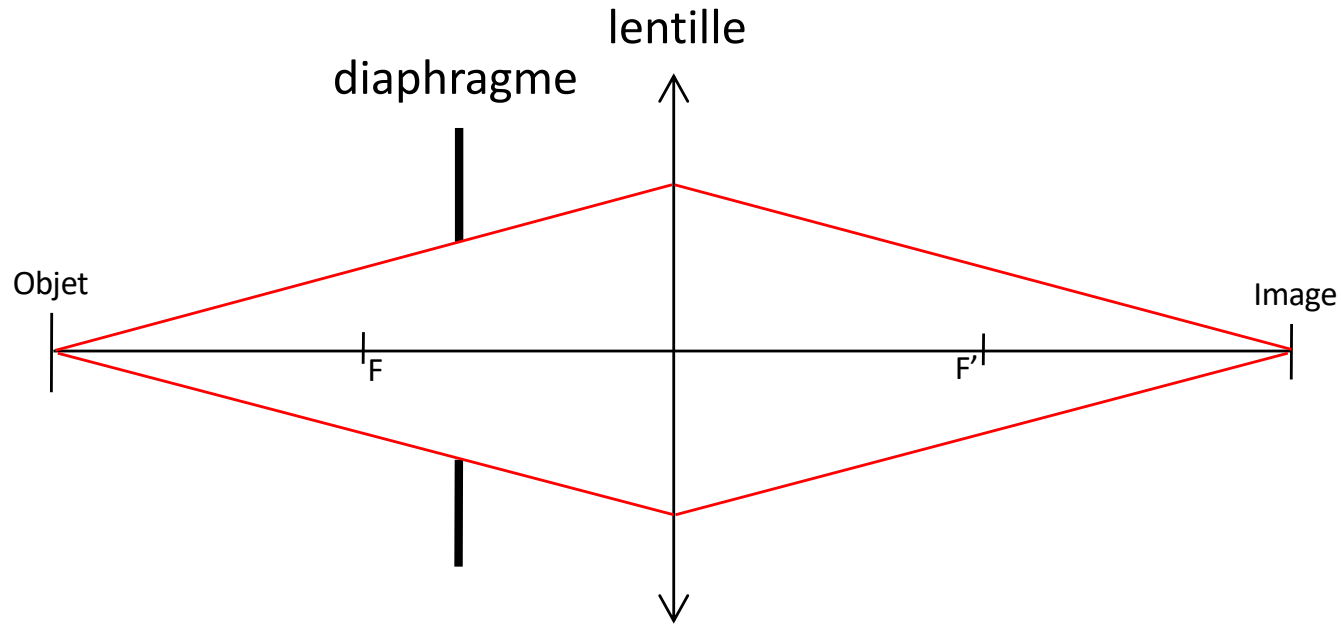
les deux

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

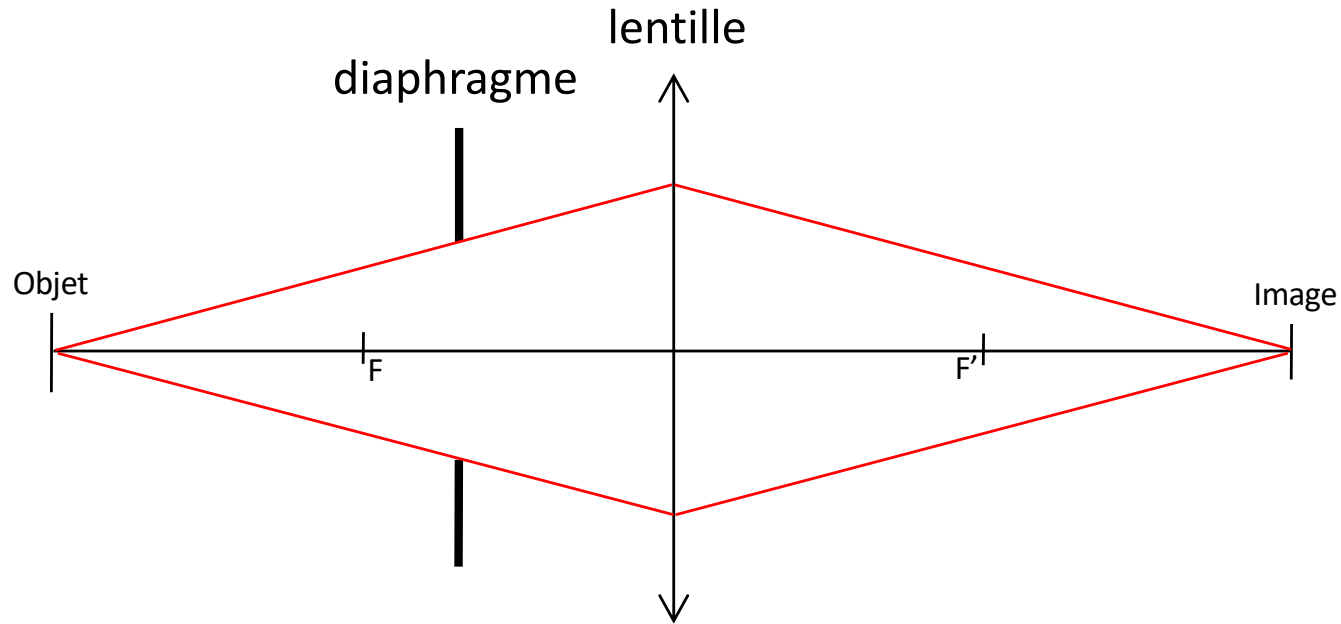


la lentille



l'image du diaphragme par la lentille

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



le diaphragme

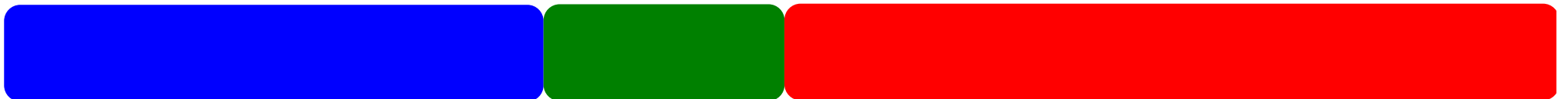
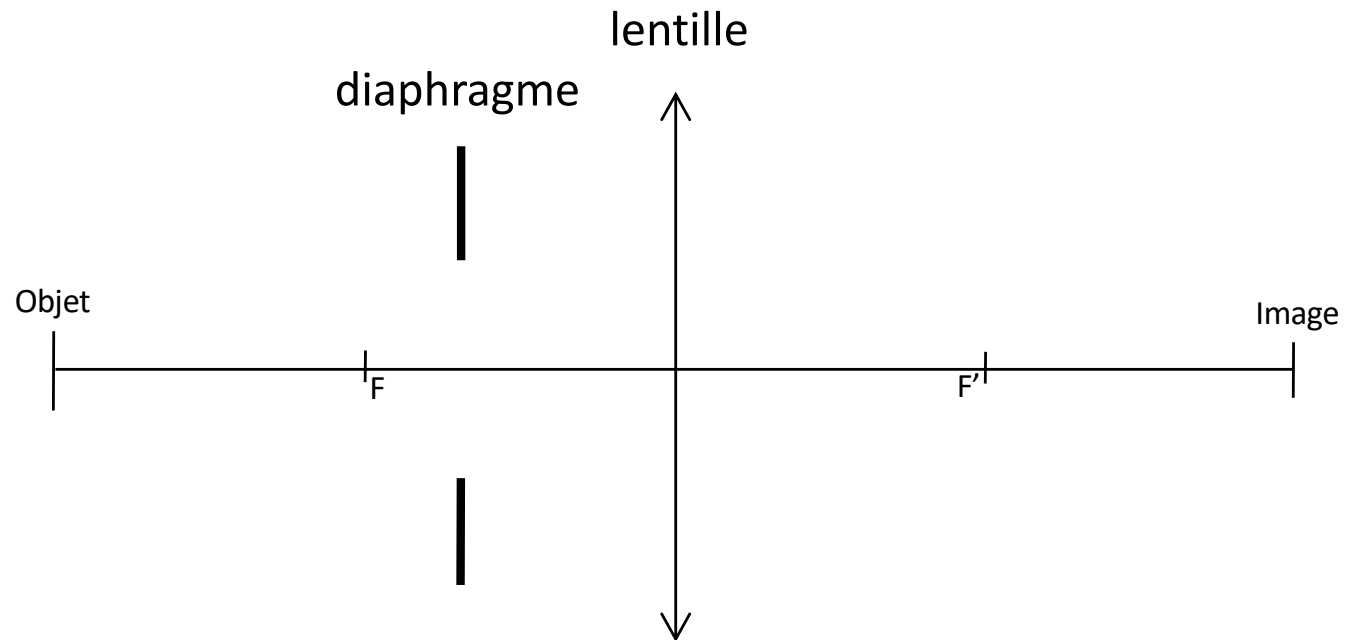


la lentille



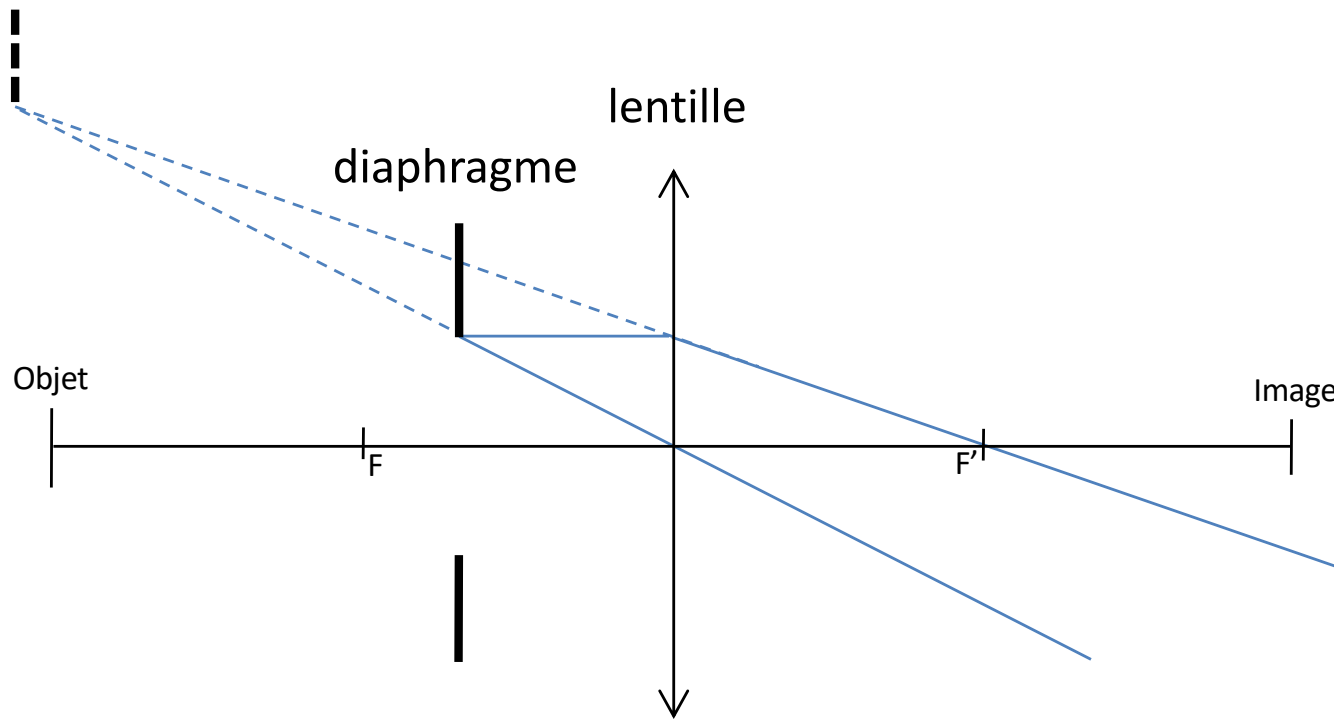
l'image du diaphragme par la lentille

Où est l'élément qui limite l'ouverture des rayons dans l'espace de sortie ?



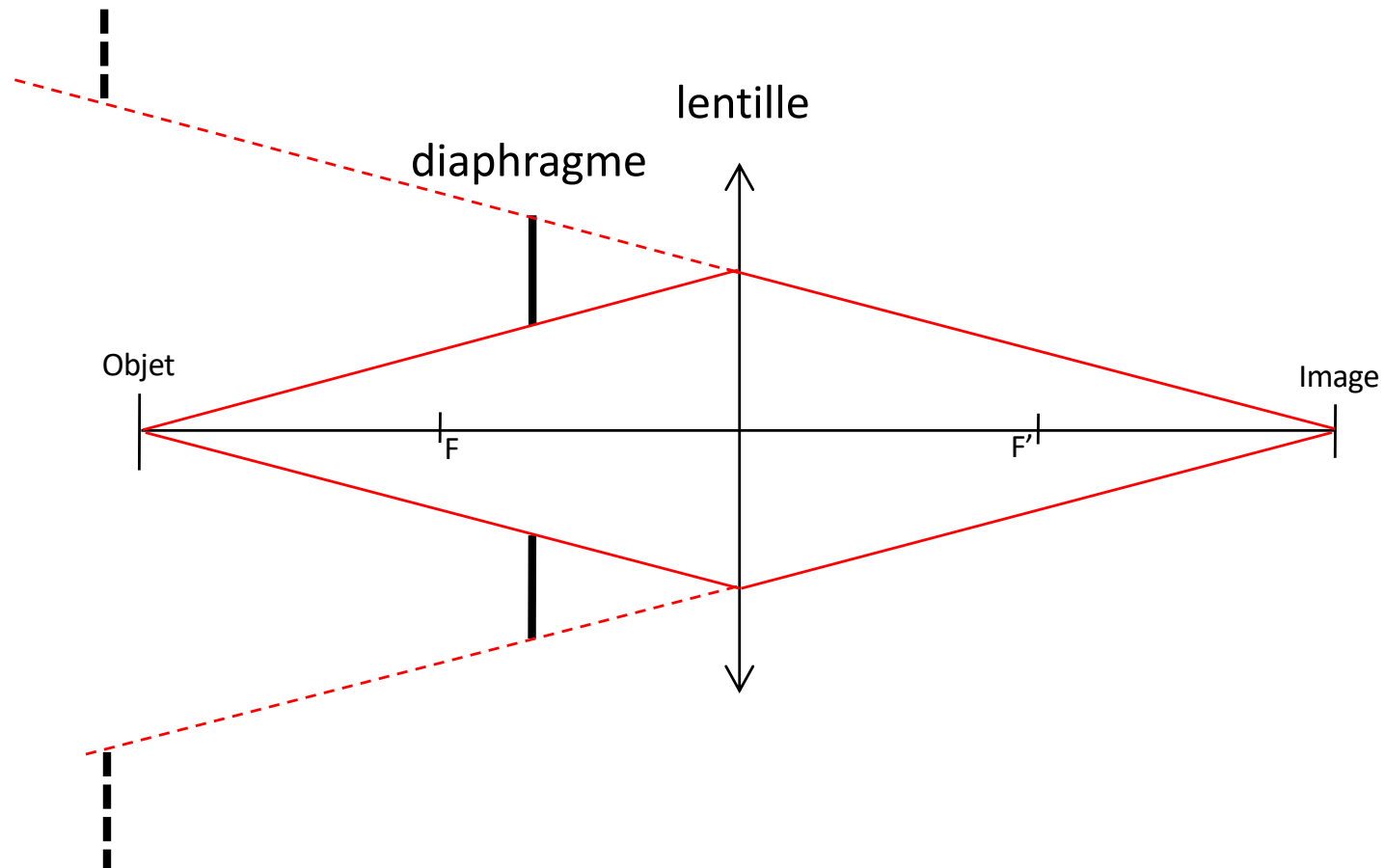
Où est l'élément qui limite l'ouverture des rayons dans l'espace de sortie ?

Image du diaphragme par la lentille



Où est l'élément qui limite l'ouverture des rayons dans l'espace de sortie ?

Image du diaphragme par la lentille

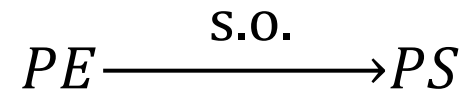


L'élément physique dans un système optique (lentille, miroir, diaphragme) qui limite l'ouverture des rayons pour un point objet sur l'axe s'appelle la **pupille du système** ou le **diaphragme d'ouverture (DO)**.

En anglais, **aperture stop, pupil**

Dans l'espace d'entrée, on définit une **pupille d'entrée** qui est l'image de la pupille par les éléments qui le précèdent.

Dans l'espace de sortie, on définit une **pupille de sortie** qui est l'image de la pupille par les éléments qui le suivent.



Au même titre que l'objet et l'image utile, mais **attention ce n'est pas la même conjugaison** (grandissement différent).

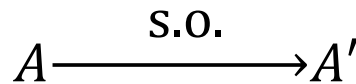
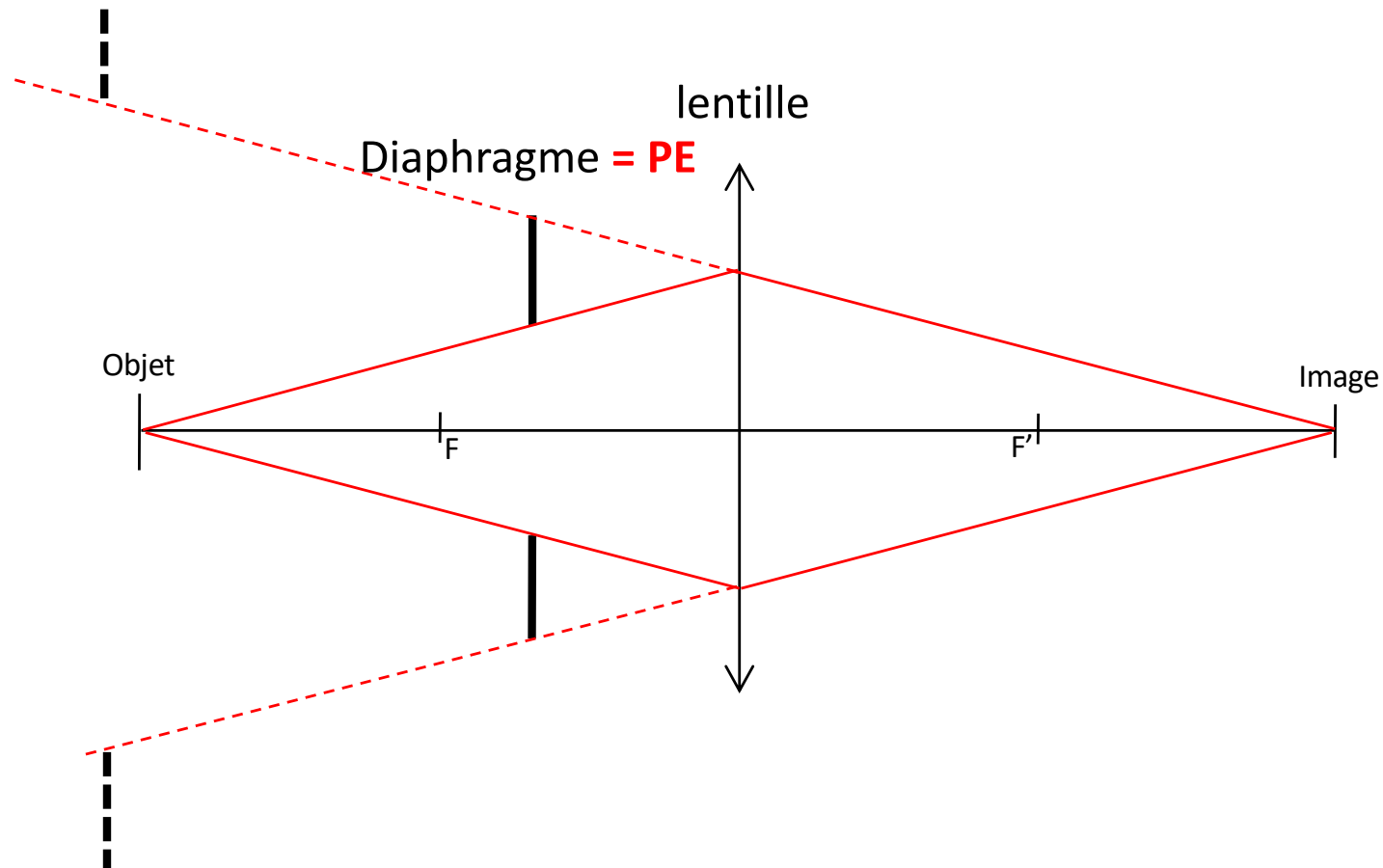


Image du diaphragme par la lentille = **PS**



Le diaphragme est la pupille d'entrée (ici $PE = DO$)

Son conjugué dans l'espace de sortie est la pupille de sortie (PS)

tracés pupilles

(fichier à part)

cours 5

Où est la pupille d'entrée ?



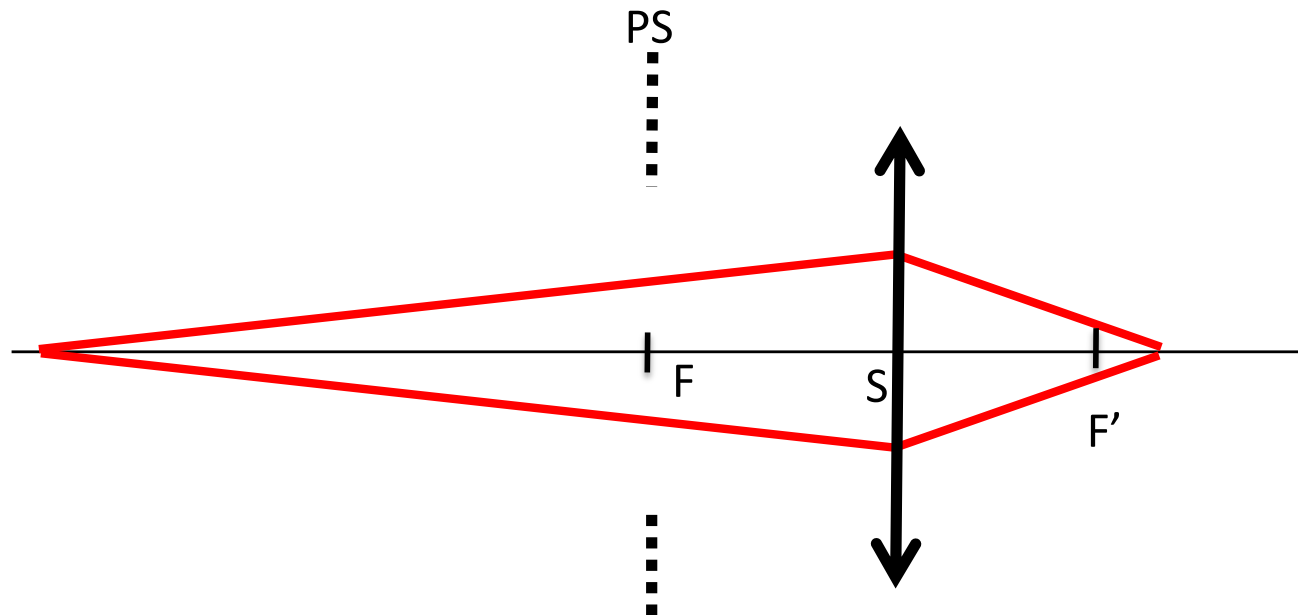
à l'infini



en F'



entre F et S



Où est la pupille d'entrée ?



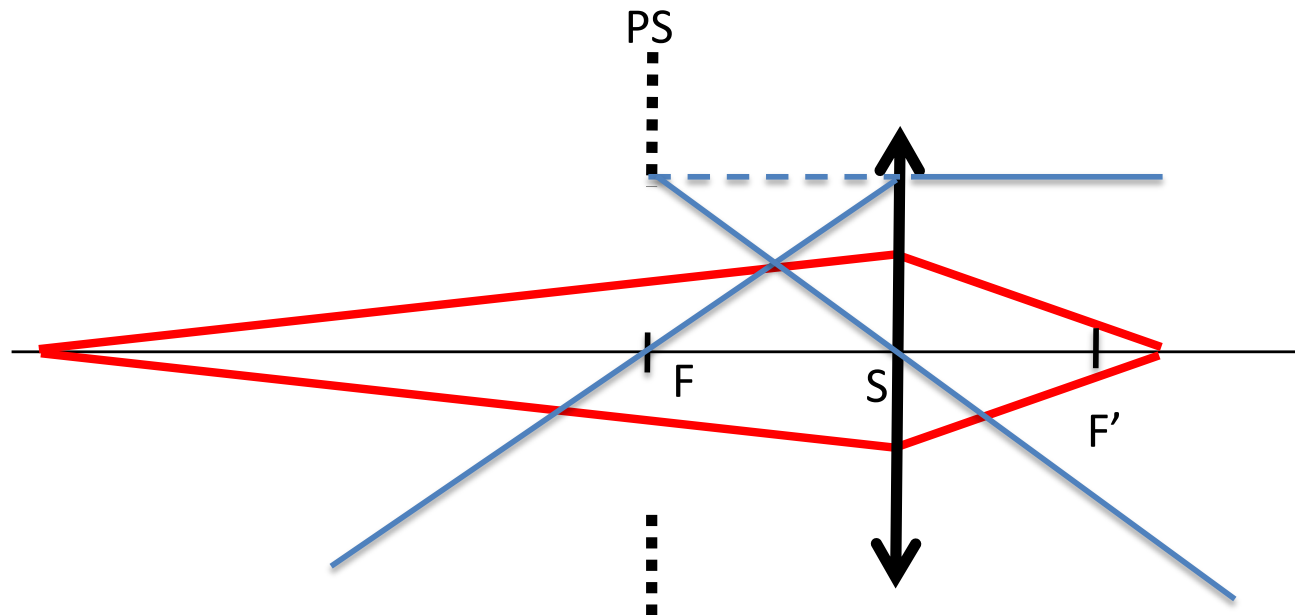
à l'infini

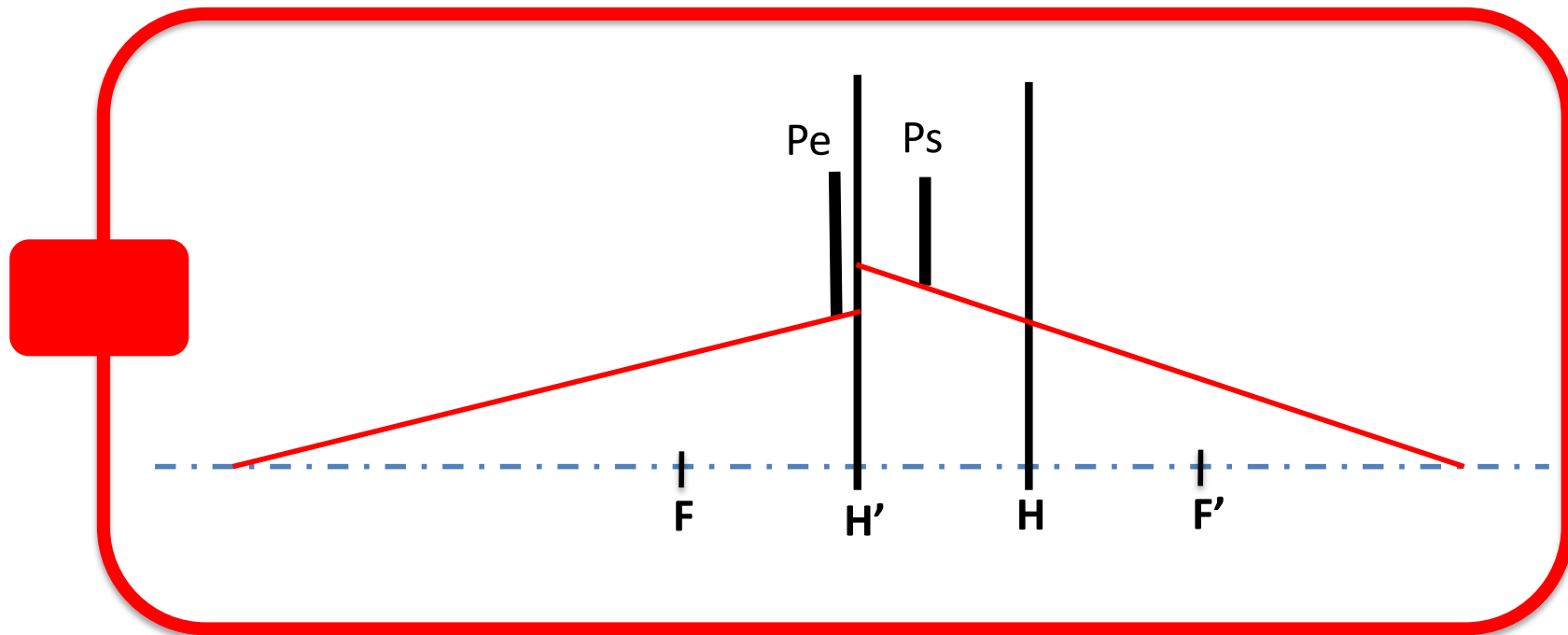


en F'

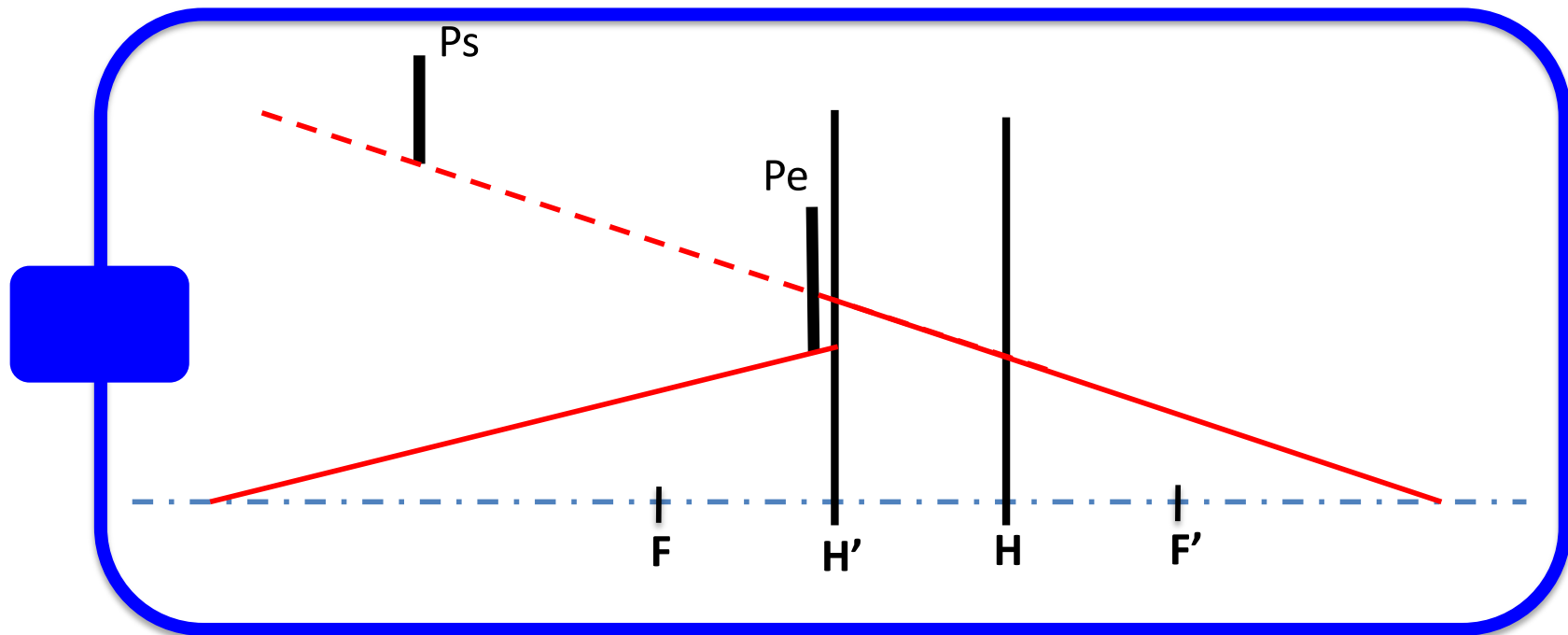


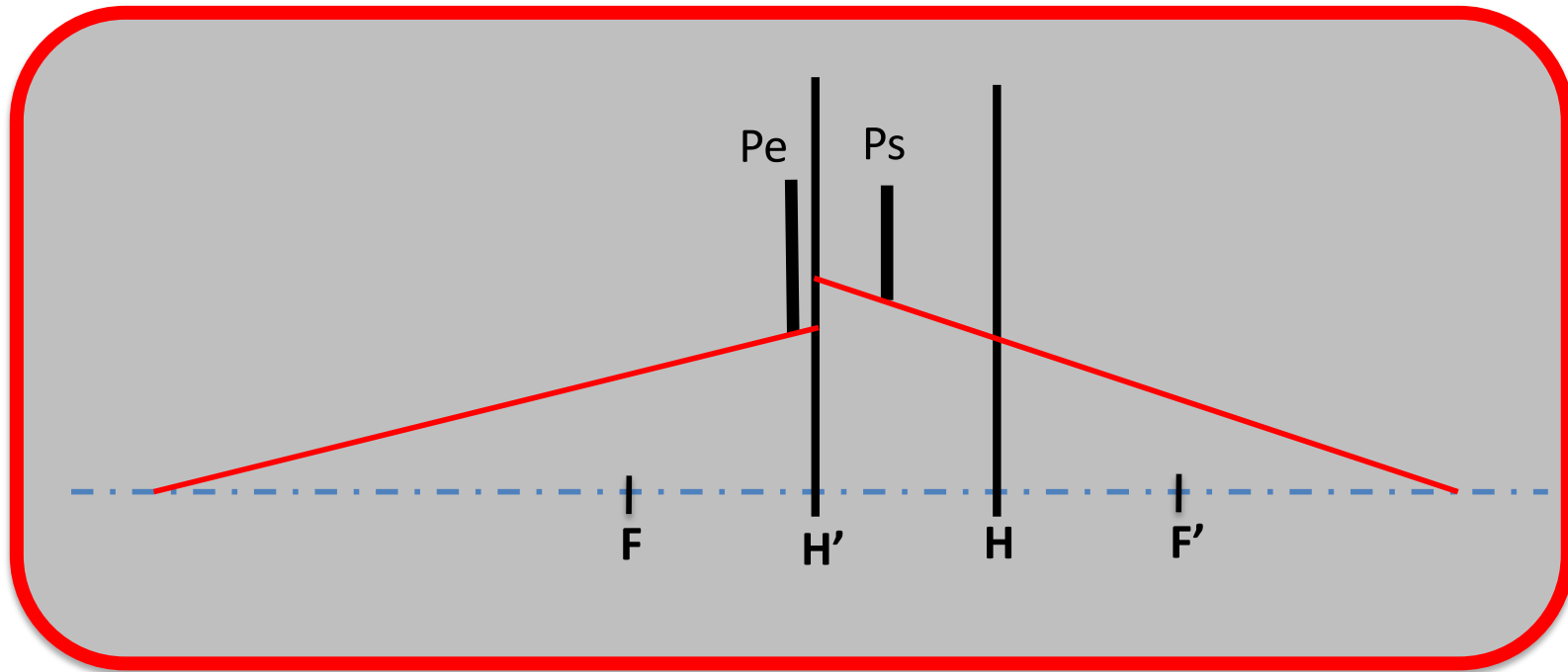
entre F et S



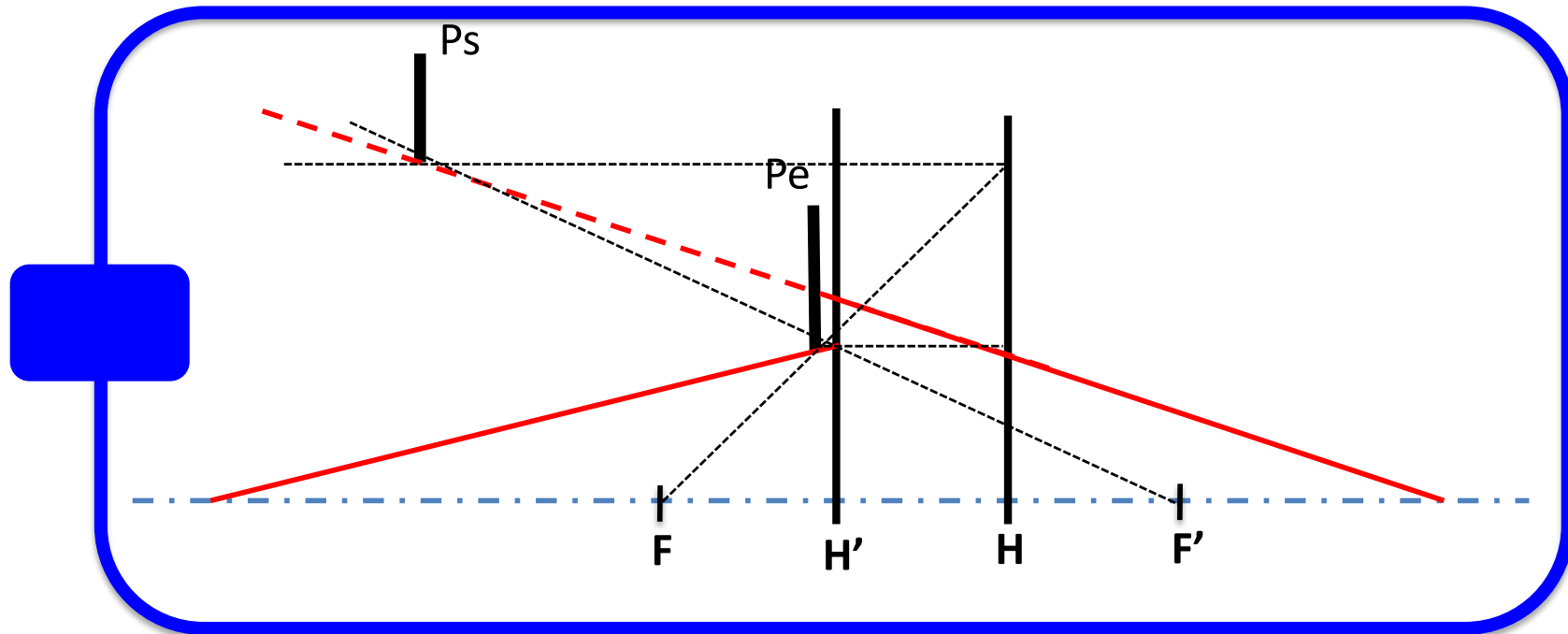


Quel schéma est vrai ?





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



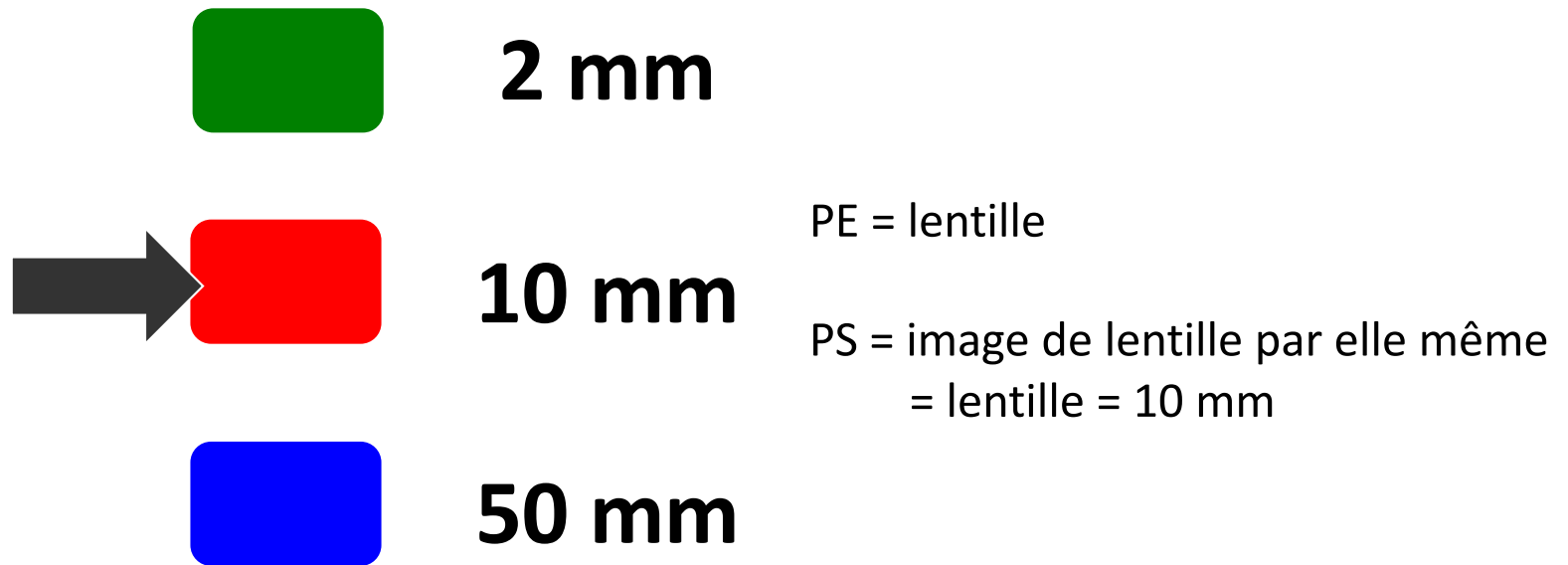
10 mm



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

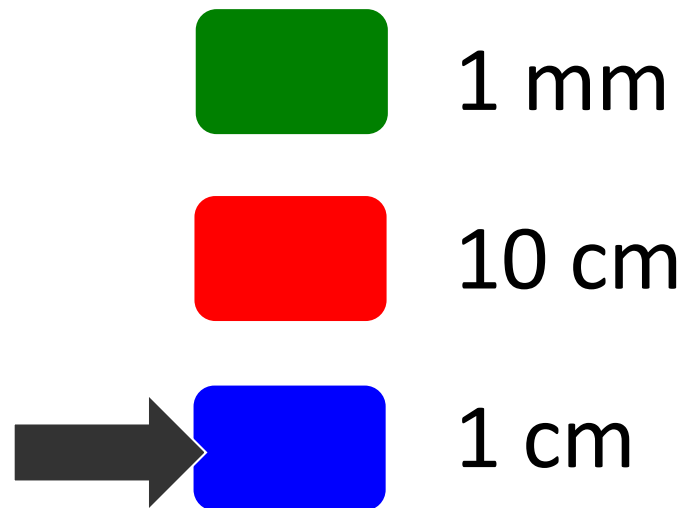


1 cm

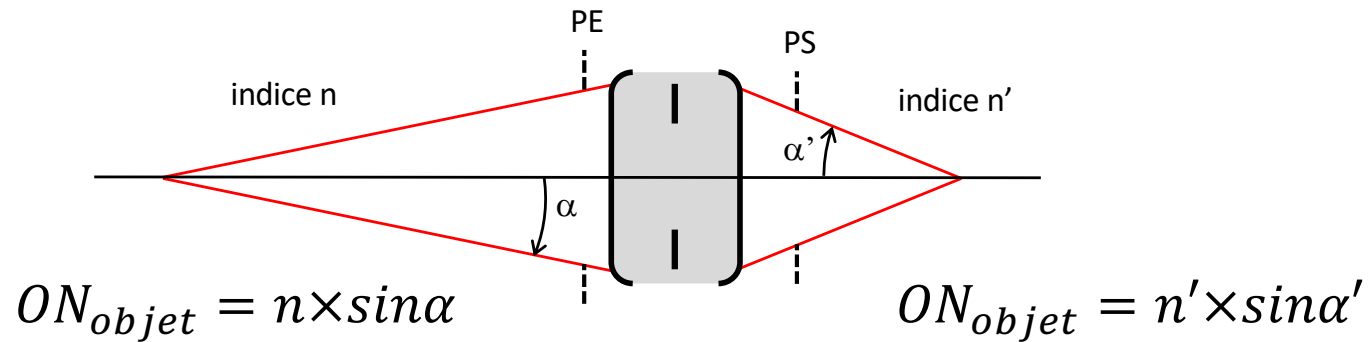
Une lentille mince convergente de focale 25 cm conjugue un objet de taille 10 cm en une image de taille 1 cm.

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 ?



Ouverture Numérique

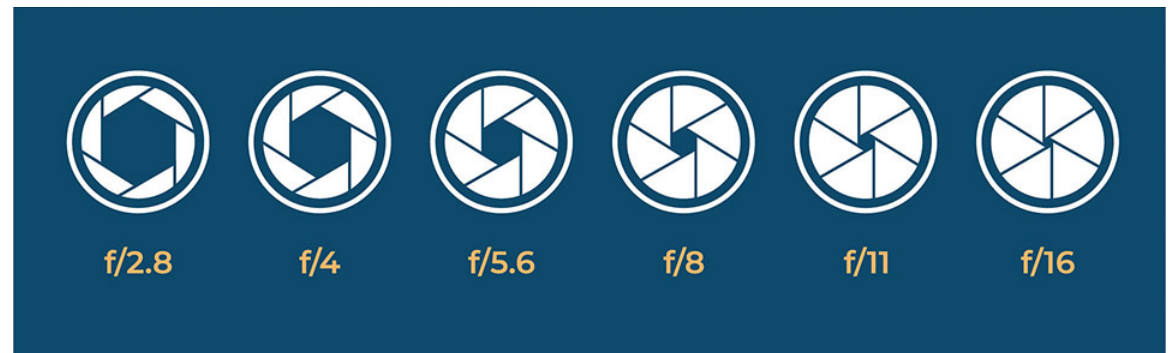


Dans un objectif de microscope la conjugaison objet-image est optimisée pour être unique. **L'ouverture numérique** objet est fixe et est donc inscrite sur le corps de l'objectif.

Nombre d'Ouverture



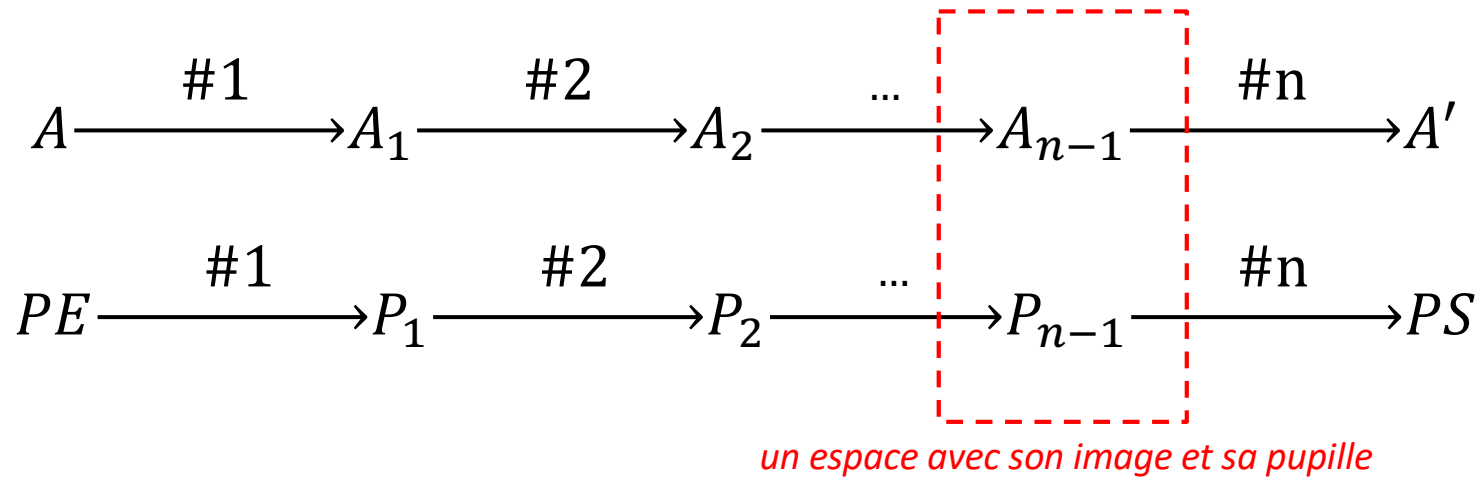
$$N = \frac{\text{distance focale}}{\text{diamètre pupille d'entrée}}$$



tracés pupilles

(fichier à part)

cours 5



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).

Pupilles

Diaphragme qui limite l'ouverture des rayons traversant l'instrument **pour un point objet sur l'axe.**

Lucarnes

Autres diaphragmes qui vont en général limiter l'ouverture des rayons traversant l'instrument **pour un point objet hors d'axe (dans le champ)**. Ces lucarnes vont limiter transversalement le champ de vue du système optique.

pupilles

stop / pupil

lucarnes

truncation

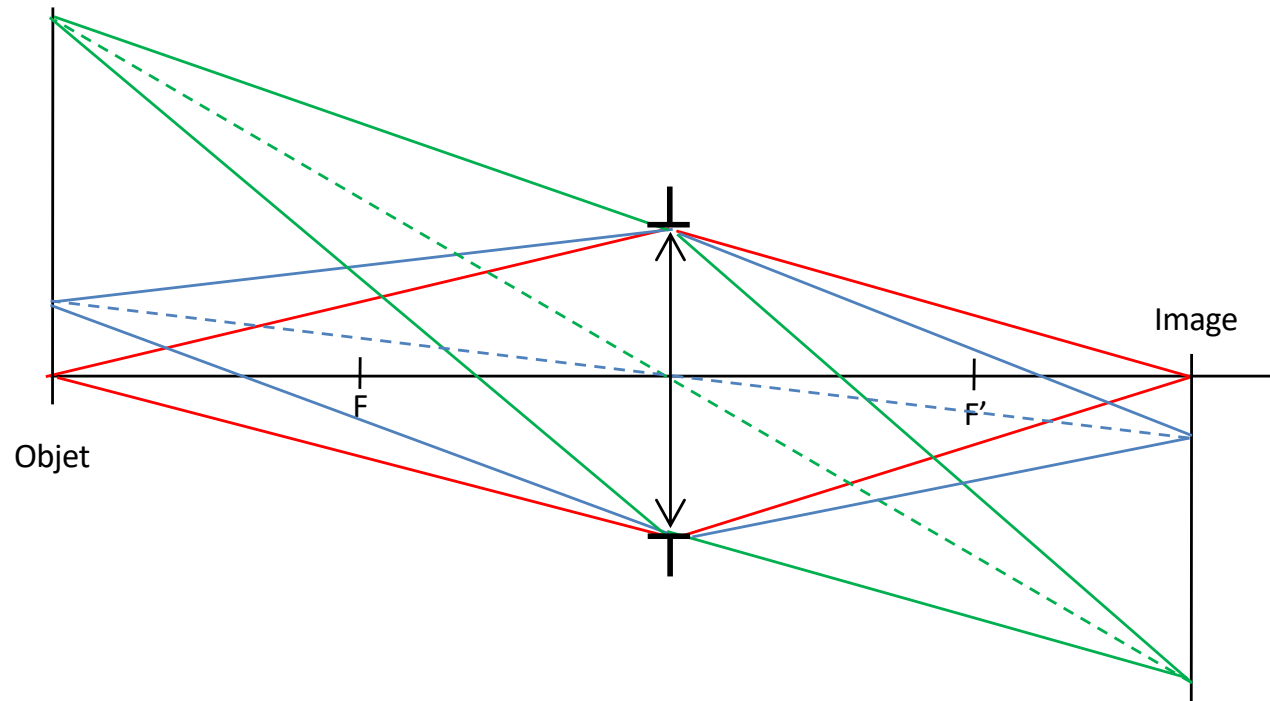
champ

field (of view)

hors axe

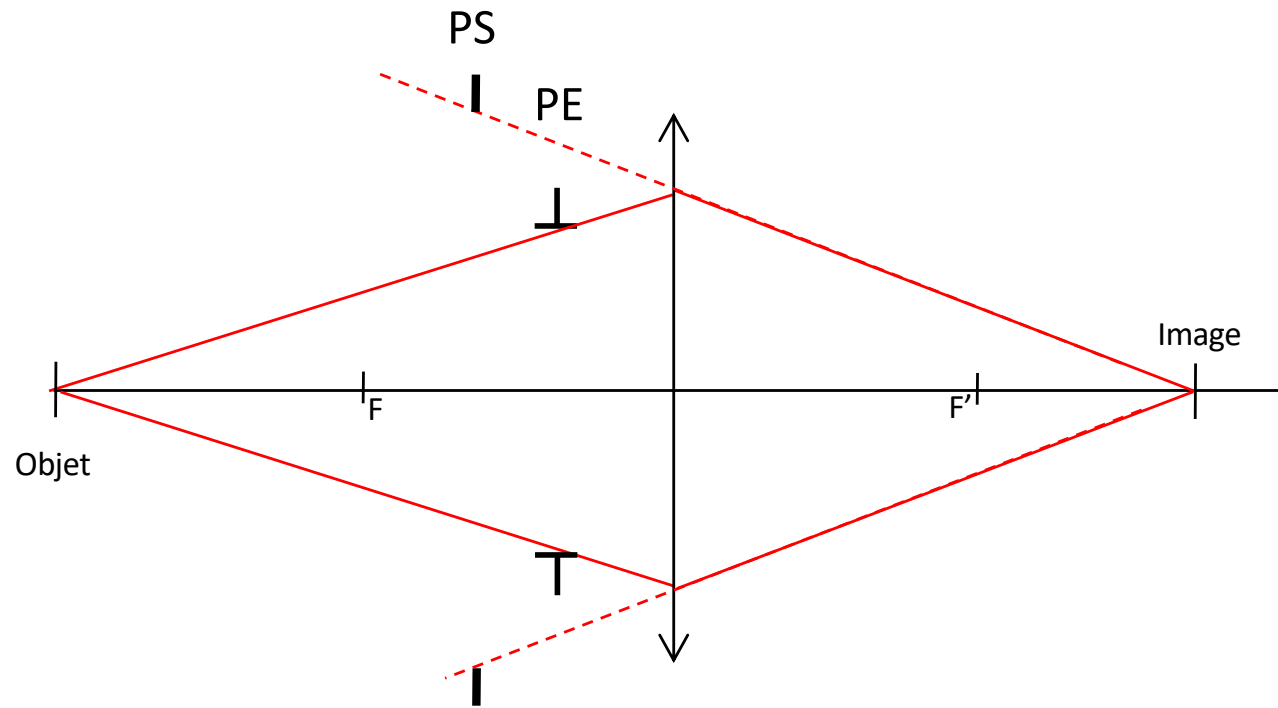
off axis

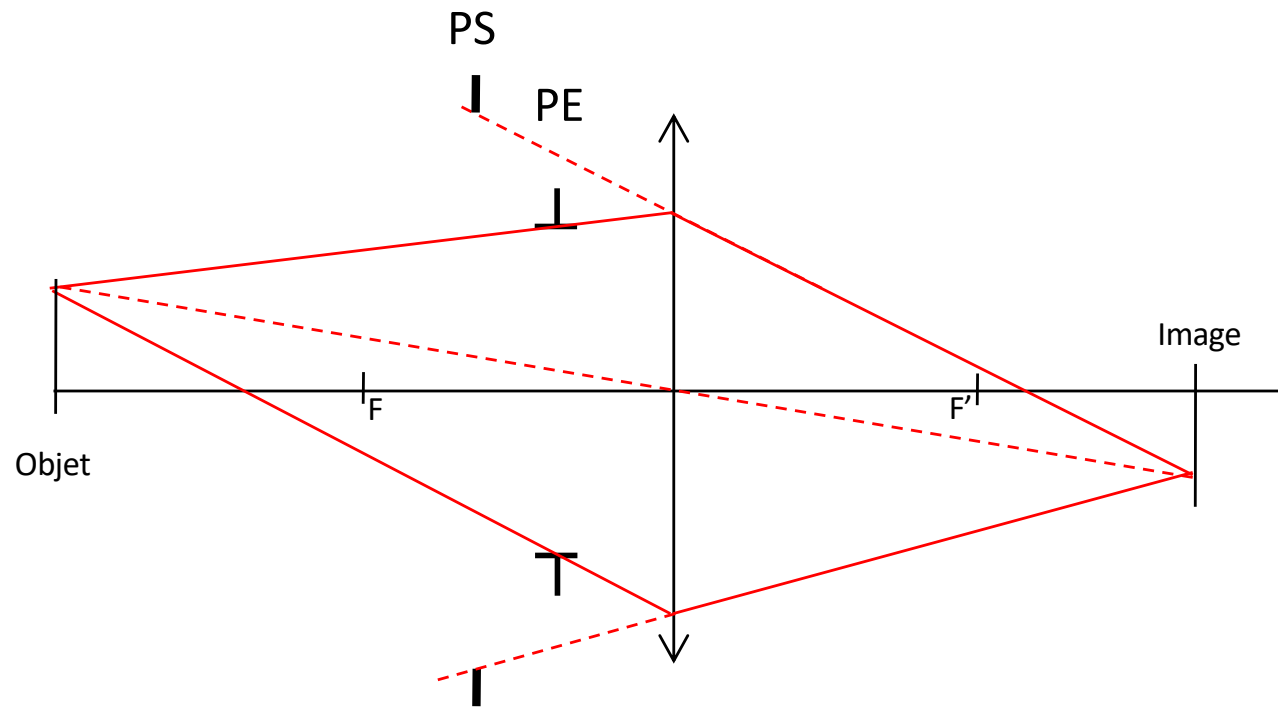
Exemple : lentille mince

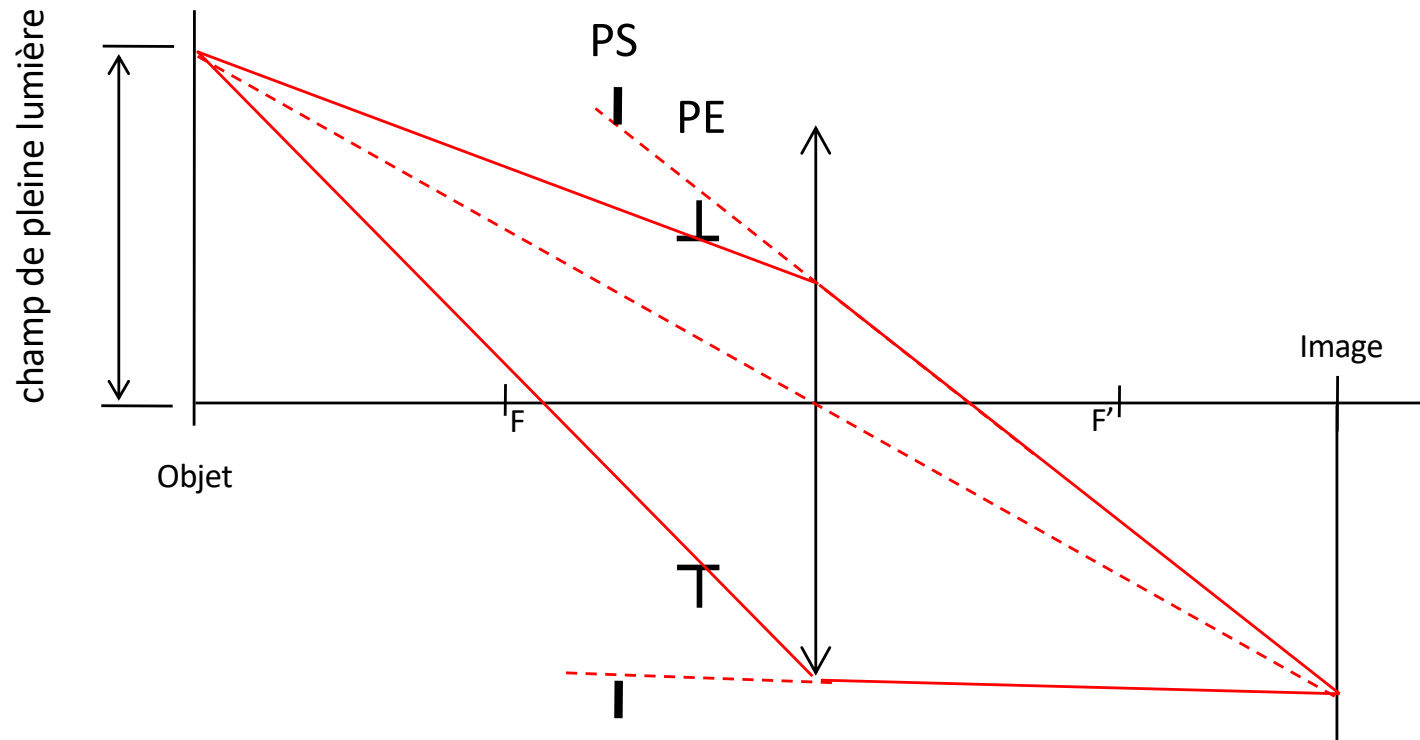


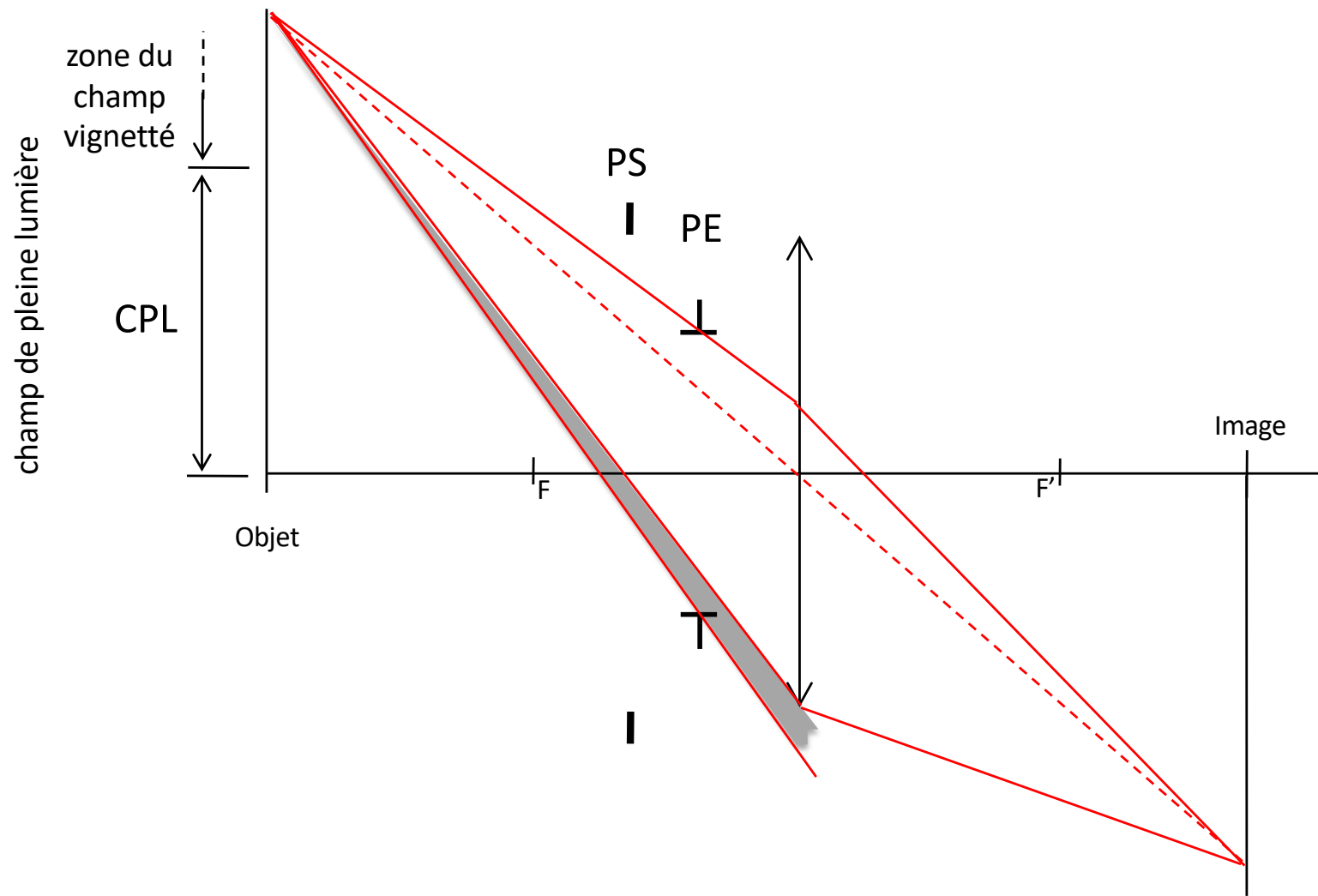
Le champ d'une lentille mince n'est en principe pas limité. Il y aura toujours un rayon provenant de l'objet et passant la pupille qui arrivera dans le plan image.

En revanche si le champ « sort » des conditions de Gauss la qualité de l'image sera très vite dégradée donc inutilisable !



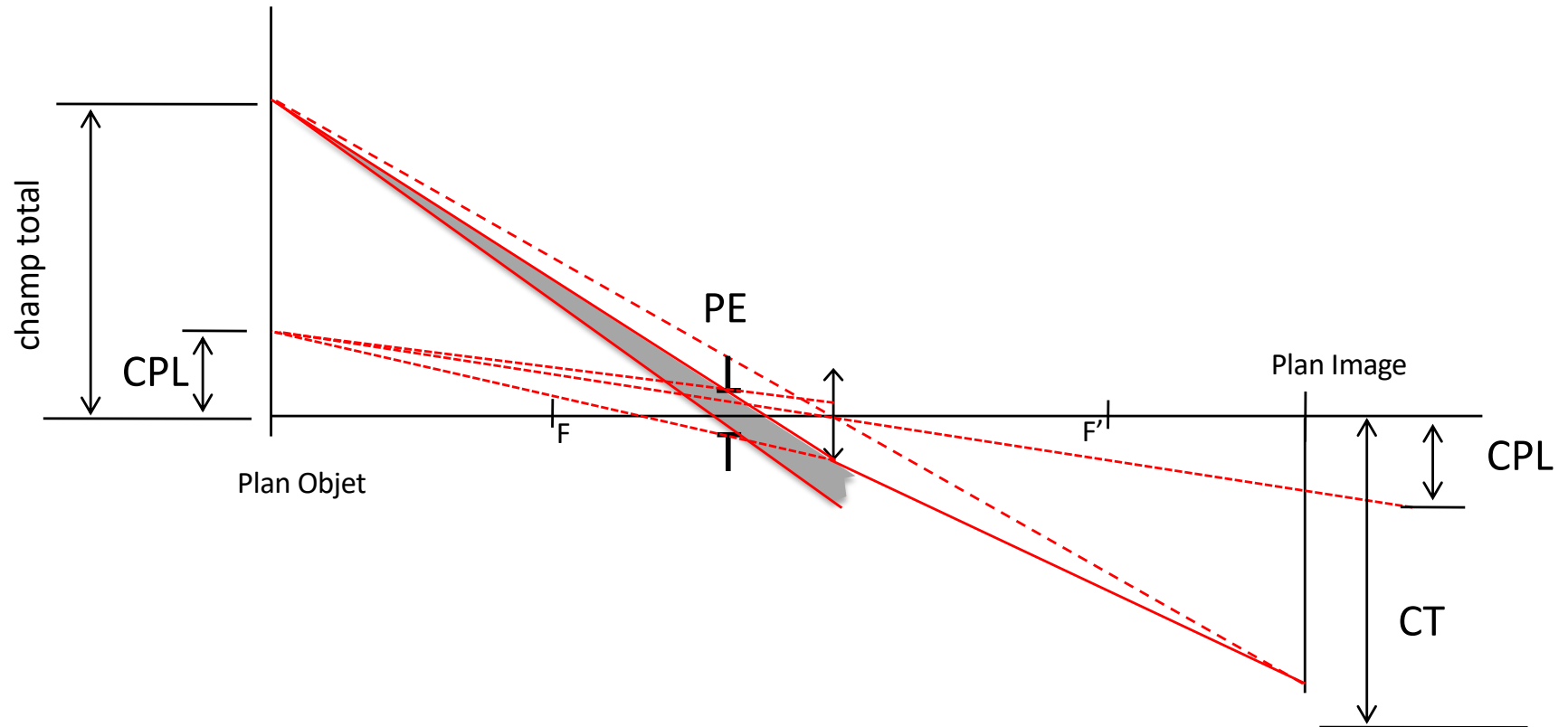






vignettage

vignetting



vignettage

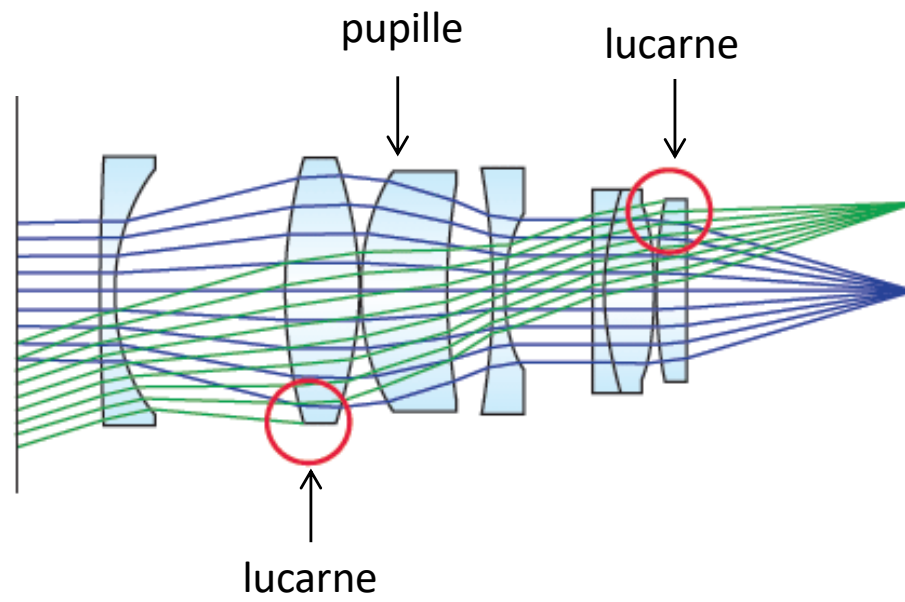
champ de pleine lumière (CPL)

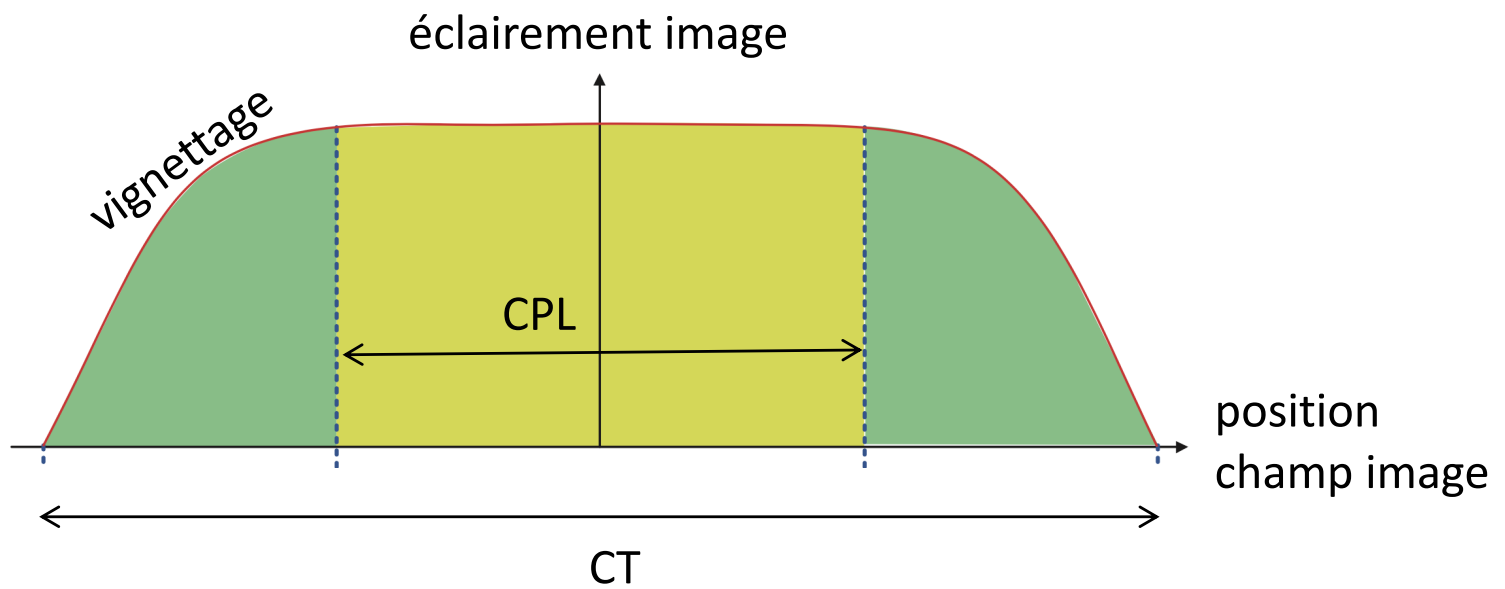
champ total (CT)

vignetting

field without vignetting

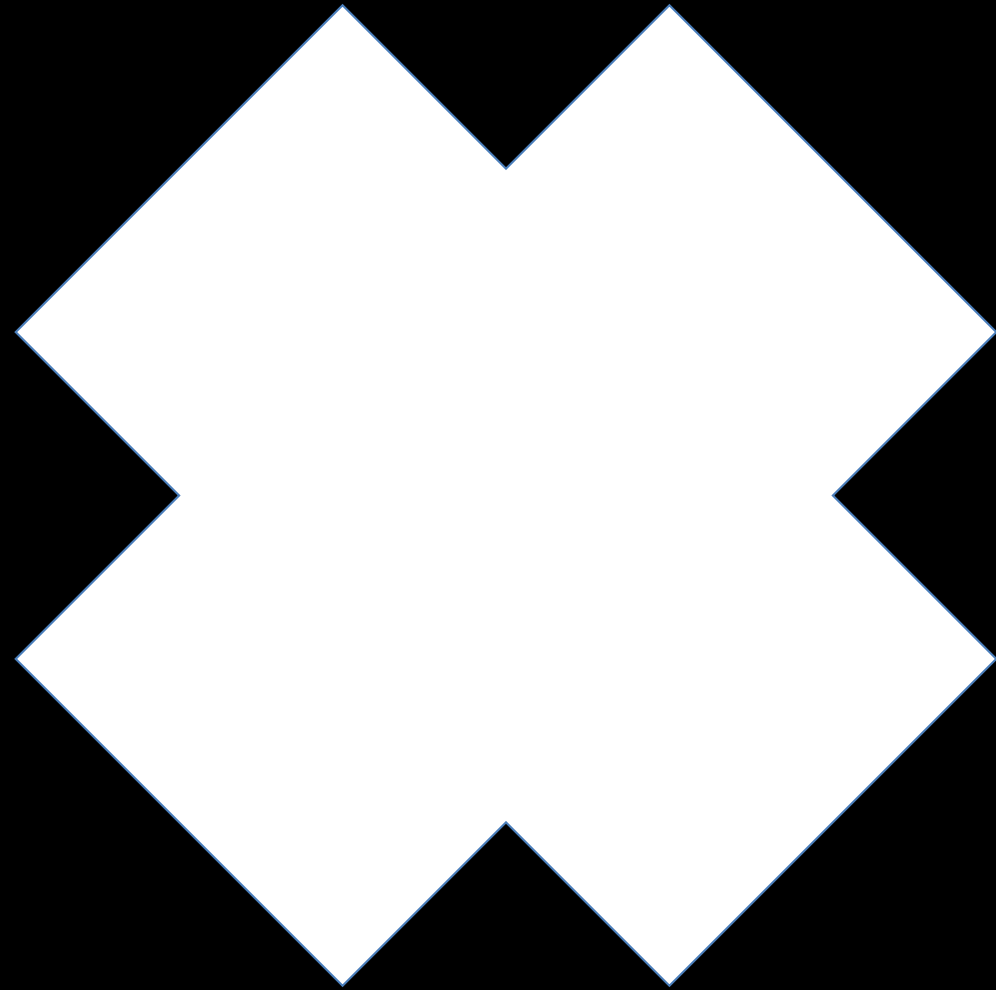
whole field





tracés champ

(fichier à part)





Que voyez-vous ?



La pupille de sortie



La pupille du système



La pupille d'entrée



Que voyez-vous ?



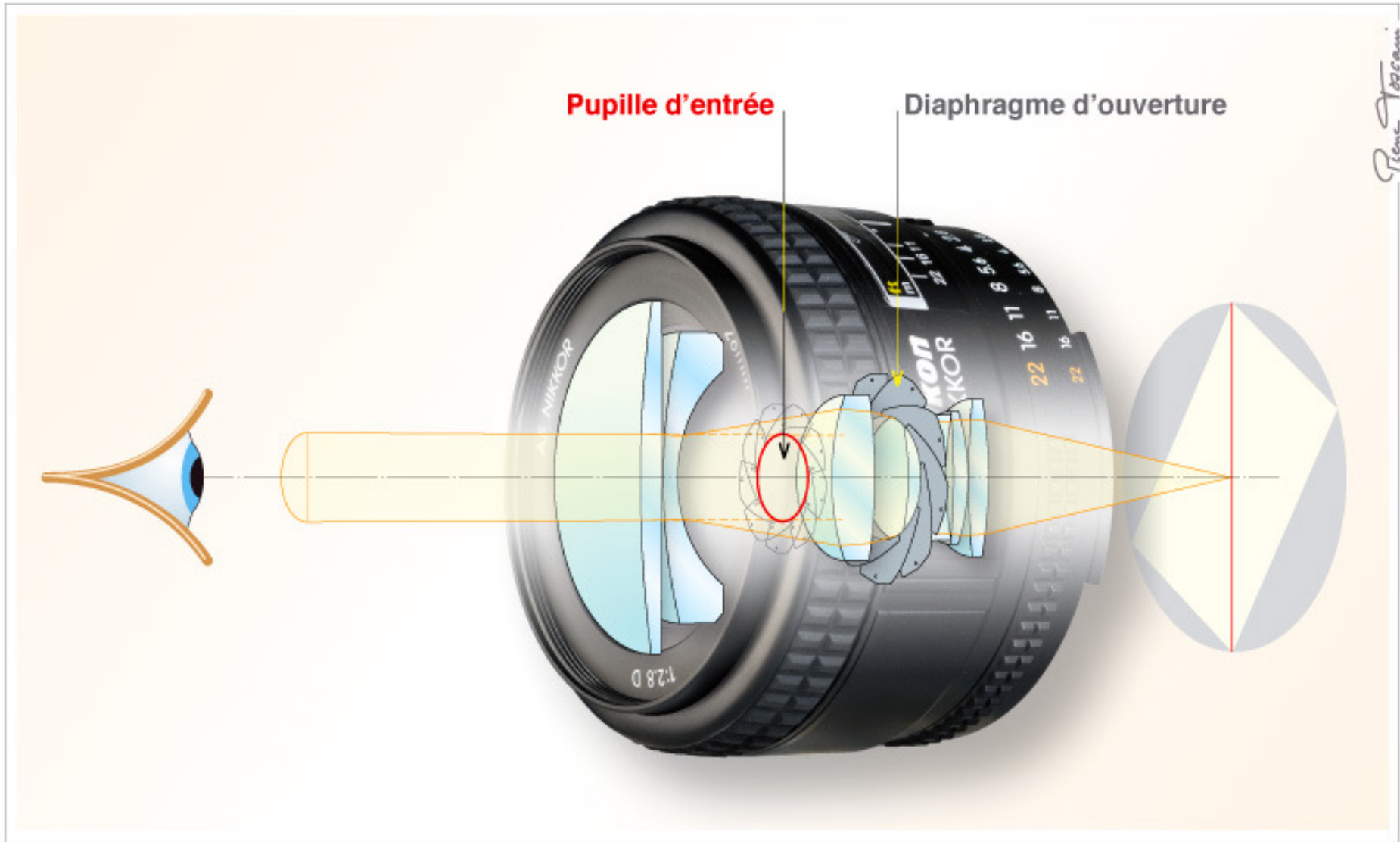
La pupille de sortie



La pupille du système



La pupille d'entrée



Que voyez-vous ?



La pupille de sortie

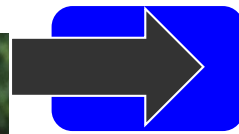


La pupille du système



La pupille d'entrée

Que voyez-vous ?



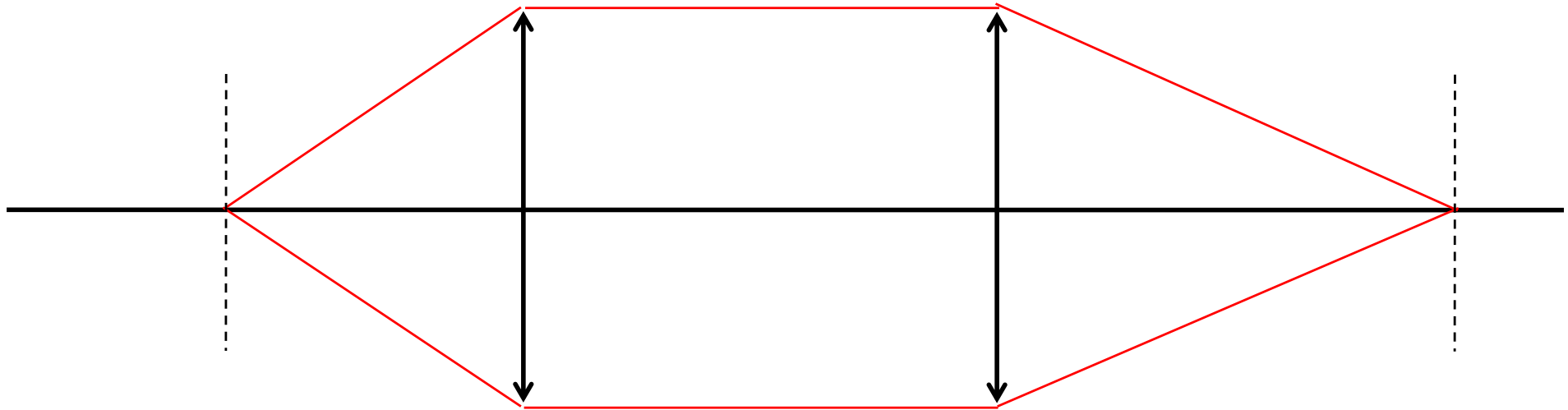
La pupille de sortie



La pupille du système



La pupille d'entrée



Quelle affirmation est vraie dans ce système ?



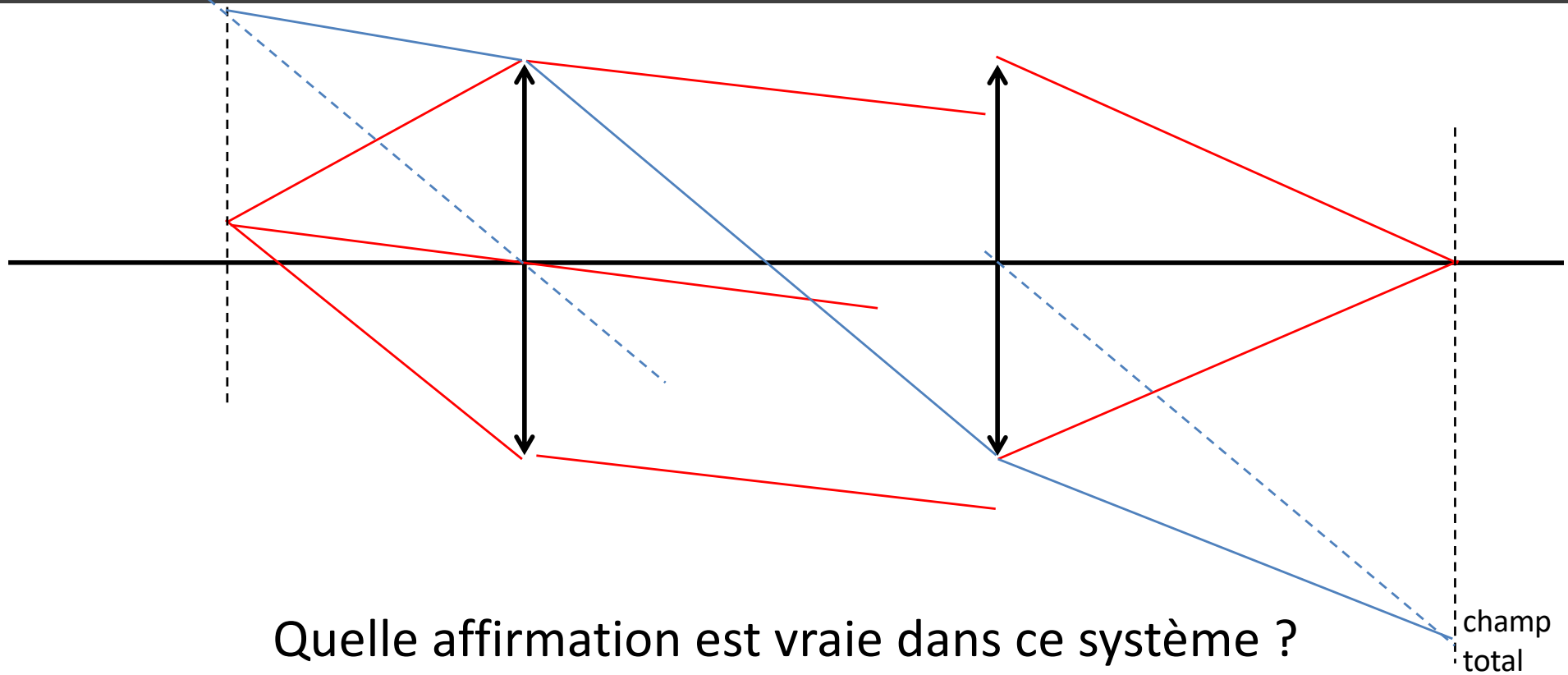
Le CPL dépend du diamètre identique des lentilles



Le CPL est nul



Le CPL est égal au champ total



Quelle affirmation est vraie dans ce système ?



Le CPL dépend du diamètre identique des lentilles



Le CPL est nul

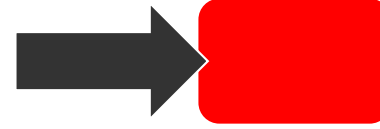


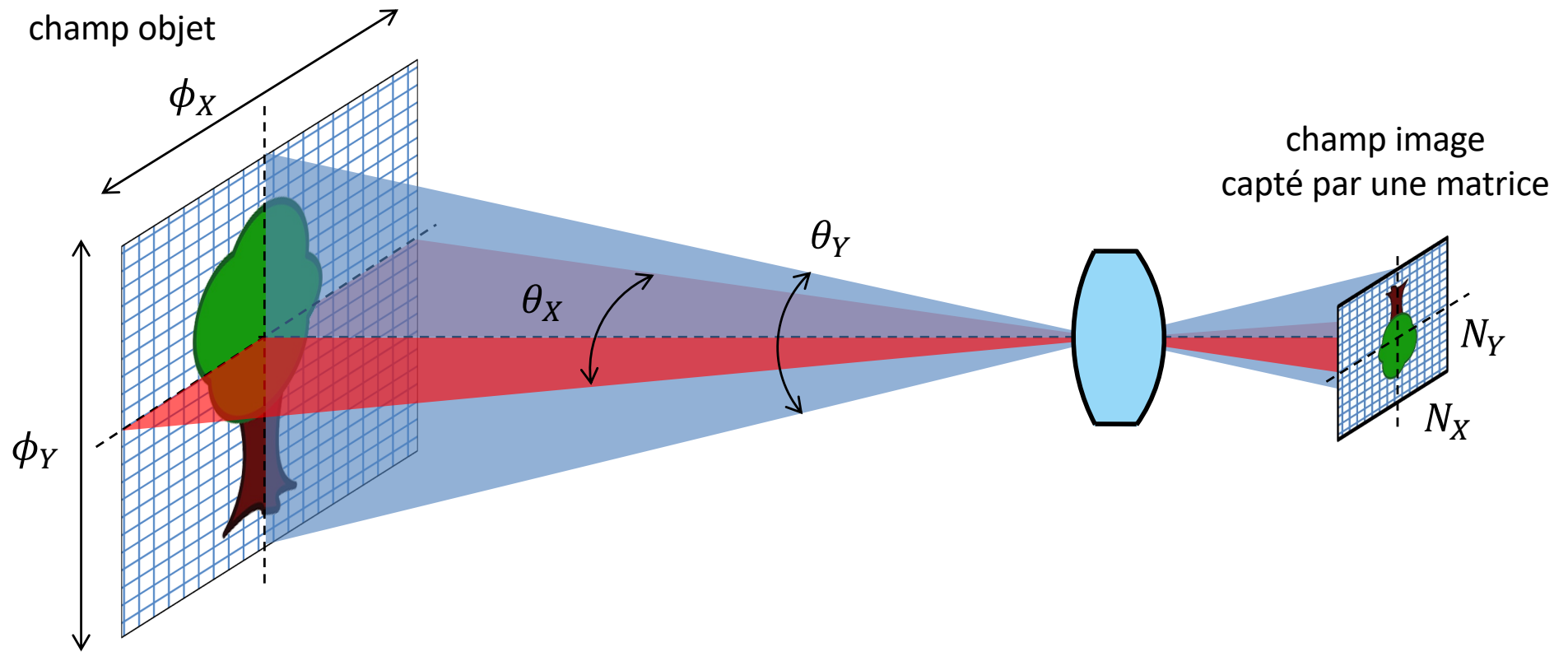
Le CPL est égal au champ total

Quelle photo a été prise avec la plus grande focale ?
(capteur identique)



Quelle photo a été prise avec la plus grande focale ?
(capteur identique)



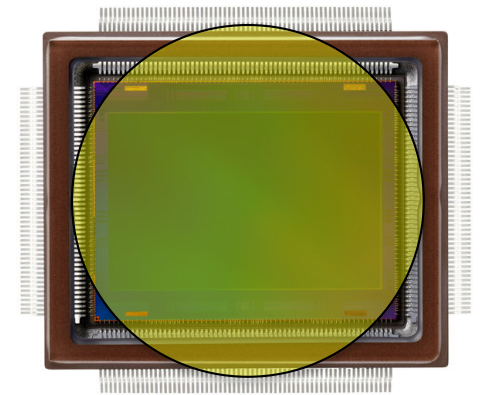
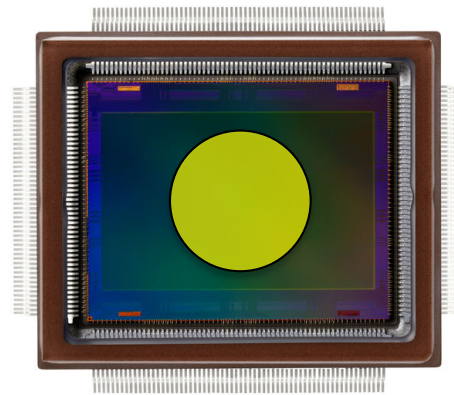
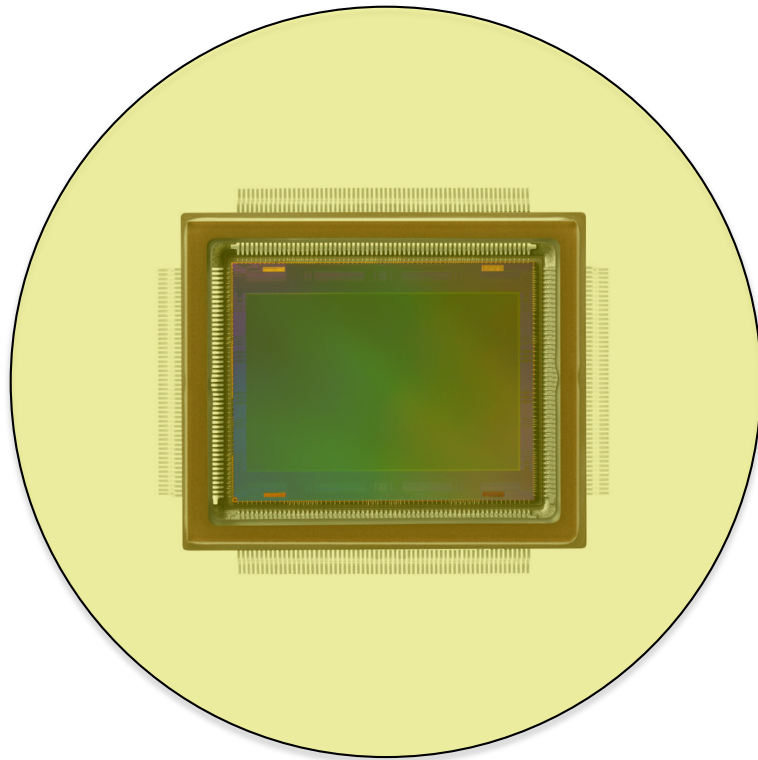


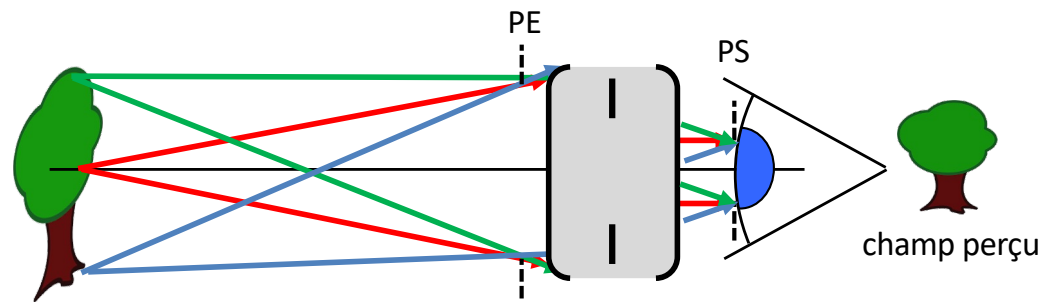
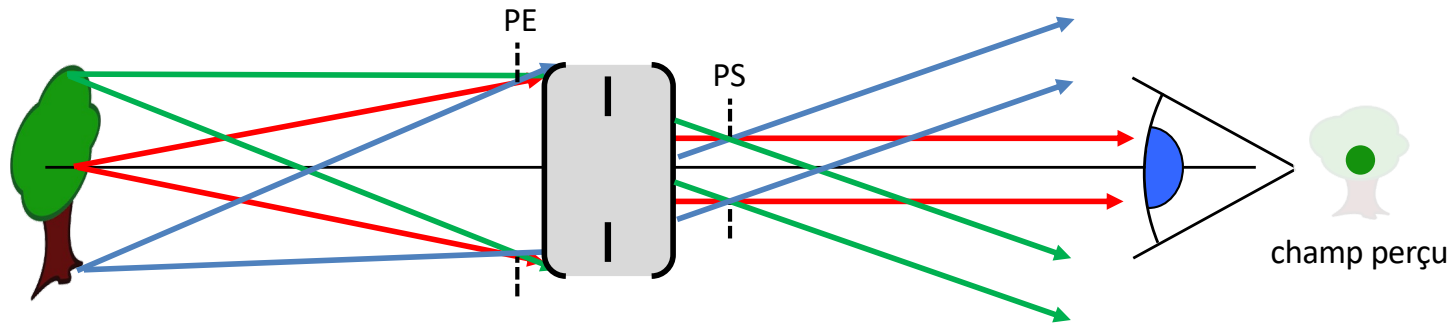
$$\infty \rightarrow F' \quad \theta_{\text{champ-X/Y}} = \frac{N_{X/Y} \times \text{pixel}}{\text{focale}}$$

$$A \rightarrow A' \quad \phi_{\text{champ-X/Y}} = \frac{N_{X/Y} \times \text{pixel}}{g_y}$$



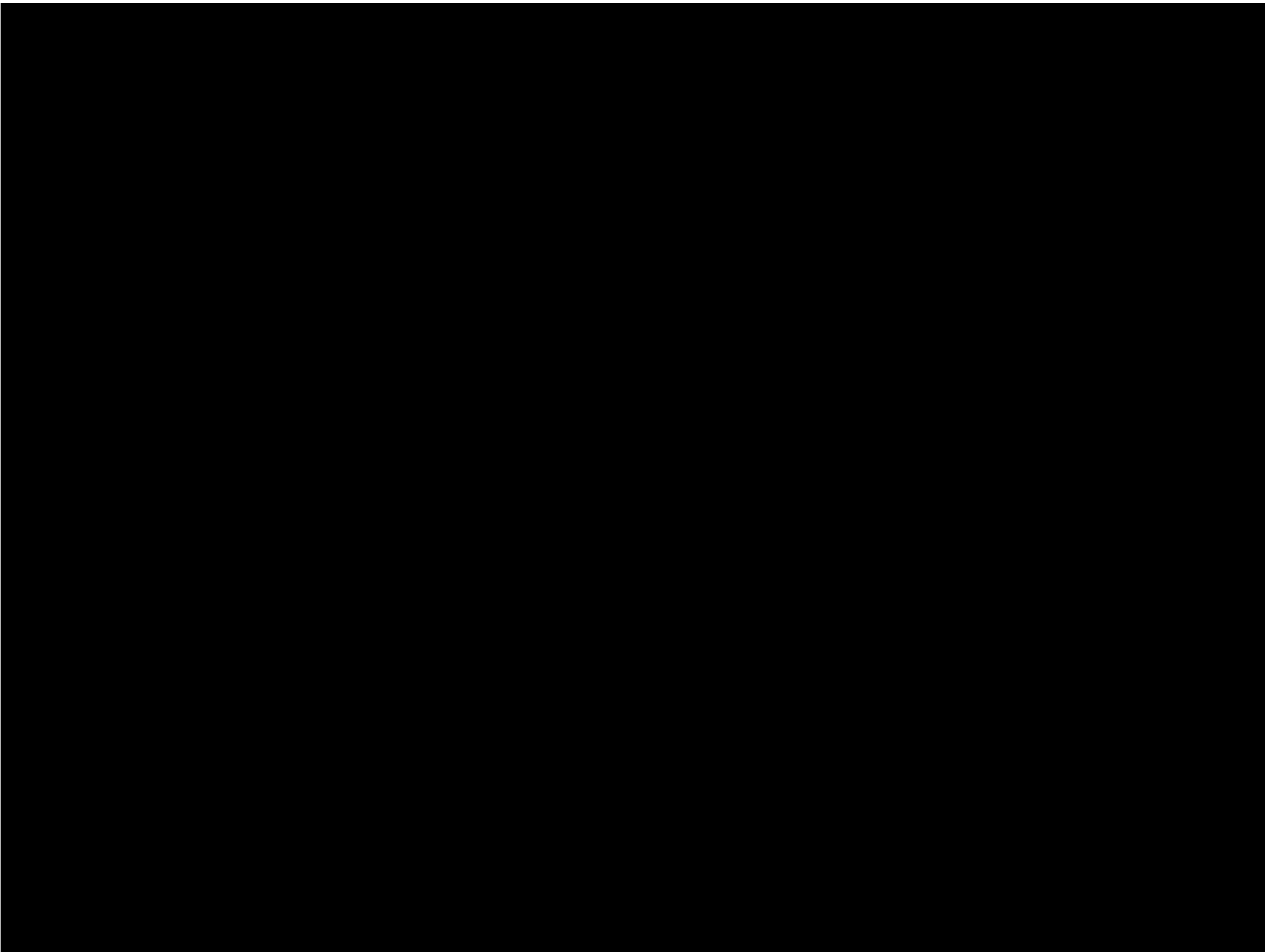
Champ Optique (CPL/CT) vs Champ Capteur





tracés champ

(fichier à part)



Quelle est la résolution dans le plan objet d'un système optique de grandissement $\times 10$ ayant une PSF de $2 \mu\text{m}$ avec un capteur de pixel $10 \mu\text{m}$



$\sim 1 \mu\text{m}$

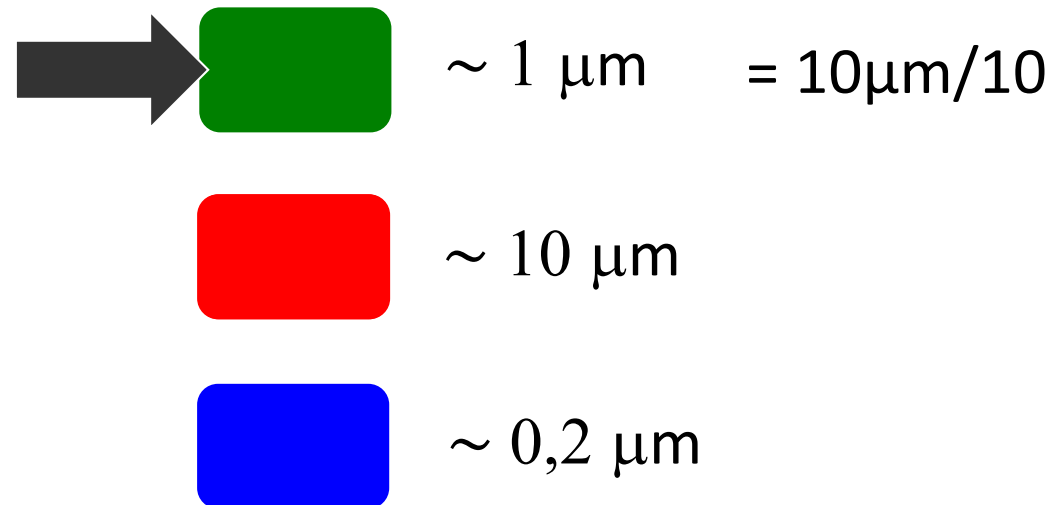


$\sim 10 \mu\text{m}$



$\sim 0,2 \mu\text{m}$

Quelle est la résolution dans le plan objet d'un système optique de grandissement $\times 10$ ayant une PSF de $2 \mu\text{m}$ avec un capteur de pixel $10 \mu\text{m}$



Quelle est la résolution objet
d'un système optique conjuguant l'infini
de focale 1 mètre ayant une PSF de $10\ \mu\text{m}$
avec un capteur de pixel $1\ \mu\text{m}$



$\sim 10\ \mu\text{m}$

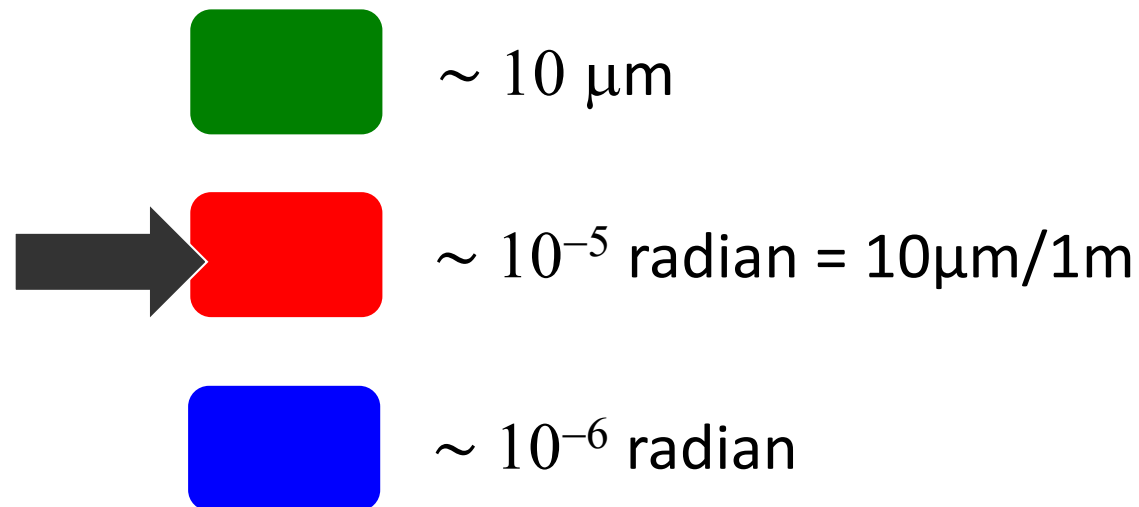


$\sim 10^{-5}$ radian



$\sim 10^{-6}$ radian

Quelle est la résolution objet
d'un système optique conjuguant l'infini
de focale 1 mètre ayant une PSF de $10\ \mu\text{m}$
avec un capteur de pixel $1\ \mu\text{m}$



Un système optique ouvert à $N = 10$ travaille avec une ouverture numérique image de 0,1 @ $\lambda = 500 \text{ nm}$
($n=n'=1$)

Quel est le diamètre de la tache d'Airy dans le plan image ?



$\sim 12 \mu\text{m}$



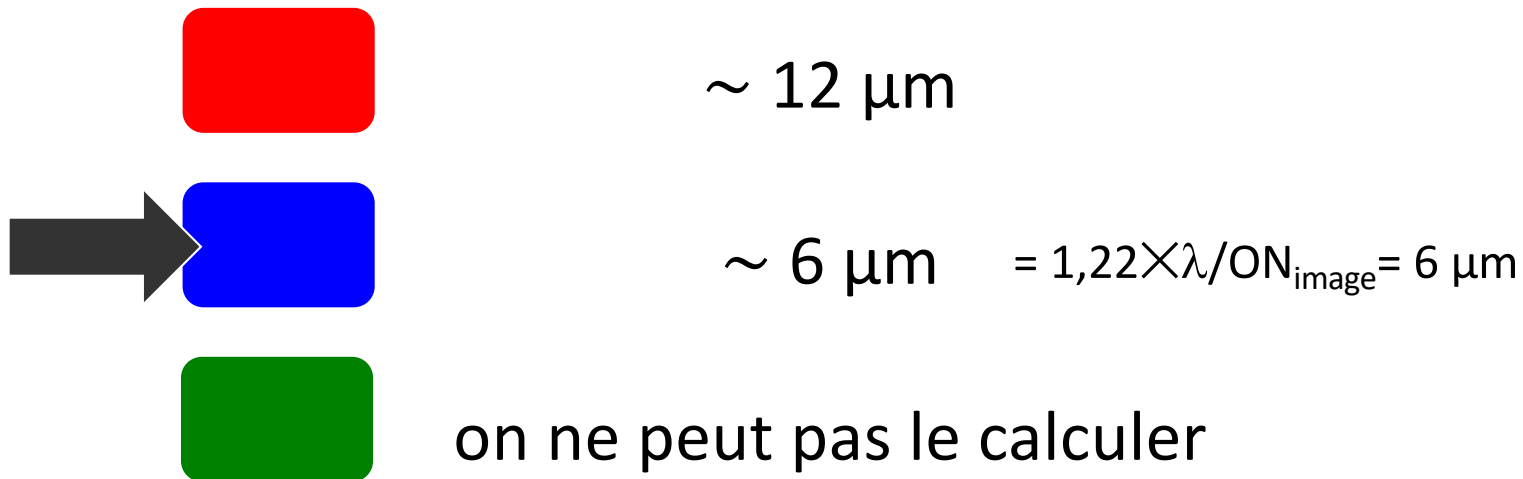
$\sim 6 \mu\text{m}$



on ne peut pas le calculer

Un système optique ouvert à $N = 10$ travaille avec une ouverture numérique image de 0,1 @ $\lambda = 500 \text{ nm}$
($n=n'=1$)

Quel est le diamètre de la tache d'Airy dans le plan image ?



si conjugaison infini foyer $\text{ON}_{\text{image}} = 1/2N$... ce n'est pas le cas ici 😊

Une lunette afocale conjugue un objet de taille 10 cm en une image de taille 1 mm. Si on éloigne l'objet de 1 mètre, que devient la taille de l'image ?



Elle augmente



Elle diminue



Elle ne change pas

Une lunette afocale conjugue un objet de taille 10 cm en une image de taille 1 mm. Si on éloigne l'objet de 1 mètre, que devient la taille de l'image ?



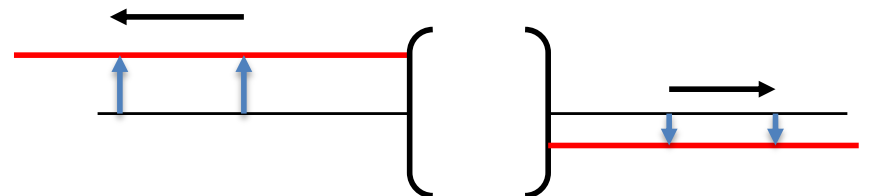
Elle augmente



Elle diminue



Elle ne change pas



La lame à faces parallèles est-elle un système afocal ?



NON



OUI



Cela dépend de la position de l'objet

La lame à faces parallèles est-elle un système afocal ?



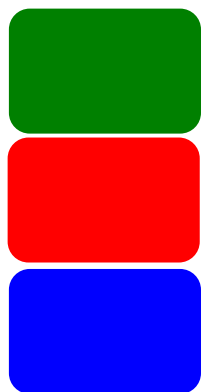
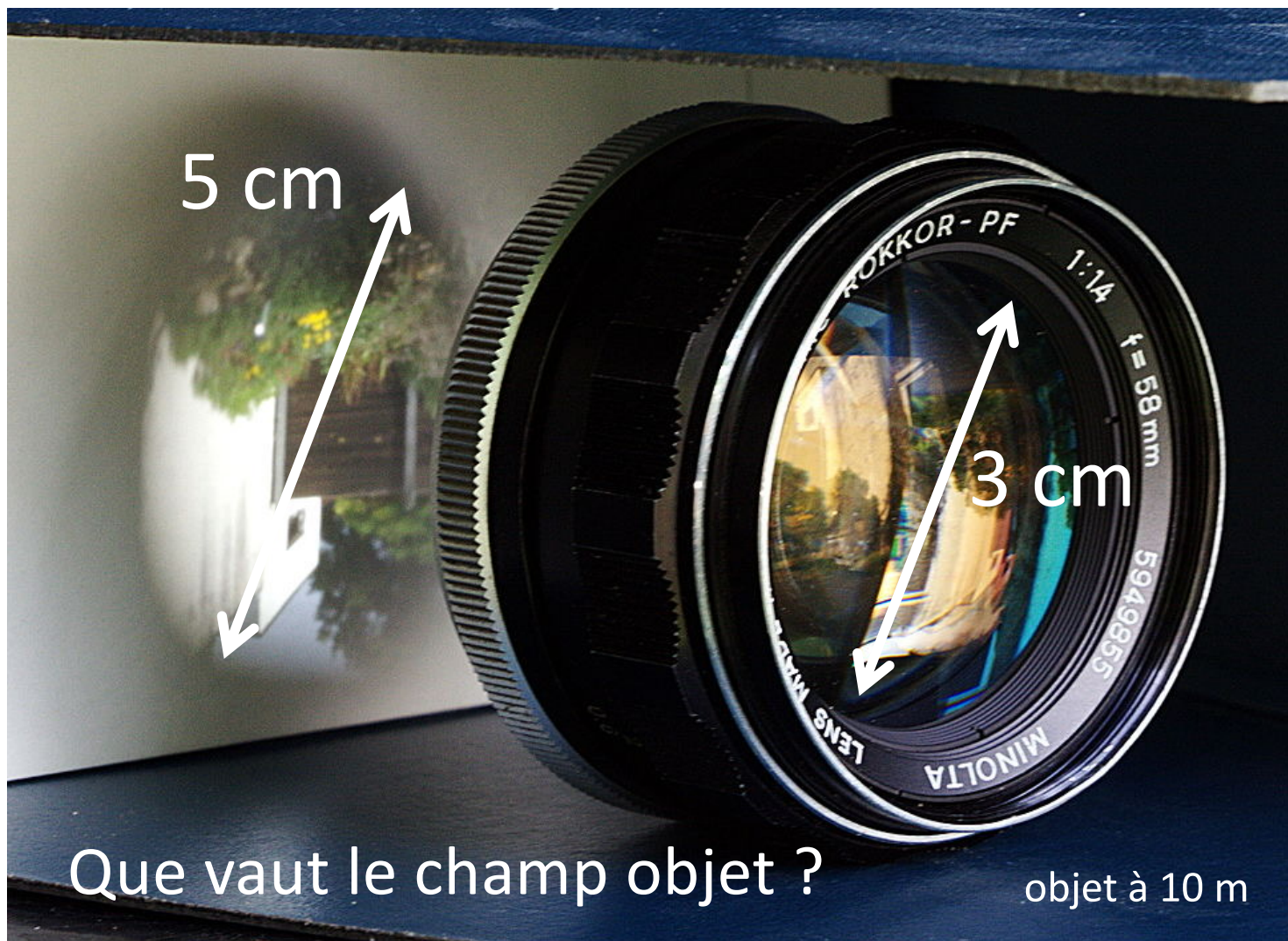
NON



OUI



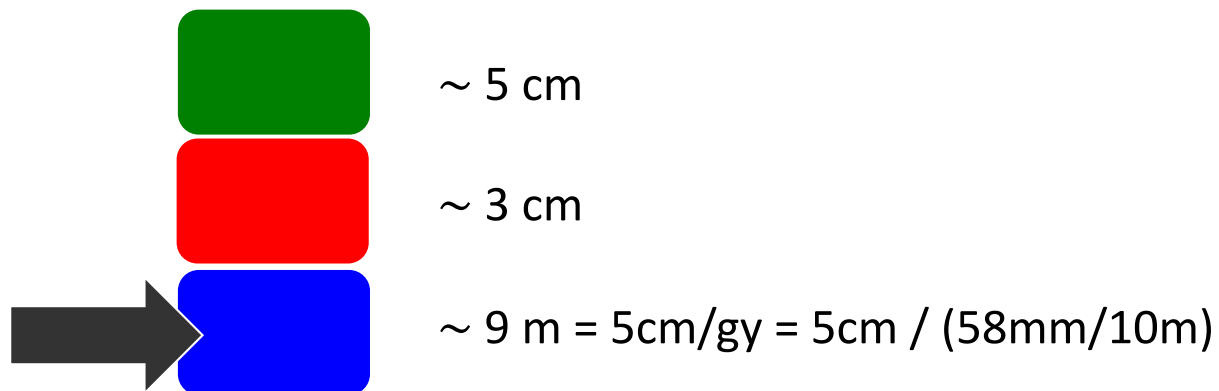
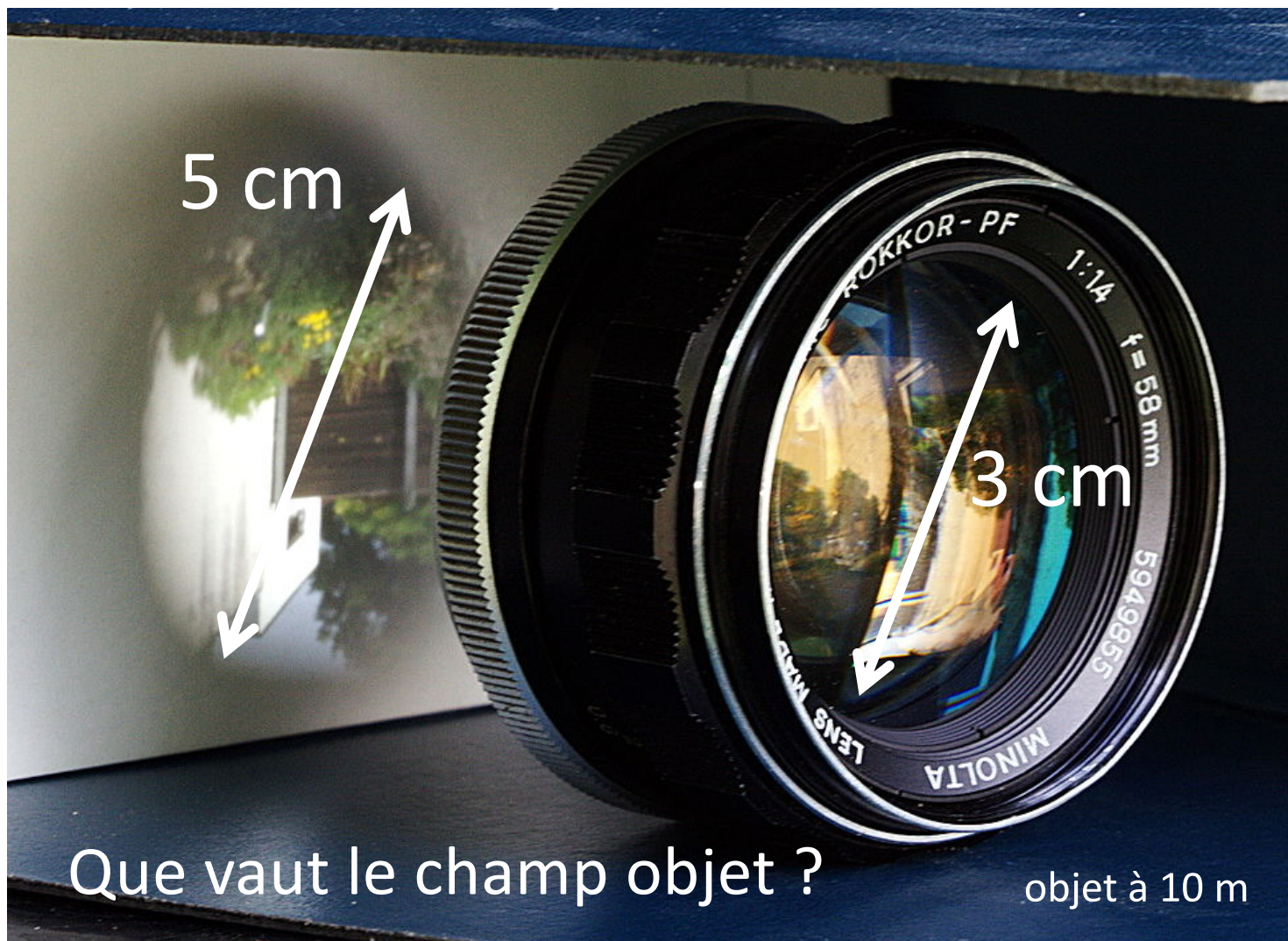
Cela dépend de la position de l'objet

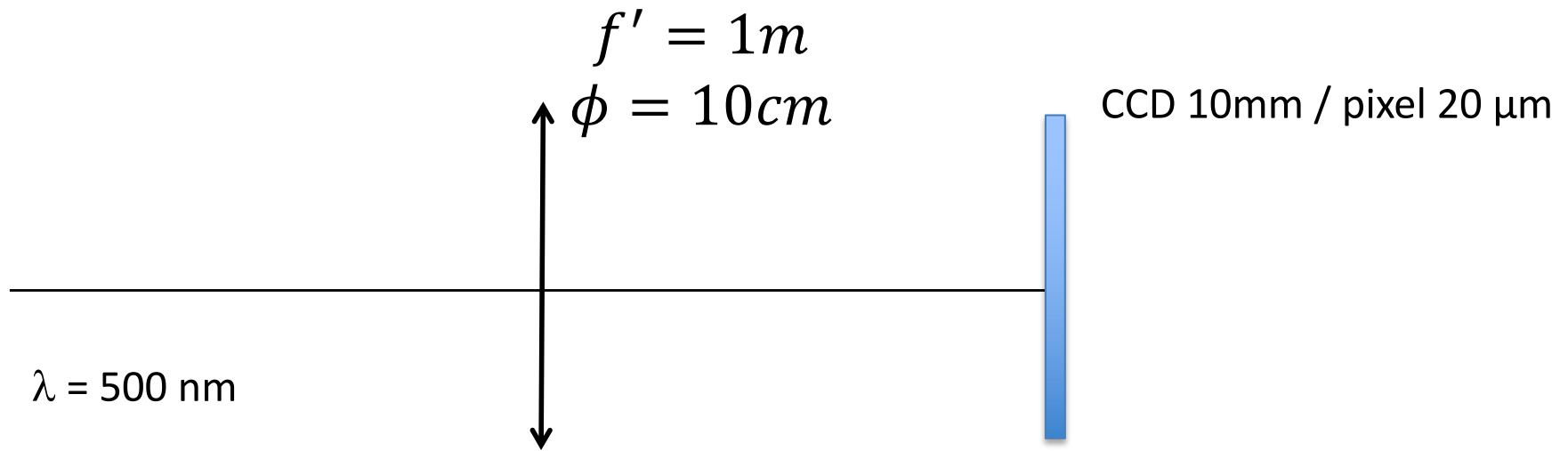


~ 5 cm

~ 3 cm

~ 9 m





Quelle est la résolution dans un plan objet placé à 50 m ?



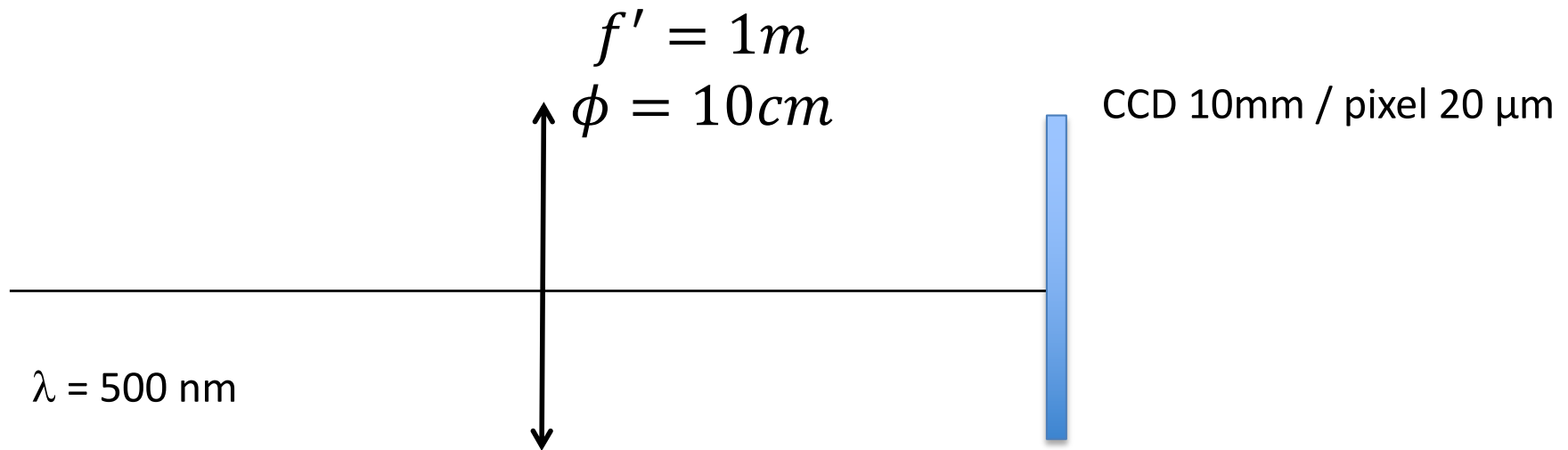
$\sim 500 \mu\text{m}$



$\sim 1 \text{ mm}$



$\sim 250 \mu\text{m}$



Quelle est la résolution dans un plan objet placé à 50 m ?

Phi_Airy (∞ -foyer) @500nm $\sim N \mu\text{m} = 10 \mu\text{m}$
 Soit une résolution optique de 5 μm (la moitié d'Airy)

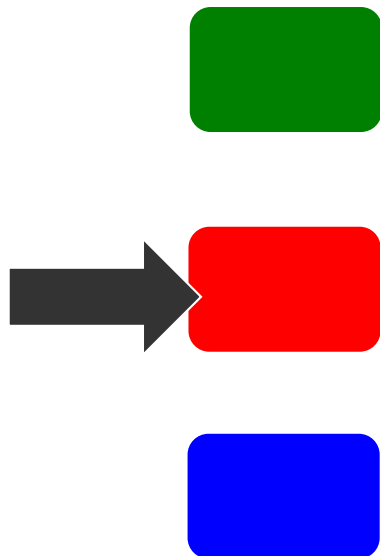
La tache d'Airy étant plus petite que le pixel
 c'est le capteur qui limite la résolution

Donc la résolution objet est simplement l'image du pixel par la lentille
 (on ramène le pixel dans l'espace objet)

La distance objet est grande devant la focale donc on peut considérer
 que l'image est en F' .

Le grandissement de la conjugaison est donc $|g_y| \approx f'/50\text{m} = 1/50$

$R_{\text{objet}} = \text{pixel}_{\text{objet}} = \text{pixel}/g_y = 20 \mu\text{m} \times 50 = \mathbf{1 \text{ mm}}$



Profondeur de champ

*... the scales on a lens bar
... focal distance opp
... are using. If you t
... the depth of field
... ce to infinity. ◁ Fo
... amera has a hype
... e focus at 18 fe*

Profondeur de champ

effet de l'ouverture



Profondeur de champ

effet de la focale



70 mm



135 mm



200 mm

Construire la lunette afocale suivante,

Objectif (OB)	focale 150 mm ouvert à $f/6$; pupille
Lentille de champ (LC)	$OB \xrightarrow{LC=F'_{OB}} LR$; plan CPL mais ne le limite pas
Lentille de redressement (LR)	focale 45 mm ouvert à $f/2,25$; $g_y = -1$
Oculaire (OC)	focale 30 mm ouvert à $f/2$; lucarne CPL

1. Positionner les éléments échelle longitudinale $\times \frac{1}{2}$; échelle transversale $\times 4$
2. Positionner les pupilles dans tous les espaces
3. Tracer deux rayons s'appuyant sur les deux bords de la pupille d'entrée provenant d'un point objet à l'infini sur l'axe optique et qui traversent tout l'instrument.
4. Tracer deux rayons qui s'appuient sur les deux bords de la pupille d'entrée pour un point objet à l'infini situé sur l'un des bords du champ de pleine lumière et qui traversent l'ensemble de l'objectif

Objectif (OB)
 Lentille de champ (LC)
 Lentille de redressement (LR)
 Oculaire (OC)

focale 150 mm ouvert à $f/6$; pupille
 $OB \xrightarrow{LC=F'_{OB}} LR$; plan CPL mais ne le limite pas
 focale 45 mm ouvert à $f/2,25$; $g_y = -1$
 focale 30 mm ouvert à $f/2$; lucarne CPL

échelle longitudinale : $\times \frac{1}{2}$
 échelle transversale : $\times 4$

Objectif (pupille)
 150 mm $f/6$

Lentille de redressement

Lentille de champ
 Objectif \rightarrow Redressement

$g_y = -1$
 45 mm $f/2,25$

Oculaire
 30 mm $f/2$
 lucarne CPL

objet
 à l'infini

F'_{OBJ}

F_R

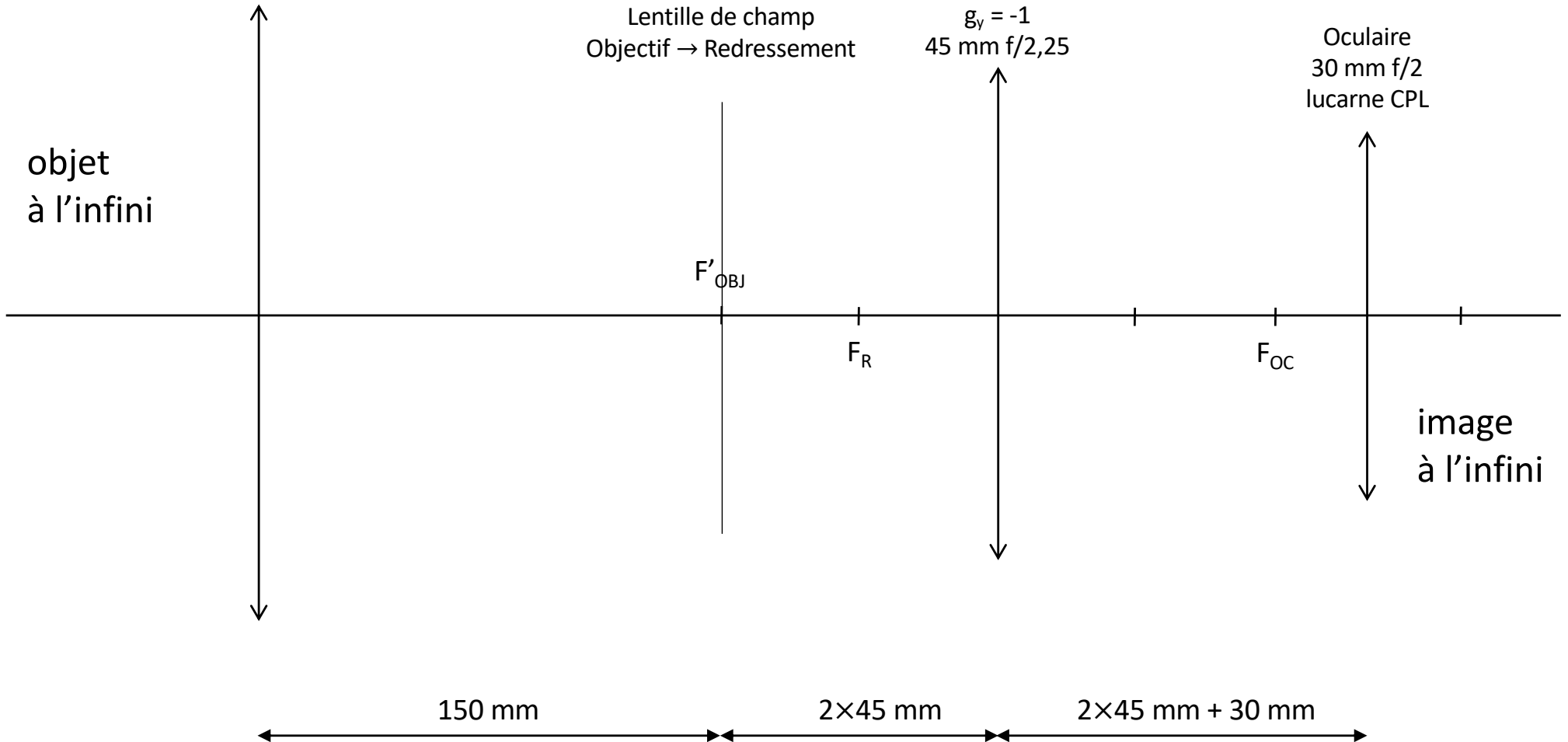
F_{OC}

image
 à l'infini

150 mm

2×45 mm

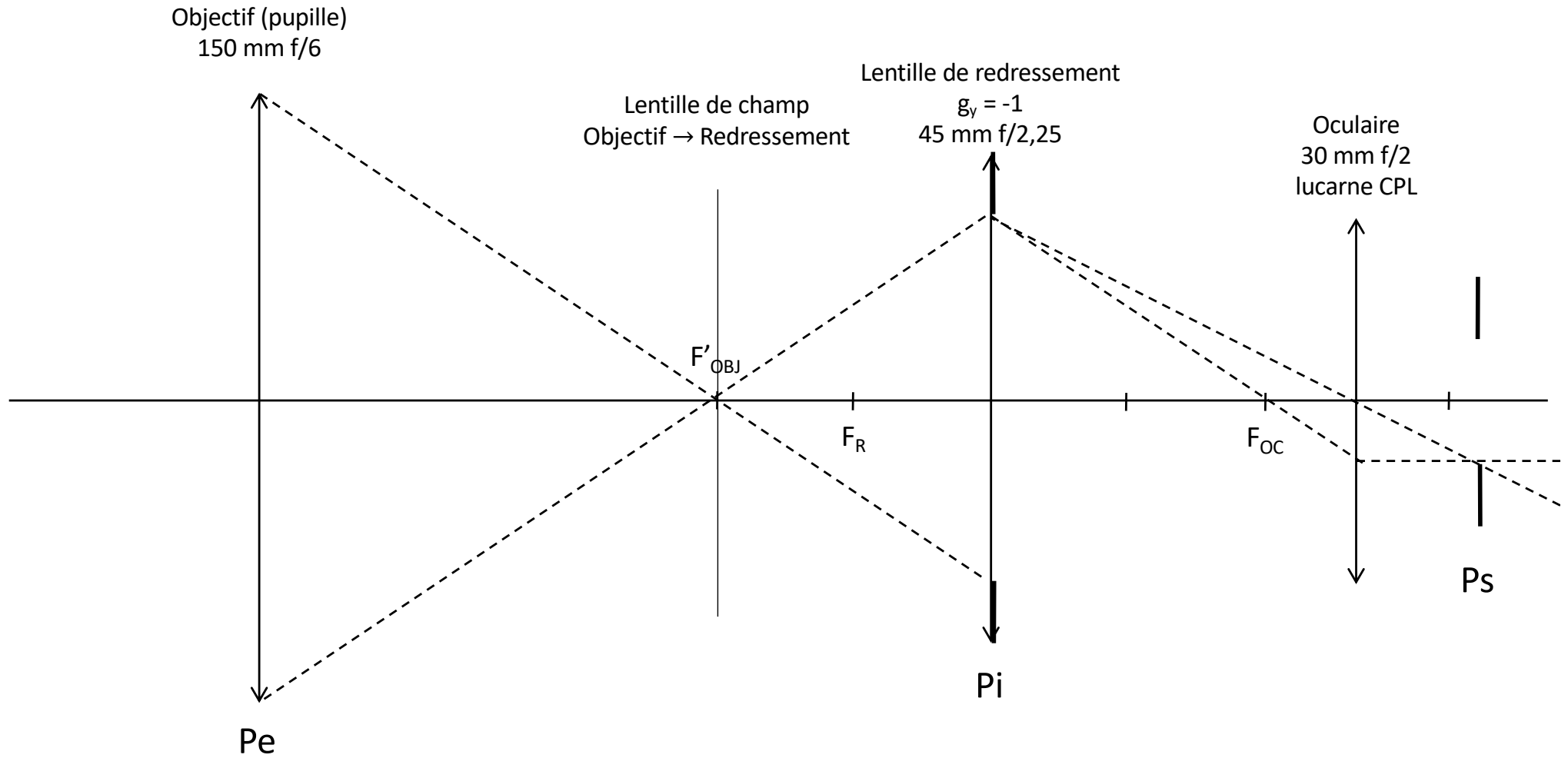
2×45 mm + 30 mm



Tracés : pupilles

échelle longitudinale : $\times \frac{1}{2}$

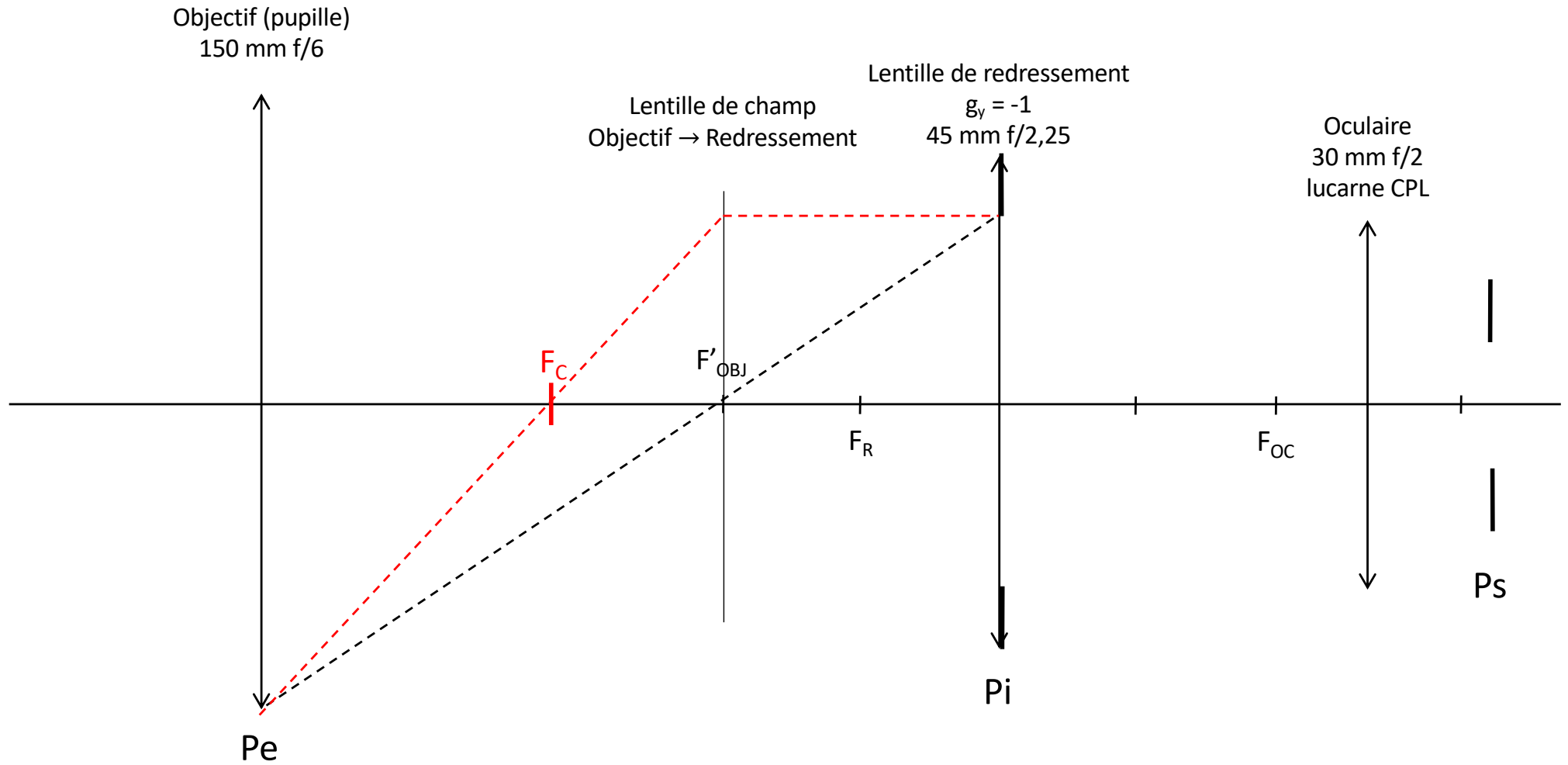
échelle transversale : $\times 4$



Tracés : pupilles

échelle longitudinale : $\times \frac{1}{2}$

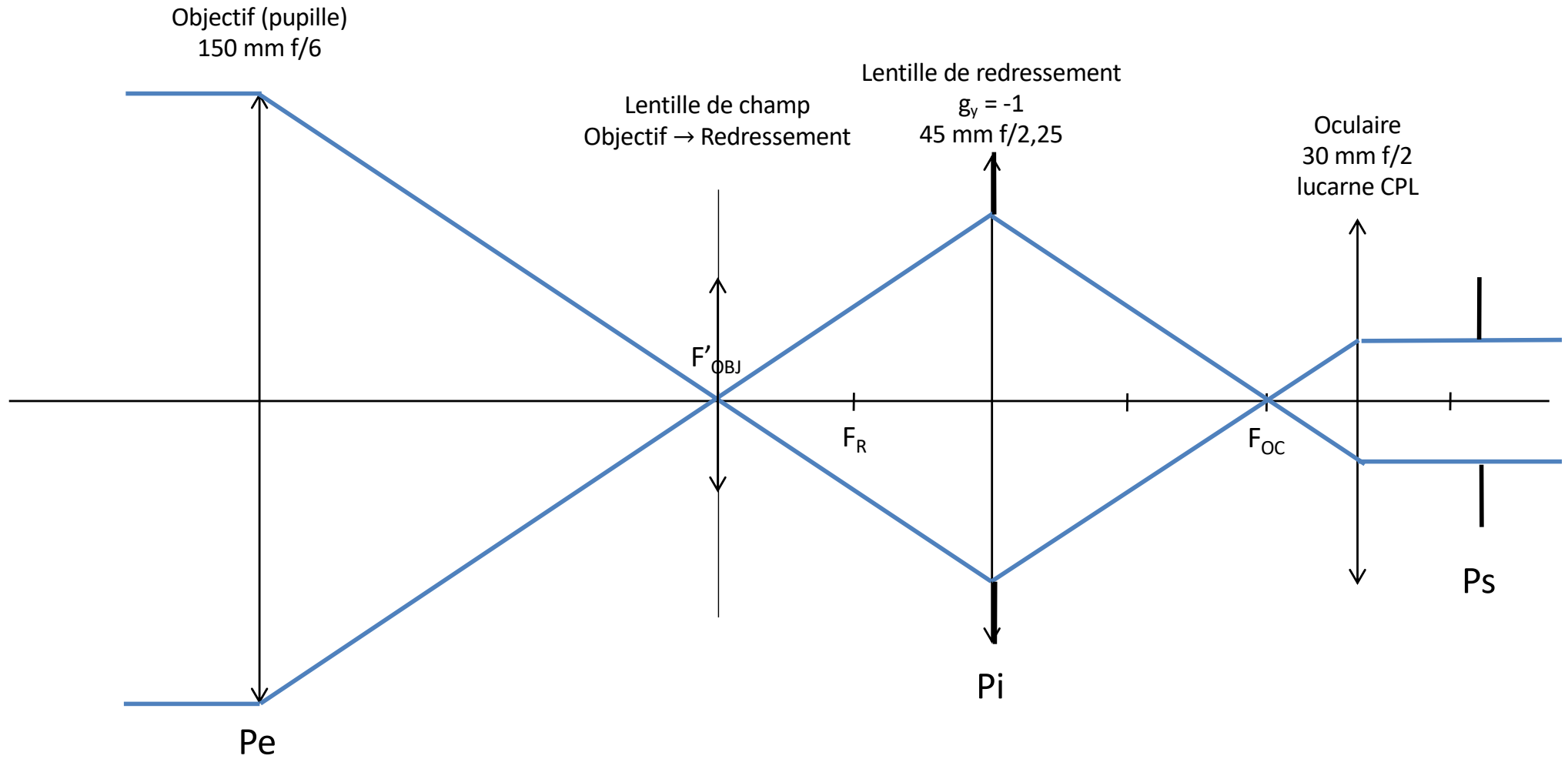
échelle transversale : $\times 4$



Tracés : point sur l'axe

échelle longitudinale : $\times \frac{1}{2}$

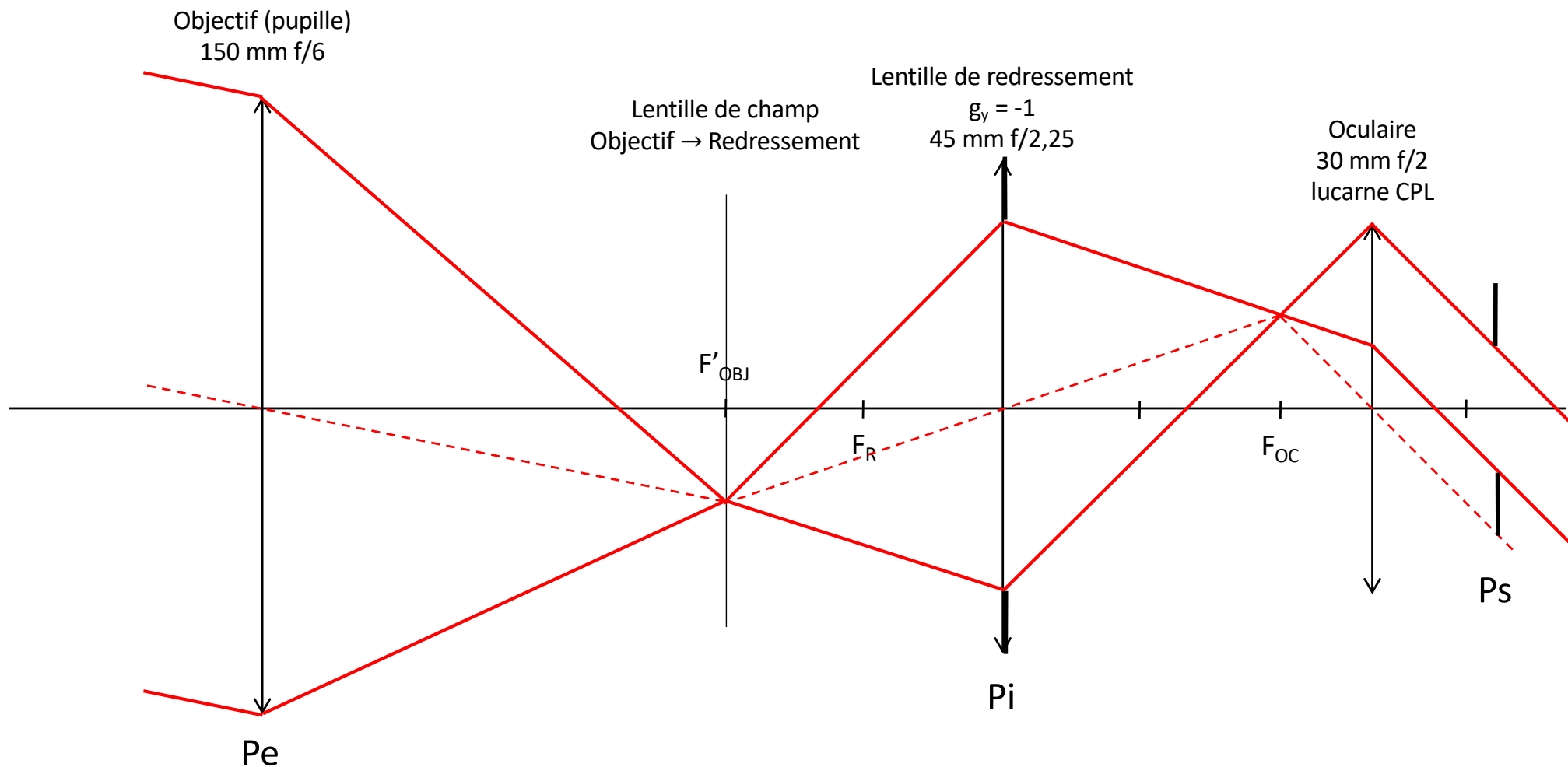
échelle transversale : $\times 4$



Tracés : bord de CPL

échelle longitudinale : $\times \frac{1}{2}$

échelle transversale : $\times 4$



échelle longitudinale : $\times \frac{1}{2}$
échelle transversale : $\times 4$

