

Éléments d'optique instrumentale

Sébastien de Rossi

1. Fondamentaux

2. Spécifications optiques

- Focale
- Conjugaison
- Ouverture
- Champ
- Qualité optique
- Profondeur de champ
- Télécentricité

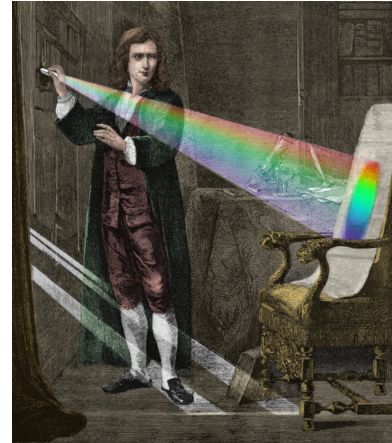
3. Exercice d'application

4. Annexes

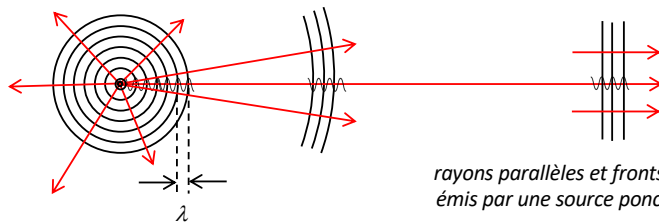
- Ressources
- Formulaire
- Glossaire Fr-En

Fondamentaux

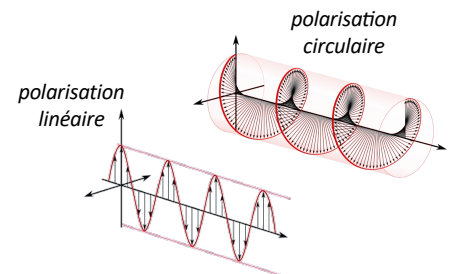
- La lumière est une onde électromagnétique transversale définie par sa **longueur d'onde** λ et sa **polarisation**
- Le spectre décrit la répartition de l'énergie lumineuse suivant la longueur d'onde. Le visible est situé entre 400 et 800 nm.
- Le **rayon** décrit la direction de l'énergie lumineuse
- L'interaction lumière-matière est définie par un **indice** optique $n(\lambda, pola, T^\circ, P)$
- Le **front d'onde** (ou surface d'onde) est l'ensemble des points d'égale perturbation lumineuse (même phase). Il est sphérique pour une source ponctuelle.



Dispersion chromatique de la lumière dans la silice (Newton, 1827)

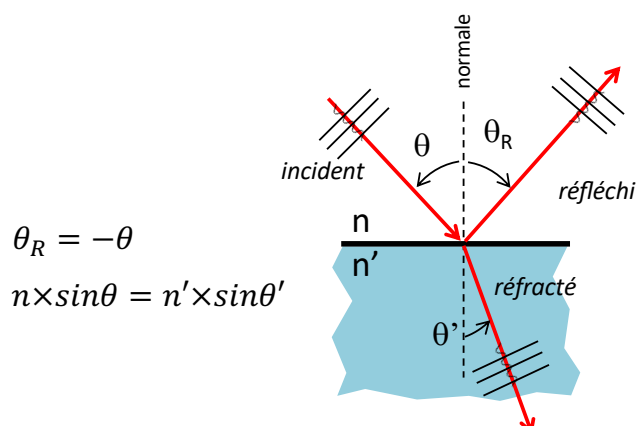


rayons parallèles et fronts d'ondes plans émis par une source ponctuelle à l'infini



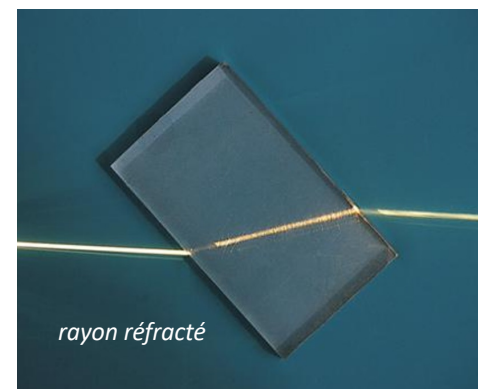
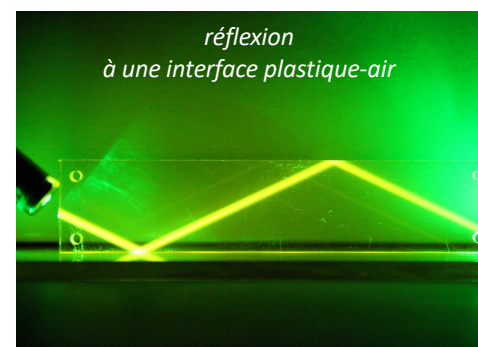
Fondamentaux • Réflexion et réfraction à une interface

Au passage d'une interface parfaitement plane entre deux milieux, l'onde incidente est généralement scindée en une **onde réfléchie** et une **onde transmise** (réfractée). Les rayons incident, réfléchi et réfracté sont tous contenus dans le même plan, appelé plan d'incidence. Les angles référés à la normale à l'interface obéissent aux relations de Snell-Descartes.

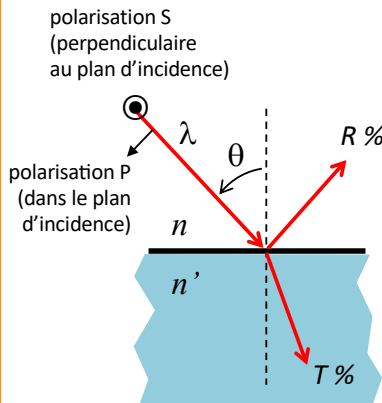


$$\theta_R = -\theta$$

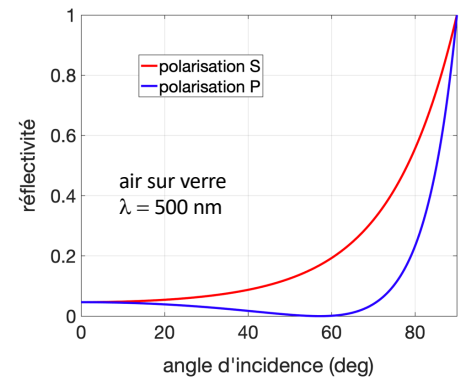
$$n \times \sin \theta = n' \times \sin \theta'$$



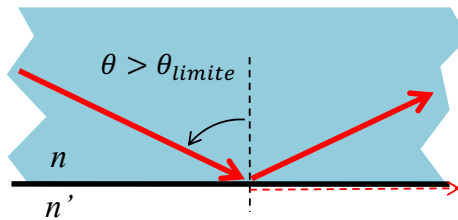
Fondamentaux • Efficacité optique aux interfaces



- En incidence quasi-normale $R(\theta \sim 0) \approx \left(\frac{n'-n}{n'+n}\right)^2 \sim 4\%$ air-verre visible
- Sans absorption $R + T = 1$
- Effet de la polarisation

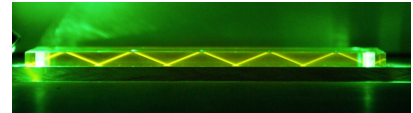


- L'efficacité augmente avec l'incidence et peut être totale au-delà d'un angle limite et lorsque l'indice du milieu d'où provient le rayon est le plus grand (exemples : fibre optique, miroir rayon X)



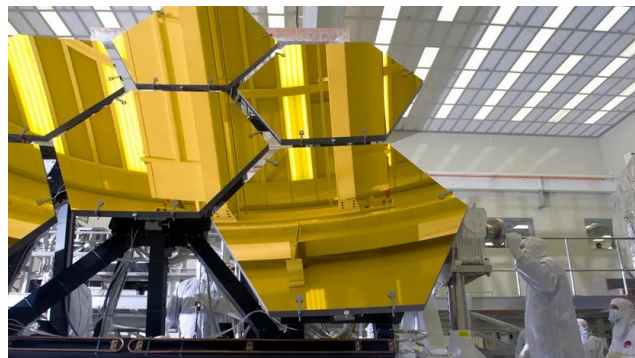
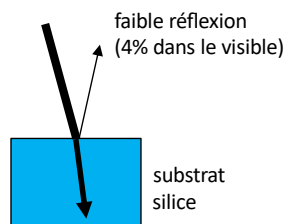
$$\theta_{limite} = \arcsin\left(\frac{n'}{n}\right) = 42^\circ$$

cas verre-air
@ visible



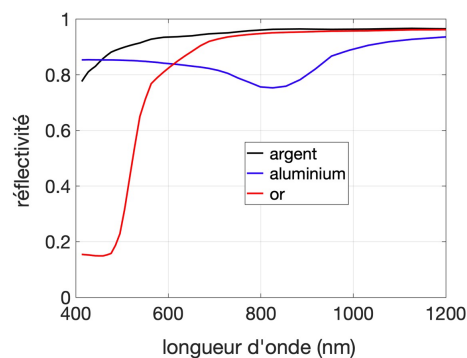
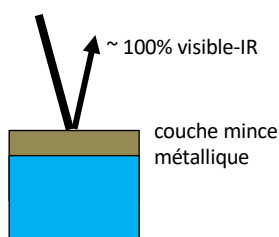
Fondamentaux • Efficacité optique aux interfaces

réflexion « vitreuse »



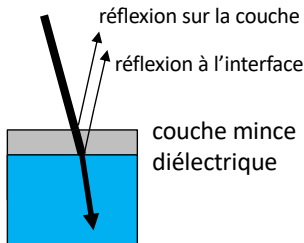
miroir primaire du James Webb Space Telescope.
Revêtement 100 nm d'or et fine couche de silice protectrice © NASA

réflexion métallique



Fondamentaux • Efficacité optique aux interfaces

double réflexion



interférences

ondes en phase



ondes déphasées

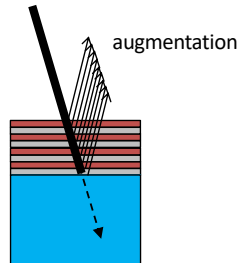


ondes en
opposition de phase



multiples réflexions

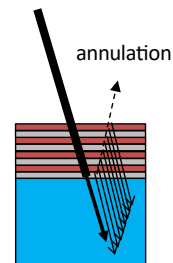
interférences constructives



miroir
haute réflectivité

multiples réflexions

interférences destructives

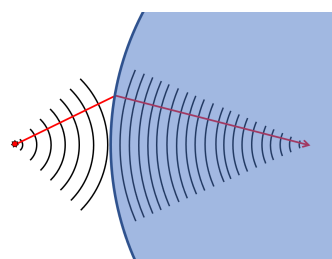
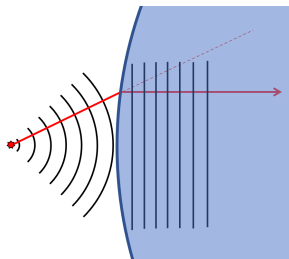


anti-reflet



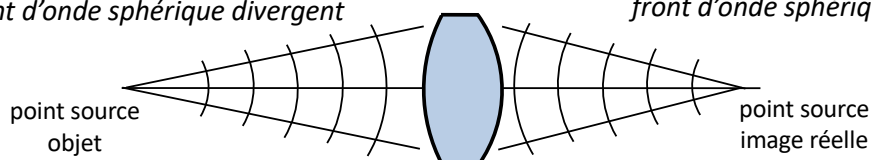
Fondamentaux • Déviation des faisceaux / focalisation

Une surface courbe peut, par réfraction ou réflexion, modifier et inverser la courbure d'un front d'onde. Cet effet est à la base de la focalisation des faisceaux et de la formation des images par des lentilles et des miroirs.



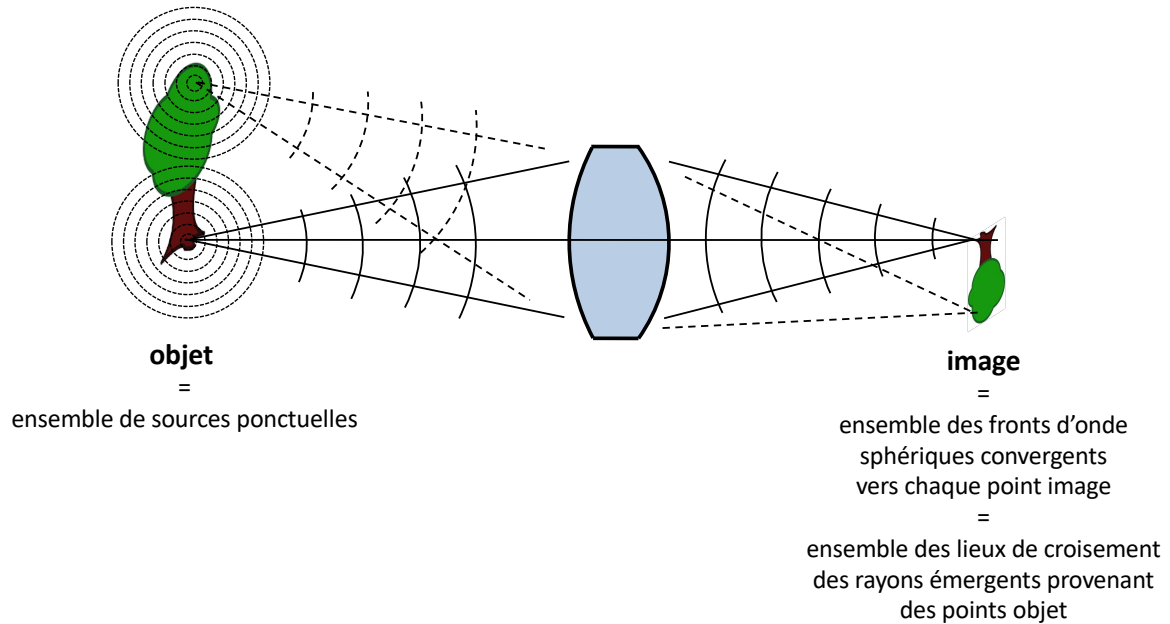
front d'onde sphérique divergent

front d'onde sphérique **convergent**



Fondamentaux • Formation des images

Une **image** est une reproduction point à point plus ou moins fidèle d'un objet étendu (homothétie, couleur) obtenue avec un système optique.



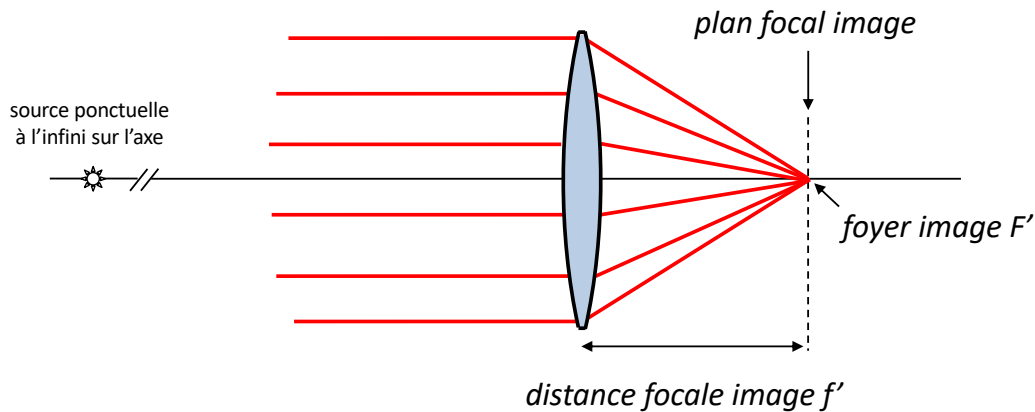
Spécifications optiques

Focale, Conjugaison

Foyers et distance focale

Lorsque l'épaisseur de la lentille est faible devant les rayons de courbures et leur différence, on parle de **lentille mince**. Dans ce cas la **distance focale** est la distance entre la lentille et le plan image (point de focalisation) d'un objet lointain.

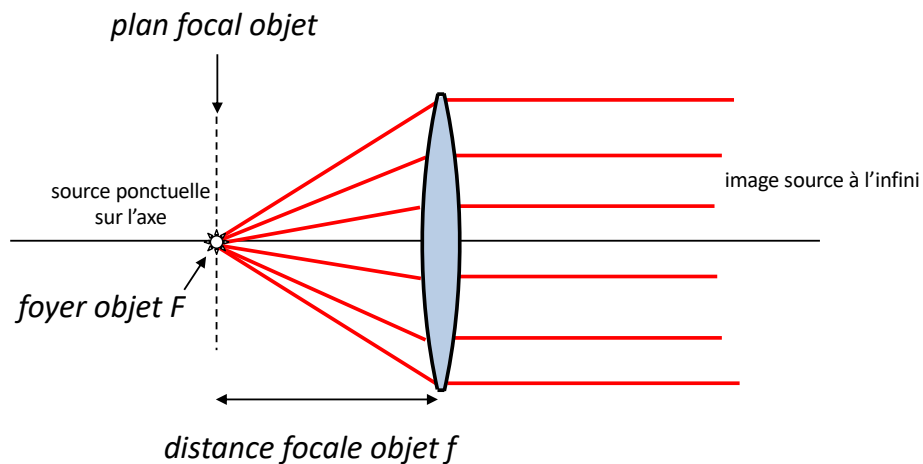
Le point de focalisation situé sur l'axe est appelé **foyer image** de la lentille.



Foyers et distance focale

De façon équivalente si on place une source ponctuelle en un point appelé **foyer objet F**, son image se formera à l'infini. La distance entre le foyer objet et la lentille est la **distance focale objet**.

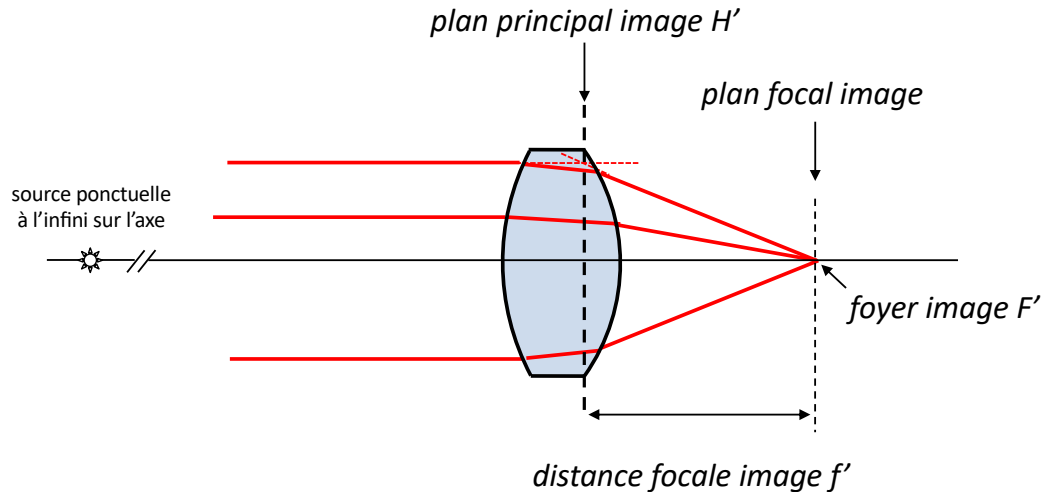
Usuellement les distances focales objet et image sont égales en valeur absolue.



Foyers et distance focale

Dans une lentille **lentille épaisse** ou un **système optique plus complexe**, la **distance focale** est la distance entre le foyer image F' et un plan spécifique appelé plan principal image H' .

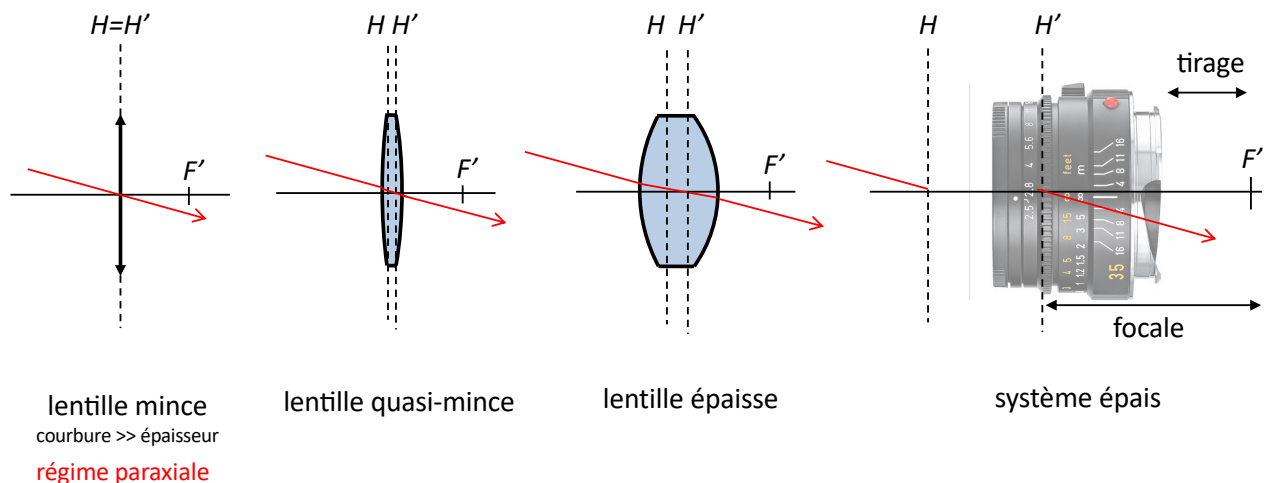
De façon équivalente on définit un **foyer objet F** , un plan principal objet H et une **distance focale objet f** . Un objet placé en F aura son image à l'infini.



Foyers et distance focale

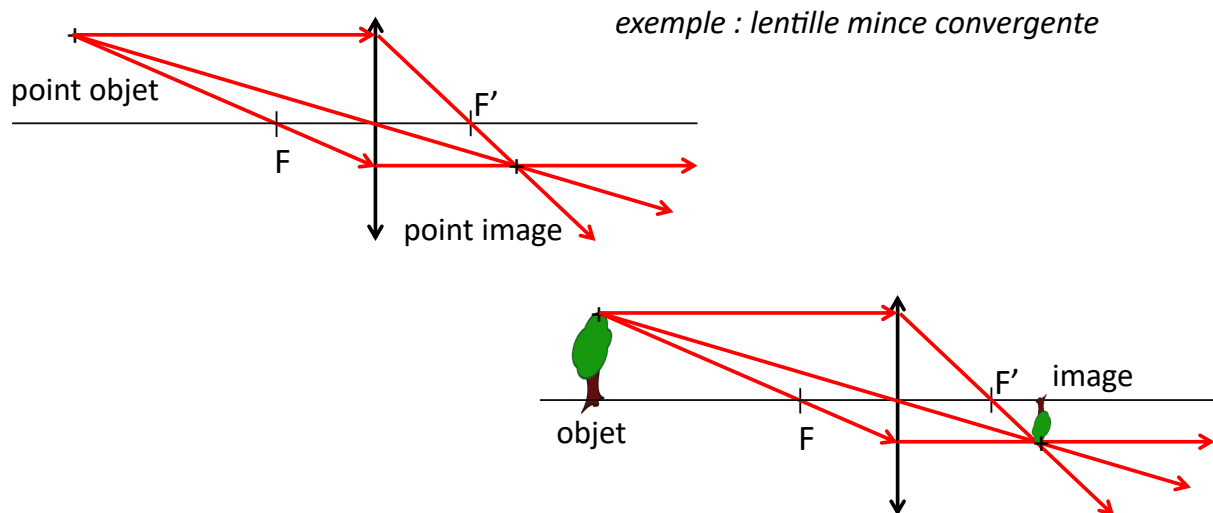
Dans une lentille mince, les plans H et H' sont quasiment confondus avec le plan de la lentille. Dans un objectif, la distance focale ne doit pas être confondue avec le tirage, distance entre la dernière lentille et le plan image.

Un système optique est dit **convergent** (respectivement **divergent**) si sa distance focale image f' est positive (respectivement négative).



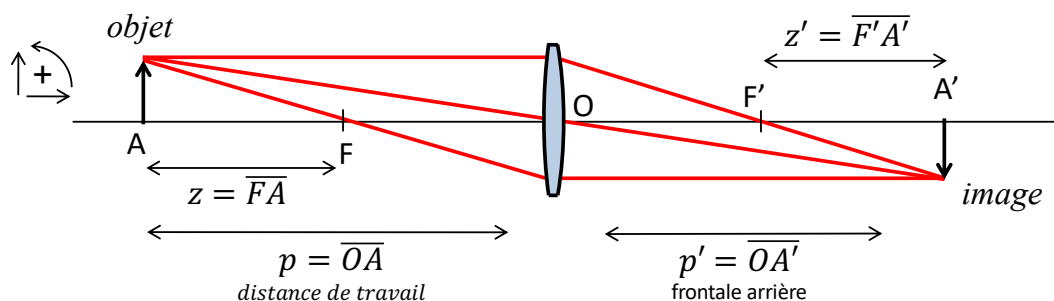
Construction géométrique de l'image d'un point

Pour construire l'image d'un point il est nécessaire de tracer au moins deux rayons partants d'un point de l'objet et trouver où s'effectue le croisement après le système optique pour déterminer la position et la taille de l'image. Pour construire l'image d'un objet il suffit de faire l'image des bords et par continuité déterminer l'image entière car dans les conditions paraxiales **l'image d'un plan est un plan**.



Système projectif – conjugaison et grandissement

Les positions de l'objet et de son image sont reliées à la distance focale par la formule de conjugaison. La position et la taille de l'image dépend de cette conjugaison. Dans les formules, les distances sont algébriques. On tient compte de leur signe par rapport au sens de propagation de la lumière. Ici HA est négatif et H'A' est positif.

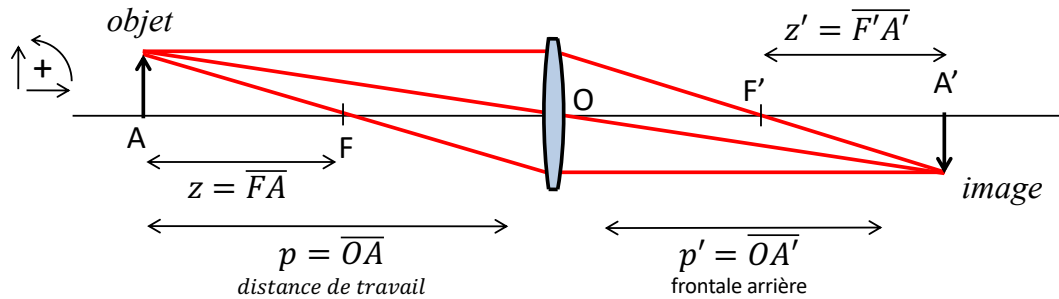


position image	$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f}$	$z \times z' = f \times f'$
----------------	--	-----------------------------

Exemple $p = -2f' \rightarrow \frac{1}{p'} = \frac{1}{p} + \frac{1}{f'} = \frac{2}{f'} \rightarrow p' = 2f'$

Système projectif – conjugaison et grandissement

Les positions de l'objet et de son image sont reliées à la distance focale par la formule de conjugaison. La position et la taille de l'image dépend de cette conjugaison. Dans les formules, les distances sont algébriques. On tient compte de leur signe par rapport au sens de propagation de la lumière. Ici HA est négatif et H'A' est positif.



taille image
grandissement transversal

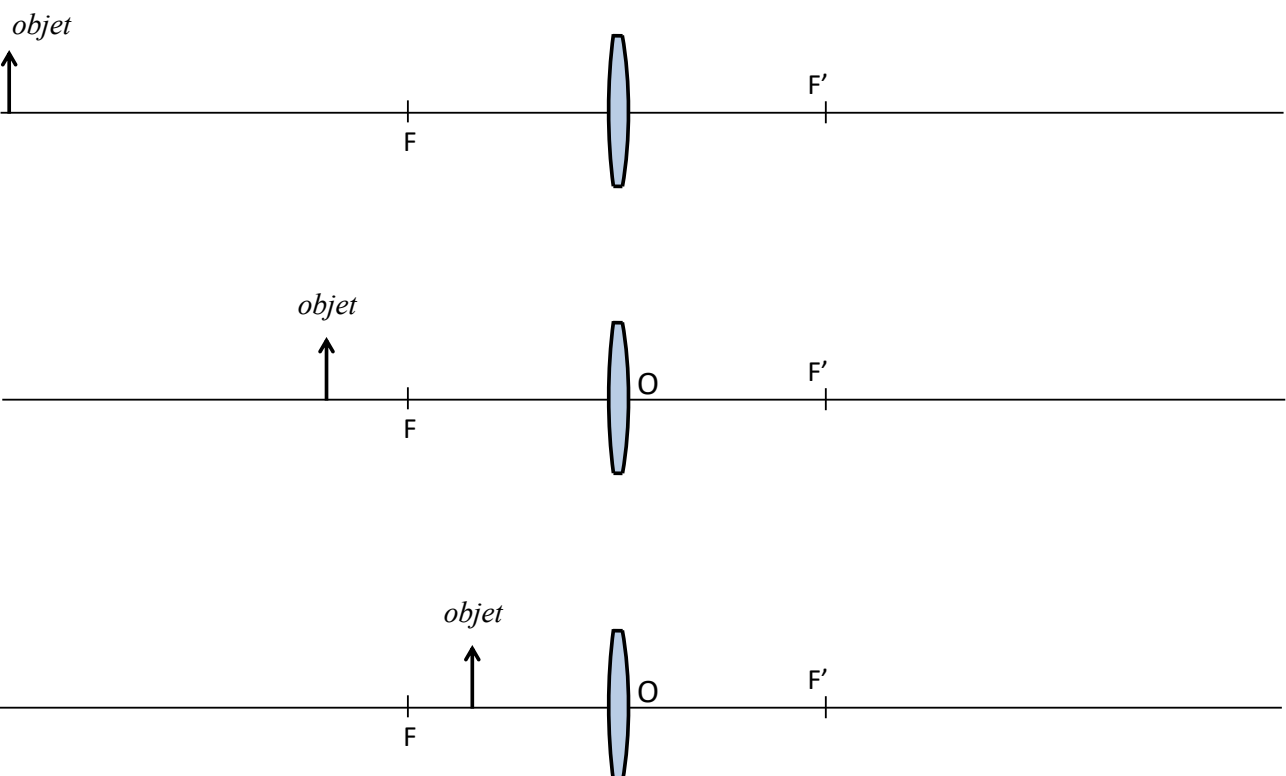
$$g_y = \frac{y'}{y} = \frac{p'}{p} = -\frac{z'}{f'} = -\frac{f}{z}$$

grandissement longitudinal

$$g_z = \frac{\delta p'}{\delta p} = (g_y)^2$$

Exemple $p = -2f' \rightarrow p' = 2f' \rightarrow g_y = \frac{y'}{y} = \frac{p'}{p} = -1$

Exemple construction de l'image



Système projectif – conjugaison et grandissement



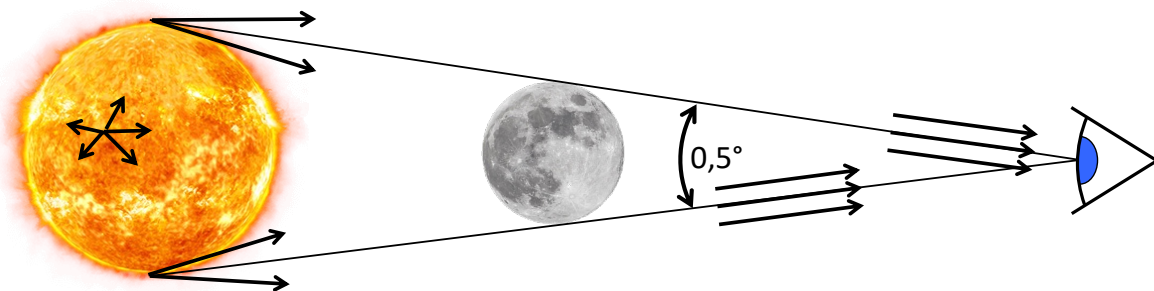
Bague de mise au point dans un objectif photo



Dans un objectif de microscope la conjugaison est optimisée pour une frontale fixe. Le grandissement est donc fixé par les distances et est inscrit sur le corps de l'objectif.

Conjugaison foyer-infini et infini-foyer

Un objet (ou son image) situé à l'infini (ou quasi) est défini(e) par l'angle apparent sous lequel on le(la) voit à l'œil nu ou à travers un instrument. On parle de **taille apparente** ou **taille angulaire**.

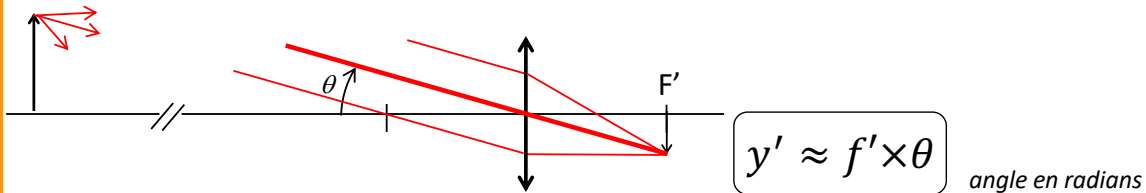


La Lune et le Soleil sont vus sous 0,5° depuis la Terre.

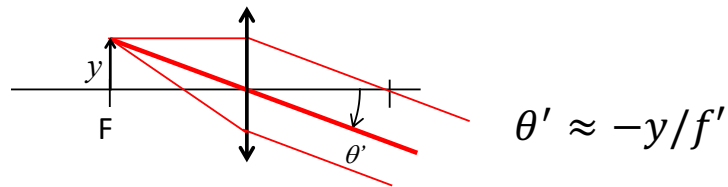
Conjugaison infini-foyer et foyer-infini

Lorsque l'objet (ou l'image) est à l'infini, le grandissement n'a plus de sens. la grandeur pertinente pour calculer la taille de l'image est la distance focale.

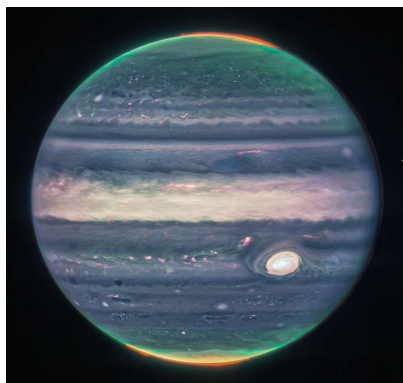
objet à l'infini de taille apparente θ $\frac{1}{p'} - \frac{1}{\infty} = \frac{1}{f'} \rightarrow p' = f'$ image au foyer de taille y'



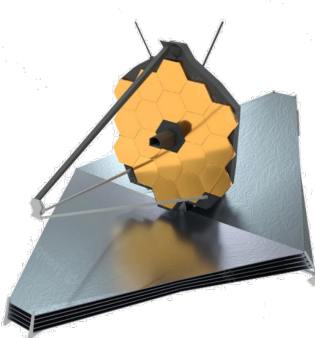
objet au foyer de taille y $\frac{1}{p'} - \frac{1}{f} = \frac{1}{f'} \rightarrow p' = \infty$ image à l'infini de taille apparente θ'



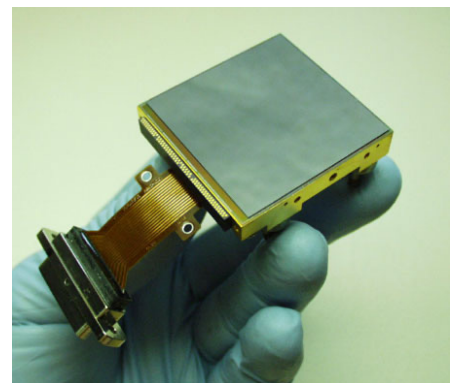
Exemple taille de l'image fournie par le télescope JWST



Jupiter vue par le JWST



JWST, focale 131 m

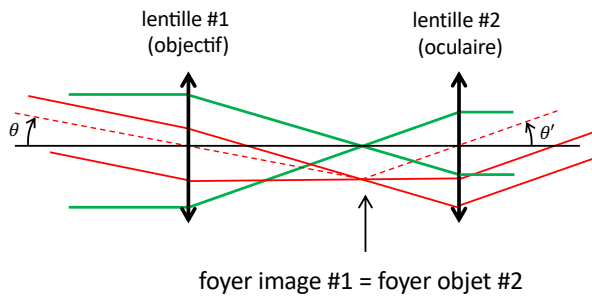


Capteur de l'instrument NIRCAM du JWST

Taille de l'image de Jupiter sur le capteur

$$y'_{Jupiter} \approx f'_{JWST} \times \theta_{Jupiter} = 131 \text{ (m)} \times \frac{140.10^3 \text{ (km)}}{628.10^6 \text{ (km)}} = 29 \text{ mm}$$

Grossissement (angulaire)



Dans un système afocal (foyers à l'infini), si l'objet est à l'infini, son image l'est aussi. Le grandissement est angulaire. On parle de **grossissement G**. On parle de grandissement dans un agrandisseur de faisceau.

$$G = \frac{\text{taille angulaire de l'image}}{\text{taille angulaire de l'objet}} = \frac{\theta'}{\theta}$$



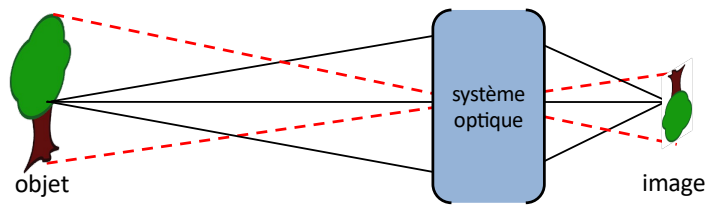
jumelle de grossissement X10



agrandisseur de faisceau variable

Spécifications optiques

Ouverture, Champ

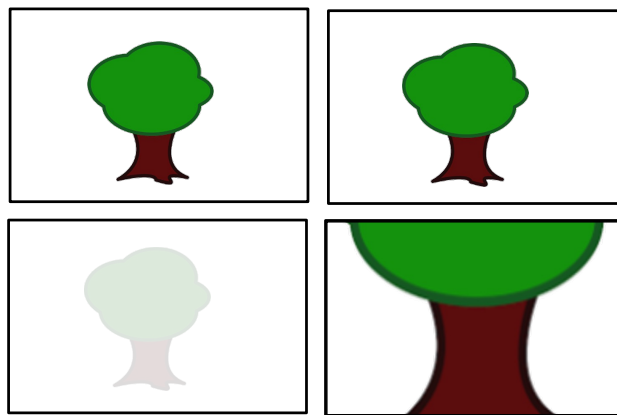


Ouverture

flux collecté

Champ

taille max objet capté



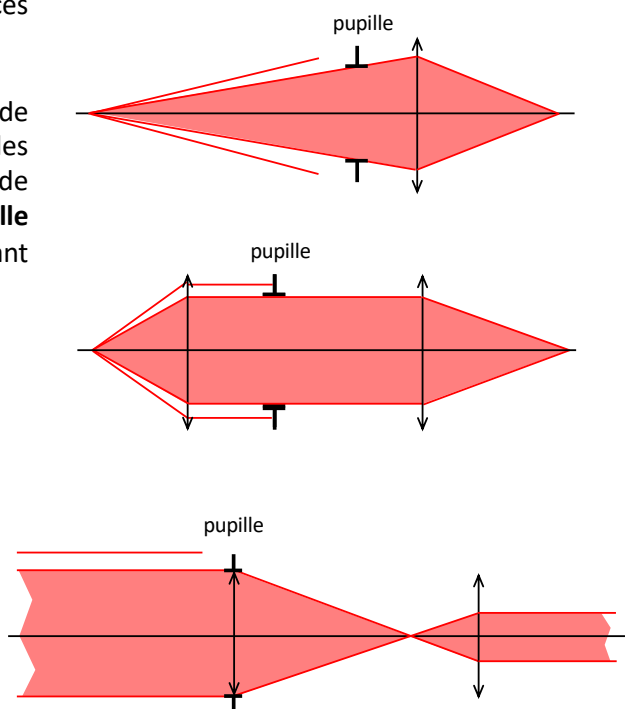
Ouverture et pupille

Un système optique, en raison de la taille de ces éléments, va limiter la quantité de lumière utile.

Le **faisceau utile** est le faisceau de plus grande étendue (le plus ouvert) qui traverse tous les diaphragmes matériels (diaphragme, bord de lentilles/miroirs, pupille de l'œil). On appelle **pupille** l'élément qui limite l'**ouverture** des rayons traversant l'instrument pour un point objet sur l'axe.

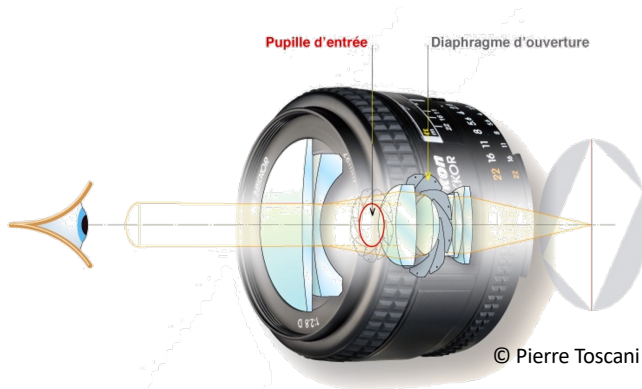


Dans un objectif photo, la pupille est le diaphragme. Elle est de diamètre variable.



Ouverture et pupille

Si cette pupille n'est pas réelle pour les rayons entrants (sortants), on définit une **pupille d'entrée (pupille de sortie)** qui est l'image de la pupille du système par les éléments qui le précèdent (le suivent)



Exemple

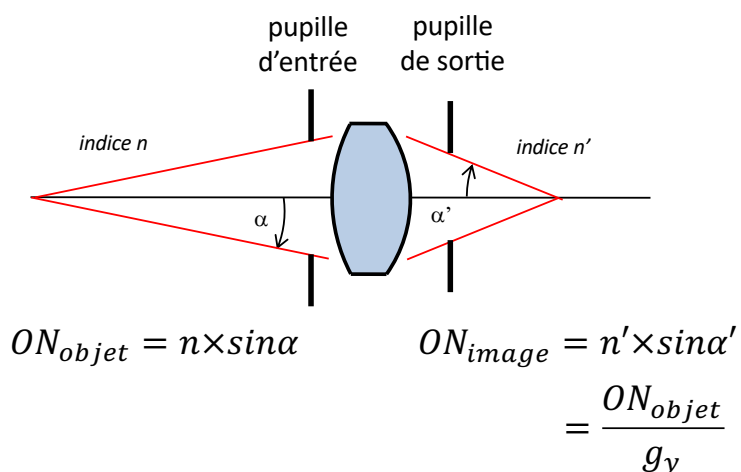
Regarder le diaphragme d'un objectif photographique par sa face d'entrée c'est regarder la pupille d'entrée.



Exemple

Regarder une paire de jumelles par sa face de sortie et à bout de bras, c'est regarder la pupille de sortie.

Ouverture numérique



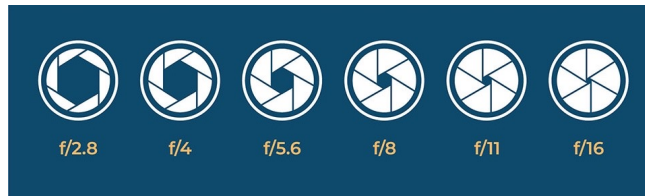
Dans un objectif de microscope (ici de grandissement 60) la conjugaison objet-image est optimisée pour une position fixe de l'objet. **L'ouverture numérique** objet est fixe et est donc inscrite sur le corps de l'objectif. ici, $ON_{\text{objet}} = 0,85$

En conjugaison infini-foyer, on montre que $n' \times \sin \alpha' = \frac{\text{rayon PE}}{\text{focale}}$

Nombre d'ouverture (f-number)



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

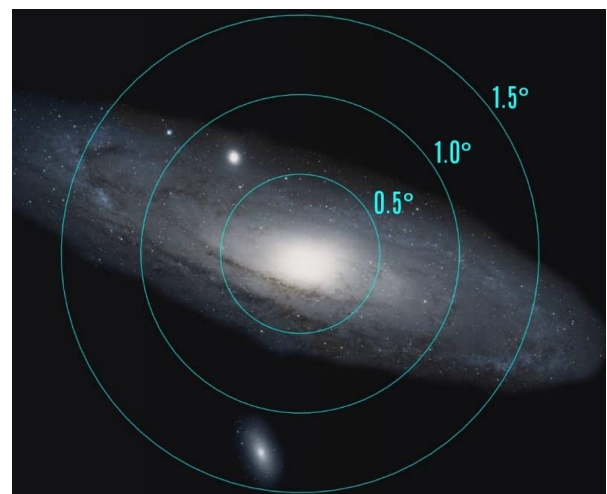


Un objectif « ouvert à f/2,8 » est un objectif pour lequel $N=2,8$ (longueur focale 2,8 fois plus grande que le diamètre de la pupille d'entrée). La quantité de lumière entrante est deux fois plus grande que f/4 et deux fois plus petite que f/2 car **l'éclairement dans l'image évolue en $1/N^2$** . Quand on passe d'une valeur à la valeur supérieure, on divise par deux la quantité de lumière arrivant sur le capteur.

Champ transversal

Le **champ transversal** à l'axe optique correspond à l'ensemble des points de la scène imagée (perçue ou captée) à travers le système optique. Il est limité par des lucarnes présentes dans le systèmes optiques et/ou par la taille du détecteur.

Il peut s'exprimer par des dimensions au niveau de la scène, si celle-ci est à distance finie ou par des angles si elle est à l'infini.



champ « angulaire » dans un télescope



20x Objective

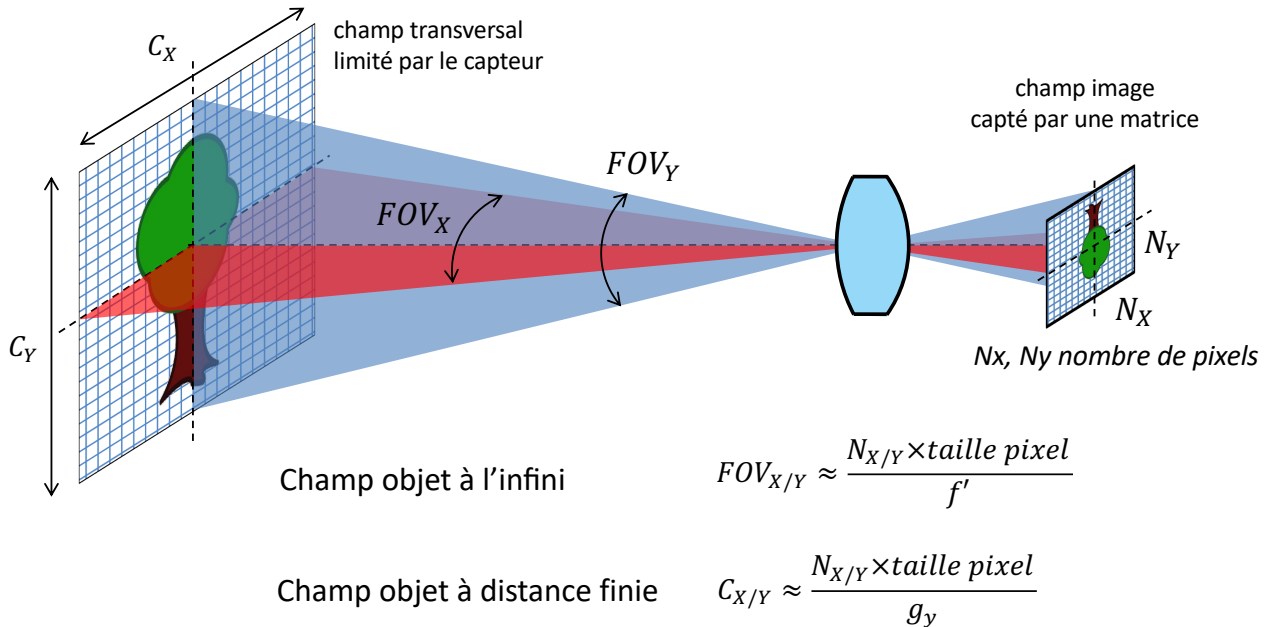
50x Objective

100x Objective

champ « métrique » dans un microscope

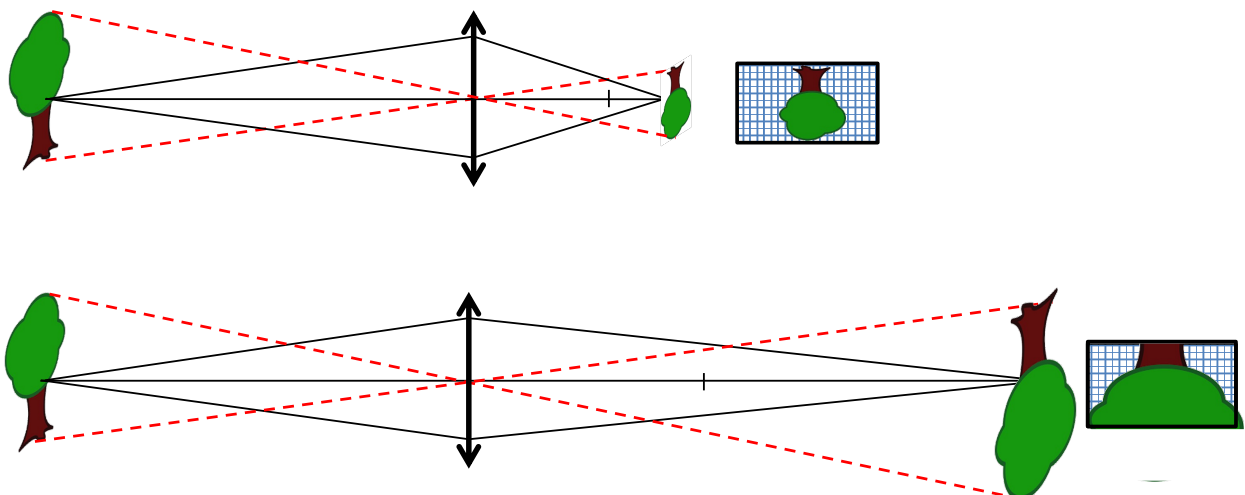
Champ transversal « capteur »

Champ transversal limité par la dimension du capteur où est projetée l'image. Le système optique devra « laisser passer » ce champ en adaptant la taille de ses éléments.



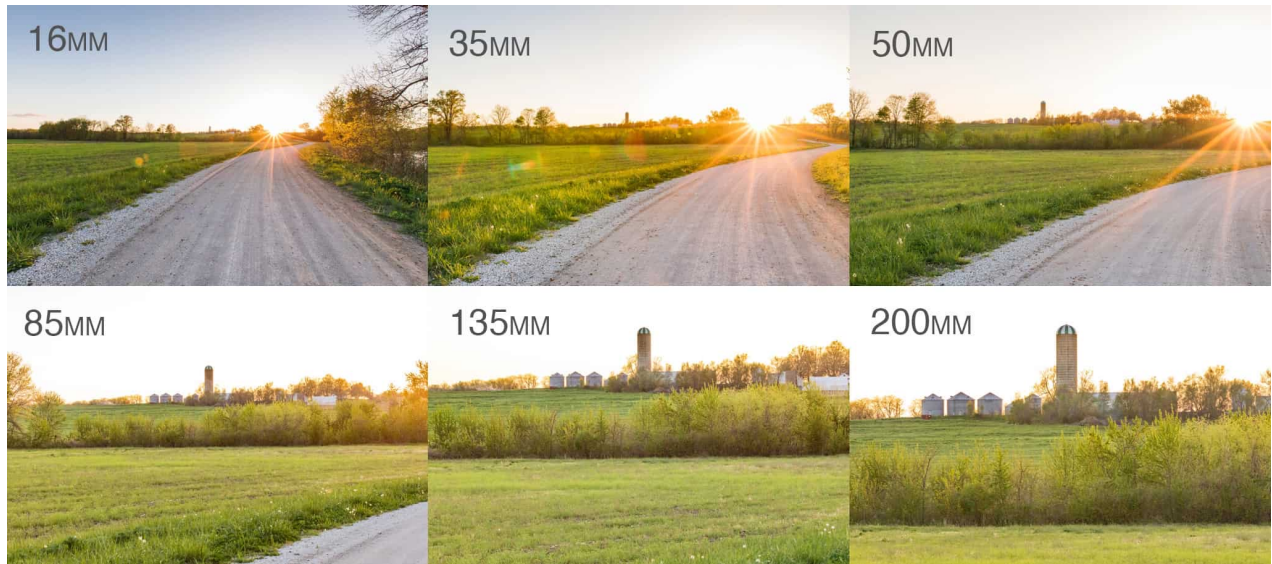
Champ transversal « capteur »

Pour un capteur fixe, la diminution du champ quand la focale augmente s'accompagne d'une augmentation de la taille de l'image. C'est l'effet **ZOOM** !



Champ transversal « capteur »

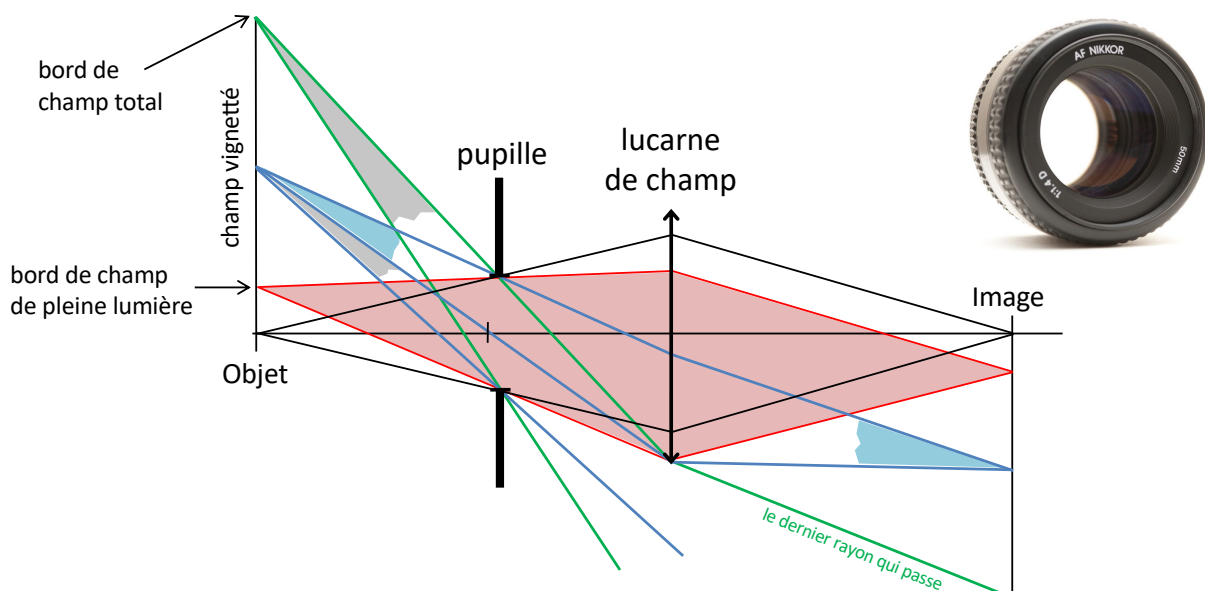
Evolution du champ en fonction de la focale pour une taille fixe de capteur



Champ transversal « optique »

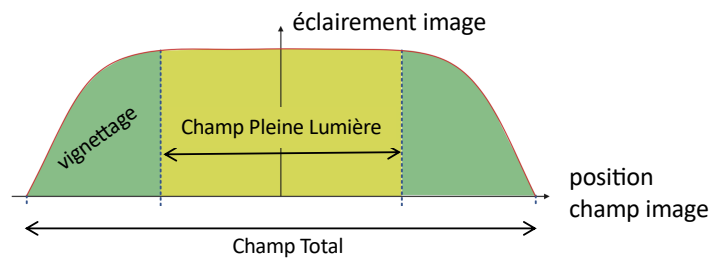
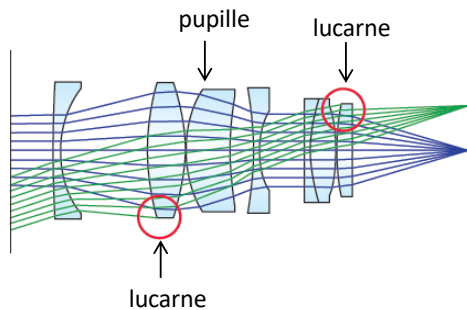
Dans un système optique, le champ est limité par la taille finie d'un ou plusieurs éléments autres que la pupille. Ces lucarnes vont vignetter le champ et réduire la quantité de lumière jusqu'au bord du champ total.

Exemple limitation du champ par un diaphragme (pupille) et une lentille (lucarne)

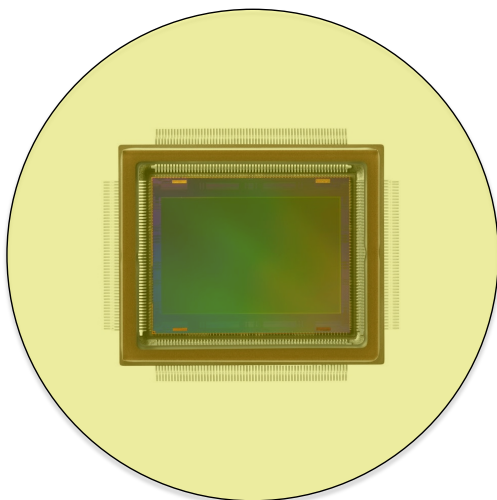


Champ transversal « optique »

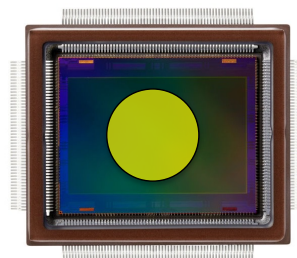
Champ transversal limité par des **lucarnes** dans un objectif photo. Effet de vignettage dans l'image acquise.



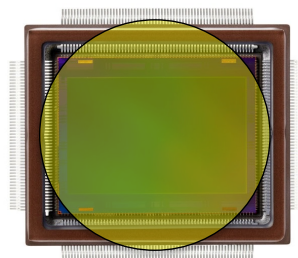
Champ transversal « capteur » vs « optique »



une optique plus chère !



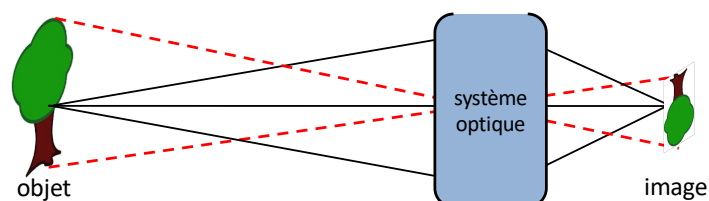
des pixels perdus !



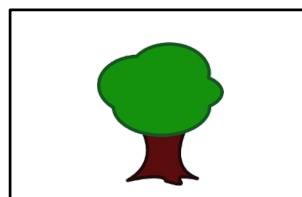
bonne adaptation capteur-champ

Spécifications optiques

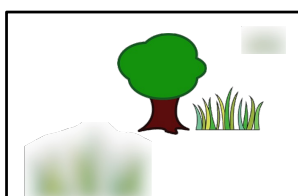
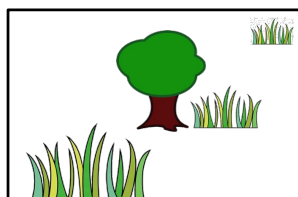
Qualité optique, Profondeur de champ



Résolution
qualité

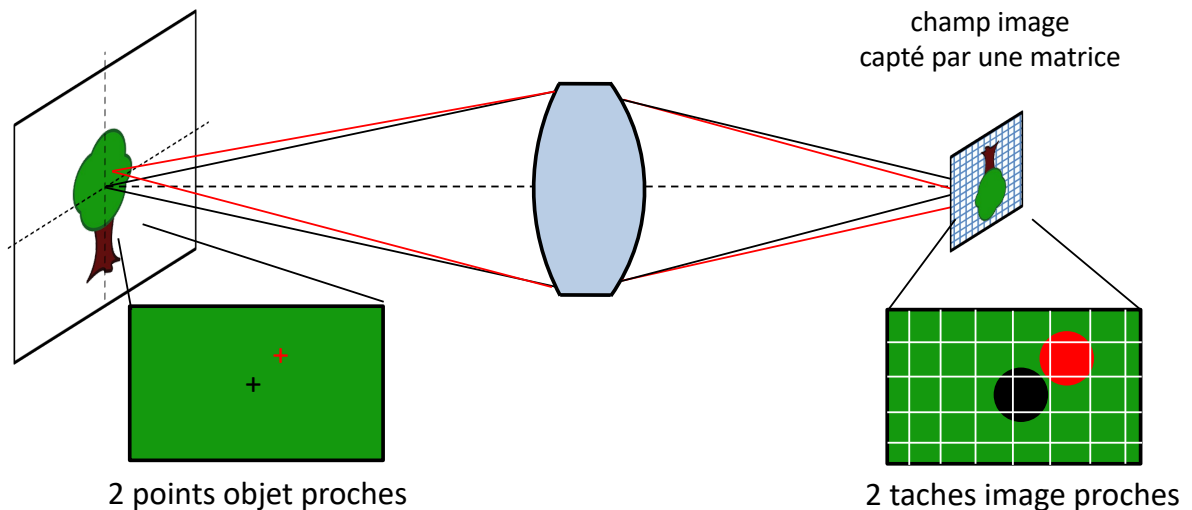


**Profondeur
de champ**



Qualité d'image - résolution

La performance d'un système optique est liée à la **qualité de la tache de focalisation** ou à la **résolution dans une image** qui est la capacité du système à distinguer deux points objets très proches. Elle peut être limitée par les aberrations géométriques (incluant les défauts de fabrication et d'alignement), la diffraction ou l'échantillonnage de la détection. Il faut maintenir cette résolution pour l'ouverture et le champ définis par l'utilisation.

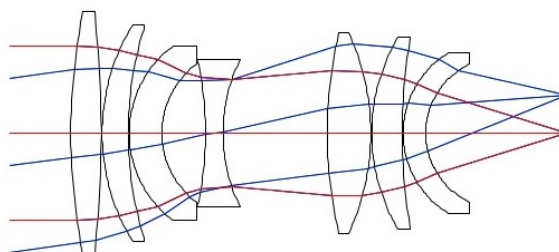


Qualité d'image - résolution

Le **stigmatisme** est la capacité d'un système optique à faire l'image géométriquement parfaite d'un point objet. Toute déviation au stigmatisme engendre une **tache (aberrations)** qui peut dégrader la résolution.

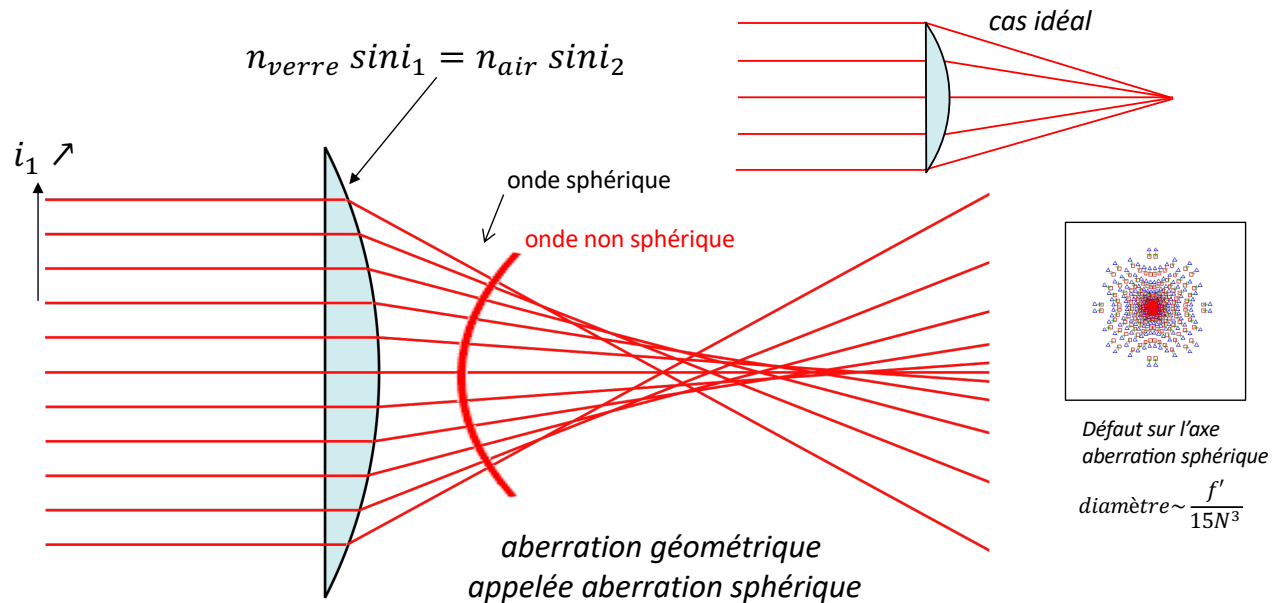
Il est très difficile d'assurer le stigmatisme pour des grandes ouvertures et/ou des grands champs. Seul le miroir plan est rigoureusement stigmatique quel que soit le point objet. La recherche du stigmatisme approché passe par un logiciel de conception optique et/ou par l'utilisation de surfaces particulières combinées entre elle (exemple, la surface parabolique est stigmatique pour un point objet à l'infini sur l'axe). On peut également se placer dans le régime paraxial.

code v[®]
OSLO
Zemax

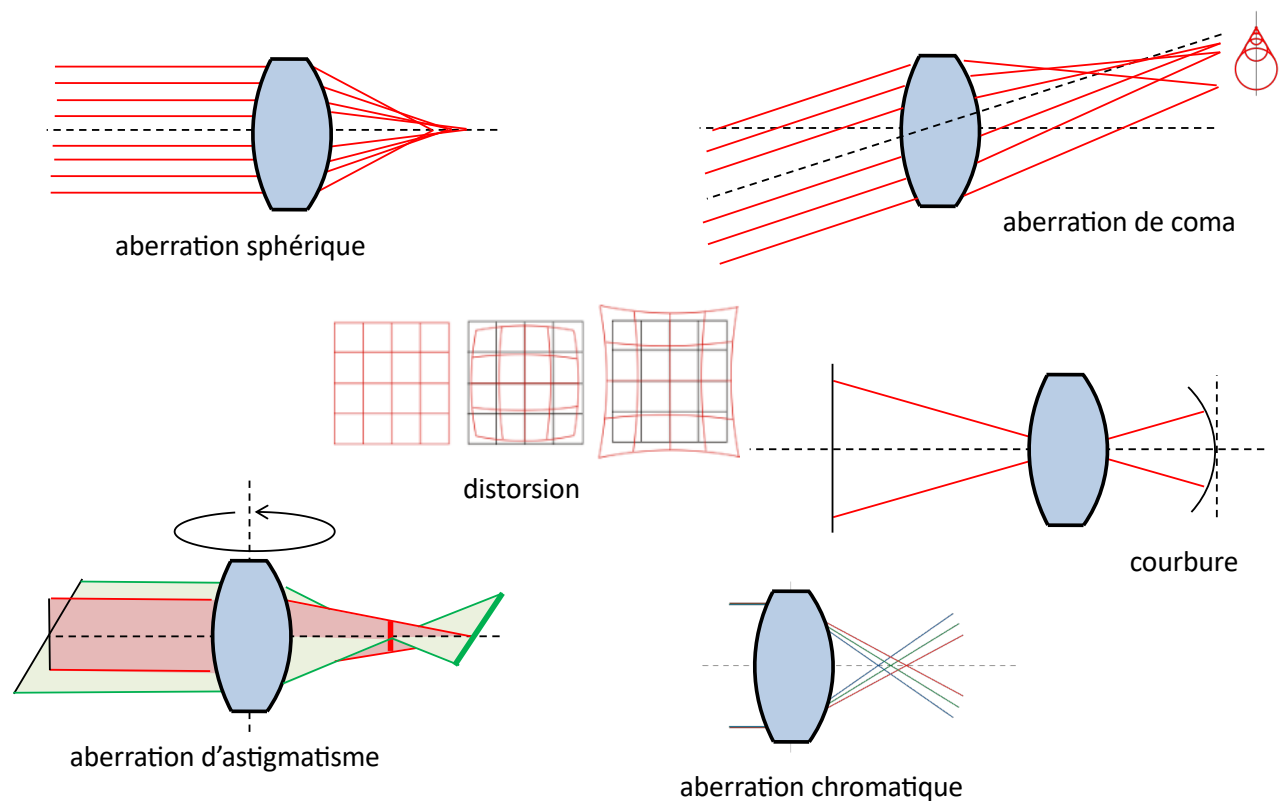


Aberrations géométriques

Les lois géométriques qui régissent la réfraction et la réflexion à une interface et les non-symétries engendrent des défauts appelés **aberrations**. Ils sont quantifiés dans les logiciels de conception optique par le **spot diagram**. Il correspond dans un plan donné aux points d'impact des rayons partants d'un point objet ayant traversés le système.



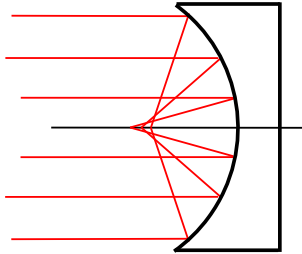
Aberrations géométriques



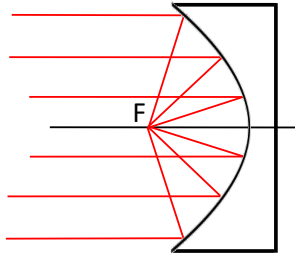
Aberrations géométriques

Exemple : miroir sphérique et miroir parabolique

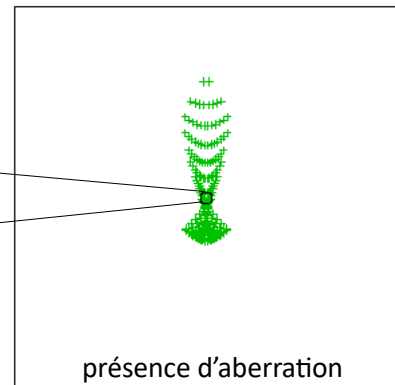
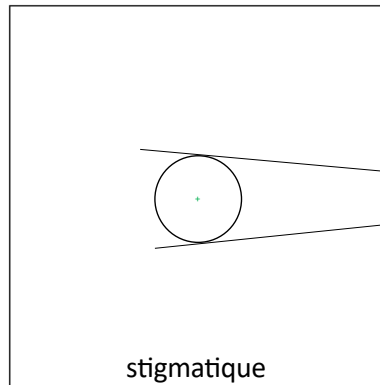
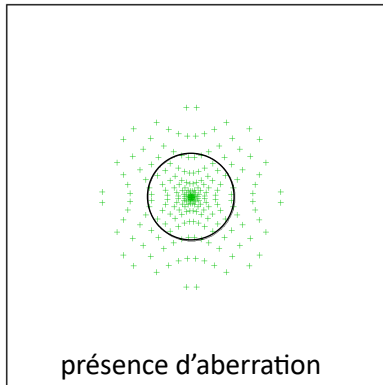
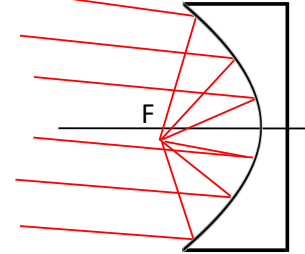
sphère sur l'axe



parabole sur l'axe

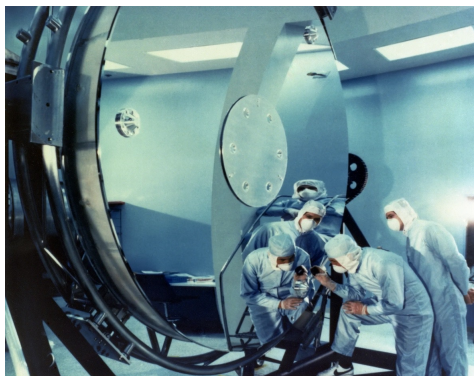


parabole hors axe



Aberrations géométriques - défaut de forme

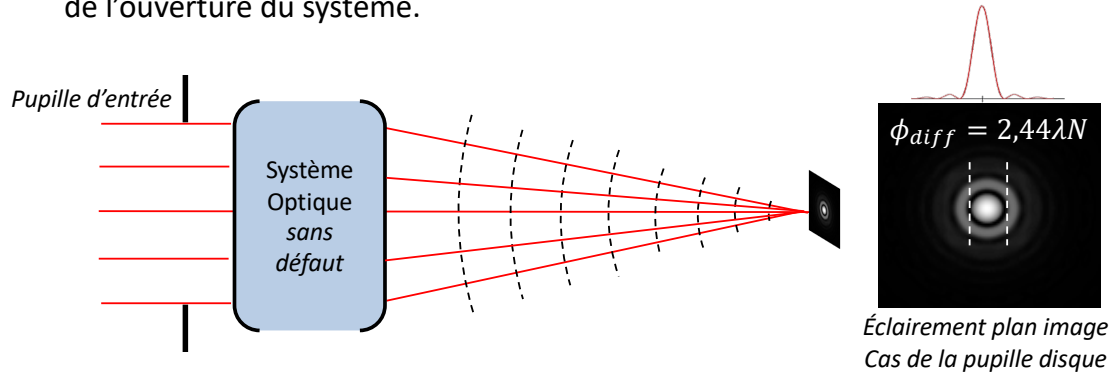
Lors de la fabrication, tout écart à la formule optique optimale déforme le front d'onde et dégrade aussi la qualité de l'image !



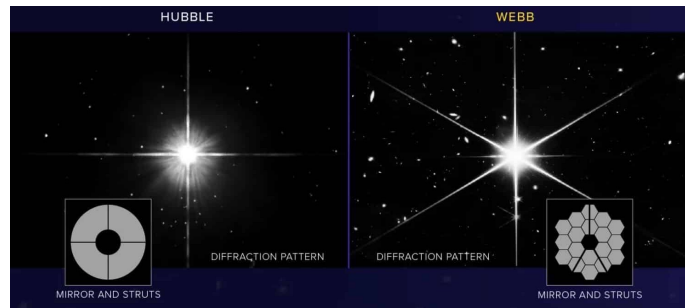
*Images fournies par le télescope Hubble avant et après sa correction.
Le miroir primaire était trop plat de 2 microns à sa périphérie !*

Diffraction dans un système optique

Dans un système optique, la diffraction engendre un étalement de l'image d'un point même pour un système parfaitement stigmatique. Plus le système est ouvert et moins la diffraction intervient. Elle dépend uniquement de la longueur d'onde et de l'ouverture du système.

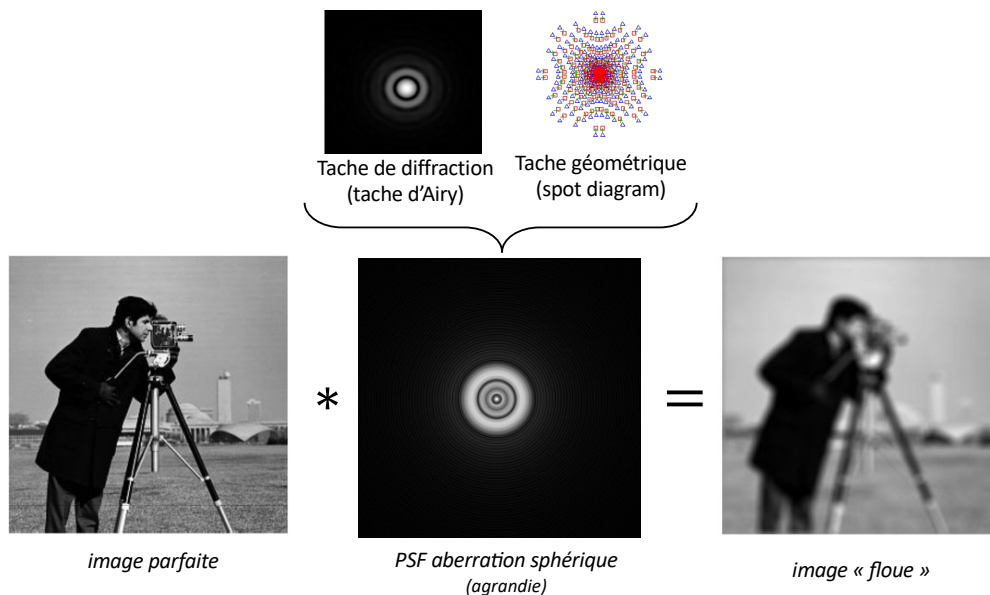


Dans un télescope l'image d'une étoile est au mieux une tache de diffraction et dépend de la forme de la pupille



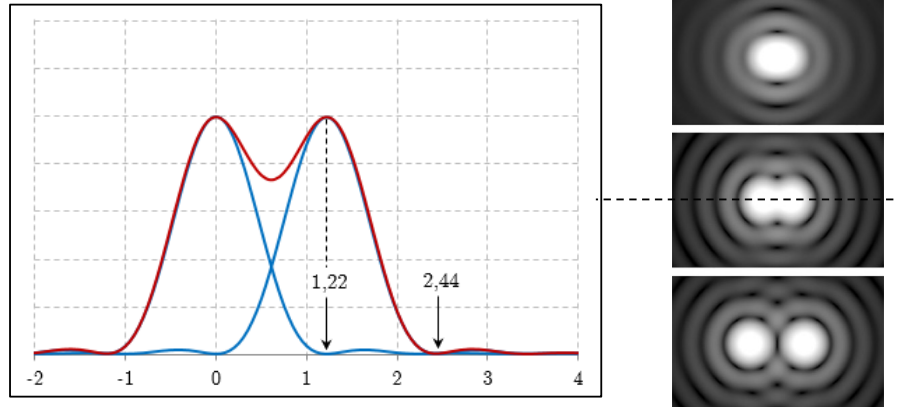
Aberration et Diffraction

La tache optique qui combine les défauts géométriques et les effets de diffraction est appelée **PSF** (*point spread function*). Si la tache géométrique est très inférieure à la tache de diffraction alors le système est dit « **limité par diffraction** ». L'image optique est la convolution de l'objet (modulo le grandissement) et de la PSF du système.



Limite de diffraction

Si la tache géométrique est très inférieure à la tache de diffraction alors le système est dit « **limité par diffraction** ». La résolution optique d'un système d'imagerie limité par la diffraction est arbitrairement définie par le **critère de Rayleigh** et vaut le **rayon de la tache d'Airy**.



$$\text{résolution optique : } R_{\text{image}} = \rho_{\text{airy}} \approx \frac{1,22\lambda}{2 \times \text{ON}_{\text{image}}} (= 1,22\lambda N \text{ si } \infty - \text{foyer})$$

PSF versus échantillonnage

La performance du système optique sera donc un compromis entre la taille de la **PSF** et de l'échantillonnage de la détection (**pixel**). En raison du critère de Shannon-Nyquist, toute fréquence spatiale supérieure à $\frac{1}{2 \times \text{pixel}}$ sera mal échantillonnée.

Donc pour éviter des artéfacts (sans post-traitement numérique ou filtre optique spécifique) il faut que la fréquence d'échantillonnage soit deux fois supérieure à la fréquence de coupure du système optique soit $\phi_{\text{PSF}} > \sim 5 \times \text{pixel}$.



image
dégradée par l'optique



image
dégradée par l'échantillonnage

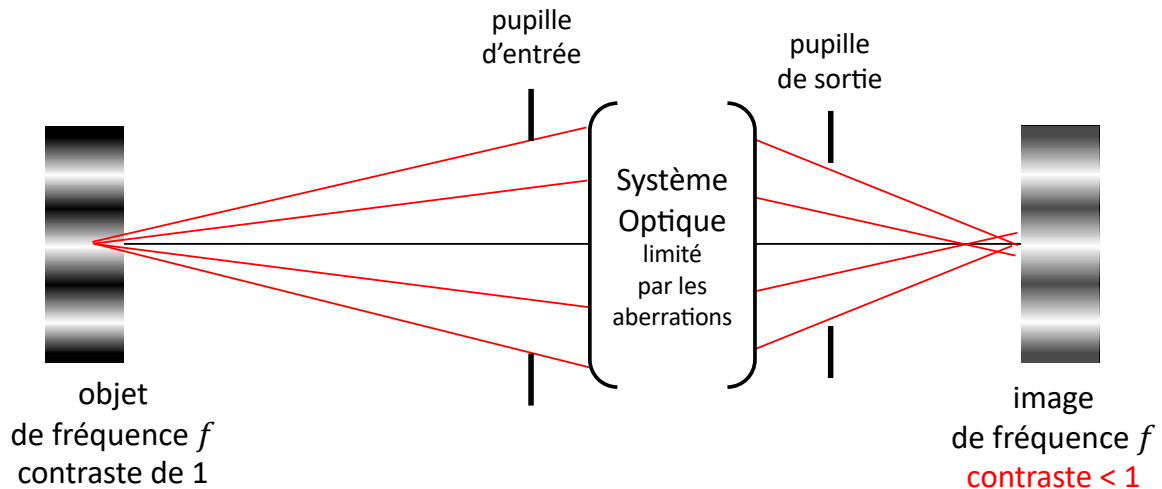


Artéfact dû à un
mauvais échantillonnage
des hautes fréquences
(PSF < ~ pixel)

FTM : Fonction de Transfert de Modulation

La résolution n'a pas de sens si elle n'est pas définie à un contraste spécifique.

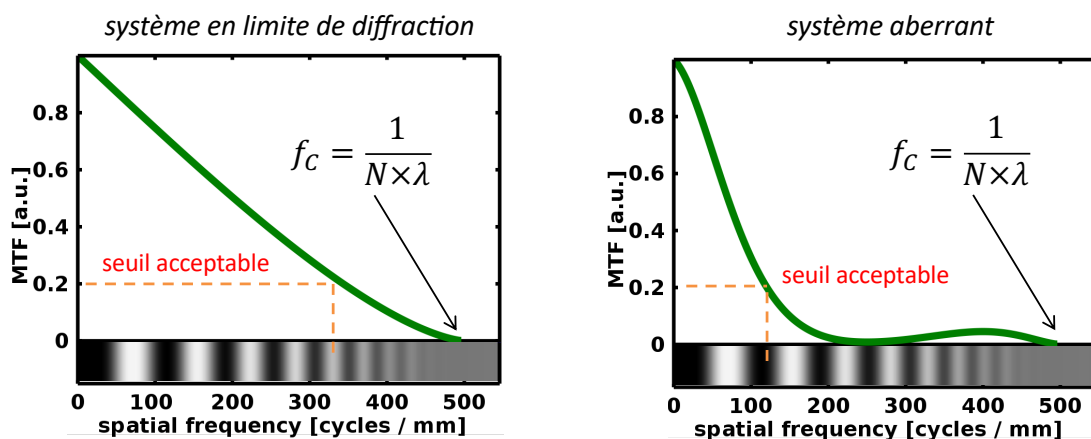
La **fonction de transfert de modulation** quantifie la perte de contraste d'un objet « sinusoïdal » en fonction de sa fréquence spatiale (inverse de sa période spatiale).



FTM : Fonction de Transfert de Modulation

La **fonction de transfert de modulation** quantifie la perte de contraste d'un objet « sinusoïdal » en fonction de sa fréquence spatiale (inverse de sa période spatiale).

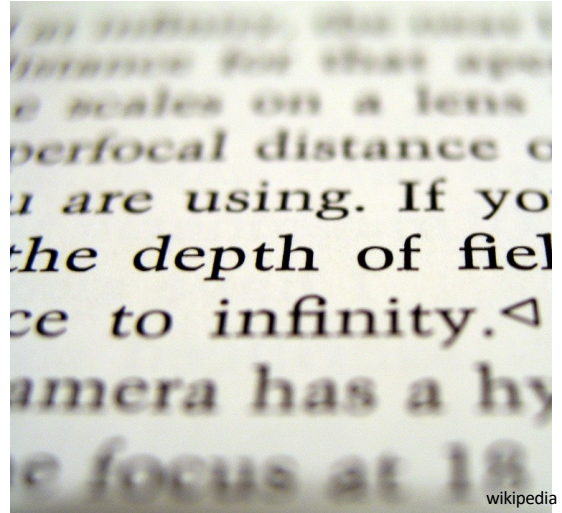
Plus la fréquence spatiale augmente moins le système optique est efficace. Au-delà d'une fréquence de coupure, aucune image n'est formée. Il joue un rôle de filtre passe-bas. La meilleure FTM est obtenue pour un système limité par la diffraction. Les aberrations engendrent systématiquement une diminution de la FTM.



Profondeur de champ

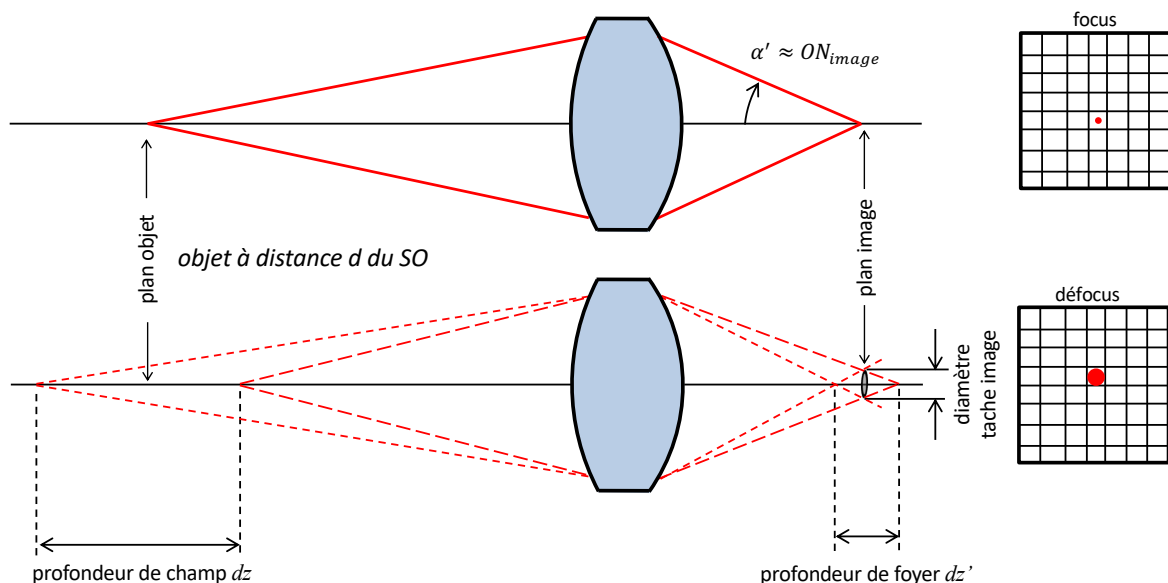
Si pour un point objet décalé longitudinalement par rapport à la position nominale, le flou de l'image défocalisée est plus petit que le **grain** (pixel, tache de diffraction ou PSF) alors l'image captée ne sera pas moins nette que l'image nominale. La zone longitudinalement « nette » côté image s'appelle la **profondeur de foyer** et côté objet **profondeur de champ**.

Quand l'instrument conjugue l'infini on ne parle pas de profondeur de champ mais de **distance hyperfocale**. A partir de cette distance de l'objectif tout objet sera perçu net.



wikipedia

Profondeur de champ



$$dz \approx \frac{2N \times \text{pixel}}{g_y^2} \approx 2N \times \text{pixel} \times \left(\frac{d}{f'}\right)^2$$

$$dz' \approx \frac{\text{pixel}}{ON_{\text{image}}} \approx 2N \times \text{pixel}$$

Profondeur de champ

La profondeur de champ augmente quand on diminue l'ouverture du système optique



La profondeur de champ diminue quand on augmente la focale du système optique

$f' = 70 \text{ mm}$

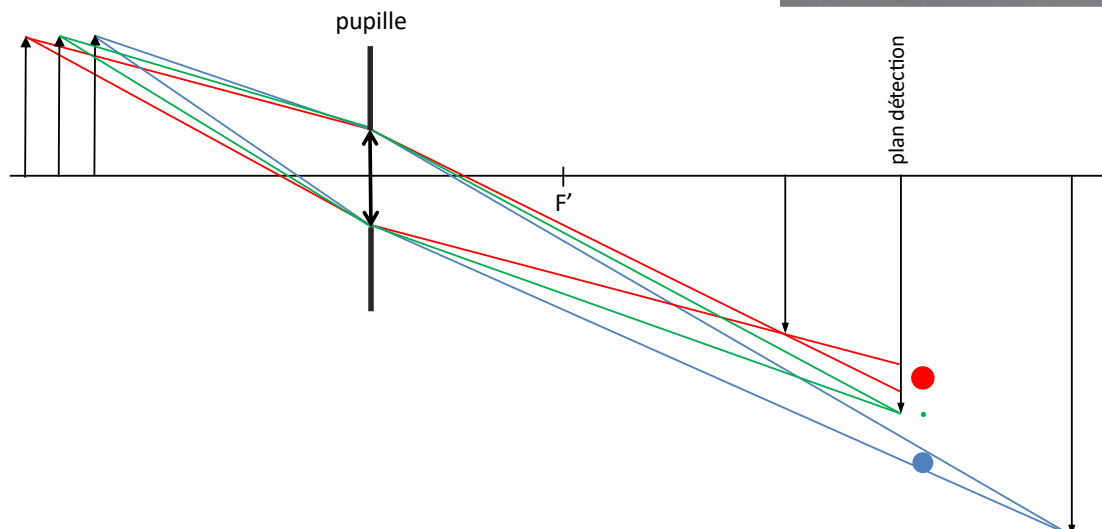
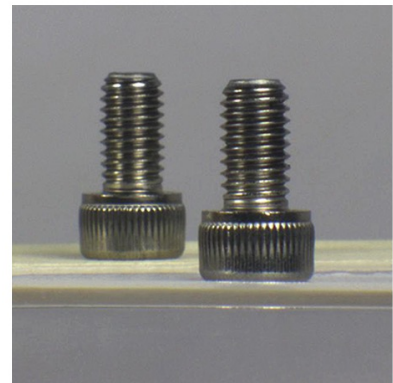
$f' = 135 \text{ mm}$

$f' = 200 \text{ mm}$



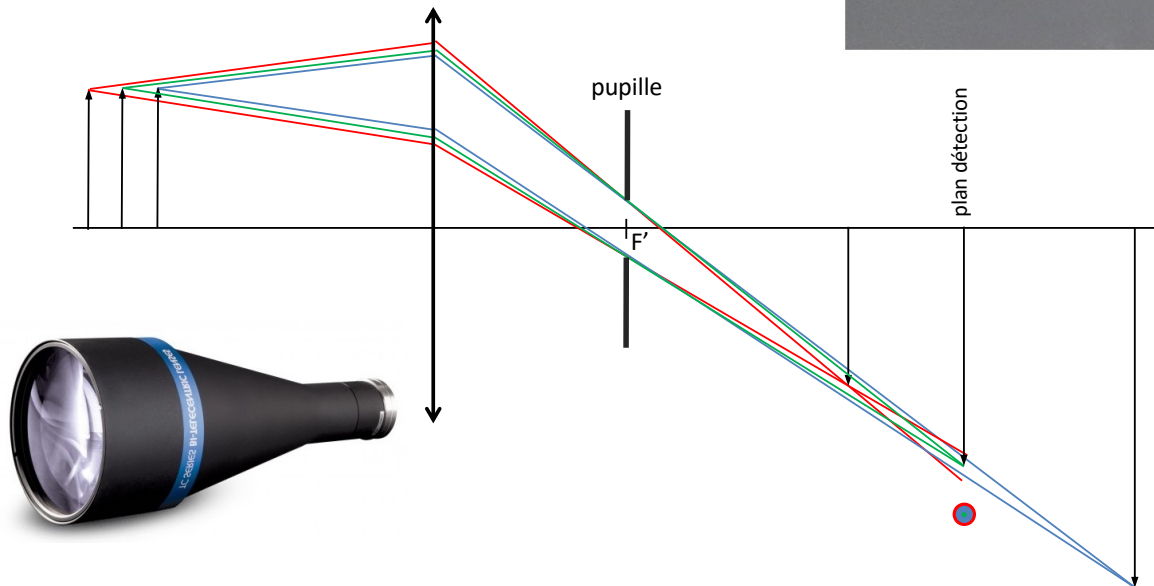
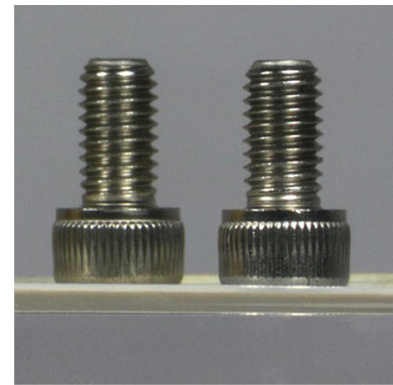
Télécentricité

Dans un système conventionnel, le grandissement varie avec la position de l'objet, ce qui entraîne un effet de parallaxe (erreur de perspective). Le cône de rayons utiles pour chaque point du champ varie également. L'image sera alors déformée dans le plan du détecteur fixe.



Télécentricité

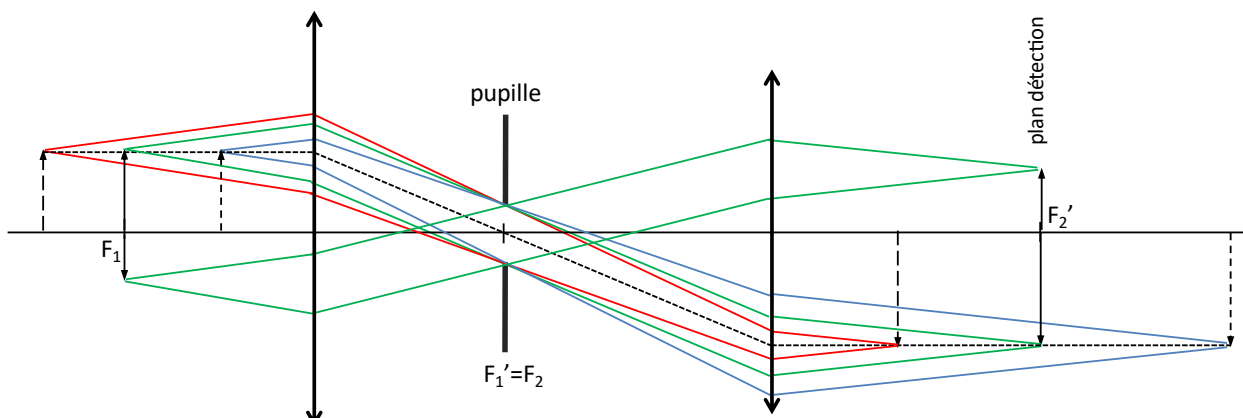
En mettant la pupille d'entrée à l'infini le rayon principal du cône d'ouverture de chaque point du champ reste parallèle à l'axe optique. Bien que le grandissement varie également avec la position, l'image d'un plan en avant ou en arrière du plan conjugué sur le capteur a la même taille apparente.



Télécentricité

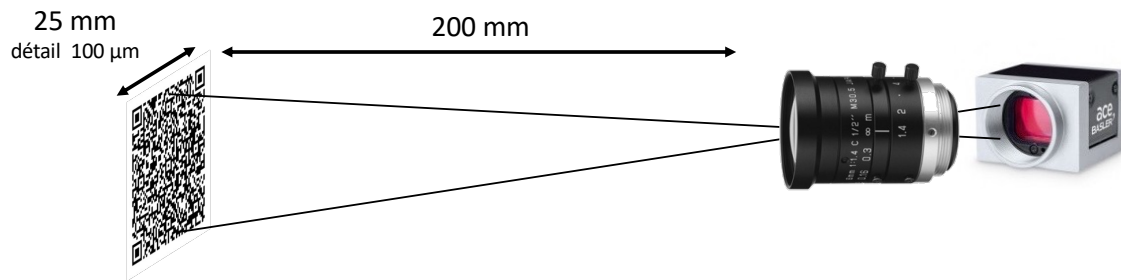
Pour obtenir un grandissement rigoureusement constant en fonction de la position de l'objet sur l'axe, il faut utiliser un système afocal constitué à minima de deux objectifs avec pupilles entrée et sortie à l'infini. Cet objectif est appelé double télécentrique.

Le rayon principal sera donc toujours parallèle à l'axe quel que soit le point dans le champ. L'effet télécentrique image assure que le rayon principal soit toujours parallèle quel que soit le point du champ. Cela minimise toute dépendance à l'angle d'incidence sur les pixels du capteur ou tout autre composant comme les filtres (en particulier les effets photométriques).



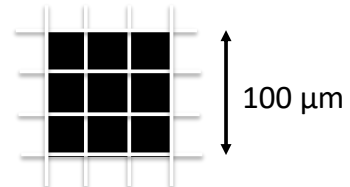
Exercice d'application

Quels objectif et capteur choisir pour visualiser un QR code situé à 200 mm ?



Critère de résolution

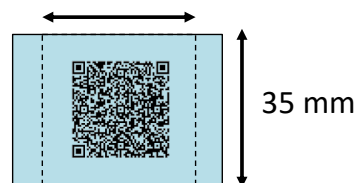
→ 3 pixels par plot soit 1 pixel objet = $100 \mu\text{m} / 3 = 33 \mu\text{m}$



Critère de champ

→ 35 mm de côté

le champ objet doit être un peu plus grand que la zone utile pour faciliter la détection



angle de champ correspondant $\sim \frac{35\text{mm}}{200\text{mm}} \sim 10^\circ$

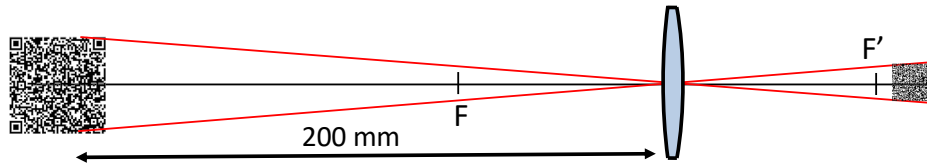
- Prenons un capteur 480 par 640 pixels de $4,8 \mu\text{m}$

→ 480 pixels doivent correspondre à 35 mm soit **un pixel objet de $73 \mu\text{m}$** ❌

- Prenons un capteur 1200 par 1920 pixels de $3,45 \mu\text{m}$

<https://www.edmundoptics.fr/p/basler-ace2-a2a1920-160ucbas-color-usb3-basic-camera/44060/>

→ 1200 pixels doivent correspondre à 35 mm soit **un pixel objet de $30 \mu\text{m}$** ✅



Distance focale de l'objectif

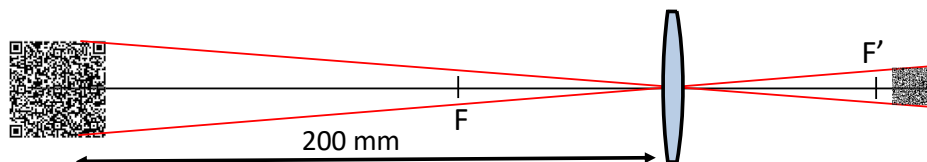
Le grandissement est imposé $g_y = \frac{3,45\mu m \times 1200}{35\text{ mm}} = 0,118$

Le grandissement impose la distance objectif-image

$$g_y = \frac{z'}{z} \rightarrow z' = 0,118 \times 200\text{ mm} = 24\text{ mm}$$

Les distances objet-objectif et objectif-image fixe la distance focale

$$\frac{1}{z'} - \frac{1}{z} = \frac{1}{f'} \rightarrow f' = 21,4\text{ mm}$$



Ouverture de l'objectif

La PSF de l'objectif doit être suffisamment petite pour ne pas dégrader la résolution fixée par les pixels. On peut partir d'une ouverture dans le cas d'un système limité par la diffraction soit,

$$\phi_{PSF} = 2,44\lambda N \lesssim \text{pixel} \rightarrow N \lesssim 2,8 @ \lambda = 500\text{ nm}$$

L'objectif présentera probablement des aberrations mais cela impactera le contraste qu'il faudra avoir supérieur à 20% à la fréquence de l'échantillonnage

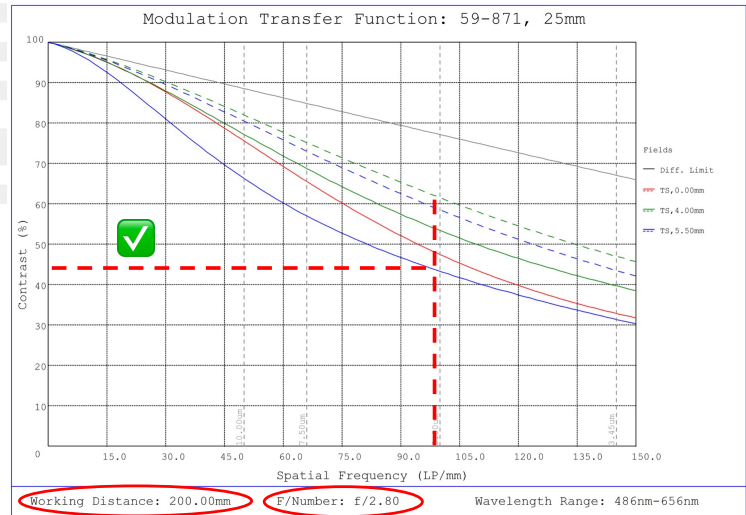
$$f_{\text{échant.}} = \frac{1}{3 \times \text{pixel}} = \frac{1}{3 \times 3,48\mu m} = 97\text{ mm}^{-1}$$

Il faut donc trouver un objectif de focale 25 mm pouvant travailler à une distance de 200 mm et ouvert à $f/2,8$ tel que sa FTM soit supérieur à 20% à 100 mm^{-1} .



www.edmundoptics.fr/p/25mm-c-series-fixed-focal-length-lens/16528/

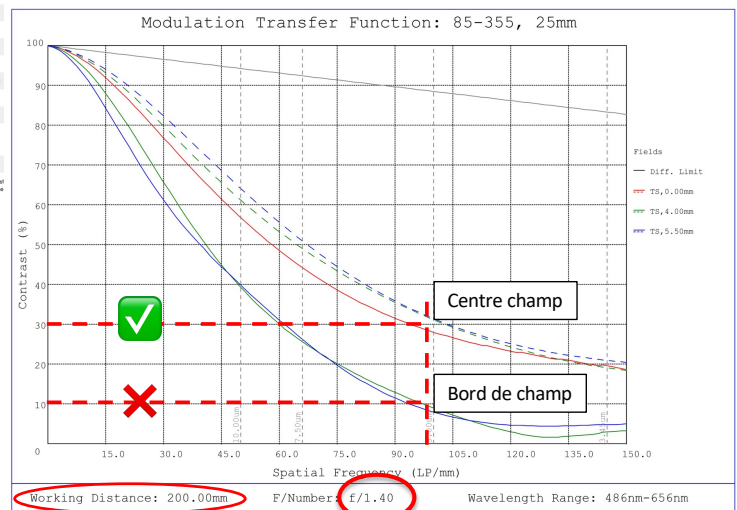
Option Iris:	Variable	Longueur (mm):	30.50
Champs de Vision Horizontal, Capteur de 1/3":	14.4°	Champs de Vision Horizontal, Capteur de 2/3":	19.8°
Filtage Filtre:	M25.5 x 0.50 (Female)	Diamètre Max. (mm):	31
Diamètre Externe (mm):	31.0	Poids (g):	49
Champs de Vision Horizontal, Capteur de 1/3":	10.8°	Max. Protrusion Derrière (mm):	1.3
Cercle Image Max. (mm):	11.00	Ouverture Numérique NA, Côté Objet:	0.0706
Champs de Vision Horizontal, Format de Capteur max.:	19.8°	Nombre d'Éléments (Groupes):	7 (8)
Champs de Vision Horizontal, Capteur de 1/1.8":	16.2°	Champs de Vision Horizontal, Capteur de 1/2.5":	13.1°
Type:	Fixed Focal Length Lens	Distance Focale FL (mm):	25.50
Grossissement Primaire PMAG:	0.243	Taille maximale du capteur:	2/3"
Distance de Travail (mm):	100 ± 10	Monture:	C-Mount
Ouverture (F/#):	f/1.4 - f/9	Traitement:	425 - 675nm BBAR
Spécification du Traitement:	425 - 675nm BBAR	Position de la Pupille d'Entrée (mm):	17.14
Champs de Vision Horizontal, Capteur de 1/4":	8.1°	Plan Principal de l'Espace Objet (mm):	18.34
Plan Principal de l'Espace Image (mm):	-12.43	Champs de Vision, Format de Capteur max.:	Horizontal: 19.8° Vertical: 14.9° Diagonal: 24.4°
Distorsion maximum (%):	0.22	Position de la Pupille de Sortie (mm):	-14.14
Lens Wavelength Range:	VIS	Imaging Lens Type:	Compact Lens



<https://www.edmundoptics.com/p/25mm-f14-ci-series-fixed-focal-length-lens/28275/>

Un objectif moins cher et un peu plus ouvert (intérêt pour le flux)

Info Option:	Fixed	Length (mm):	28.90
Horizontal Field of View, 1/3" Sensor:	25.4mm - 14.5°	Horizontal Field of View, 2/3" Sensor:	35mm - 19.8°
Filter Thread:	M25.5 x 0.50 with required adapter 289-341	Maximum Diameter (mm):	26.5
Weight (g):	28	Horizontal Field of View, 1/3" Sensor:	19mm - 10.9°
Maximum Rear Protrusion (mm):	1.33	Maximum Image Circle (mm):	11.00
Numerical Aperture NA, Object Side:	0.0766	Horizontal Field of View @ Max Sensor Format:	35mm - 19.8°
Number of Elements (Groups):	7 (8)	Horizontal Field of View, 1/1.8" Sensor:	18.5mm - 16.7°
Front Thread:	M22.0 x 0.75 (Male)	Horizontal Field of View, 1/2.5" Sensor:	17.5mm - 15.2°
Type:	Fixed Focal Length Lens	Diameter (mm):	26.50
Focal Length FL (mm):	25.50	Primary Magnification PMAG:	0.269
Maximum Sensor Format:	2/3"	Working Distance (mm):	90 ± 10
Mount:	C-Mount	Aperture (F/#):	f/1.4
Coating:	425 - 675nm BBAR	Coating Specification:	425 - 675nm BBAR
Entrance Pupil Position (mm):	15.89	Horizontal Field of View, 1/4" Sensor:	14.3mm - 8.2°
Object Space Principal Plane (mm):	18.77	Image Space Principal Plane (mm):	-13.44
Field of View of Max Sensor Format:	Horizontal: 33.3mm - 19.8° Vertical: 14.9mm - 14.9° Diagonal: 41.8mm - 24.4°	Maximum Distortion (%):	0.21
Exit Pupil Position (mm):	-15.68	Lens Wavelength Range:	VIS
Imaging Lens Type:	Compact Lens with Fixed Aperture	Storage Temperature (°C):	-20 to +60 For most temperature phases



Réduire l'ouverture

Ressources

Optique géométrique : imagerie et instruments
Optique, une approche expérimentale et pratique
Optique : Fondements et Applications
Optique

Bernard Balland
Sylvain Houard
Jean Philippe Perez
Eugene Hecht

édition INSA
édition de Boeck
édition Dunod
édition Pearsen

Handbook of optical systems (5 volumes)
Modern Optical Engineering

edited by Herbert Gross
Warren J. Smith
Wiley edition
SPIE Press



Vidéos pédagogiques Série RAYON

épisode 1 – Formation des images

http://www.youtube.com/watch?v=OUF5_DJo4rl

épisode 2 – La distance focale

<https://www.youtube.com/watch?v=GIY6Y2TwD0o>

épisode 3 – La qualité des images

<https://www.youtube.com/watch?v=dhmpuCD8iA>

Formulaire

objet de taille y

image de taille y'

$g_y = \frac{y'}{y} = \frac{p'}{p} = -\frac{z'}{f'} = -\frac{f}{z}$ $g_z = (g_y)^2$

$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f}$ $z \times z' = f \times f'$

objet au foyer de taille apparente θ

image au foyer de taille $y' \approx f' \times \theta$

Nombre d'ouverture $N = \frac{f'}{\phi_{pupille}}$

Ouverture Numérique objet $= n \times \sin \alpha$
(α angle axe – bord pupille entrée PE)

Ouverture Numérique image $= n' \times \sin \alpha'$
(α' angle axe – bord pupille sortie PS)

Tache de diffraction image

$\phi_{diff} = \frac{1,22\lambda}{ON_{image}}$

si $\propto -f'$
 $\phi_{diff} = 2,44\lambda N$

Profondeur de champ $dz \approx \frac{2N \times pixel}{g_y^2} \approx 2N \times pixel \times \left(\frac{p}{f'}\right)^2$

foyer objet F foyer image F'

f distance focale f'

tirage $\sim f'$
systèmes minces

H H' f'

F F'

tirage $\neq f'$
systèmes épais

Glossaire Fr-En

angle d'incidence	incidence angle	montage optique	optical set-up
aplanétique	aplanetic	nombre d'ouverture	F-value, F-number, focal ratio
axe optique	optical axis	objectif grand angle	wide angle lens
champ / champ d'observation	field / field of view	objet	object
conception optique	lens design	oculaire	eyepiece
défaut de mise au point	defocusing	Ouverture	aperture (stop)
détecteur	detector	ouverture numérique	numerical aperture
diaphragme	stop	plan focal	focal plane
dioptre	refracting surface	points conjugués	conjugated points
distance focale	focal length	profondeur de champ	depth of field
distance frontale	working distance	puissance (vergence)	power (of a lens)
faisceau	beam	pupille d'entrée	entrance pupil
figure/tache de diffraction	diffraction pattern	pupille de sortie	exit pupil
flou (nom) / flou (adjectif)	blur/blurred	rayon d'ouverture centre champ - bord pupille	axial ray
foyer	focus, focal point	rayon de champ bord champ - centre pupille	chief ray
grandissement	magnification	rayon de courbure	radius of curvature
grossissement	magnifying power	rayon lumineux	light ray
hors axe	off-axis	rayon oblique (hors plan méridien)	skew ray
image réelle	real image	rayon paraxial	paraxial ray
image virtuelle	virtual image	réflexion	reflection
incidence rasante	grazing incidence	réponse percutielle	point spread function (PSF)
lame à faces parallèles	parallel plate	revêtement (couche mince)	coating
lentille convergente	converging lens	silice	(fused) silica
lentille divergente	diverging lens	source ponctuelle	point source
lentille, objectif	lens	surface rugueuse	rough surface
longueur d'onde	wavelength	tache d'Airy	Airy pattern
loupe	magnifying glass	Téléobjectif	telephoto lens
lumière (image) parasite	spurious light/image	Télescope	reflecting telescope
lumière parasite	stray light	tirage	(free) working distance
lunette, télescope	telescope	tirage (du foyer)	back focal distance, back focus
mettre au point / focalisation	to focus / focusing	trou	pinhole
miroir	mirror	vignettage, œil de chat	vignetting, cat's eye