LES TELESCOPES

On a l'habitude d'appeler lunettes les instruments avec une lentille pour objectif, et télescopes les instruments à miroir. Un terme plus juste et utilisé internationalement est "Réfracteur" pour la lunette et "Réflecteur" pour le télescope.
Dans tous les cas le but est de collecter la lumière sur tout l'objectif pour la concentrer dans le plan focal pour obtenir une image.

Les Problèmes d'optique

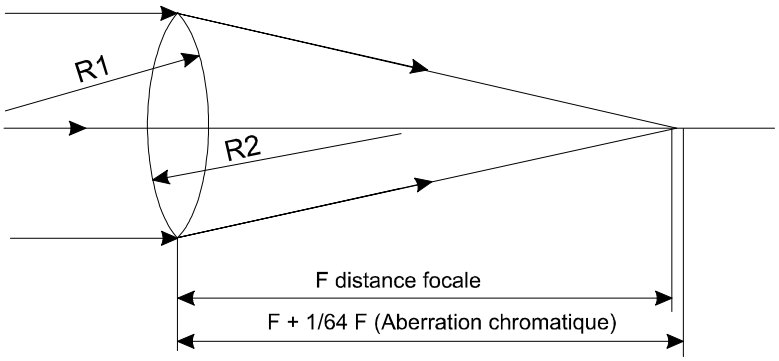
La première lunette avec oculaire divergent utilisée par Galilée vers 1610 avait un objectif de 2 cm de diamètre, le maximum réalisé est 1,02 m à Yerkes avec 19 m de focale.

En théorie, on va concentrer l'image dans le plan focal de la lentille, mais ceci n'est qu'une approximation qui n'est valable que pour un très faible champ ou une grande distance focale par rapport au diamètre de l'objectif, car en général l'image d'une source ponctuelle n'est pas un point mais une tache due à l'aberration géométrique à laquelle s'ajoute l'aberration chromatique, le système n'est pas stygmatique. C'est cela que l'on s'attache à corriger.

L'aberration chromatique

Une lentille est un disque de verre limité par 2 surfaces sphériques de rayons R1 et R2
La distance focale est définie par: $1/F = (n-1)\,[1/R2-1/R1] = (n-1)\,C$
C étant la courbure totale

On voit que 1/F et donc F varie avec l'indice de réfraction n, fonction de la longueur d'onde. Ainsi, entre les raies rouge et bleue de l'Hydrogène prises en référence, la distance focale varie de 1/64 ($\nu = 64$)pour des verres courants appelés "Crown Glass". (Fig 1)
Pour une lentille de 64 mm de diamètre et une focale de 1 m, la tache d'aberration chromatique fait 1 mm de diamètre pour ces 2 raies.
On ne peut diminuer cette aberration qu'en augmentant la distance focale, c'était la solution choisie au 17^{e} siècle, mais l'image est très agrandie et très peu lumineuse.



On s'est ensuite orienté vers les objectifs achromatiques, notamment avec les verres au plomb appelés "Flint Glass" ($\nu = 36$), donc d'aberration encore plus importante.
Mais en combinant une lentille crown glass convergente avec une lentille flint glass divergente, on peut compenser cette aberration. Par le calcul on arrive à trouver des combinaisons qui réduisent fortement l'aberration chromatique, bien qu'il subsiste un spectre secondaire.
Pour un objectif de 1 m de diamètre et une distance focale de 20m (le maximum en service), l'aberration entre le rouge et le bleu fait encore 0,5 mm. C'est pourquoi on s'est orienté vers les réflecteurs.

L'aberration géométrique

On considère une lentille de diamètre = 2h, de distance focale = F, et un rayon incident sous l'angle θ.
Ainsi que le coefficient $\rho = h/F$ (Rappel: ouverture = F/D ou F/2h)
Si ρ et θ sont petits, l'image du point peut être considérée comme ponctuelle (approximation de Gauss), cas d'une petite lentille avec grande distance focale.
Si ρ est important (F/D petit), et θ grand (grand champ), les aberrations deviennent rapidement très importantes.

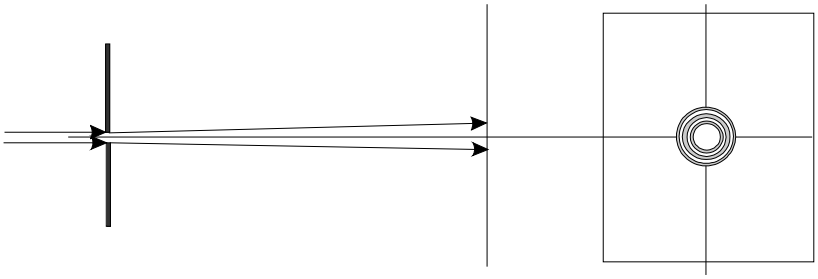
Il y a 4 types d'aberrations géométriques:

- L'aberration sphérique qui varie comme $\rho 3$. En raison de la forme sphérique des lentilles, les rayons ne se concentrent pas tous au même point. L'aberration se manifeste sur toute la surface, si elle est supprimée, le système est **stigmatique**.
- Pour les 3 suivantes, l'aberration est plus importante sur les bords, puisqu'elle est fonction de l'angle d'incidence.
- Le coma qui varie comme $\rho^2\theta$, l'image d'un faisceau donne une aigrette. Si l'aberration est supprimée, le système est **aplanétique**.
- L'aberration d'astigmatisme qui varie comme $\rho\theta^2$ se manifeste pour les faisceaux minces très incidents, les images sont ponctuelles mais se répartissent sur une sphère. Si l'aberration est supprimée, le système est **anastigmate**.
- L'aberration de distorsion qui varie comme $\theta 3$ peut exister même pour un faisceau à un seul rayon. Elle est peu gênante en astronomie.

Les aberrations Sphérique et d'astigmatisme ont une distribution symétrique dans la tache.
L'aberration de coma n'a pas une répartition symétrique (aigrette). Il faut donc à tout prix l'éviter pour l'astronomie de position car il n'y a pas de centre défini.

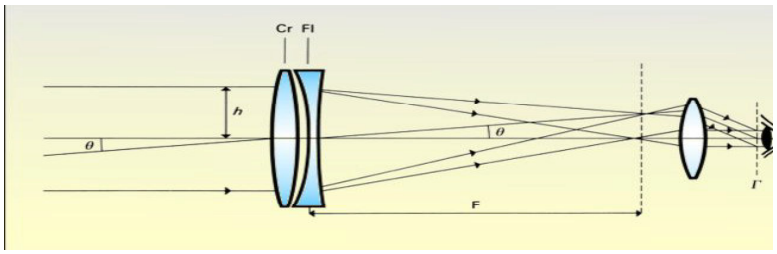
La diffraction

On a considéré jusque là que la lumière se propage en ligne droite. Mais d'après le principe de Huygens, l'image des rayons passant par un trou très petit est une figure de diffraction non ponctuelle.



Donc même en l'absence d'aberrations, l'image d'une source ponctuelle aura une certaine surface qui se caractérise par une tache brillante entourée par des cercles concentriques alternativement sombres et brillants qui s'éloignent en décroissant et dont le diamètre dépend de la longueur d'onde
Ceci conduit à la notion de pouvoir séparateur d'un instrument, car si 2 taches se superposent en partie, on ne peut les séparer. On considère que l'écart de 2 images doit être supérieur à 0,85 fois le rayon du premier anneau sombre, pour la raie verte, cela conduit à l'expression classique du pouvoir séparateur de : **12"/D** (D diamètre de l'objectif en cm).
Un instrument de diamètre 12 cm doit donc théoriquement séparer 2 étoiles écartées de 1" d'angle (soit 1mm vu à 206m). Mais dans la pratique, on atteint rapidement une limite plus élevée.

Les réfracteurs (Lunettes)



L'aberration chromatique peut être fortement réduite par l'utilisation de deux lentilles comme vu précédemment, cela laisse encore la possibilité de faire varier les rayons de courbure des lentilles, il reste encore deux variables.
On peut supprimer l'aberration sphérique grâce à l'une de ces variables.

Il reste enfin la possibilité soit de supprimer le coma, soit d'égaliser les 2 rayons de courbure en contact pour pouvoir coller ensemble les deux lentilles, ce qui est très intéressant pour les petits objectifs.
Tous les objectifs à doublet sont de qualité équivalente quant à l'astigmatisme et à la courbure de champ loin de l'axe, ce qui ne gêne pas beaucoup l'observation.
La distorsion est négligeable.
Il existe 3 réfracteurs de diamètre > à 80 cm: Yerkes (102cm), Lick USA, et Meudon; et une trentaine de réfracteurs de diamètre > à 60cm.

On a aussi construit des réfracteurs à triplets, ou "Astrographes", 2 éléments convergents encadrent une lentille divergente, on peut ainsi corriger théoriquement les aberrations chromatiques et géométriques du 3^{e} ordre. Mais cette combinaison est très difficile à réaliser et à régler. Quelques instruments ont été construits atteignant 50 cm de diamètre pour une distance focale de 3,8 m, donc un grand champ, mais ils ont été supplantés par les télescopes de Schmidt.

On utilise 2 lentilles, un crown et un flint dont on peut faire varier les rayons de courbure pour réduire l'aberration chromatique. (lunettes achromatiques)
Les lunettes de qualité sont réalisées avec des verres Fluorite ou ED (lunettes apochromatiques)

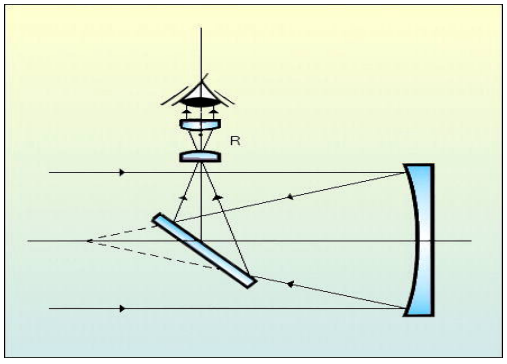
Les réflecteurs (Télescopes)

Les avantages sont:
- chromatisme absolu,
- on n'a à polir qu'une seule face au lieu de 4,
- et l'homogénéité du verre n'est pas importante puisque non traversé par les rayons.

Le plus simple est le miroir sphérique, mais il a une aberration sphérique importante pour un objet situé à l'infini. On réalise donc un miroir parabolique, pas trop compliqué à réaliser, et qui est rigoureusement stigmatique.
Cependant, surtout pour des F/D faibles afin de réduire l'encombrement, le coma et l'astigmatisme sont importants, et le champ utilisable est donc limité. Malgré cela ce système est très répandu.

Télescope de Newton

Le premier télescope fut réalisé par Isaac Newton avec un miroir en bronze blanc de 37 mm de diamètre et 16 cm de focale. Herschel réalisa le plus grand avec 1,20 M de diamètre. Le bronze fut ensuite remplacé par le verre, réalisation de Léon Foucault.
Le faisceau réfléchi est renvoyé sur le côté du tube par un miroir incliné à 45° maintenu par 3 pattes (l'araignée) qui permettent un réglage . Pour les grands diamètres > 4 m, l'observateur et l'instrumentation peuvent être suspendus sur une nacelle au foyer primaire.
Inconvénients, le tube est ouvert et le miroir est exposé aux poussières, une certaine turbulence de l'air peut aussi se produire à l'intérieur du tube.

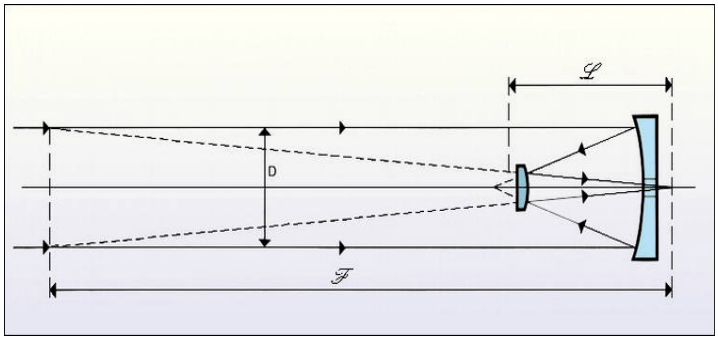


Télescope Dobson

L'optique est la même que celle du Newton, il diffère par le montage mécanique très simple en monture azimutale, et on privilégie le diamètre au détriment de la qualité du miroir pour abaisser le prix. Plus adapté à l'observation du ciel profond.

Télescope Cassegrain

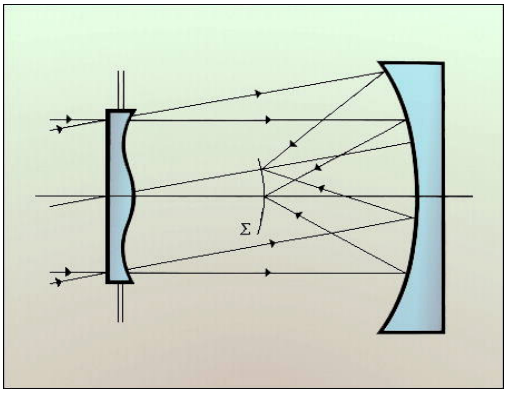
Il existe une autre possibilité. Si on envoie le faisceau sur un miroir secondaire hyperbolique de même axe que le miroir primaire parabolique, on forme l'image légèrement en arrière de ce dernier qui est percé d'un trou, on obtient ainsi un tube beaucoup plus court ou des distances focales plus longues pour un encombrement réduit.



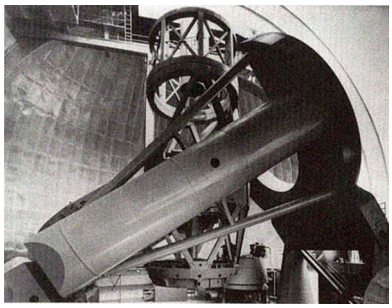
Cependant pour les très grands diamètres, et un champ de l'ordre de 1°, le coma et l'astigmatisme deviennent trop importants sur les bords du champ.

Télescope de Schmidt (Système catadioptrique)

Bernard Schmidt en 1932 à Hambourg a imaginé une solution ingénieuse et simple pour obtenir un instrument de grand diamètre, grand champ et courte distance focale.
Il utilise un miroir sphérique et l'originalité réside dans le fait que l'entrée est diaphragmée par une ouverture dont le centre coïncide avec le centre de courbure du miroir. La seule aberration est l'aberration sphérique qui est corrigée grâce à une lame de Schmidt placée sur le diaphragme. Cette lame comporte une face plane et une face creusée en partie moyenne qui est convergente au centre et divergente à la périphérie, l'ensemble est stigmatique.

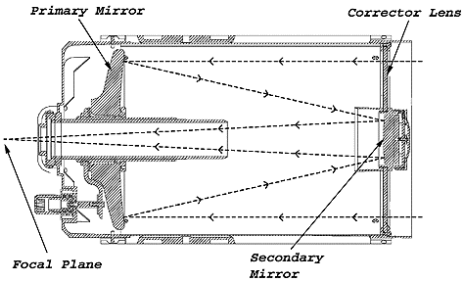


Le lieu image des points est une sphère et non un plan. Il ne présente aucune aberration, excepté un peu d'aberration chromatique, due à la traversée de la lame.
On utilise des détecteurs ou films suffisamment flexibles pour s'adapter à la surface sphérique.
Le plus grand est celui du Mont Palomar, avec un diamètre utile de 122 cm , une distance focale de 3,07 m et un champ de 6° x 6°. Il a servi à réaliser le premier atlas photographique moderne du ciel.



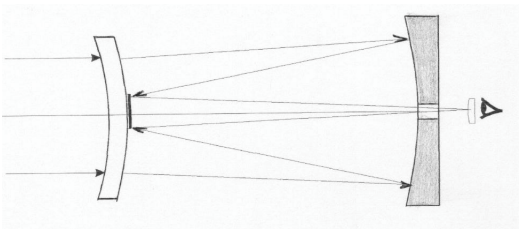
Télescope Schmidt Cassegrain

C'est une combinaison du système Cassegrain auquel on a appliqué une modification type Schmidt.
Le miroir est sphérique, une lame de Schmidt est disposée à l'entrée du tube pour corriger l'aberration sphérique. Le faisceau est renvoyé par un miroir hyperbolique, et l'image formée derrière le miroir primaire percé.
Cette solution est très utilisée pour les télescopes grand public (Celestron, Meade, …).
Le miroir sphérique est plus facile à réaliser, l'appareil est très compact et relativement léger, le tube est fermé protégeant le miroir. Les aberrations chromatique et géométriques sont limitées et peu gênantes.



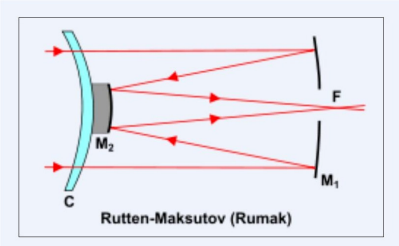
Télescope Maksutov-Cassegrain

Ce système diffère du Schmidt Cassegrain dans le fait principalement que la lame d'entrée est sphérique et le miroir secondaire réglable est remplacé par une surface réfléchissante déposée sur la face intérieure de la lame corrective sphérique à l'entrée du tube. Ce système est ainsi plus stable et son alignement craint moins de se dérégler, il permet aussi de plus grands grossissements, avec un f/d > à 15.
Par contre la lame correctrice shérique étant plus épaisse, il est plus lourd et les diamètres sont généralement limités à 180 mm et maximum 200.



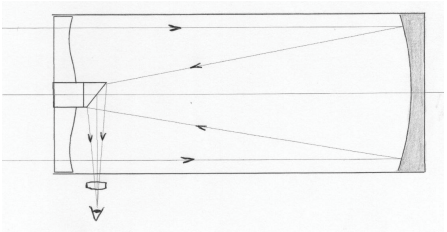
Variante Rutten Maksutov (Rumak)

La conception du Mak est très rigide car le secondaire épouse la courbure de la lame sphérique.
Dans le dessin du Rumak le secondaire est indépendant du primaire, on a donc la possibilité de jouer sur sa courbure.



Nota : Il existe aussi des Newton-Maksutov

Télescope Schmidt Newtonien



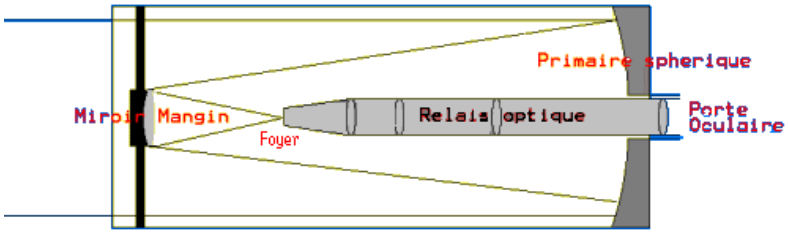
Ce système est maintenant utilisé sur des télescopes pour amateurs, il combine la lame corrective de fermeture avec la vision latérale du Newton, pour obtenir des appareils moins chers que les Schmidt-Cassegrain.

Ritchey Chretien RC

C'est un télescope Cassagrain dont le miroir primaire est lègèrement hyperbolique et le secondaire hyperbolique aussi. Le résultat est une image sans défaut de coma. C'est la solution utilisée pour les télescopes d'imagerie et de mesure (ex Hubble). Le principal défaut est la difficulté de réalisation et le prix qui en découle, mais aussi une obstruction un peu plus importante du miroir secondaire.

Télescope à relais

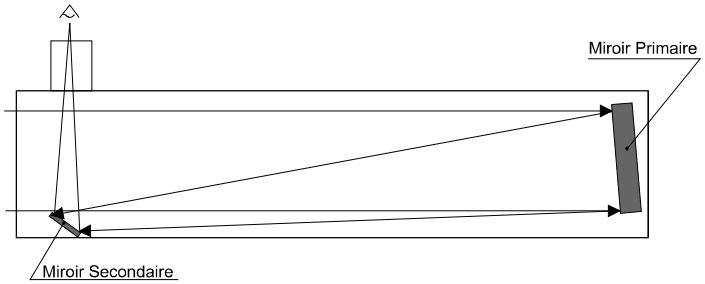
Sur les dessins de Dilworth et de Paramyothi



Caractérisques :
- Tube ouvert
- Miroir primaire sphérique et secondaire presque plan
- Le point focal se situe à l'intérieur du tube, et il est repris par un relais optique composé de 3 à 4 lentilles qui rejette le point focal en arrière du tube.

Avantages :
- Assez courte distance focale, donc grand champ (1°) f= 7 à 8
- Pas de lumière parasite dans le champ
- Peu de vignetage
- Légèreté : le 160 mm Clavius pèse 5 Kg

Télescope Hors Axe

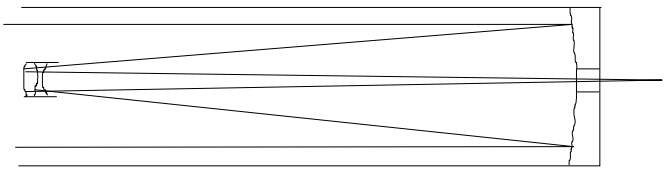


Télescope Hors Axe

Réalisé par DGM Optics, l'idée est de rejeter le miroir secondaire hors du passage des rayons lumineux, mais le miroir primaire est paraboloïde asymétrique.
Avantage: il possède la même clarté qu'un réfracteur, mais le miroir primaire est plus difficile à réaliser.

Télescope Klevtsov

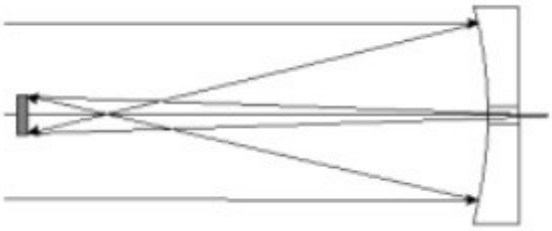
Utilise une base comme SCT avec miroir primaire sphérique, mais sans lame de correction à l'entrée. La correction est effectuée par un secondaire à 2 éléments de type "Mangin", constitué de 2 lentilles dont la 2^{e} située près de l'entrée est aluminisée. Les rayons sont réfléchis et corrigés à travers les 2 lentilles et renvoyés a travers le primaire comme pour un SCT ou MAK



Il a les avantages du Newton: pas de condensation et mise en température plus rapide, mais inconvénient du miroir mal protégé et obstruction importante du secondaire.

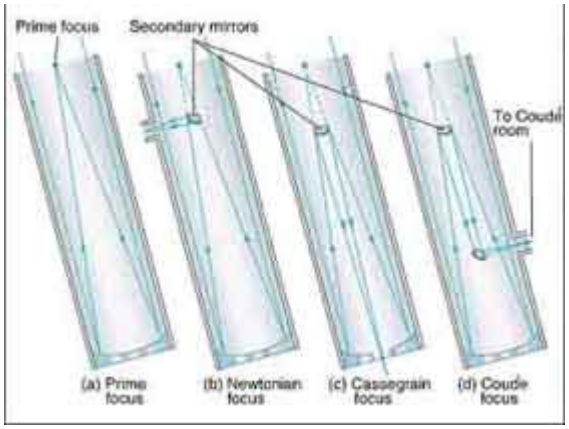
Télescope Gregorien

Ce dessin peut s'appliquer à différents types de télescopes. On place le miroir secondaire sphérique au delà du plan focal du primaire. Cette modification allonge le tube, mais elle a l'avantage de permettre d'observer une image non inversée.

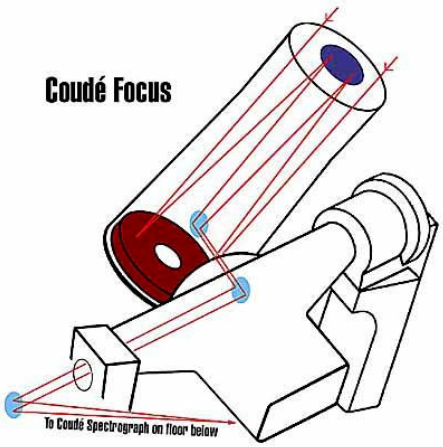


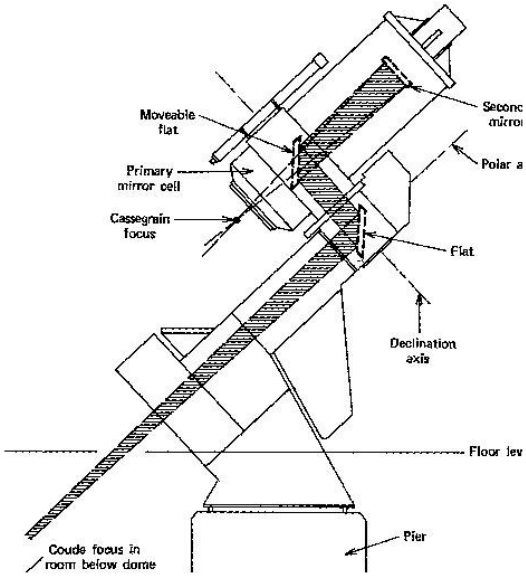
Coudé Focus

L'image ci-dessous compare les différentes façons de renvoyer le point focal.



Dans le cas du coudé focus, on renvoie le point focal sur le côté, ce qui permet de le transmettre à travers la monture vers un poste d'observation fixe. Ce système est surtout utilisé avec les grands diamètres à monture importante et pour diriger vers un matériel important d'observation comme les spectrographes.
La configuration permet souvent les deux types de focalisation: Cassegrain et coudé par interposition du miroir tertiaire amovible avec une focale beaucoup plus longue.

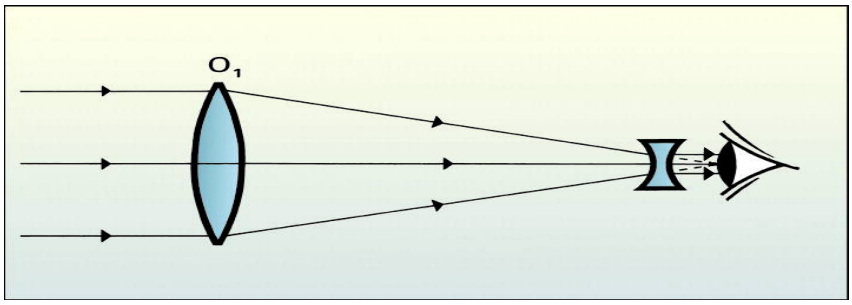




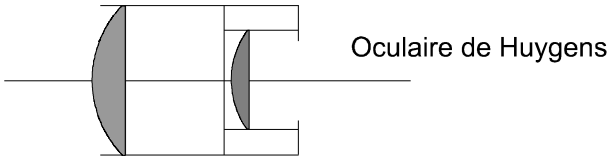
Inconvénient: l'image tourne pendant l'observation et il faut donc corriger cette rotation comme dans le cas d'une monture azimutale.

Observation visuelle et Occulaires

Au tout début, on formait une image réelle dans le plan focal de l'objectif, que l'on observait avec une loupe (encore utilisé pour l'observation du soleil). Mais on s'aperçut vite qu'on peut former une nouvelle image à l'infini avec une lentille divergente placée avant le plan focal, réalisé par Porta en 1585 et utilisé par Galilée.



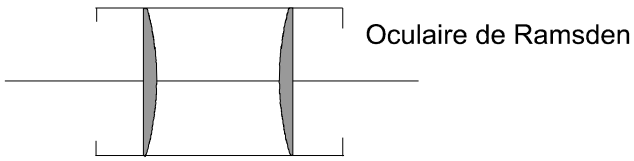
Milieu 17^{e} siècle, Huygens invente l'oculaire convergent qui est resté jusqu'à maintenant, utilisé sur les lunettes car il est économique, mais de résultat médiocre. L'image se forme entre les 2 lentilles.



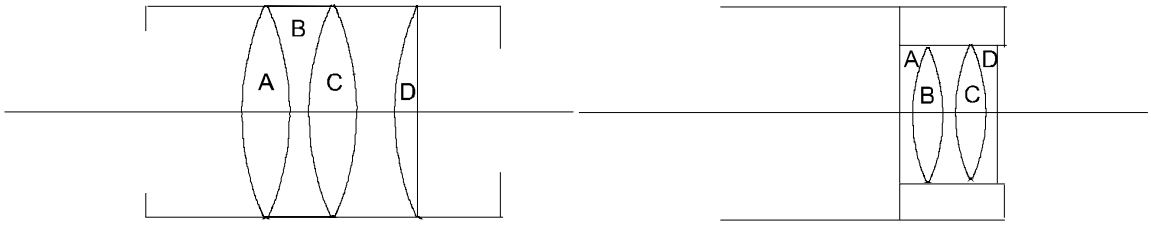
Il faut considérer 3 caractéristiques: Clarté, Grossissement et Champ.
Si les plans focaux de l'objectif et de l'oculaire, sont confondus, on observe à l'infini, comme à l'œil nu, mais avec un grossissement qui est égal au rapport des distances focales F/f.
La pupille de l'œil est placée sur l'image que l'oculaire forme de l'objectif, le diamètre oculaire est le diamètre de l'objectif divisé par le grossissement, il doit être au maximum de 6 mm environ pour couvrir la totalité de la pupille. Ceci détermine le grossissement équipupillaire, par ex. 33 pour un objectif de 200 mm.

Pour l'observation des étoiles, la clarté de l'instrument est alors définie comme le rapport de la surface de l'objectif à la surface de la pupille, donc au carré du grossissement équipupillaire, environ 1000 dans l'exemple précédent.

Pour l'observation des objets étendus (planètes), la clarté est définie par le carré du rapport du grossissement équipupillaire au grossissement effectif.
Mais pour profiter du pouvoir de résolution de l'instrument, il faut que le grossissement soit assez élevé pour que en le multipliant par 12"/D, on obtienne un angle supérieur au pouvoir résolvant de l'œil qui est de 60" environ, soit environ le triple du grossissement équipupillaire (soit un grossissement de 100 dans le cas précédent).
Le champ observable dépend de l'oculaire.
Avec une lentille simple on a des aberrations importantes.
Il existe de nombreux types d'oculaires, le plus courant est celui de Ramsden, formé de 2 lentilles identiques séparées par une distance égale à leur distance focale, la première étant placée dans le plan focal de l'objectif, son champ est limité à 30/35°.



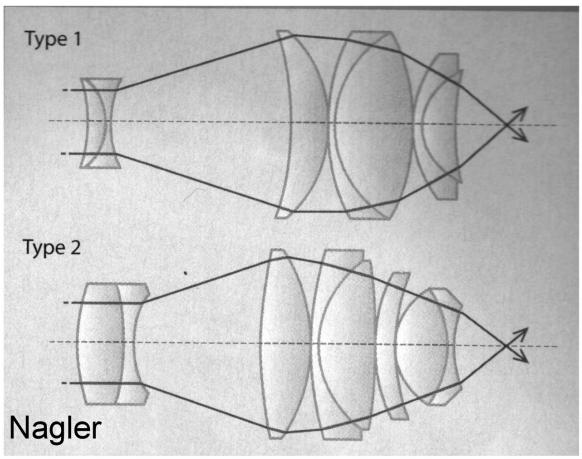
Une variante améliorée est l'oculaire de Kellner, mieux adapté aux focales élevées.
On trouve maintenant de nombreux types d'oculaires dont la clarté et le champ dépendent beaucoup du nombre de lentilles.



Oculaire orthoscopique (4 lentilles)

Oculaire Plössl (4 lentilles)

Parmi les plus évolués on trouve les oculaires Nagler ou équivalents à 7 ou 8 lentilles, donnant un angle d'observation supérieur à 80°



L'observation photographique

On place le film dans le plan focal de l'objectif. On ne parle plus de grossissement mais d'échelle, de distance angulaire qui est égale au rapport de l'écartement sur le film à la distance focale de l'objectif, en radian.
Chaque image d'une source ponctuelle est une tache de grains d'argent dont le diamètre dépend de l'éclat.
Mais le rendement est mauvais, il faut 1000 photons pour impressionner un grain d'argent, alors que la rétine réagit à 10 photons.
On a commencé à remédier à cela avec la caméra électronique qui utilise le phénomène photo électrique , on atteint alors une sensibilité 50 fois plus grande, mais c'est un équipement lourd.
Progressivement on est arrivé aux CCD (Charge coupled device), une mosaïque de pixels de 7 à 30 microns qui stockent les photons et sont pilotés par ordinateur.

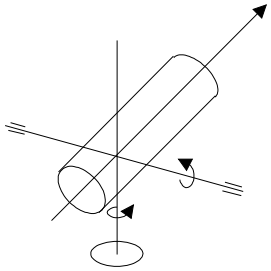
La Mécanique

L'ensemble mécanique de support et de guidage doit assurer la fixité de l'image sur le récepteur, ou déterminer l'instant de passage d'un objet dans une position déterminée, donc dans un système de coordonnées.
Le système de référence le plus immédiat est celui du théodolite avec un axe horizontal perpendiculaire à l'axe de la lunette, et un axe vertical. On peut alors pointer une direction quelconque du ciel, mais les coordonnées varient avec le mouvement diurne du ciel. C'est la monture azimutale.
Si l'axe horizontal est orienté est-ouest on a une méridienne, la lunette balaie le plan méridien et permet de repérer l'instant du passage d'une étoile au méridien, et de déterminer l'écart angulaire entre les étoiles avec pour origine le point Vernal (point Gamma), direction du soleil à l'équinoxe de printemps. Cette mesure est maintenant faite automatiquement pour plus de précision.

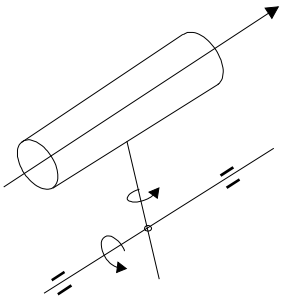
La monture azimutale est à éviter pour la photo, car l'image tourne et il faut corriger cette rotation pour les longues poses.
Pour simplifier le suivi du mouvement diurne, on a construit depuis le 17^{e} siècle des montures équatoriales de façon que l'axe vertical soit orienté vers le pôle céleste. On ne fait plus tourner que l'axe polaire uniformément pour suivre le mouvement diurne.
La principale difficulté est de construire des ensembles suffisamment rigides, et pouvant s'orienter sans zone morte dans tout le ciel visible.

De nombreux systèmes ont été imaginés, on peut les classer en 4 catégories:
- Monture symétrique ou non symétrique
- Monture Anglaise ou monture Allemande.

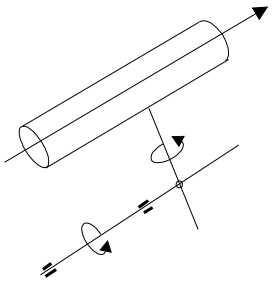
- Monture symétrique: Le point de rencontre de l'axe optique et de l'axe de déclinaison se trouve sur l'axe horaire (les 3 axes sont concourants Ex: monture azimutale). Sinon elle est non symétrique.



- Monture Anglaise: l'axe de déclinaison coupe l'axe horaire entre les 2 paliers qui supportent ce dernier.



- Monture Allemande: l'axe de déclinaison coupe l'axe horaire en dehors des paliers.



La monture à fourche est une monture Allemande symétrique.
La monture à berceau est une monture Anglaise symétrique.
Les grands réfracteurs fin 19^{e} siècle sont souvent sur monture Allemande simple.
Les grands réflecteurs sont souvent sur des montures à fourche (Kitt Peak), ou à berceau. Le Mont Palomar est monté sur une monture à berceau aménagée pour pouvoir pointer le Nord.
Actuellement on revient aux montures azimutales pilotées par ordinateurs qui permettent de maîtriser le pilotage des mouvements qui ne sont plus uniformes, y compris pour les télescopes amateurs.

On a aussi essayé divers systèmes permettant d'avoir un poste d'observation et d'instrumentation fixe par rapport au mouvement diurne, permettant d'avoir une image fixe lors du suivi stellaire, par des jeux de miroirs renvoyant le faisceau lumineux à travers les axes. On distingue, sans entrer dans les détails de construction:

- Les sidérostats: l'image tourne autour d'un point central.
- Les cœlostats: l'image est complètement fixe.

Problèmes de construction des grands télescopes

On sait réaliser des objectifs avec une précision proche de la théorie, on sait polir le verre avec un précision de 1/100^{e} de micromètre (10nm ou 100 Å) soit 1/50 λ de la raie verte.
Les montages mécaniques doivent compenser les déformations thermiques et de pesanteur. A ce point de vue, la monture azimutale est la meilleure. La compensation dans l'axe optique se fait par un ensemble de vérins. Dans le sens perpendiculaire, la compensation est plus délicate.

Les derniers grands télescopes utilisent des optiques actives et adaptatives.
L'optique active consiste à corriger les déformations du matériel, miroir et monture, pendant leur déplacement grace à une compensation à travers des ordinateurs.
L'optique adaptative consiste à corriger la turbulence de la couche d'air. Un rayon laser mesure 100 fois par seconde cette turbulence et commande une correction par ordinateur.

On obtient ainsi des images 10 fois plus nettes.