



Les Instruments de l'Astronomie

Généralités

L'œil, la lunette astronomique, les jumelles,
les télescopes, les radio-télescopes,
les télescopes dans l'espace,
les montures d'instruments astronomiques,
les oculaires et les grossissements,
la lumière et les filtres, l'astrophotographie,
Iconographie



Les instruments de l'astronomie

I Généralités sur l'optique

L'**optique** est la branche de la physique qui traite de la lumière et de ses propriétés, du rayonnement électromagnétique, de la vision ainsi que les systèmes utilisant ou émettant de la lumière. Du fait de ses propriétés ondulatoires, le domaine de la lumière peut couvrir le lointain UV jusqu'au lointain IR en passant par les longueurs d'onde visibles. Ces propriétés recouvrent alors le domaine des ondes radio, micro-ondes, des rayons X et des radiations électromagnétiques. Historiquement, l'optique, apparaît dès l'Antiquité, puis est développée par les érudits musulmans dont des Perses. Elle est d'abord géométrique. Ibn al-Haytham (965-1039), scientifique perse, connu par les occidentaux sous le nom d'Alhazen est considéré comme le père de l'optique moderne, de la physique expérimentale et de la méthode scientifique. Une traduction latine d'une partie de ses travaux, le Traité d'optique, a exercé une grande influence sur la science occidentale.

L'**optique géométrique** propose une analyse de la propagation de la lumière basée sur des principes simples : la propagation rectiligne et le retour inverse. Elle a pu expliquer les phénomènes de la réflexion et de la réfraction. Elle s'est perfectionnée jusqu'au XVIII^e siècle, où la découverte de nouveaux phénomènes, tels que la déformation de la lumière au voisinage d'obstacles ou le dédoublement de la lumière lors de la traversée de certains cristaux, a conduit au XIX^e siècle au développement de l'optique physique ou ondulatoire.

L'**optique physique** considère la lumière comme une onde; elle prend en compte les phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation.

L'**optique quantique**. Au début du XX^e siècle les théories d'Einstein sur la nature corpusculaire de la lumière donneront naissance au photon et à l'optique quantique. Les physiciens sont alors contraints d'admettre que la lumière présente à la fois les propriétés d'une onde et d'un corpuscule. À partir de là, Louis de Broglie considère, au travers de la mécanique ondulatoire, que si le photon peut se comporter comme un corpuscule, alors, à l'inverse, les corpuscules tels que les électrons ou les protons peuvent se comporter comme des ondes.

Notre but ici n'est pas de développer un cours de physique qui serait à la fois rébarbatif et complexe, en exposant la grande quantité d'équations et de formules mathématiques qui sont nombreuses dans l'étude approfondie de l'optique. Si vous avez besoin ou envie d'en savoir plus sur l'optique, nous vous conseillons de vous procurer des ouvrages spécialisés adaptés à la connaissance de cette discipline.

Dans l'optique appliquée à l'astronomie, vous avez essentiellement besoin de connaître les différentes formes de lentilles et leur effet sur le passage de la lumière, ainsi que quelques autres notions. Vous remarquerez que les lentilles convergentes sont plus épaisses au centre que sur les bords, alors que c'est le contraire pour les lentilles divergentes. Sommairement, une lentille convergente, utilisée seule, va avoir tendance à grossir ce que l'on regarde, une lentille divergente, utilisée seule, va le réduire.

Lentilles convergentes :



Lentille biconvexe



Ménisque convergent



Lentille plan-convexe

Lentilles divergentes :



Lentille biconcave



Ménisque divergent



Lentille plan-concave

II L'œil

Quand on pose la question à des visiteurs de notre observatoire : « avec quoi peut-on regarder le ciel et les étoiles ? », la réponse est, dans la grande majorité des cas : « avec un télescope, avec une lunette astronomique », parfois « avec des jumelles », mais un très petit nombre de personnes ou d'enfants pense spontanément à l'œil ou aux yeux... !! Pourtant, il suffit de lever la tête vers le ciel étoilé pour se rendre compte que l'œil est essentiel et vient en premier.

D'abord parce que regarder le ciel avec des instruments suppose, au préalable, que l'on mette son œil contre un oculaire et que si l'instrument multiplie la faculté visuelle et l'améliore, cette faculté est néanmoins nécessairement préexistante. On se sert d'abord et surtout de ses yeux, de sa vue...

Ensuite parce que seule la vue directe permet d'englober des éléments trop grands pour être vus en totalité à travers des instruments. Comment reconnaître les constellations ? **D'ailleurs les constellations n'existent pas**, elles ne sont le fruit que de l'imagination des hommes qui ont essayé de représenter la position de certaines étoiles les unes par rapport aux autres, de les grouper et de les associer à l'image subjective d'un animal, d'une personne, d'un dieu ou d'une chose. D'ailleurs, beaucoup de constellations décrites depuis l'antiquité portent des noms différents selon les civilisations qui les ont nommées.

Un exemple, la constellation que nous appelons la **Grande Ourse** en France et dans les pays francophones est connue sous le nom de « Plough » (charrue) chez nos voisins anglais, « Big Dipper » (grande louche) chez les américains. Chez les grecs anciens c'était « Callisto », une nymphe aimée de Zeus et chez les romains cela s'appelait « septem triones » (sept bœufs de labour) ce qui a donné en français le nom « **septentrion** », le Nord. Chez les scandinaves c'était « Karlavagen » (le wagon de Charles, probablement Charlemagne), en Bretagne « Karr kamm » (chariot tordu), « Karr Arzhur » (le chariot du roi Arthur) ou « Lost-arar » (le bout de la charrue). Une version arabe raconte que la constellation représente le cercueil d'un père tiré par ses trois filles (le rectangle que forment les quatre étoiles représente son cercueil). Elles le portent depuis la nuit des temps et essaient de rattraper son assassin (La Petite Ourse). Le jour où elles attraperont l'assassin, ce sera la fin du ikhan. Dans l'astronomie hindoue, on l'appelle aussi « Sapta Rishi » (les sept sages), et en persan « Haft Awrang » (les sept trônes). En Chine, les Prêtres taoïstes avaient pour habitude de prier les esprits et les divinités représentés par les constellations et les étoiles comme la Grande Ourse, et en astronomie chinoise, ses sept étoiles principales correspondent à le très ancien astérisme Beidou. Au Japon, la Grande Ourse est nommée "Louche du Nord". Certains Indiens d'Amérique du Nord (Algonquins, Micmacs, Narragansett, Cherokees) considèrent aussi ce groupe d'étoiles comme une ourse poursuivie par trois chasseurs. Il semblerait que la Grande Ourse ait été liée au mythe d'une chasse cosmique depuis le Paléolithique supérieur au moins, ce qui expliquerait la présence de cette croyance à la fois en Eurasie et en Amérique du Nord. Le proto-récit aurait pris la forme d'un cervidé poursuivi jusqu'au ciel par un chasseur et s'y transformant en constellation.

Connaître les constellations permet aussi plus facilement de se repérer dans le ciel, de voir que le ciel « tourne » au fil des heures mais aussi des saisons, de s'orienter en sachant trouver la Grande Ourse, puis de là repérer la Petite Ourse qui, elle-même, contient l'étoile polaire (fixe dans notre ciel) et donc de savoir où est le Nord ! Nous pouvons même voir des galaxies à l'œil nu, même si leur éloignement ne nous permet pas d'en discerner les détails et si elles nous font plutôt penser à une sorte de nuage un peu flou. Il en est ainsi des Nuages de Magellan, petites galaxies sœurs de la nôtre visibles dans l'hémisphère Sud, ou la grande galaxie d'Andromède dans l'hémisphère Nord. Nous pouvons également voir des nébuleuses, dont la grande nébuleuse d'Orion, des amas ouverts (Pléiades,...), des amas globulaires (grand amas d'Hercule,...).

Comment englober l'ensemble de la Voie Lactée ? C'est impossible, sauf à l'œil nu ! Enfin, et ce n'est pas la moindre des choses, il faut parler de la poésie ou de la magie d'un ciel étoilé par une belle soirée d'été : cette sensation que nous sommes entourés d'un nombre fantastiques d'autres étoiles qui sont autant de soleils lointains et les questions presque métaphysiques qui peuvent en découler... Y a t'il d'autres planètes susceptibles d'abriter la vie, sommes-nous seuls dans l'Univers dont pourtant nous n'apercevons à l'œil nu qu'une partie infinitésimale ? Que nous sommes tout petits dans cette immensité ! Autant de réflexions qui nous viennent à l'esprit en regardant le ciel, comme nos ancêtres le voyaient depuis des millénaires avant

que l'ingéniosité de l'homme n'invente et fabrique des instruments qui nous permettent d'essayer de mieux comprendre l'Univers qui nous entoure et dont nous faisons partie...

Donc l'œil est définitivement essentiel en astronomie. Celui-ci nous permet aussi, maintenant que nos connaissances ont augmenté, de savoir que si telle étoile est bleue ou bleuâtre (Rigel, Spica,...) c'est qu'elle est jeune, si telle autre est blanche ou jaune (Sirius, Véga ou notre soleil) c'est qu'elle est en milieu de vie ou qu'au contraire, que si celle-là est orangée ou rouge (Bételgeuse, Aldébaran, Arcturus, Antarès, ...) c'est qu'il s'agit d'une étoile vieillissante, en fin de vie.

Voir en Annexe I la liste des objets du ciel visibles à l'œil nu.

L'observation visuelle directe a été la seule utilisée jusqu'au XVII^{ème} siècle. La forme et la taille de la Terre, la distance séparant la Terre et la Lune, les lois régissant le mouvement des planètes ont été trouvées sans lunette ni télescope. Contrairement à une idée très répandue, l'astronomie peut très bien se pratiquer sans appareil d'optique. Notre organe de vision est doté de facultés extraordinaires que nous allons examiner.

Anatomie de l'œil

L'œil est l'organe de la vision. Il est de faible volume (6,5 cm³), pèse 7 grammes et a la forme d'une sphère d'environ 24 mm de diamètre, complétée vers l'avant par une autre demi-sphère de 8 mm de rayon, la cornée. Pour simplifier, l'œil est composé, comme l'appareil photo qui s'en est inspiré, d'une lentille (le cristallin), diaphragmé par la pupille, et qui forme une image renversée sur la rétine, à la fois écran et capteur qui envoie les informations reçues au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique.

L'ensemble cristallin-rétine est situé dans le globe oculaire, dont la forme sphérique est stabilisée par la pression exercée par un liquide visqueux transparent qui l'emplit (l'humeur vitreuse ou vitrée et l'humeur aqueuse). Tous les éléments de l'œil sont évidemment importants, mais certains jouent un rôle prépondérant du point de vue de l'optique : La pupille est un trou circulaire qui dose la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil. Son fonctionnement est automatique en fonction de la luminosité ambiante. Son équivalent photographique est le diaphragme. Le cristallin est la lentille de l'œil qui permet la mise au point grâce à sa plasticité (souplesse) qui lui permet de modifier ses courbures (donc sa focale) lors de l'accommodation. De forme biconvexe, transparent et mou, il est situé à l'intérieur du globe oculaire. S'il devient opaque, il est responsable de la cataracte. L'équivalent photographique du cristallin est l'objectif qui contient des lentilles. La rétine est une membrane neurosensorielle qui tapisse le fond de l'œil, c'est sur elle que doivent se former les images qui seront transmises au cerveau. C'est elle qui transforme les rayons lumineux en influx nerveux. Elle est l'équivalent de la pellicule photographique. La rétine est une membrane d'environ 0,25 mm d'épaisseur et de surface à peu près égale à celle d'un petit timbre-poste dans laquelle se trouvent plus de 130 millions de cellules nerveuses portant des noms qui reflètent leur forme : Les bâtonnets constituent environ 95% de ces cellules et sont au nombre de 120 millions. Ils sont responsables de la vision nocturne, et ne sont sensibles qu'à la différence entre obscurité et lumière. Ils ne font pas de différence entre le rouge et le bleu mais envoient un influx nerveux qui varie selon la luminosité : les bâtonnets ne voient qu'en noir et blanc. Par contre, ils ont la plus grande sensibilité et sont donc adaptés à de faibles quantités de lumière et jouent un rôle essentiel dans la vision nocturne. Les cônes sont des cellules sensorielles plus grandes et forment les 5% restants des photorécepteurs. Ils sont responsables de la vision diurne (de jour) et font la différence entre les couleurs. Les cônes sont présents en majorité au niveau de la « tache jaune » dans la région centrale de la rétine. Au milieu de celle-ci se trouve la « fovéa », une légère dépression où sont présents uniquement des cônes, très serrés. La vision est à ce niveau plus précise, plus détaillée et plus sensible aux mouvements que sur le reste de la rétine. C'est d'ici que provient la plupart de l'information visuelle arrivant au cerveau. Comme pour les images TV, il y a 3 sortes de cônes :

- les cônes S, sensibles au bleu
- les cônes M, sensibles au vert
- les cônes L, sensibles au rouge

(Les lettres conventionnelles S, M et L proviennent des mots anglais Short, Medium et Long, qui correspondent respectivement aux courtes (bleu), moyennes (vert) et grandes (rouge) longueurs d'onde). C'est la combinaison des informations des 3 types de cônes qui permet de voir de nombreuses couleurs différentes. Rappelons que ce sont les capacités réceptrices de ces cellules qui définissent ce que l'on appelle la lumière visible. C'est la lentille convexe qui forme l'image sur la rétine. Elle est caractérisée par

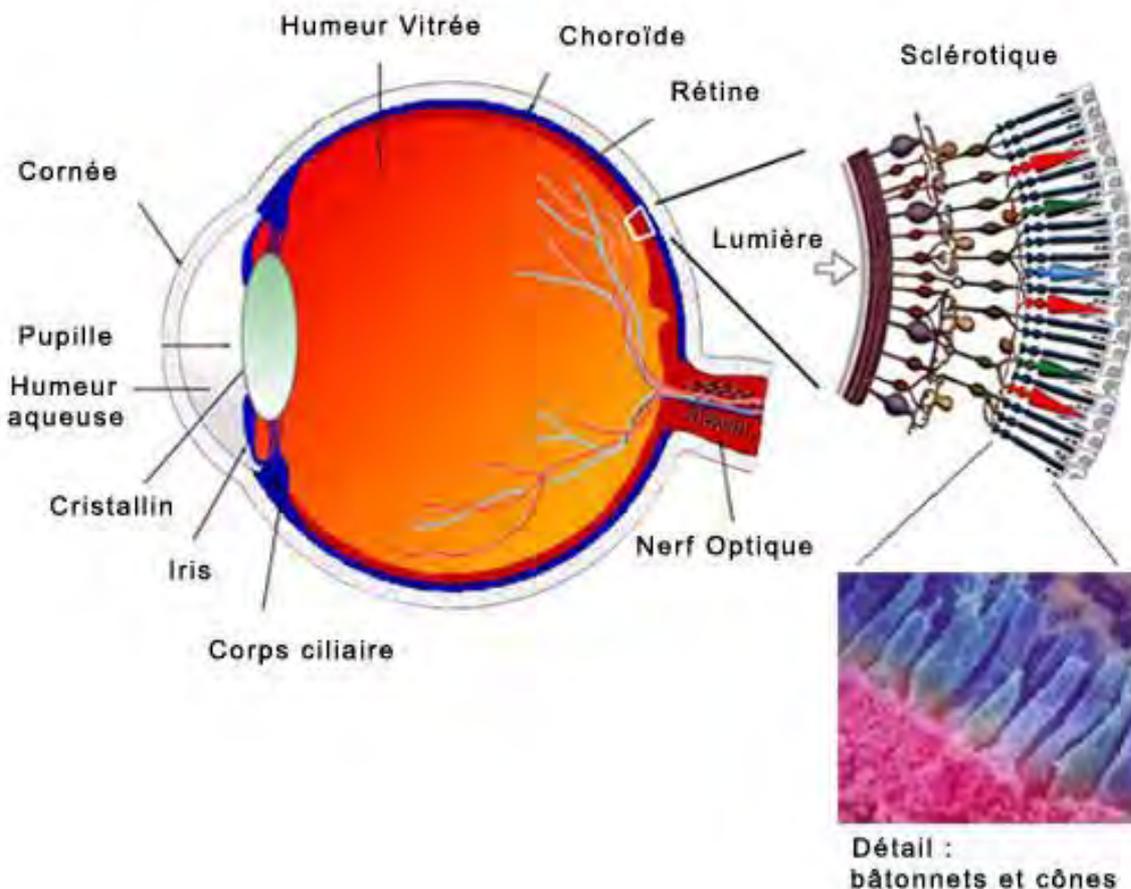
le diamètre de sa pupille et sa distance focale. Elle a la particularité d'être à géométrie variable, c'est-à-dire de pouvoir, grâce aux muscles ciliaires, modifier à volonté sa courbure et son indice de réfraction, et donc sa distance focale. Cette possibilité s'appelle l'accommodation.

L'un des points important est la rétine. Située au fond de l'œil, elle permet la formation des images via le nerf optique qui achemine les informations au cerveau. La rétine est tapissée de cellules qui sont particulièrement serrées au niveau de la fovéa. L'image qui se forme sur la fovéa est nette, autour de cette zone, elle est floue. La fovéa a un diamètre d'environ 200 µm.

Le cristallin quant à lui permet de focaliser l'image sur la rétine de la même manière que lorsque l'on règle un instrument astronomique à notre vue. En astronomie, un paramètre nous intéresse particulièrement, c'est la pupille ou plutôt son diamètre. Celui-ci varie en fonction de la luminosité de l'objet observé. Il est d'environ 1 mm en pleine lumière et peut aller jusqu'à 4 mm pour un sujet standard et même 6 mm pour les plus jeunes d'entre nous. En astronomie, le sujet étant peu lumineux, la pupille sera dilatée au maximum.

Tous les chiffres suivants sont donnés pour un œil moyen, non malade :

- Volume du globe oculaire : 6,5 cm³
- Poids : 7 grammes
- Diamètre du globe oculaire : 24 mm
- Diamètre du cristallin : 10 mm
- Focale du cristallin seul : 4,6 mm
- Focale du système oculaire : 17 mm
- Surface de la rétine : 1 250 mm²
- Nombre de cônes : 6 500 000
- Nombre de bâtonnets : 130 000 000
- Épaisseur de la couche des récepteurs : 40 microns



Le champ visuel

Le champ visuel est l'espace délimité par la perception spatiale de l'œil sans déplacer la tête. La fovéa (2°) permet une vision des détails très fins, L'Ergorama (30°) celle des formes et le Panorama ($60-70^\circ$) celle des mouvements. Il existe trois champs visuels différents :

1. Champ total fixe : il correspond au champ perçu par un œil fixe, il est très grand d'où l'emploi en astronomie d'oculaires à grand champ (environ 150°).
2. Champ de vision nette fixe : il correspond pour un œil fixe au champ de vision perçu par la fovéa, il est d'environ 1° . Il est intéressant d'avoir cette valeur en tête lorsque l'on place son œil derrière un oculaire. Si le champ de celui-ci est grand, il faut se promener dessus pour voir un objet étendu de manière nette.
3. Champ de vision nette totale : c'est le champ que peut examiner l'œil par rotation dans son orbite, il est d'environ 40 à 50° . Donc, en théorie, un champ plus grand dans un oculaire ne sert à rien.

L'accommodation

L'œil est un formidable instrument, la mise au point s'effectue toute seule. Au repos, l'œil effectue la mise au point sur l'infini, au maximum et sans fatiguer les muscles, pour un œil normal, la mise au point peut se faire jusqu'à 25 cm. En dessous de cette distance, les muscles travaillent beaucoup pour accommoder et se fatiguent donc vite. Dans un instrument astronomique, on projette l'image à l'infini pour qu'elle puisse être récupérée par l'œil au repos.

Et voici tout naturellement, les défauts d'accommodation de l'œil.

1. *La myopie* : C'est en fait l'œil qui est trop convergent. Les objets situés loin sont flous (on imite alors la taupe). Pas de problème en astronomie, on veillera seulement à refaire la mise au point lorsque l'on passe derrière quelqu'un pour avoir une image nette.
2. *L'hypermétropie* : là, c'est l'inverse, l'œil n'est pas assez convergent, les objets situés trop près seront donc flous. Les objets situés à l'infini seront vus nets si l'œil accommode légèrement. Toujours pas de problème en astronomie, une bonne mise au point et le tour est joué.
3. *La presbytie* : c'est un problème lié à l'âge. Les objets situés au loin sont flous ainsi que ceux situés près de la personne. C'est simplement un cumulatif des 2 défauts précédents, on arrivera donc toujours à obtenir une image nette dans un instrument astronomique.
4. *L'astigmatisme* : C'est un problème de révolution de l'œil. Alors là, on peut toujours faire la mise au point mais il est essentiel de garder ses lunettes pour avoir une image nette dans un instrument astronomique. Un point apparaît en fait comme une petite ligne.

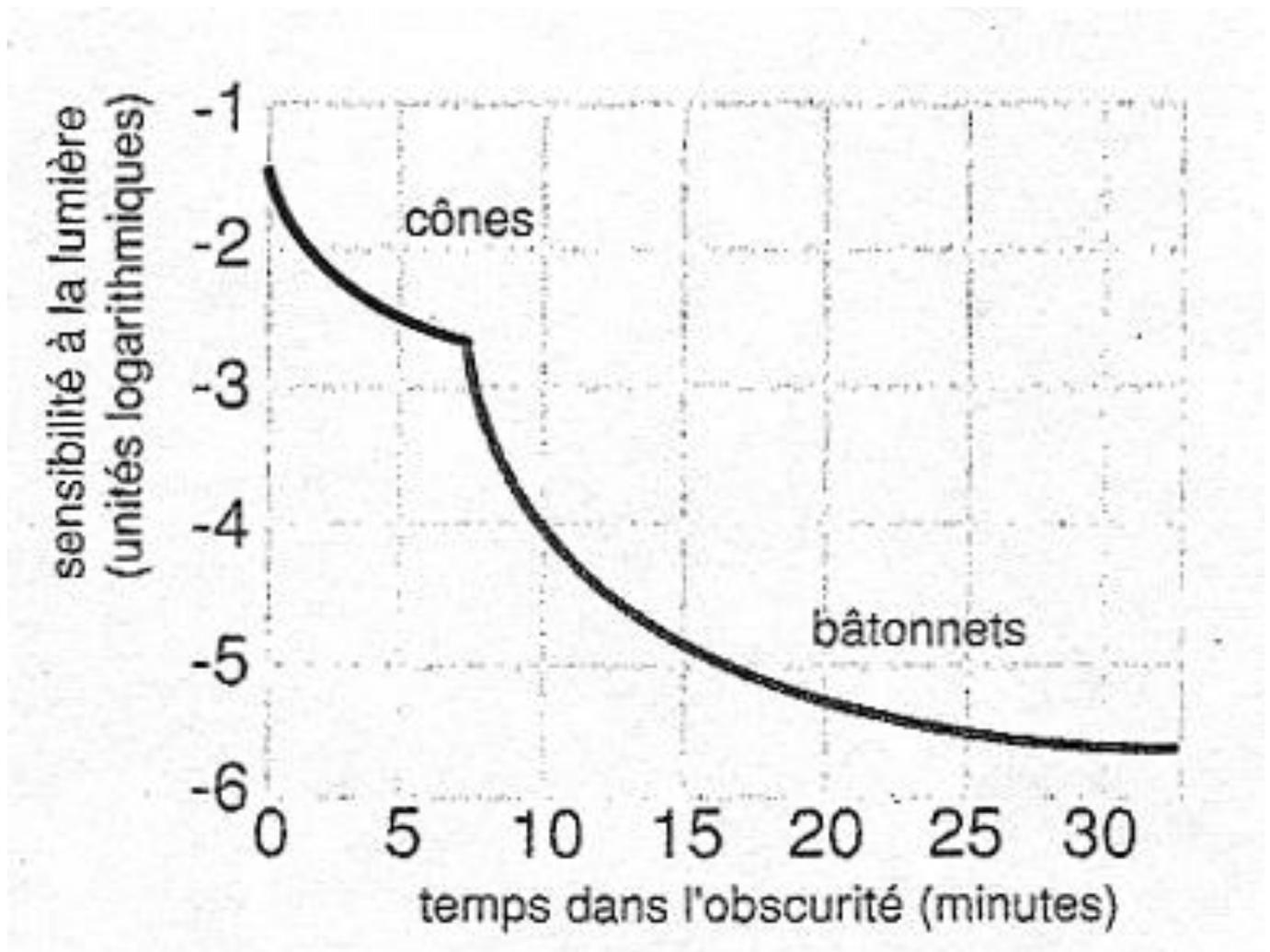
Le pouvoir séparateur

En astronomie, ce paramètre est très important. Il permet de savoir si un détail sera visible ou non. En pratique, le pouvoir séparateur de l'œil est d'environ 1 minute d'arc (soit $1/60^{\text{ème}}$ de degré). Attention, ceci est un ordre d'idée. En effet, le pouvoir séparateur dépend de la forme des détails, de la couleur, de la luminance des objets (l'œil a une dynamique de plus de 100 000), du contraste, du rayon de la pupille (plus il est grand, plus le pouvoir séparateur est important), de la fatigue. Il faut distinguer le pouvoir séparateur du pouvoir de perception qui est l'aptitude de l'œil à déceler un objet ponctuel. En effet l'œil voit des étoiles qui ont un diamètre apparent bien inférieur à la minute d'arc. Le pouvoir de perception dépend de la luminance de l'objet et du contraste entre l'objet et son environnement (le pouvoir de perception est meilleur avec un environnement sombre : c'est souvent le cas en astronomie).

Le pouvoir séparateur de l'œil humain est très variable. C'est essentiellement lui qui est noté par les ophtalmologistes lors des tests de vision. On considère qu'un œil normal sépare un angle de 1 seconde d'arc, soit 1 mm à 3,4 m. Il est alors noté 10/10. Certains possèdent un meilleur pouvoir séparateur, ce qui explique les notes éventuelles de 11/10 voire 13/10. Vous pouvez tester votre acuité visuelle en observant la deuxième étoile de la queue de la Grande Ourse, dans laquelle un bon œil doit discerner sans difficulté les deux composantes : Alcor et Mizar. Une tradition non vérifiée voudrait qu'elle ait servi à tester l'acuité visuelle des archers de Charles Quint et de Gengis Khan. Certaines personnes peuvent repérer sans instrument les quatre principaux satellites de Jupiter.

La vision diurne et nocturne

L'œil est un organe que nous utilisons généralement très mal, surtout lors d'observations nocturnes. Il a en effet la faculté de bien voir la nuit, mais il a besoin d'un délai d'adaptation relativement important. Au cours de l'adaptation, la pupille s'ouvre, son diamètre pouvant passer de 2 à 8 mm, ce qui permet de faire passer, à pleine ouverture, environ 16 fois plus de lumière qu'en plein jour. Cette ouverture de la pupille n'est pas la seule adaptation à l'obscurité. La surface sensible de notre œil, la rétine, est tapissée de deux types de cellules réceptrices. Les cônes, sensibles aux couleurs, s'adaptent rapidement aux éclaircissements forts. Les bâtonnets s'adaptent, eux, très lentement aux éclaircissements faibles mais sont peu sensibles aux couleurs. Après plusieurs dizaines de minutes d'adaptation l'œil est capable de détecter des éclaircissements un milliard de fois plus faibles que ceux qu'il enregistre en pleine lumière. Il est donc indispensable d'être patient et d'entraîner son œil à la vision nocturne si l'on veut en tirer le meilleur parti. Il suffit de rester dans l'obscurité une bonne dizaine de minutes pour percevoir un net progrès de l'adaptation.



On observe plusieurs choses sur cette figure. La première est que suivant la longueur d'onde (λ : la couleur), l'œil n'a pas la même sensibilité. De plus, suivant que l'on regarde un objet de jour (fort éclaircissement) ou de nuit (faible éclaircissement), le pic de sensibilité n'est pas situé au même endroit. Le maximum se situe à 555 nm (jaune vert) le jour et à 505 nm (vert) la nuit. Ceci vient du fait que la rétine est formée de cônes (6.5 millions) et de bâtonnets (125 millions). Les cônes (2.5 μm de diamètre) sont principalement utilisés le jour, sont très sensibles à la couleur et sont disposés principalement au centre. Les bâtonnets sont utilisés pour la vision nocturne et sont plus denses en pourtour de rétine. Les bâtonnets sont très sensibles à l'éclaircissement mais restituent mal les couleurs : la nuit tous les chats sont gris mais on peut détecter une bougie à 27 km. Il existe un troisième mode de fonctionnement de l'œil appelé vision « mésopique » (photopique pour le jour et scotopique pour la nuit) qui est en fait un mélange de vision diurne et nocturne.

Quelques questions à se poser en astronomie

Pourquoi attendre l'acclimatation de l'œil ?

La vision de jour est quasi instantanée (passer d'une pièce sombre à une pièce claire ne prend que quelques secondes maximum à l'œil pour s'acclimater). Mais le passage de la vision de jour à la vision de nuit prend plusieurs minutes. C'est pourquoi il est important de laisser le temps à l'œil de s'acclimater. En général, on compte environ 1/4 d'heure minimum pour cela.

Pourquoi la mise au point est-elle plus difficile la nuit ?

La mise au point est déclenchée par la fovéa qui est tapissée de cônes peu sensibles à la lumière. Il est donc difficile de localiser précisément cette mise au point et ce, d'autant plus que les objets sont souvent diffus.

Pourquoi toujours des lampes rouges la nuit ?

En fait, la lumière rouge est dite « inactinique ». C'est à dire qu'elle permet à l'œil de détecter la lumière rouge sans pour autant détruire l'acclimatation nocturne. De plus, les cônes sont plus facilement activés par le rouge ce qui nous permet d'utiliser la fovéa et donc de facilement lire une carte grâce à une mise au point aisée. Attention cependant à ne pas utiliser une lumière rouge trop forte sinon l'œil repassera automatiquement à la vision photopique et il faudra de nouveau attendre 1/4 d'heure pour récupérer la vision scotopique.

Pourquoi passer du temps pour regarder un objet faible ?

Pour plusieurs raisons. L'une d'entre elle qui est indépendante de l'œil, c'est la turbulence. En effet, la turbulence trouble l'image : plus on passera de temps sur un objet, plus on a de chance de capter de fins détails. La deuxième raison est que le champ de vision nette de l'œil est faible, il faut donc balader son œil sur un objet étendu pour en apprécier toute la splendeur. La troisième raison est que l'œil ne travaille pas seul, même s'il refait une image toutes les 1/10^{ème} de seconde, le cerveau est capable d'intégrer une partie de cette image et donc d'améliorer notre vue de l'objet. Ce temps d'intégration est estimé à six secondes au maximum.

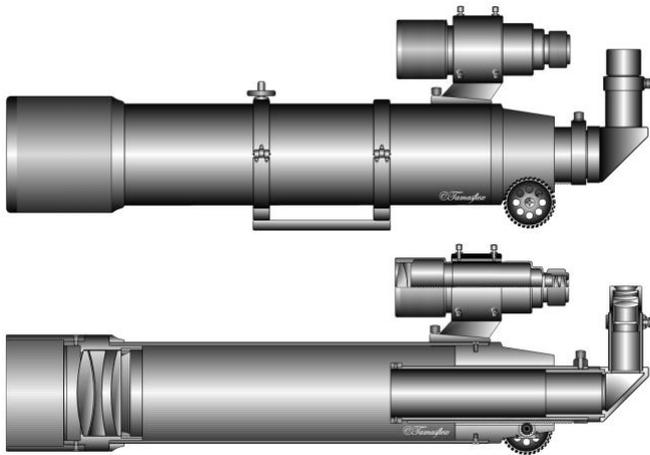
Pourquoi regarder les objets faibles sur le côté ?

La nuit, on utilise les cônes pour obtenir une sensibilité maximale. Ces cônes sont principalement situés en périphérie de la rétine, il vaut donc mieux observer un objet en vision décalée. Une autre propriété intéressante des cônes est le fait qu'ils nous permettent de capter des détails lorsque l'objet est mouvant mais de manière furtive. Utiliser cette propriété en astronomie peut s'avérer payant. Un autre problème lié à la vision nocturne tient à répartition des cellules sensibles sur notre rétine. Les cônes sont rassemblés à proximité de l'axe de l'œil, les bâtonnets entourant cette zone centrale. La région la plus sensible aux éclairissements faibles est décalée par rapport au centre de la rétine. Pour distinguer les objets les plus faibles, il faut donc regarder légèrement de côté. On dit qu'on utilise alors la vision périphérique.

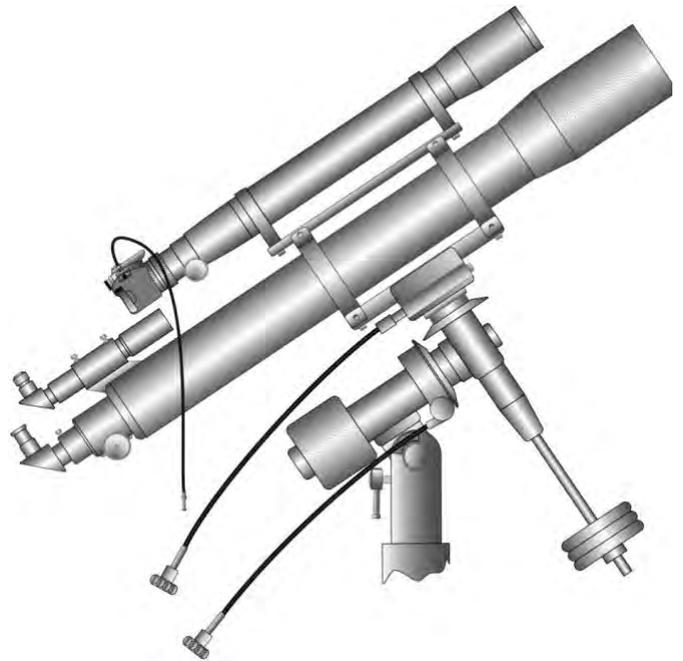
La nécessaire adaptation à l'obscurité met en évidence un des fléaux de notre époque : la pollution lumineuse. Nos villes sont extrêmement mal éclairées : nous envoyons une énorme quantité de lumière vers le ciel. Cette lumière éclaire les particules en suspension dans l'atmosphère et masque les étoiles. Loin des villes, le ciel est beaucoup plus noir, mais il devient difficile de trouver, même à la campagne, un site qui ne soit dégradé par un lampadaire ou une source lumineuse quelconque. Il n'existe plus de site astronomique dans l'hémisphère nord qui ne soit pas pollué par l'éclairage. Que tous ceux qui souhaitent observer le ciel agissent localement, pour faire diriger les éclairages collectifs vers le sol et non vers le ciel. La communauté économisera ainsi de l'énergie et de l'argent et le spectacle du ciel continuera d'enchanter nos enfants et nous permettra de garder nos racines. N'oublions pas que si tout a changé sur cette Terre depuis l'Antiquité, l'aspect du ciel est, lui, resté identique, nous offrant ainsi le seul lien réel avec nos ascendants. Préservons-le pour nos descendants.

© Francis VENTER

III La lunette astronomique



Réfracteur apochromatique



Lunette astronomique équipée d'un chercheur et d'un appareil photographique à grande focale sur le même axe

Une **lunette astronomique** est un instrument optique composé de lentilles et permettant d'augmenter la luminosité et la taille apparente des objets du ciel lors de leur observation. Équipée d'un redresseur d'image, elle se comporte alors en **lunette d'approche**. Développée à partir de la fin du XVI^e siècle, la lunette astronomique est utilisée à partir de 1609 pour faire des observations systématiques du ciel.

Historique

Son invention n'est pas précisément attribuée. Certains écrits de Leonard Digges laissent supposer qu'il avait mis au point un prototype dès les années 1550, mais les premiers exemplaires explicitement décrits viendraient d'Italie (vers 1590) ou du nord de l'Europe (Pays-Bas, vers 1608). Giambattista della Porta la mentionna dans son ouvrage *La Magie naturelle* (1589). Par la suite, plusieurs personnes cherchèrent à en obtenir le brevet : Hans Lippershey, qui fut le premier à faire une démonstration concrète d'une lunette d'approche de grossissement trois, à la fin du mois de septembre 1608, Sacharias Jansen qui en aurait vendu à la foire d'automne de Francfort en septembre 1608, et Jacques Metius (voir Jacob Metius ou frère de Metius). Ce dernier est soutenu par Descartes, qui parle de cette invention au début de sa *Dioptrique* :

« Mais, à la honte de nos sciences, cette invention, si utile et si admirable, n'a premièrement été trouvée que par l'expérience et la fortune. Il y a environ trente ans, qu'un nommé Jacques Metius, de la ville d'Alkmaar en Hollande, homme qui n'avait jamais étudié, bien qu'il eût un père et un frère qui ont fait profession des mathématiques, mais qui prenait particulièrement plaisir à faire des miroirs et verres brûlants, en composant même l'hiver avec de la glace, ainsi que l'expérience a montré qu'on en peut faire, ayant à cette occasion plusieurs verres de diverses formes, s'avisait par bonheur de regarder au travers de deux, dont l'un était un peu plus épais au milieu qu'aux extrémités, et l'autre au contraire beaucoup plus épais aux extrémités qu'au milieu, et il les appliqua si heureusement aux deux bouts d'un tuyau, que la première des lunettes dont nous parlons, en fut composée. »

Dès que la lunette d'approche fut connue et commença à se répandre, plusieurs personnes, dont Thomas Harriot et Christoph Scheiner, la tournèrent vers le ciel au début de 1609 pour observer les objets célestes.

Mais c'est Galilée qui, à partir d'août 1609 établit véritablement la lunette d'approche comme instrument d'observation astronomique par l'ensemble de ses observations célestes et surtout par le regard neuf qu'il portait sur le ciel et les objets qu'il observait : il s'étonnait des phénomènes qu'il voyait et il les étudiait. Il construisait ses propres lunettes et leur donna d'abord un grossissement de six au lieu de trois, pour le porter progressivement à 20 puis à 30.

La lunette de Galilée, une révolution en astronomie

Tout commence en 1609. Galilée, l'un des « bâtisseurs du ciel », prend connaissance d'une lettre du français Jacques Badovere. Elle confirme que la longue-vue conçue par l'opticien hollandais Hans Lippershey en 1608 existe bel et bien. Le savant ne tarde pas à construire son propre instrument, aujourd'hui appelé la lunette de Galilée. Elle est formée d'un tube comprenant à ses extrémités un objectif convergent et un oculaire divergent. L'objectif forme dans son plan focal l'image d'un objet placé à l'infini. L'oculaire divergent donne une image définitive à l'infini, que l'œil de l'observateur peut percevoir sans accommodation.

Avec sa lunette, Galilée va réaliser une série de découvertes qui bouleverseront l'astronomie. Mais avant cela, le 21 août 1609, il fait une démonstration à l'attention du sénat de Venise, depuis le sommet du campanile de la place Saint-Marc. Sa lunette ne grossit encore que huit ou neuf fois, mais la qualité des images convainc les doges vénitiens du potentiel de l'instrument pour les applications militaires. Galilée est le seul à l'époque à obtenir une image droite, grâce à l'utilisation d'une lentille divergente en oculaire. Fort de ce succès, il cède alors les droits de son invention à la république de Venise et, en retour, voit ses gages doublés et son poste de mathématicien à Padoue confirmé à vie. Si Galilée n'est pas le premier à utiliser une lunette pour faire des observations en astronomie, puisqu'il a été devancé au moins par Thomas Harriot, il est le premier à publier ses découvertes dans son ouvrage de 1610 : *Sidereus Nuncius* (traduit par *Le messager des étoiles*). Il y révèle que la Voie lactée est constituée de myriades d'étoiles que l'on ne pouvait distinguer à l'œil nu, que la Lune est irrégulière et a des montagnes, comme la Terre.



L'une des premières lunettes astronomiques de Galilée

Galilée a réalisé plusieurs lunettes au cours de sa vie, augmentant progressivement leur pouvoir de grossissement. On en connaît plusieurs dizaines. © *Istituto e Museo di Storia della Scienza*, Florence

Surtout, il fait savoir qu'il y a quatre corps célestes en orbite autour de Jupiter, à l'instar des planètes tournant autour du Soleil dans le système de Copernic. Il s'agissait bien sûr de Io, Europe, Ganymède et Callisto. En 1611, c'est Kepler qui donnera le nom de « satellites » à ces astres. Dans les années qui vont suivre, Galilée fera d'autres découvertes qui remettront en cause la philosophie d'Aristote et renforceront les théories de Copernic. Ainsi, il avance que la surface du Soleil n'est pas parfaite (à l'image de celle de la Lune) puisqu'on y observe des taches solaires, et que Vénus a des phases, ce qui implique qu'elle tourne autour du Soleil et non de la Terre.

Une optique géométrique encore balbutiante du temps de Galilée

Les lois de l'optique géométrique sont encore mal connues à l'époque. Il faudra attendre les travaux de Descartes et Newton pour disposer d'un modèle mathématique solide pour concevoir lunettes et télescopes. On pensait donc jusqu'à présent que Galilée n'avait pas beaucoup contribué aux connaissances plus ou moins empiriques des opticiens de son temps, lorsqu'il a conçu et fabriqué plusieurs de ses lunettes, finissant par atteindre un pouvoir grossissant de 30, à force de perfectionnement.

Mais selon Yaakov Zik et Giora Hon de l'université d'Haïfa en Israël, dans un article publié sur arxiv, il est difficile de croire que Galilée ne disposait pas d'une théorie de l'optique géométrique bien en avance sur celle de ses contemporains. Il ne se serait pas contenté d'améliorer légèrement les connaissances empiriques, vaguement théorisées, des ingénieurs et artisans de l'époque, utilisées par exemple pour monter des spectacles à la manière de Léonard de Vinci. Selon les deux historiens des sciences, dès 1610, Galilée pose clairement les contraintes à respecter pour obtenir un instrument capable de faire de bonnes observations et les satisfait. La longueur de sa lunette peut être réglée pour faire une mise au point, ce qui atteste de ses connaissances sur les relations entre le pouvoir grossissant des lentilles associées et la longueur les séparant. Il est visiblement capable de calculer le grossissement de ses lunettes, et de modifier convenablement leur ouverture, de sorte que seule la bonne quantité de lumière entre dans le système optique. Galilée a aussi développé des moyens efficaces pour contrôler la plupart des aberrations dans ses instruments. Il sait en outre calculer leur champ de vision apparent, et se sert de cette connaissance pour mesurer des distances angulaires entre les corps célestes.

Les secrets de Galilée, l'avis de Kepler

Le fait que Galilée soit implicitement en possession d'une théorie optique avancée n'a d'ailleurs pas échappé à l'un des meilleurs spécialistes de ces questions à cette époque : Kepler. En témoigne une lettre envoyée à Galilée par le mathématicien et astronome, puisqu'il y écrit : « *Voilà pour l'instrument. Maintenant, en ce qui concerne son utilisation, vous avez certainement découvert une méthode ingénieuse pour déterminer exactement à quel point les images des objets sont agrandies par votre instrument et quelles tailles angulaires peuvent être découvertes dans le ciel... Vos accomplissements rivalisent avec la haute précision des observations de Tycho Brahe.* » Alors, Galilée avait-il vraiment des connaissances secrètes en optique géométrique, comme le pensent Yaakov Zik et Giora Hon ? Peut-être existe-t-il quelque part un manuscrit perdu ou une preuve définitive de cette connaissance. On se souvient de ce qu'il était advenu du fameux manuscrit de Descartes sur les polyèdres, et dont le contenu n'a été retrouvé dans les papiers de Leibniz qu'au XIX^e siècle. Le mathématicien et philosophe français y avait devancé un célèbre théorème d'Euler portant sur la topologie algébrique, ainsi que des notions de courbure des surfaces, que l'on ne trouvera que bien plus tard chez Gauss.

Composition

Une lunette est composée d'un objectif et d'un oculaire disposés de part et d'autre d'un tube fermé. Le tube peut être fixe ou télescopique comme dans le cas des longues-vues de marine. L'oculaire se situe, comme l'indique son nom, du côté de l'œil, et il est de petite dimension. L'objectif se situe de l'autre côté, et est généralement de plus grande dimension que l'oculaire.

Ces premières lunettes *d'approche*, terrestre ou astronomique, ont possédé un objectif convexe et un oculaire concave (voir description de René Descartes plus haut) dû au principe de hasard de leur invention par des lunetiers. Les plus récentes (voir description plus bas) possèdent objectif et oculaire convexes.

Malgré l'histoire, les deux systèmes conservent chacun leurs avantages. L'oculaire concave donne une image droite permettant l'usage en longue-vue terrestre et un raccourcissement de la longueur du tube par rapport à la focale de l'objectif. L'assemblage de deux de ces lunettes de petite taille crée l'appareil dit *jumelles de Galilée* (utilisées au théâtre vu les faibles performances). Alors que pour l'oculaire convexe, on obtient un retournement de l'image (haut et bas) et un allongement par rapport à la longueur de la focale de l'objectif. L'usage en lunette astronomique n'est pas gêné par ces conséquences (ni haut ni bas dans le ciel, monture mécanique pour supporter le système). Par contre, l'usage marin ou terrestre a imposé un tube télescopique et un système optique de redressement de l'image, dit *véhicule* composé d'un doublet ou d'un nombre pair de prismes (qui plient, raccourcissent l'encombrement) dans le cas de la lunette à prismes ou des jumelles dites de marine.

Les 9 Avantages de la lunette astronomique

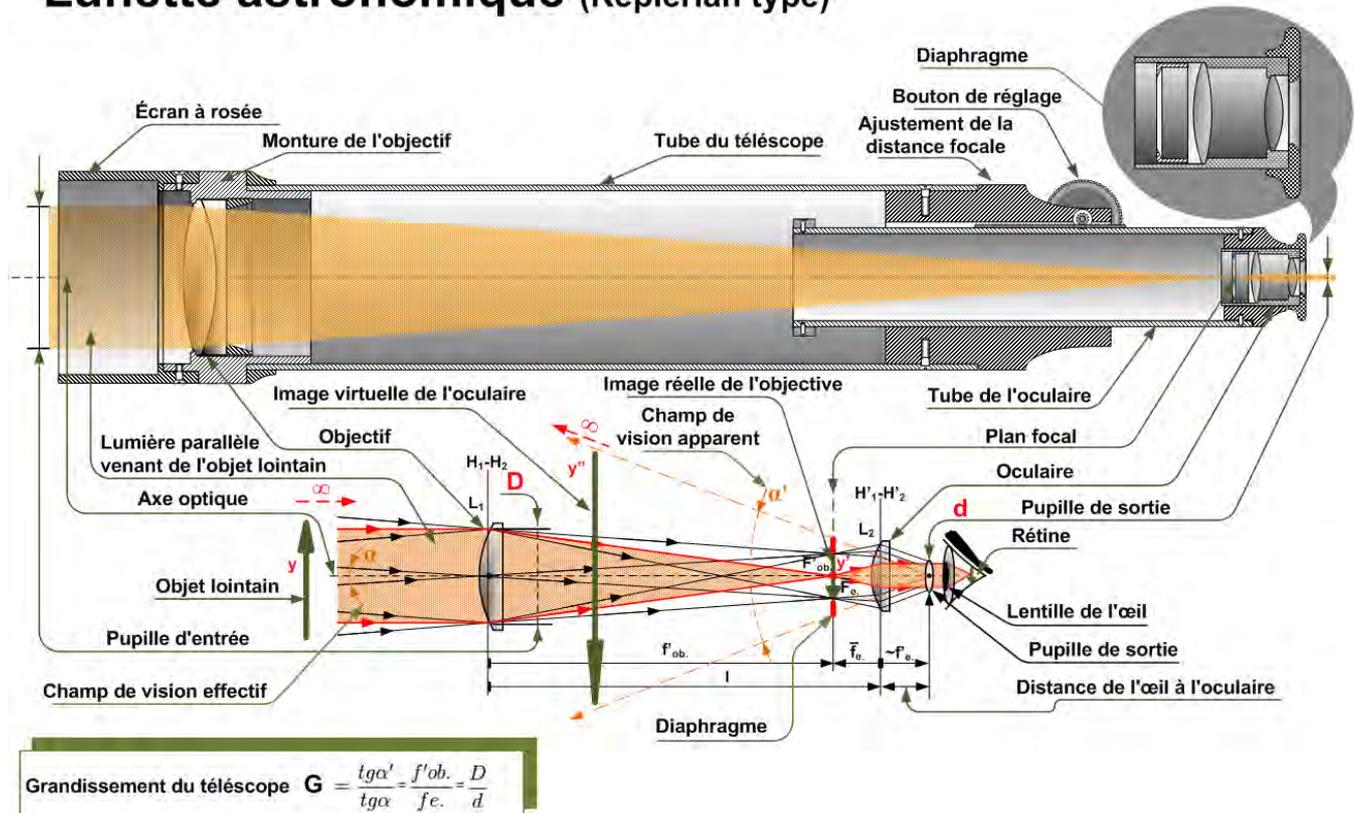
1. **La lunette astronomique est un objet solide et robuste.** Une fois l'alignement initial réalisé, son système optique aura plus de résistance aux défauts d'alignement qu'un télescope à miroirs.
2. La lunette nécessite très peu d'entretien grâce à son système de tube très hermétique à l'air.
3. Du fait qu'elle soit hermétique, elle n'est pas affectée par les gros courants d'air, ni par les changements de température, ce qui a pour effet d'obtenir des images plus nettes et plus stables que les télescopes. Donc, très peu sensible aux turbulences atmosphériques.
4. Pour un débutant, la lunette est un très bon instrument pour commencer, car il n'y a presque aucun réglage à effectuer.
5. Les prix assez bas: ils s'échelonnent de 60 € à environ 350 € pour une qualité très acceptable (pour diamètres jusqu'à 80 ou 90 mm).
6. Très faible encombrement, par rapport à un télescope, donc facile à transporter.
7. Meilleure qualité d'image par rapport à un télescope, dans un environnement pollué par la lumière urbaine.
8. Excellente pour l'observation planétaire.
9. Permet de pratiquer l'observation terrestre (nature, oiseaux) en sus de l'observation astronomique.

Les 6 inconvénients de la lunette astronomique

Bien que l'on fabrique encore d'excellentes lunettes, les inconvénients de ce type d'appareil ont largement freiné la construction de très gros réfracteurs **dans le domaine de la recherche en astronomie.**

1. La lunette d'astronomie peut parfois subir un effet appelé *aberration chromatique* (distorsion des couleurs). Cet effet produit une sorte d'arc-en-ciel autour de l'image observée, ce qui peut avoir pour conséquence de créer une image floue et de mauvaise qualité.
2. Selon la longueur d'onde de lumière projetée, l'objet capté peut ne pas être correctement restitué dans l'oculaire: les ultraviolets ne peuvent pas traverser la lentille des lunettes.
3. Plus l'épaisseur de la lentille augmente, plus la lumière passe difficilement.
4. **La lunette astronomique n'est pas adaptée pour observer le ciel profond.**
5. A diamètre égal, la lunette est plus performante qu'un télescope, mais avec un prix exorbitant.
6. La lunette n'est généralement pas adaptée pour l'astrophotographie en raison de son petit diamètre.

Lunette astronomique (Keplerian type)

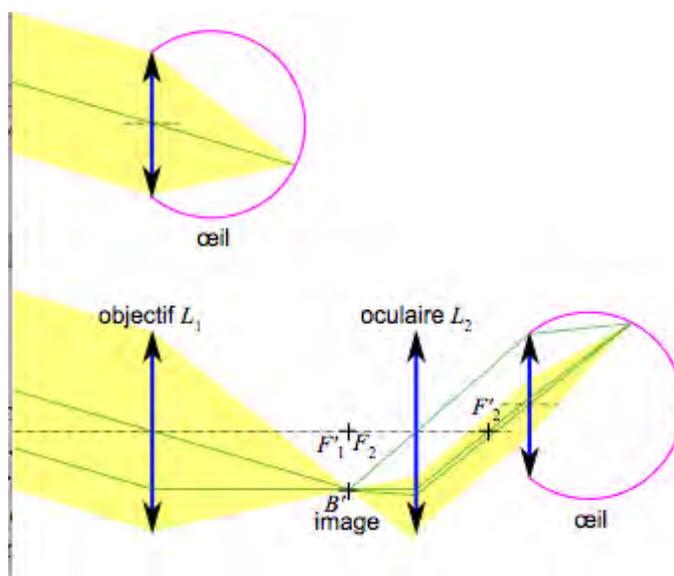


On peut faire une lunette simple avec deux loupes. Une grande, à foyer assez lointain servant d'objectif, et une petite, à foyer rapproché servant d'oculaire. En effet, l'objectif et l'oculaire sont deux systèmes optiques convergents, c'est-à-dire qu'ils concentrent (focalisent) les rayons lumineux, à la manière d'une loupe. Ces deux systèmes convergents ont comme caractéristiques principales le diamètre et la distance focale. La distance focale est la distance entre le centre du système optique convergent (par exemple le centre de la lentille d'une loupe) et le foyer (le point où des rayons lumineux provenant de l'infini convergent). Les lunettes modernes ont toutes des objectifs et des oculaires composés de plusieurs lentilles. En effet, une lentille simple n'a une qualité acceptable que sous certaines conditions. On peut corriger ou diminuer certains défauts en appariant plusieurs lentilles ayant des verres d'indice différent, on crée ainsi des doublets achromatiques ou des triplets apochromatiques qui sont exempts de défauts sur des plages plus grandes.

Le grossissement de la lunette est donné par : $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$ où α' est l'angle sous lequel on voit l'image finale au travers de la lunette et α est l'angle sous lequel on voit l'objet à l'œil nu. Étant donné que nous observons des objets célestes, on peut considérer que les angles sont petits et ainsi, comme on a (pour de petits angles) : $\tan \alpha \simeq \sin \alpha \simeq \alpha(\text{rad})$ Alors, le grossissement de la lunette est calculé en divisant la distance focale de l'objectif par celle de l'oculaire.

Lunette astronomique afocale

Une lunette astronomique est dite afocale lorsque le foyer image de l'objectif est à la même position que le foyer objet de l'oculaire. L'objet observé se trouvant à l'infini son image se trouve dans le plan focal image de l'objectif. Or le plan focal image de l'objectif est aussi le plan focal objet de l'oculaire, l'image fournie par celui-ci se trouve à l'infini. Un œil humain parfait étant fait pour observer un objet situé à l'infini, il n'accommode pas lorsqu'il observe une image à travers une lunette astronomique afocale (les myopes et les hypermétropes compensent par le réglage oculaire).



Principe optique d'une lunette astronomique afocale; par rapport à l'œil nu (en haut), la lunette collecte plus de lumière et amplifie l'angle d'incidence sur l'œil, l'objet est donc vu plus grand et plus lumineux

Lunette et télescope

Un télescope se différencie d'une lunette astronomique :

- la *lunette astronomique* a un objectif composé d'un ensemble de lentilles,
- le *télescope* a un objectif-miroir comme composant essentiel.

Il faut noter le risque de confusion dans l'utilisation et la traduction du mot *télescope*, particulièrement lors de la consultation de documentations en langue anglaise. En effet, dans cette langue, le mot *télescope* est utilisé tant pour la lunette astronomique (on parle alors de *refracting telescope*) que pour le télescope (on parle de *reflecting telescope*).

Les amateurs constructeurs atteignent plus facilement la réalisation d'un miroir de moyennes dimensions (autour de 200 mm) et l'instrument des passionnés non-professionnels est, par conséquent, le télescope.

L'instrument principal de l'observatoire de Nice est la lunette astronomique équipant le Grand Équatorial, longue de 18 mètres, avec une lentille de 76 cm de diamètre. Elle fut pour la première fois opérationnelle en 1888 et était, à l'époque, la plus grande lunette du monde. Elle fut détrônée quelques mois plus tard par la lunette de l'observatoire Lick, disposant d'une lentille d'un diamètre de 91 centimètres.



Lunette astronomique de l'observatoire de Nice

IV Les jumelles

Des **jumelles** sont un dispositif optique binoculaire grossissant destiné à l'observation d'objets à distance, constitué de deux lunettes symétriques montées en parallèle. L'intérêt des jumelles par rapport à une lunette simple est, dans une certaine mesure, de pouvoir conserver la vision stéréoscopique. Certaines jumelles de marine à très longue portée sont même conçues avec un écartement important des axes optiques en entrée, de manière à améliorer la perception de la profondeur pour des objets lointains. *A contrario*, les jumelles, dites de Galilée, qui comportent des oculaires concaves, et donnent, des objectifs, une image non renversée, et possèdent des tubes droits, sans coude. L'écartement de leurs axes optiques étant celui des yeux de l'observateur (écart interpupillaire), elles n'augmentent pas l'effet de relief et sont simplement conçues pour le confort binoculaire de l'observateur. De faible grossissement, elles sont aussi qualifiées de *jumelles de théâtre*. On les appelle également « lunettes de Galilée » ou lorgnettes.



La lumière entre dans le système optique par les objectifs, comportant plusieurs lentilles, à l'extrémité de chaque tube. Les objectifs étant des systèmes convergents, les images résultantes sont retournées (haut/bas, gauche/droite) comme dans une lunette astronomique. Ces images sont vues grossies à travers des oculaires faisant office de loupes et constitués eux aussi de plusieurs lentilles. Pour permettre l'observation d'images terrestres redressées (droites), un véhicule optique est interposé dans le chemin lumineux. Composé d'un système de prismes, il offre l'avantage de plier le faisceau lumineux et de permettre de réduire l'encombrement global de l'instrument. Autre avantage qui caractérise cet appareil optique, les faisceaux optiques, pliés, restent parallèles, ce qui permet d'augmenter l'écart des axes optiques des objectifs en conservant un écart entre les axes de sorties égal à celui des yeux de l'observateur. La conséquence est la conservation de la sensation de relief, augmentée, de plus, par un grossissement de l'appareil supérieur à l'unité.

Jumelles astronomiques, grossissement 25 fois

L'ensemble des tubes est élaboré de telle sorte (axe mécanique central) qu'on puisse régler l'écart interpupillaire pour l'ajuster d'un individu à l'autre. Un des oculaires est réglable pour tenir compte d'une éventuelle différence de qualité visuelle (correction en dioptries) des deux yeux de l'observateur. On distinguera les jumelles militaires des jumelles courantes dites *de marine*. Pour ces dernières, une molette centrale permet d'accommoder sur un objet proche en déplaçant l'ensemble des oculaires vers les images données par les objectifs.



Les jumelles peuvent avoir de multiples usages :

- opérations militaires
- ornithologie
- **astronomie amateur**
- surveillance et sécurité des lieux publics.
- assistance et sécurité en mer.
- randonnées
- sport et nature, chasse
- pour apprécier un spectacle (jumelles de théâtre, lorgnette)

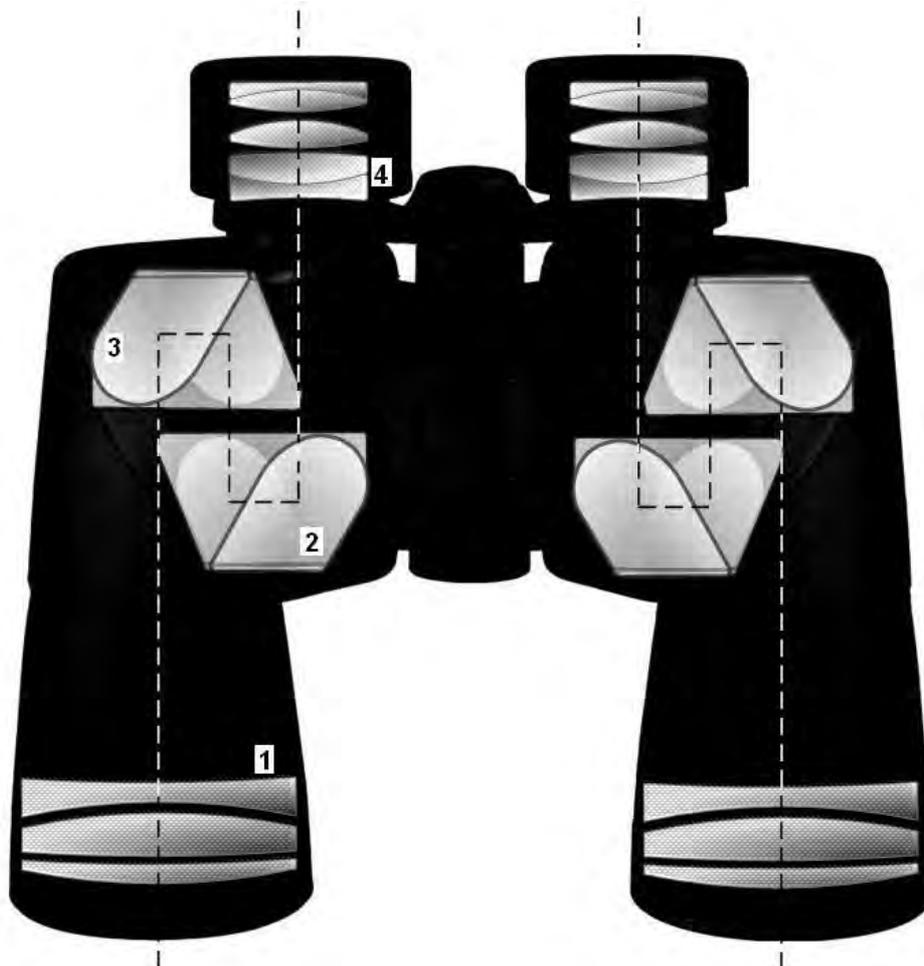


Schéma des jumelles : 1 – Objectif — 2-3 - Prismes de Porro — 4 - Oculaire

Dans le cas de l'astronomie, les jumelles s'avèrent utiles dans les observations du ciel profond (galaxies, nébuleuses), grâce à leur grand champ, la vision binoculaire et leur luminosité. Des formules avec plus fort grossissement sont optimales pour l'observation des comètes.

On peut, avec de bonnes jumelles, voir les 4 principaux satellites de Jupiter (Io, Europe, Ganymède et Callisto) et observer certaines nébuleuses (la grande nébuleuse d'Orion, M42) ou des amas ouverts. On peut aussi regarder des détails de la Lune. Le principal défaut des jumelles en astronomie tient au fait que, si l'on observe en tenant les jumelles avec les mains, le champ de vision est très instable. Il faut donc de préférence utiliser un trépied pour stabiliser l'image.

Un conseil : l'observation du superbe amas ouvert M45, plus connu sous le nom de l'amas des Pléiades dans la constellation du Taureau est magnifique avec des jumelles de grossissement moyen. Pas besoin de l'observer avec un télescope ou une lunette astronomique, ou alors avec un oculaire de très faible grossissement (x6 ou x8).

Dans le commerce, les jumelles sont caractérisées principalement par deux nombres, souvent notés a x b :

- Le premier chiffre, a, représente le coefficient de grossissement des jumelles.
- Le deuxième chiffre, b, représente le diamètre des optiques des jumelles. Il est exprimé en millimètre.
- Certaines jumelles ont des prismes en Bk-7 (boro-silicate), verre de qualité inférieure aux prismes en Bak4 (baryum) offrant une transmission optimale de la lumière.
- On remarque que les lentilles possèdent des reflets de différentes couleurs, cela provient du traitement optique appliqué. Préférez les reflets violacés, rouge bordeaux, et verts aux bleutés et orangés. Si le reflet est "blanc", c'est que la lentille n'est pas traitée. Il est mentionné : Fully Multicoated ou Fully Broadband Multicoated sur les jumelles bénéficiant des meilleurs traitements optiques.
- Pour obtenir le champ que l'observateur semble voir (champ de vision apparent) : on multiplie le champ réel par le grossissement des jumelles. Par exemple des jumelles "10x50, champ 6.5°" le champ de 6.5° représente le champ vu par les jumelles. Elles offrent un champ apparent de 65° à l'observateur. Si le champ apparent est supérieur à 60° il est considéré comme étant "grand angle". Mais attention parfois certains modèles de jumelles ou d'oculaires grand angles présentent beaucoup de chromatisme et autres défauts optiques.
- La pupille de sortie est le diamètre du faisceau lumineux quittant l'oculaire. Elle se détermine en divisant le diamètre des optiques par le grossissement. Plus la pupille de sortie est grande, plus les jumelles sont lumineuses, mais si elle dépasse le diamètre de l'iris de l'observateur, de la lumière est perdue.

Une nouveauté dans les jumelles destinées à l'astronomie : Les jumelles (ou les yeux) de Hibou



Ces jumelles ont un grossissement de 2 ou 2,1 et elles ont un angle de vue de 40 ou de 54 mm.

Le but des jumelles de Hibou (ainsi nommées pour l'aspect de « gros yeux ») n'est pas de grossir fortement des objets du ciel comme pour observer une planète, un amas ou la Lune. En effet le grossissement de 2 fois est très faible. Le but réel est de voir à travers elles une beaucoup plus grande quantité d'étoiles en rendant visibles des étoiles ou des objets qui sont invisibles à l'œil nu. Certains parlent de 5 à 10 fois plus d'étoiles !!!

Il est courant de dire qu'un individu doté d'une vue standard ne voit que des étoiles qui ont une magnitude apparente de + 5,8 à + 6. Naturellement, cela dépend des individus et cela dépend également de la qualité du ciel sous lequel on regarde. Ce pourquoi, par exemple, on ne peut pas voir Uranus [5,8 à 6,1] (et encore moins Neptune [entre 7,7 et 8]) à l'œil nu. Avec ces lunettes on peut voir Uranus car le grossissement, même modeste dont on dispose, va permettre de voir des éléments dont la magnitude apparente va être de 6 ou 7.

Suivant les modèles et les marques, ce sont des jumelles dont le coût varie de 90 à 300 € (prix en automne 2023).

V Les télescopes

A) Généralités

Un **télescope** (du grec *τηλε* (*tele*) signifiant « loin » et *σκοπεῖν* (*skopein*) signifiant « regarder, voir ») est un instrument d'optique permettant d'augmenter la luminosité ainsi que la taille apparente des objets à observer. Son rôle de récepteur de lumière est souvent plus important que son grossissement optique, il permet d'apercevoir des objets célestes ponctuels difficilement perceptibles ou invisibles à l'œil nu. Les télescopes sont principalement utilisés en astronomie, car leurs réglages ne les rendent propices qu'aux observations d'objets très éloignés et se déplaçant relativement lentement.

On distingue, notamment en France, deux types majeurs de télescopes, selon la manière dont la lumière est focalisée par l'objectif :

- dans un *télescope réfracteur*, appelé lunette astronomique en France, la lumière est focalisée par un *système dioptrique* composé d'un ensemble de lentilles (réfraction);
- dans un *télescope réflecteur*, auquel se restreint l'appellation de télescope en France, la lumière est focalisée par un *système catadioptrique* composé de miroirs (réflexion) mais aussi de dioptres (ex. correcteurs).

Histoire et généralités

Précurseur du télescope, la lunette d'approche a été conçue en Italie vers 1586; son invention est très probablement due à l'opticien italien Giambattista della Porta. Mais c'est le 21 août 1609 que l'astronome italien Galilée présenta, au sommet du campanile, la première lunette astronomique au Doge Leonardo Donato et aux membres du Sénat. Son confrère allemand Johannes Kepler en perfectionna le principe, en proposant une formule optique à deux lentilles convexes.



Réplique du télescope de 6 pouces qu'Isaac Newton présenta à la Royal Society en 1672

Dans un télescope, un miroir concave est utilisé pour former l'image. En 1663, le mathématicien écossais James Gregory fut le premier à proposer la formule du télescope avec un grandissement dû au secondaire. Néanmoins, Marin Mersenne avait, lui, anticipé un système dans lequel le primaire et le secondaire étaient paraboliques, la pupille de sortie était située sur le secondaire, qui servait ainsi d'oculaire. Mais le champ était très faible. Le mathématicien et physicien anglais Isaac Newton en construisit une première version en 1671. Dans ce type d'instrument, la lumière réfléchiée par le miroir primaire concave doit être amenée à une position d'observation, en dessous ou sur le côté de l'instrument. Henry Draper, l'un des tout premiers astronomes américains à construire un télescope, utilisera deux siècles plus tard un prisme à réflexion totale au lieu du miroir plan du télescope de Newton. Le pionnier fut le télescope de 2,54 m de diamètre de l'observatoire du Mont Wilson, en Californie : demeuré célèbre pour avoir servi dans les années 1920 aux travaux de l'astronome américain Edwin Hubble, son utilisation cessa de 1985 à 1992 sous l'effet de

pressions financières. La conception des télescopes Keck marque une innovation importante : la surface réfléchissante du miroir de chacun des deux télescopes est composée d'une mosaïque de trente-six miroirs hexagonaux, tous orientables individuellement grâce à trois vérins. Elle équivaut à un miroir primaire de 10 m de diamètre, sans en avoir le poids. Des techniques dites d'optique active permettent de jouer sur les vérins pour optimiser le profil de la surface réfléchissante totale. De son côté, le Very Large Telescope (VLT) de l'European Southern Observatory (ESO), est composé de quatre télescopes, possédant chacun un miroir de 8,20 m. Il est situé au Chili, au sommet du Cerro Paranal, à 2 600 m d'altitude. Il a été équipé en 2002 du système d'optique adaptative NAOS lui permettant d'être deux fois plus précis que le télescope spatial Hubble. Il est aussi possible aujourd'hui d'utiliser dans le domaine optique les principes de l'interférométrie pour améliorer la résolution. C'est le principe utilisé par les deux Kecks, mais surtout par le VLT dont les quatre miroirs, distants au maximum de 130 m, ont la même résolution théorique qu'un seul miroir de 130 m de diamètre. La sensibilité n'est cependant pas améliorée, et la technique de l'interférométrie reste assez spéciale, souvent utilisée dans des cas très particuliers.

Objectif

Dans un télescope l'objectif est un miroir concave, le plus souvent parabolique. À la différence des glaces utilisées dans la vie courante, la face réfléchissante est située en avant, de sorte que la lumière ne traverse pas le verre qui sert uniquement de support à une pellicule d'aluminium de quelques centièmes de micromètres. La lumière étant simplement réfléchiée et non réfractée, contrairement à ce qui se passe dans une lunette astronomique, l'achromatisme des télescopes est total. La lumière est ensuite focalisée en un point appelé foyer image. Le faisceau convergent peut être renvoyé vers un oculaire à l'aide d'un second miroir qui est plan dans le cas d'un télescope de Newton. Ce petit miroir provoque inévitablement une obstruction, c'est-à-dire une perte de luminosité ce qui n'est pas grave, mais aussi une légère perte de contraste sans gravité si elle ne dépasse pas 20 %.



Oculaires (voir Chapitre IX)

L'oculaire est la partie de l'instrument qui permet d'agrandir l'image produite par l'objectif au niveau du foyer-image; un oculaire n'est rien d'autre qu'une loupe perfectionnée. La mise au point se fait en réglant la distance entre l'objectif et l'oculaire. Un télescope est théoriquement un instrument afocal, c'est-à-dire qu'il est possible de faire coïncider le foyer-image du miroir primaire avec le foyer-objet de l'oculaire. Les oculaires sont interchangeables, ce qui permet de modifier les caractéristiques de l'instrument. Ils sont constitués de lentilles qui introduisent des aberrations optiques plus ou moins bien corrigées selon les modèles. Le plus courant est aujourd'hui l'oculaire de Plössl, tandis que les oculaires de Huygens et de Ramsden, composés de deux lentilles, sont aujourd'hui abandonnés. Le diamètre des oculaires est normalisé, il est donc possible de les utiliser indifféremment sur tout type d'instrument, y compris avec une lunette astronomique. Le standard américain de 1" 1/4 (31,75 mm) est le plus courant. Mais les oculaires de 2" (50,8 mm) sont de plus en plus populaires pour les longues focales, malgré leur prix plus élevé.

Monture

La monture est la partie mobile qui supporte et permet d'orienter l'instrument. Ces montures s'appliquent tant aux télescopes qu'aux lunettes astronomiques. Il existe deux grands types de monture : les montures **équatoriales** et les montures **azimutales**. Voir les spécificités de ces montures au *chapitre VIII*.

L'automatisation à la portée du grand public (voir chapitre VIII)

L'évolution la plus importante de ces dernières années est la possibilité, pour les montures les plus sophistiquées, d'être munies d'un dispositif autonome de correction des erreurs de suivi d'un astre : ces montures permettent le guidage par un autoguideur ou une caméra d'astronomie à double capteur, et ce grâce à des algorithmes de traitement d'image qui permettent d'asservir la position de la monture aux dérives constatées à l'image. On peut par ailleurs noter l'apparition de services d'astrophotographie par Internet (montures pilotées à distance).

Accessoires

Outre les éléments déjà décrits et évidemment indispensables à l'utilisation d'un télescope, divers accessoires, utilisables tant avec un télescope qu'une lunette astronomique, permettent d'élargir le champ d'utilisation d'un instrument :

Chercheur

Ce viseur, une petite lunette généralement réticulée, doit être correctement réglé : il doit être parallèle au tube de l'instrument. Pour le vérifier, visez un objet terrestre le plus éloigné possible comme le toit d'une maison et regardez si le centre du réticule correspond au centre du champ de vision du télescope. Son but est de faciliter le pointage vers une zone du ciel grâce à son champ de vision plus large, ce qui permet de se repérer plus facilement parmi les étoiles. Le grossissement d'un chercheur standard est de x6 à x8.

Trépied

Élément dont la grande importance ne doit pas être négligée, il accueille la monture et supporte l'instrument. Pour cette raison, il doit être adapté pour supporter le poids de l'ensemble. Divers modèles sont disponibles, réalisés en aluminium ou acier, tous visant un même but : équilibrer et stabiliser l'ensemble pour éviter au maximum les risques de bascule de l'instrument (quelle que soit sa position) et absorber les vibrations. Utilisez de préférence un trépied solide, plutôt surdimensionné par rapport avec votre instrument que le contraire.

Renvoi coudé

Il permet une observation plus confortable et évite d'avoir recours à des postures peu confortables durant l'observation, principalement vers le zénith. Son utilisation n'est pas nécessaire avec un télescope du type Newton du fait de sa construction. Les renvois coudés peuvent être constitués d'un miroir ou d'un prisme à réflexion totale. Ils permettent de dévier le rayon lumineux de 90° par rapport à l'axe initial. Très utiles avec des lunettes astronomiques ou des télescopes ayant l'axe de visée dans le prolongement du tube (Schmidt-Cassegrain, Ritchey-Chrétien, Maksutov-Cassegrain, etc.)

Lentille de Barlow

La lentille de Barlow allonge la distance focale à laquelle se forme le foyer-image. Elle s'utilise en complément de l'oculaire, dont elle permet de multiplier le grossissement par le coefficient (généralement 2, mais aussi 3, voire 4) qui la caractérise. Celles vendues avec les télescopes sont souvent de mauvaise qualité. La lentille de Barlow doit être constituée d'un doublet ou triplet achromatique pour ne pas altérer l'image et son utilisation doit être réservée à la Lune et aux planètes. Son intérêt est d'éviter d'utiliser les lentilles de très courtes focales qui sont coûteuses et fragiles (moins de 5 mm). Elle sert aussi à rejeter le plan focal résultant en dehors de la monture et de pouvoir y placer, dès lors qu'il est accessible, une plaque photographique ou un capteur CCD.

Réducteur de focale

Cet instrument a l'effet inverse de la lentille de Barlow, c'est-à-dire qu'il raccourcit la distance focale du foyer-image. Pour cela, il doit être placé entre l'objectif et le foyer. En diminuant le rapport f/D (voir plus loin), il réduit le grandissement. Son utilisation est réservée à la photographie au foyer (argentique ou numérique) et permet d'augmenter la dimension (angulaire) du champ photographique, ainsi que la luminosité, ce qui permet de diminuer les temps de pose ou d'accéder à des objets plus diffus.

Filtre lunaire

Ce filtre est utilisé lors de l'observation de la Lune qui est très lumineuse et peut créer un éblouissement. (voir Chapitre X)

Filtre solaire

Observer le soleil avec un télescope va définitivement détruire la rétine de l'œil concerné en une fraction de seconde. C'est extrêmement dangereux et irréversible. C'est pourquoi on utilise des filtres solaires. (voir Chapitre X)

Caractéristiques et propriétés

Caractéristiques techniques

Le diamètre

Le diamètre du télescope, en l'occurrence le miroir primaire, est la caractéristique la plus importante de l'instrument car la plupart de ses propriétés optiques en dépendent. En effet, plus celui-ci est grand, au plus il collecte de lumière et permet d'affiner les détails des structures observées en planétaire et en ciel profond des objets peu lumineux et de petite taille apparente. Le diamètre est généralement exprimé en millimètres pour les instruments du commerce, quelquefois en pouces (1" = 25,4 mm).

La longueur focale

Il peut s'agir de la longueur focale du miroir primaire, ou de celle de l'instrument complet, ou de celle des oculaires. Pour une lunette ou un télescope Newton, la longueur focale de l'instrument (exprimée en mm) correspond à celle de l'objectif, alors que pour les télescopes Cassegrain (et les formules optiques comparables) la longueur focale ne peut être que le résultat d'un calcul propre à l'association d'un miroir primaire (concave) et d'un miroir secondaire (convexe). La longueur focale est ce qui permet de grossir les objets observés. Pour un télescope possédant une focale de 1600 mm et un oculaire de 20 mm, le grossissement est de : x80, selon la formule : $\text{grossissement} = \text{focale du télescope} / \text{focale de l'oculaire}$.

Le rapport f/D

Le rapport focale/diamètre est le rapport de la longueur focale de l'objectif et de son diamètre, exprimés bien sûr dans la même unité. Ce rapport est essentiel pour juger de la capacité de l'instrument à observer ou photographier des objets faiblement lumineux, selon les mêmes règles que pour les objectifs photographiques. Pour une même formule optique (voir types de télescopes ci-dessous), un faible rapport f/D donne un instrument plus compact, donc stable et facile à manier et transporter. Néanmoins, la précision de collimation croît comme $(D/f)^2$. En d'autres termes, un télescope ouvert à $f/D = 5$ sera deux fois plus difficile à collimater qu'un télescope ouvert à $f/D = 7$. Au-delà de $f/D = 10$, l'instrument a un champ limité ce qui convient à l'observation planétaire, moins à celle des objets diffus du ciel profond. En outre, les oculaires pouvant être de focale plus longue, le recul d'œil et donc le confort en seront meilleurs. Pour l'astrophotographie un f/D faible (4 à 6) sera intéressant pour limiter le temps de pose tout en simplifiant la collimation, surtout si l'on améliore le champ avec un correcteur de Ross à deux lentilles.

Propriétés optiques

Le pouvoir de résolution

Le pouvoir de résolution est la capacité d'un système optique à révéler les détails, il gagne en finesse avec le diamètre de l'objectif. Le pouvoir de résolution mesure le plus petit angle séparant deux points que l'on parvient à voir comme distincts l'un de l'autre, soit environ 1 minute d'arc pour l'œil humain. On peut le calculer fort simplement en divisant 120 par le diamètre de l'instrument exprimé en mm. Par exemple, un télescope de 114 mm de diamètre a un pouvoir séparateur d'environ 1" (120/114), un télescope de 200 mm a un pouvoir séparateur de 0,6". Toutefois, les turbulences atmosphériques, la stabilité de l'instrument et la qualité de l'objectif empêchent souvent d'atteindre la limite théorique de résolution.

On peut déterminer la taille T des détails que peut résoudre un instrument par la relation : $T = \tan \frac{P}{3600} \times D$

Où D est la distance de l'astre que l'on désire observer, et P (seconde d'arc) le pouvoir de résolution. Par exemple, un télescope de 200 mm ($P = 0,6''$), pourra discerner sur la Lune ($D = 392000$ km), des détails de 1,14 km (T).

La clarté

La clarté augmente avec le diamètre de l'objectif, elle est théoriquement proportionnelle à la surface de la section du télescope, diminuée de l'obstruction du miroir secondaire. On peut calculer un facteur approximatif en divisant le carré du diamètre de l'objectif à celui de la pupille (environ 6 mm dans le noir). Par exemple, si un télescope a un diamètre de 114 mm, il collectera 361 fois plus de lumière que l'œil ($114^2/6^2$). Toutefois, la luminosité des images dépend aussi du grandissement, sauf pour les étoiles qui fournissent toujours une image ponctuelle. Les astres diffus, tels que les nébuleuses ou les galaxies, doivent donc être observés avec des oculaires adaptés au rapport f/D pour pouvoir appliquer de faibles grandissements. L'œil humain n'est plus guère utilisé comme « capteur » direct. L'ancienne plaque photographique est remplacée par des capteurs électroniques dont le rendement réel dépasse les 50% pour les modèles les plus performants.

Le grandissement

Il correspond au rapport entre le diamètre apparent de l'image à la sortie de l'oculaire et le diamètre apparent de l'objet réel vu par l'œil nu. Il peut se calculer en divisant la longueur focale du miroir primaire par celle de l'oculaire. Il est précisément limité par la clarté et le pouvoir de résolution :

- Pour augmenter le grandissement avec un instrument donné, il faut utiliser un oculaire de petite longueur focale. Les détails se trouvent agrandis, mais la clarté en est réduite d'autant, puisqu'on ne va considérer qu'une partie des rayons transmis par l'instrument. Le diamètre de l'objectif est donc un facteur essentiel pour collecter suffisamment de lumière, et atteindre un grandissement élevé.
- Au-delà de la limite de résolution de l'instrument, le grandissement ne révèle plus d'autres détails que les défauts optiques de l'équipement utilisé.

A contrario, un faible grandissement permet d'observer un large champ du ciel, ce qui peut être mis à profit pour l'observation d'objets étendus. Un faible grandissement nécessite un instrument de courte focale : un oculaire grand champ de faible longueur focale permet en effet en théorie de compenser un rapport f/D élevé de l'objectif, mais le phénomène de vignettage, lui, ne peut pas être surmonté : les bords de l'image seront sombres, voire noirs (pour des conseils plus précis, voir Observation du ciel et Astrophotographie).

La couleur

La plupart des télescopes amateurs semblent transmettre des images peu colorées. Cette limitation est en réalité due uniquement à l'œil, qui n'est pas suffisamment sensible à la faible luminosité transmise par le télescope pour distinguer les couleurs (stimulation des bâtonnets, et non des cônes). En réalité, les télescopes sont assez fidèles pour la restitution de la couleur, et généralement supérieurs aux lunettes astronomiques. Avec un bon instrument, les couleurs des planètes sont visibles. Concernant les objets lointains (hormis les étoiles dont la couleur est discernable, à l'œil nu pour les plus brillantes), selon les individus, les objets observés et la taille de l'instrument, on peut au mieux discerner la couleur verte, à laquelle l'œil est plus sensible. Les autres couleurs ne sont accessibles qu'avec des télescopes puissants (plusieurs dizaines de centimètres de diamètre).

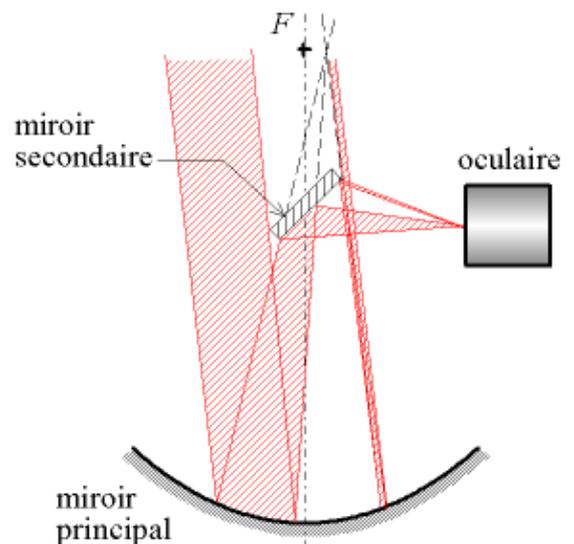
Types de télescopes

Un télescope utilise une formule optique qui, par la forme et la disposition des miroirs, cherche à obtenir des images de la meilleure qualité possible, tant en finesse qu'en luminosité, pour révéler le maximum de détails.

On distingue deux types de télescopes :

- le télescope réflecteur (Types Newton, Dobson, Herschel, Gregory, Cassegrain, Schwarzschild, Dall-Kirkham)
- le télescope catadioptrique (Types Ritchey-Chrétien, Schmidt, Schmidt-Cassegrain, Maksutov-Cassegrain)

Le premier emploie exclusivement des miroirs pour collecter et focaliser la lumière sur l'oculaire (comme ceux de type Newton), alors que le second type se voit adjoindre une lentille mince, la lame correctrice, disposée à l'avant du tube pour accroître le champ visuel (utilisé notamment par la formule Schmidt-Cassegrain).



B) Télescope de Newton (1668)

Le **télescope de Newton**, souvent appelé communément un « Newton », est un dispositif optique composé de 2 miroirs. C'est donc un dispositif à objectif « réflecteur » (qui réfléchit la lumière) *a contrario* de la lunette astronomique qui est un dispositif à objectif « réfracteur » (la lumière traverse les parties optiques, elle est « réfractée »). Il a été inventé par Isaac Newton.

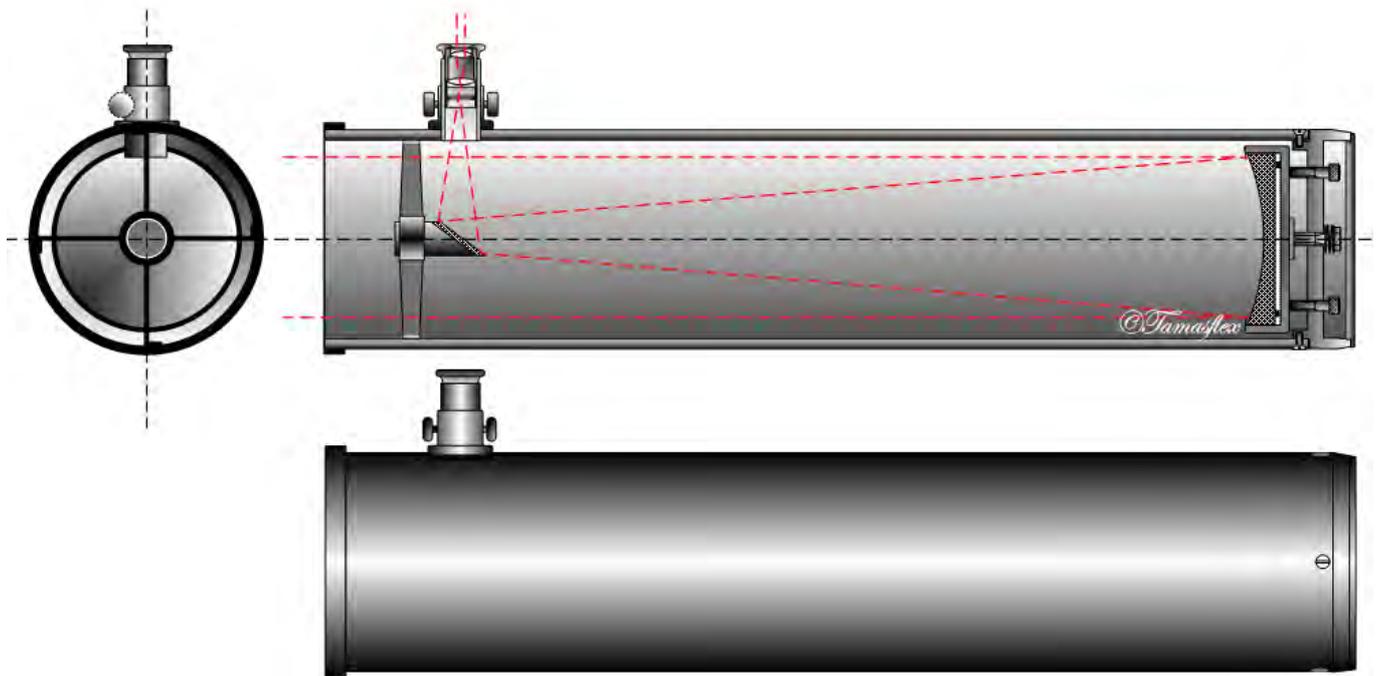
Principe optique

Ce télescope est composé d'un miroir primaire ou objectif, de forme théoriquement paraboloidale (sphérique en pratique) et d'un miroir plus petit appelé « secondaire » qui est plan. Le premier miroir permet de collecter la lumière provenant de la région du ciel pointée, le second permet de dévier la lumière hors de l'axe optique de manière perpendiculaire.

Le premier miroir est caractérisé par :

- Son diamètre (ou ouverture). La quantité de lumière collectée ainsi que le pouvoir séparateur (angulaire) de l'instrument dépendent de ce dernier. La quantité de lumière est proportionnelle au carré du diamètre.
- La distance entre le centre du miroir et le point focal image (endroit où se forme l'image d'un objet situé à l'infini) appelée la distance focale. C'est elle qui détermine la grandeur, dans le plan focal, de l'image primaire de l'objet observé.

Ainsi on peut déterminer le rapport F/D (focale sur diamètre) qui donne une indication sur les performances photographiques de l'appareil mais aussi de la facilité de mise au point. Un rapport F/D de 10 est pour une utilisation plutôt planétaire (objets bien brillants mais petits) alors qu'un rapport F/D de 3-4 est dédié au ciel profond (objets étendus et de faible magnitude).



Trajet des rayons lumineux dans le télescope de Newton

Avantages

La fabrication des miroirs paraboliques de moyen diamètre (40-60 cm) est beaucoup plus simple et à la portée d'un amateur éclairé contrairement à la fabrication d'une lentille de diamètre équivalent. La réfraction due à l'instrument est nulle. Pas d'aberration chromatique contrairement à une lentille simple. Pour obtenir les mêmes résultats avec un instrument réfracteur, il faut utiliser des verres très spéciaux et souvent chers (doublets achromatiques, triplet fluorite).

Inconvénients

Un Newton présente une aberration que l'on appelle la « coma » (*coma* : chevelure, les étoiles en bord de champ ne sont plus des points) ou encore l'aigrette. Ceci limite la qualité sur les bords du champ des télescopes très ouverts.

Le secondaire, ainsi que l'araignée qui le supporte, obstruent le champ visé, ce qui crée des figures de diffraction gênantes et fait perdre un peu de la lumière par comparaison avec une lunette de la même ouverture (ce qui provoque une diminution de contraste). Ceci peut être caractérisé par l'obstruction, le quotient du diamètre du miroir secondaire par le diamètre du miroir primaire, généralement exprimée en pourcentage. En pratique on ne dépassera pas 20 % pour du visuel et 30 % pour la photographie. En deçà de 20 %, la baisse de contraste est négligeable. On dit souvent qu'un miroir de 200 mm avec 20 % d'obstruction est égal à une lunette apochromatique de 160 mm, un 300 mm avec 30 % à une lunette apochromatique de 210 mm, etc. Cette règle est bien confirmée par les courbes de FTM.

Fabrication d'un miroir primaire

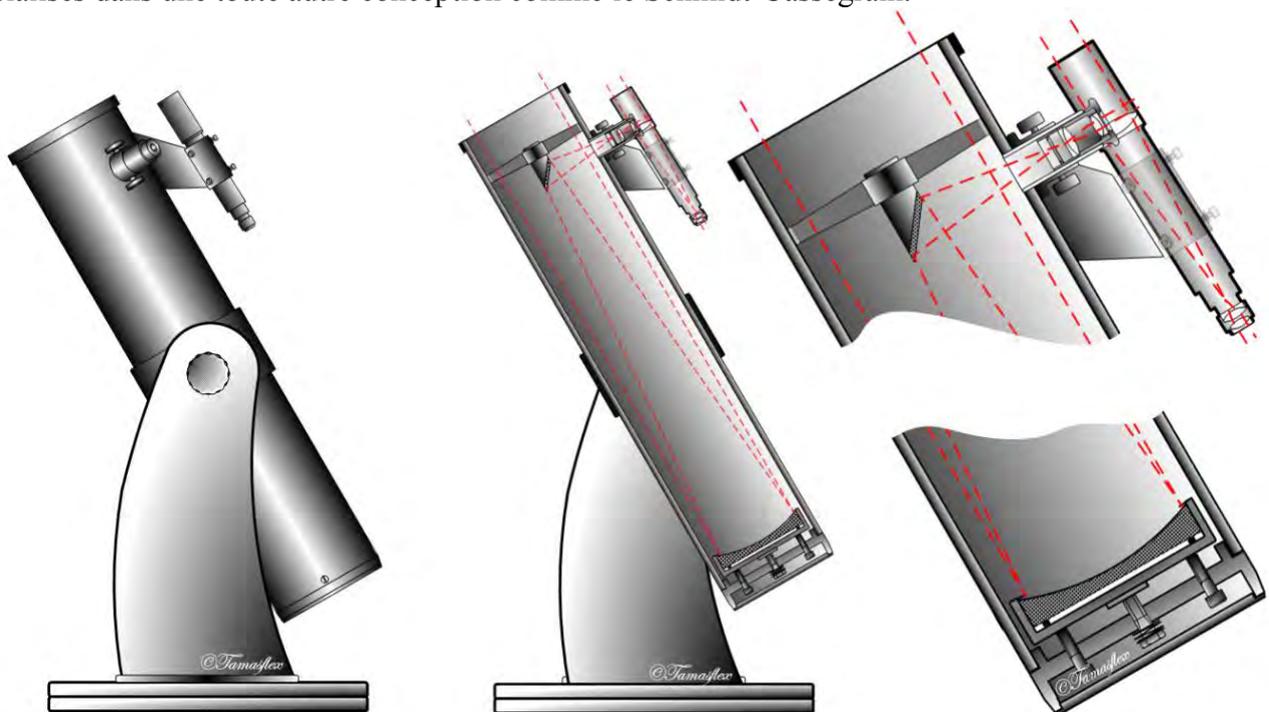
La surface sphérique est beaucoup plus simple à fabriquer manuellement qu'une surface parabolique. Inconvénient, elle présente une aberration de sphéricité qui limite le diamètre du miroir utile (comme l'a constaté Newton) et rend globalement l'image floue sur un foyer plan. On peut utiliser ce type de miroir mais à condition d'utiliser de longs rapports focaux (f/D) pour minimiser les effets de cette aberration de sorte que tous les rayons passent dans le cercle d'erreur de la tache de diffraction du disque d'Airy et passent inaperçus. Pour éviter cette aberration, les miroirs primaires concaves ont une forme asphérique de géométrie parabolique. On l'obtient par rectification du polissage de la surface sphérique. Cette étape s'appelle la parabolisation. André Danjon et André Couder donnent les diamètres et focales acceptables pour fabriquer un miroir primaire sphérique à la limite de la diffraction (taillé à $\lambda/4$). « La partie mécanique nécessaire à la mise en station de l'ensemble augmentant vite avec le diamètre de ce miroir, on le limitera à 200 mm, taille idéale en regard des gestes nécessaires à sa fabrication. Comptez environ 6 mois de taille et de polissage, moins dans un club avec des gens expérimentés. »

Ce délai est valable pour un novice (auquel s'adresse d'abord ce livre) ou une personne ne disposant pas de beaucoup de temps libre. En effet, en pratique à partir d'un disque de verre brut sur mesure, un amateur expérimenté peut fabriquer manuellement un miroir parabolique en 2 semaines (cf. par exemple les stages de l'Association Albireo à Albi ou de la Société Astronomique de France). Grâce à une machine-outil (CNC), on peut accomplir le même travail en 40 heures pour un 200 mm et en 60 à 70 heures pour 300 mm $f/4$. Si l'amateur bénéficie du support et de l'expérience des membres d'un club, la taille d'un miroir parabolique ne devrait pas être un problème. Un travail de qualité permet d'obtenir un polissage dont la précision est supérieure à $\lambda/10$, une valeur que même les fabricants professionnels de matériel amateur dépassent rarement pour une question de rentabilité. Grâce au support d'un club, quand l'amateur sera un peu plus expérimenté, il pourra se permettre de tailler de plus grands miroirs, y compris percés en leur centre (type Cassegrain ou Grégorien), sans trop d'efforts grâce notamment aux outils segmentés en céramique et aux machines-outils. Après le polissage, il faut utiliser (généralement on le fabrique manuellement) un appareil de contrôle (par exemple un appareil de Foucault ou Foucaultoir) pour vérifier que la sphéricité du futur miroir s'approche le plus possible de la forme de révolution souhaitée. Ces mesures comme toutes les évaluations suivantes font référence à des calculs simples de géométrie (calcul du rayon de courbure, de la flèche, etc), l'amateur s'aidant généralement de l'informatique et de programmes plus ou moins élaborés, gratuits ou sous licence. On effectue ensuite la parabolisation pour atteindre la forme finale et on contrôle le résultat à l'aide du Foucaultoir et d'un masque de Couderc. On peut aussi réaliser des tests plus objectifs et plus complets avec un interféromètre de Michelson et même utiliser des appareils professionnels d'analyse de front d'onde tel l'analyseur Shack Hartmann (SHWFS). Lorsque ce travail est terminé, on réalise un bulletin de contrôle pour vérifier que toutes les valeurs de la surface sont nominales et donc que la courbure du disque est bien celle d'une parabole et présente la précision requise. A ce stade, si nécessaire, on peut encore effectuer des retouches de polissage suivies d'un nouveau contrôle, et on répète cette opération jusqu'au moment où le résultat est satisfaisant. En raison de la précision recherchée, la parabolisation dure aussi longtemps que toutes les autres étapes réunies (ébauche, réunissage, doucissage et polissage), et d'autant plus pour les miroirs ayant un petit rapport focal qui exigent une précision supérieure. Enfin, on procède à l'aluminure (on recouvre la surface du verre d'une couche d'aluminium par évaporation sous vide) et au traitement de surface (antioxydant, renforcement, antireflet et optionnellement anti-buée). Ce traitement s'effectue en une seule étape, généralement dans un établissement spécialisé et dure environ 3 heures.

C) Les Dobsons (1968)

Les télescopes de type « Dobson » sont une variante des télescopes Newton.

En astronomie amateur, le **télescope de Dobson** est un télescope de Newton monté sur une monture azimutale simplifiée. Pour désigner un tel instrument, on entend parfois l'anglicisme **télescope dobsonien** (qui vient de *Dobsonian telescope*), mais plus couramment et simplement, on utilise plutôt le terme **Dobson** ou, plus affectueusement, « **Dob** ». Comme ces noms l'indiquent, c'est l'astronome amateur américain John Dobson, né en 1915, qui est à l'origine de ce concept qui trouve de plus en plus d'adeptes, surtout en Amérique et en Europe. Avant les années 1960 et 1970, les astronomes amateurs n'avaient guère d'autre choix que de mettre la main au porte-monnaie pour trouver du matériel permettant d'observer le ciel de manière approfondie. Souvent, les amateurs d'observation visuelle étaient bridés par le diamètre limité des instruments qu'ils étaient en mesure de s'offrir (toutes choses égales par ailleurs, le prix d'un télescope croît grosso modo exponentiellement avec le diamètre), et la seule manière d'aller plus loin se résumait à se lancer dans l'astrophotographie, plus fastidieuse et qui ne procure pas les mêmes sensations. Selon les dires de John Dobson lui-même, ce dernier a taillé ses premiers miroirs de télescope à la fin des années 1950 dans le plus grand secret de son monastère védiste californien. Il aurait ainsi construit son premier télescope (de 130 mm de diamètre) en 1958 à partir de matériaux de récupération disponibles sur place, y compris les émeris nécessaires au polissage du miroir. Une décennie plus tard (après avoir été expulsé de son monastère pour manque d'assiduité), en 1968 John Dobson mis au point avec les membres de la San Francisco Sidewalk Astronomers le premier télescope dobsonien, un 610 mm de diamètre (24") qu'il présenta au meeting de la Riverside Telescope Makers Conference en 1969. Pour l'anecdote, le tube étant rigide et non démontable, il le transportait dans un minibus acheté d'occasion. Malgré la fragilité de l'installation du premier modèle, John Dobson remporta le Prix de la Meilleur Optique. Bien que son concept fut controversé (monture azimutale et dédié à l'observation visuelle alors que tous les candidats proposaient des instruments équatoriaux et généralement adaptés à l'astrophotographie), Dobson proposa d'en construire d'autres qu'il proposa pour la modique somme de 300 \$. Vu le prix demandé, le succès fut au rendez-vous. Remarquant d'emblée les intérêts inhérents au système (un télescope de grand diamètre pour un coût raisonnable), les astronomes amateurs américains l'ont vite adopté : les Dobson de toutes tailles, fabriqués en un weekend (pour les plus petits) à base de planches, de clous et autres bouts de tuyau devinrent alors monnaie courante. Depuis lors, n'importe qui peut accéder aux beautés du ciel profond moyennant quelques heures de bricolage. Même si ce n'est pas la première approche « *Do it yourself* » qui ait vu le jour en astronomie amateur, c'est assurément l'une des plus populaires. Aujourd'hui le "dob" est au catalogue de pratiquement tous les revendeurs et de nombreux constructeurs, même ceux qui s'étaient spécialisés dans une toute autre conception comme le Schmidt-Cassegrain.



La relative simplicité du Dobson a permis aux industries de l'optique de s'approprier un concept peu coûteux à fabriquer et pouvant ainsi être proposé aux clients à des tarifs compétitifs. A l'orée du XXI^e siècle, des usines chinoises et taïwanaises ont franchi le pas en proposant des télescopes de Dobson (avec un tube en métal) de 150, puis 200, 250 et 300 mm. On ne peut nier que l'apparition de ces instruments dans le commerce a contribué à l'essor de l'astronomie amateur moderne : le débutant d'aujourd'hui peut commencer avec un télescope de 200 mm de diamètre là où la génération précédente devait se contenter d'une lunette de 60 mm ou d'un télescope de 115 mm.

Un télescope transportable

Face à l'urbanisation croissante de leur territoire et plus généralement à la recrudescence de la pollution lumineuse, les astronomes amateurs ont dû se résoudre, pour la plupart, à se déplacer pour observer. Jusqu'à la fin des années 1980, les seuls instruments transportables étaient forcément limités en diamètre puisque la longueur du tube est au minimum du double de celui-ci. Les instruments du commerce les plus gros mais néanmoins transportables que l'on pouvait alors trouver étaient les Schmidt-Cassegrain de 12" (305 mm), pas forcément évidents à mettre en place par une seule personne (plus de 20 kg à hisser sur la monture). Depuis lors, quelques amateurs et artisans américains ont eu l'idée de remplacer le traditionnel tube plein en carton par des tiges métalliques triangulées moins encombrantes, moins lourdes, et surtout démontables, s'inspirant du « tube Serrurier » du télescope Hale de 5 m de l'observatoire du Mont Palomar. Ainsi le Dobson pouvait se démonter en quatre parties distinctes :

- le berceau (« *rocker* ») qui sert de monture,
- la boîte à miroir qui contient le miroir primaire avec son barillet, et sur laquelle sont fixés les tourillons qui reposent sur le berceau,
- la cage du miroir secondaire dans laquelle se trouve le miroir secondaire et le porte-oculaire destiné à recevoir les instruments de l'observateur, et
- les tubes (en général au nombre de huit) destinés à relier la boîte à miroir et la cage du secondaire et éventuellement enveloppés, après montage, d'une « chaussette » en tissu noir permettant de protéger le miroir des intempéries et des lumières parasites.

La principale difficulté de réalisation tient dans la bonne définition du rapport rigidité/poids non seulement dans la structure du télescope, mais aussi dans sa partie optique. Le verre utilisé pour le miroir primaire est très dense, et c'est souvent la pièce la plus lourde. La course aux kilogrammes superflus nécessaire à la réussite du télescope revient à diminuer l'épaisseur du miroir, sachant que s'il est trop fin il va avoir tendance à se déformer sous son propre poids et donc à dégrader la qualité des images. Il est donc souvent nécessaire d'avoir recours à un barillet complexe : des trois points de contact traditionnels on devra souvent passer à six, neuf, dix-huit, vingt-sept points voire plus, tant qu'il est plus avantageux d'avoir un télescope complexe (il faut conserver l'isostatisme du barillet !) que difficile à transporter. Aujourd'hui, nombreux sont les amateurs qui n'hésitent plus à faire appel aux matériaux composites (tubes en fibre de carbone...) ou encore aux services d'un mécanicien. Il existe même des sociétés qui fabriquent des pièces détachées, si bien que l'amateur peut se concentrer sur le polissage du miroir ou bien les travaux de menuiserie. Preuve de la compacité que peut atteindre ce type de télescope, un amateur français est parvenu à faire rentrer un Dobson de 760 mm de diamètre dans le coffre de sa voiture.



Vers plus de sophistication

De moins en moins d'amateurs rechignent à faire appel aux miracles de l'électricité (voire de l'électronique) pour améliorer leur télescope. Le principal défaut du Dobson réside dans l'absence de compensation du mouvement relatif de l'observateur par rapport à la voûte céleste, c'est pourquoi il existe des systèmes de motorisation des deux axes (azimut et hauteur) qui permettent non seulement de suivre les astres observés, mais aussi de pointer automatiquement un objet (système « *go-to* »). Un autre système appelé « table équatoriale » ou « plate-forme équatoriale » permet, une fois glissé sous la monture du télescope, d'assurer le suivi équatorial sans rotation de champ pendant une heure environ; certains amateurs dotés de télescopes de Dobson ont ainsi pu faire de l'imagerie même si ce n'est pas la vocation première de ce type d'instrument.

Les amateurs souhaitant gagner du temps peuvent également équiper leur instrument d'un système de codeurs reliés à une interface permettant de sélectionner l'objet à observer. Une fois cet objet sélectionné, la *raquette* affiche les coordonnées différentielles de l'objet par rapport à la position courante du télescope; une fois que l'observateur a tourné le tube de son télescope de manière à afficher zéro en azimut et en hauteur, alors l'objet voulu doit se trouver dans le champ de l'oculaire. Ce système est appelé « *push-to* » (littéralement « pousser vers ») par opposition au « *go-to* » (nom donné aux systèmes de pointage automatique; signifie « aller vers ») qui suppose un déplacement motorisé et non manuel.

Finalement, le Dobson d'aujourd'hui n'a bien souvent plus beaucoup de points communs avec l'idée originale de John Dobson. Même si cet esprit reste vivace chez beaucoup d'astronomes amateurs, il n'en demeure pas moins que l'époque des planches, des quatre clous et des miroirs taillés à la va-vite est révolue. Les artisans et bricoleurs talentueux ont montré, depuis, que les télescopes de Dobson réalisés avec soin sont les instruments idéaux pour l'observation visuelle : légers, démontables et avec une bonne qualité optique malgré leur taille, ils peuvent se révéler parfaitement utilisables au quotidien, aussi bien pour l'observation du ciel profond que pour celle des planètes. Bien sûr, une telle approche peut nécessiter un investissement assez important, autant en termes de temps que d'argent. Les télescopes de Dobson sont aussi l'occasion de laisser libre cours à ses idées : ainsi de nombreux amateurs ont construit des Dobson en matériaux composites (fibre de verre et/ou de carbone), des Dobson binoculaires, ou encore des Dobson qui se replient en une simple valisette.

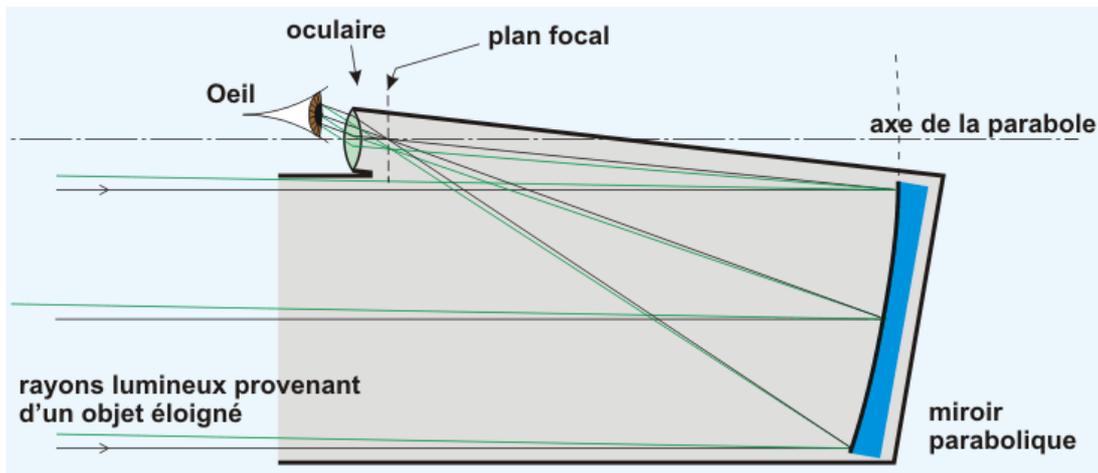
Les 10 avantages des télescopes réflecteurs

1. Le télescope ne subit aucune aberration chromatique car toute la lumière qui réfléchit le miroir ne souffre d'aucune distorsion.
2. Le coût de fabrication d'un télescope est bien moindre qu'une lunette, ce qui se répercute sur le prix grand public.
3. La taille du diamètre est beaucoup plus grande que la lunette, donc plus de lumière est collectée, et par conséquent, le télescope permet l'observation d'un ciel profond (Nébuleuses, galaxies, amas globulaires...).
4. Beaucoup de télescopes sont adaptés pour la pratique de l'astrophotographie.
5. Conception compacte et légère pour les Dobson.
6. Très apprécié des astronomes amateurs grâce à la confortable position du porte-oculaire.
7. Le tube protège les télescopes de Newton contre la buée et le gel.
8. Grâce à son système optique simple, le Newton est un instrument facile à régler (collimation).
9. Le type de construction du Cassegrain lui permet d'être plus compact.
10. Au-dessus d'un rapport focal de $f/6$, les images recueillies sont très lumineuses.

Les 8 inconvénients des télescopes réflecteurs

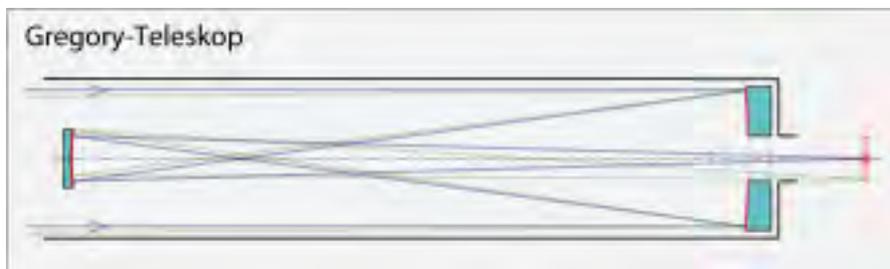
1. Assez encombrants, prévoir de quoi les transporter.
2. **Plus sensibles aux turbulences atmosphériques que les lunettes.**
3. Collimation parfois difficile.
4. Il est nécessaire d'entretenir régulièrement son télescope (nettoyage).
5. Plus fragiles qu'une lunette ou qu'un télescope catadioptrique.
6. Aberration optique : la coma (donne une sorte d'aspect de comète à l'objet observé, ainsi que des contours irisés).
7. Les tubes de 200mm commencent à devenir vraiment encombrants, chers et lourds.
8. Ces types de télescopes ne sont pas adaptés à l'observation terrestre.

D) Télescope de Herschel (1760)

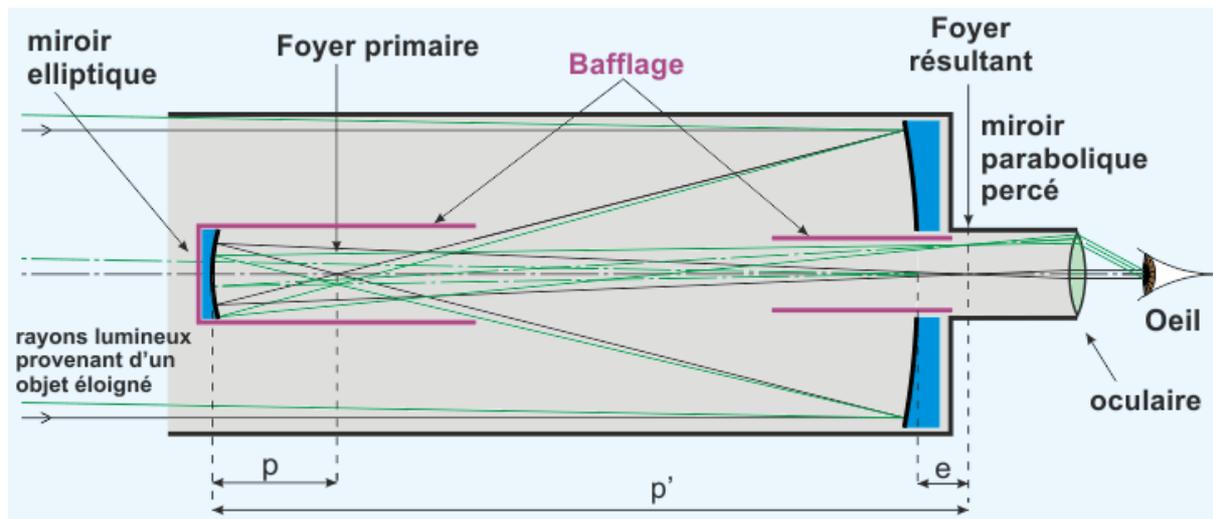


Télescope type Herschel, pratiquement inexistant de nos jours

E) Télescope de Gregory (1673)



Le **télescope grégorien** est un type de télescope composé de deux miroirs, qui fut inventé au XVII^e siècle par James Gregory, un mathématicien et astronome écossais. Il est construit pour la première fois en 1673 par Robert Hooke. Son invention précède celle du premier télescope de Newton que Sir Isaac Newton construit en 1668 mais le premier télescope grégorien ne fut construit que 5 ans après celui de Newton. Les plans du télescope grégorien développés par James Gregory paraissent pour la première fois en 1663 dans une publication de *Optica Promota* (Progrès en optique). Des télescopes de conception similaire ont été retrouvés parmi les travaux de Bonaventura Cavalieri dans *Lo specchio ustorio* (Les verres ardents) en 1632 et ceux de Marin Mersenne dans *L'harmonie universelle* en 1636. Les premières tentatives de construction de Gregory se soldèrent par des échecs étant donné qu'il n'avait aucune connaissance pratique dans le domaine des télescopes et n'était pas parvenu à trouver un opticien capable de construire un télescope à partir de son modèle. Dix ans après la création de son modèle, il parvient enfin à construire le premier télescope grégorien, aidé par Robert Hooke. Un télescope grégorien est composé de deux miroirs concaves. Le miroir primaire, un paraboloïde focalise la lumière en avant du miroir secondaire de forme ellipsoïde qui réfléchit alors l'image vers un trou au centre du miroir primaire. Ce trou permet de résoudre le problème de l'observation de l'image dans un système composé de miroirs. La focalisation à l'avant du miroir secondaire laisse la place pour un diaphragme qui permet de réduire la lumière parasite des astres, c'est-à-dire de la lumière indésirable venant d'astres hors du champ de vue du télescope. La possibilité d'insérer un diaphragme est très utile pour les télescopes observant le Soleil puisque cela réduit aussi la quantité de chaleur parvenant au miroir secondaire et limite donc les déformations dues à la différence de température. Le *Solar Optical Telescope* du satellite Hinode emploie un modèle grégorien pour ces raisons. La conception du télescope donne une image droite de l'objet, ce qui permet des observations terrestres. Il peut par ailleurs être utilisé comme téléobjectif photographique, du fait de son encombrement très inférieur à sa focale. Ce type de télescope a cependant été largement supplanté par le télescope de type Cassegrain. Il est encore utilisé pour de petits télescopes terrestres et des viseurs, car l'image étant droite, il n'est pas nécessaire d'utiliser de prismes pour inverser l'image. L'observatoire Steward coule des miroirs pour des télescopes grégoriens depuis 1985. Pour les constructeurs amateurs de télescopes, la construction d'un télescope grégorien est plus simple que celle d'un Cassegrain car les deux miroirs étant concaves il est possible de tester leur fiabilité avec un test de Foucault (ou « foucaultage »).



Télescope de Gregory

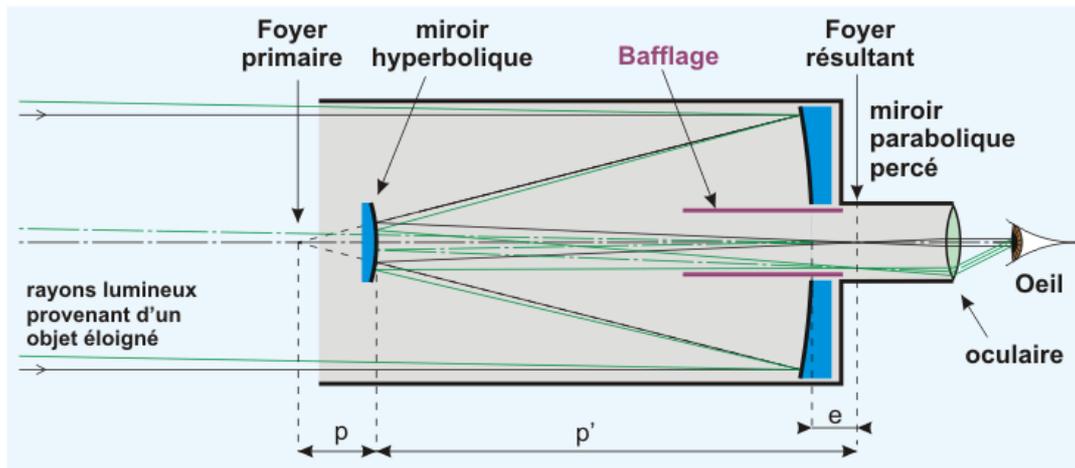


Télescope grégorien vers 1735, Putnam Gallery

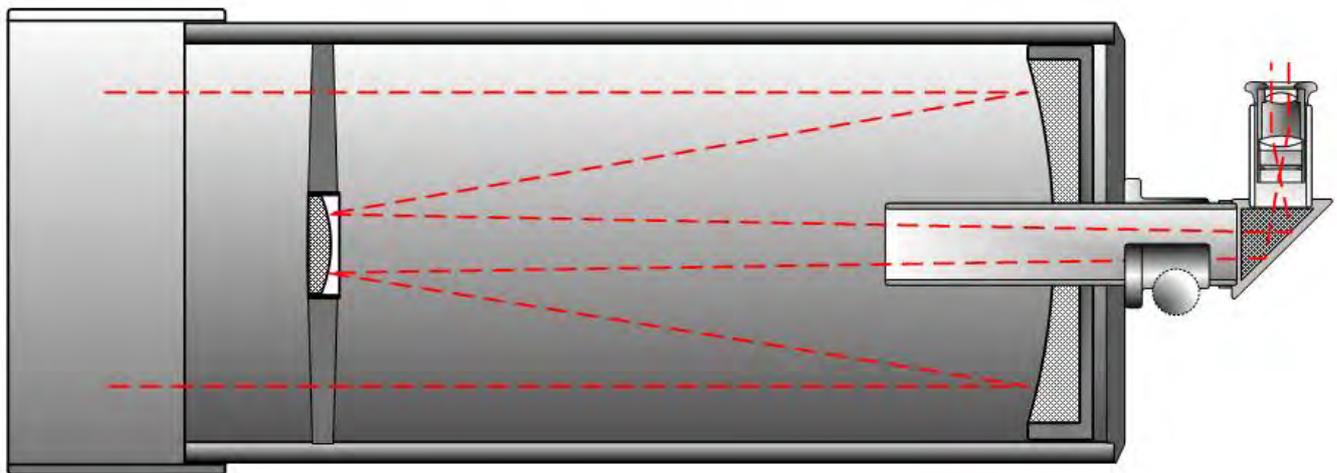
F) Télescope de Cassegrain (1672)

Le **télescope de Cassegrain** est un dispositif optique composé de deux miroirs, un miroir primaire concave et parabolique, dit objectif, et un miroir secondaire convexe hyperbolique. Il s'agit d'un dispositif *réflecteur*, proposé en 1672 par Laurent Cassegrain. Il fait suite à la proposition de l'anglais Gregory, comportant un primaire parabolique concave et un secondaire également concave mais elliptique. Ce dernier, compte tenu de sa facilité de construction, sera utilisé jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Le principal avantage du Cassegrain est sa compacité, qui le rend transportable jusqu'à des diamètres de 300 mm.

Mais l'utilisation d'un miroir parabolique a pour conséquence de créer une aberration de *coma*, ce qui déforme les étoiles en bord de champ en leur donnant une forme qui ressemble à une comète (coma = chevelure) et réduit donc le champ utilisable. Il faudra attendre le télescope Ritchey-Chrétien en 1927 pour réaliser une combinaison où la coma est corrigée. Le physicien allemand Karl Schwarzschild avait déjà donné en 1905 une théorie générale des systèmes à deux miroirs. On ignore si le professeur Chrétien qui a commencé à songer à ce télescope en 1910 a retrouvé ces résultats ou s'il a lu et appliqué le rapport de Schwarzschild (1873-1916).



Le télescope de type Cassegrain « pur »

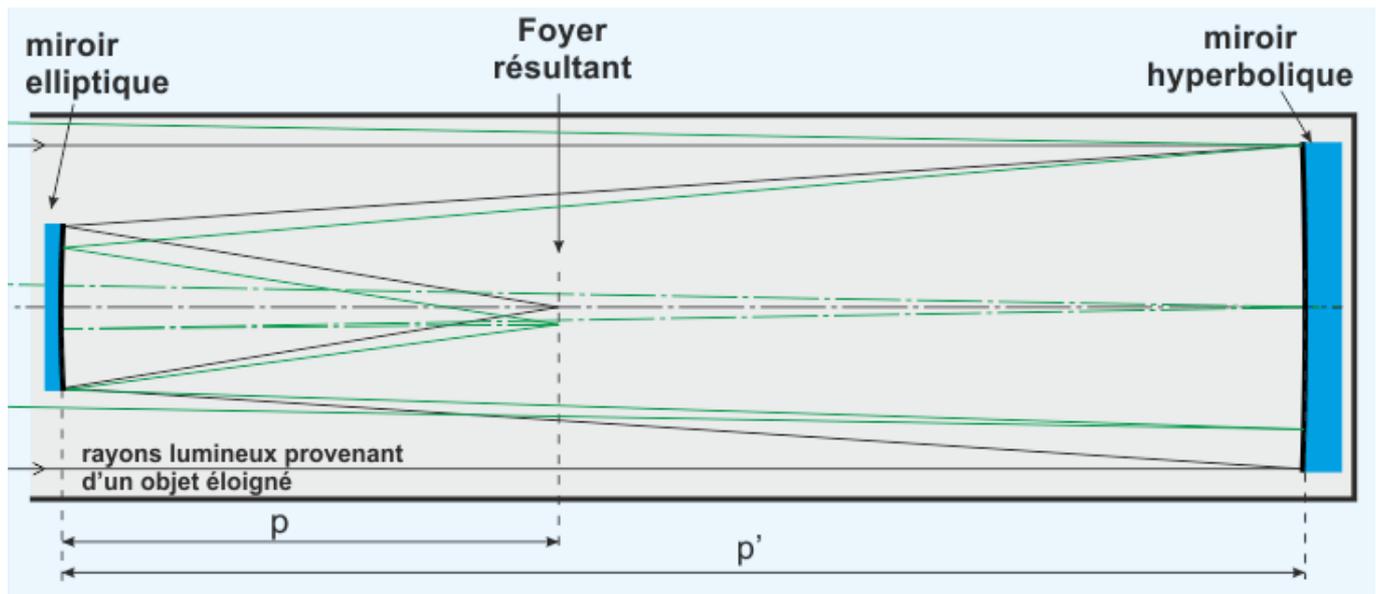


Le télescope de type Cassegrain amélioré, variante catadioptrique

Contrairement au télescope de Newton, le miroir primaire est percé en son centre et les axes optiques des deux miroirs coïncident. L'image formée peut donc être perçue par un observateur, un capteur CCD (etc.) placé derrière le télescope et non sur le côté comme dans le télescope de Newton, ce qui a pour effet de ne pas faire tourner l'image comme dans ce dernier. Le télescope Cassegrain a donné naissance à de nombreuses variantes, notamment les télescopes dits catadioptriques, qui possèdent une lame de fermeture sur laquelle est fixé le miroir secondaire, et qui permet de corriger les aberrations optiques. On trouve parmi ces variantes le télescope Schmidt-Cassegrain, très apprécié parmi les amateurs, qui reprend le montage de Cassegrain en l'associant à une lame de Schmidt pour corriger l'aberration de sphéricité. Cependant, les lames de Schmidt sont assez coûteuses. Le télescope Maksutov-Cassegrain utilise à leur place un ménisque (une lentille concave, avec deux rayons de courbures légèrement différents), plus facilement réalisable par des moyens industriels.

Une autre évolution du Cassegrain est le télescope Ritchey-Chrétien dont la genèse date de 1910 et la première réalisation de 1927 avec un diamètre de 50 cm. Il est composé de deux miroirs hyperboliques, qui donnent une image focale corrigée totalement des aberrations de coma et de sphéricité (télescope aplanétique), reste l'astigmatisme et la courbure de champ qui peuvent être corrigés par des lentilles situées près du foyer. La plupart des télescopes professionnels modernes, notamment Hubble, utilisent toujours la combinaison Ritchey-Chrétien. Un miroir primaire de Ritchey-Chrétien peut être utilisé au foyer, moyennant un correcteur de Ross, constitué de deux lentilles réalisées dans le même verre. Enfin le télescope de Dall-Kirkham (env. 1924), afin de faciliter la réalisation du secondaire, possède un secondaire sphérique et non hyperbolique comme sur le Cassegrain. Il est facilement testable aux franges à l'aide d'un interféromètre de Fizeau sur un calibre sphérique, lui-même testé à l'appareil de Foucault comme un miroir. Compte tenu d'une coma plus élevée, il sera destiné au planétaire. La bonne régularité de la surface sphérique entraînera une excellente définition au centre du champ. Le primaire (elliptique) est un peu moins déformé que la parabole. Le Mewlon de Takahashi est le prototype de ce genre de télescope.

G) Télescope de Schwarzschild (variante du Cassegrain – XX^e siècle)



H) Télescope Ritchey-Chrétien (1910)

En astronomie, le **télescope Ritchey-Chrétien** est un télescope de type Cassegrain particulier, conçu pour éliminer l'aberration optique appelée coma. Ce type de télescope fournit un champ d'observation relativement large comparé à une conception plus conventionnelle. Dans le télescope Ritchey-Chrétien, le miroir primaire et le miroir secondaire sont *hyperboliques*. Il fut inventé au début des années 1910 par l'astronome américain George Willis Ritchey (1864–1945) et l'astronome français Henri Chrétien (1879–1956). Ritchey construisit avec succès le premier télescope Ritchey-Chrétien, d'un diamètre de 0,5 m, en 1927. Le second exemplaire fut un modèle de 1 mètre construit par Ritchey pour l'observatoire naval des États-Unis. La conception de type Ritchey-Chrétien est exempte de coma au 3^e ordre et d'aberration sphérique, bien qu'elle souffre de coma au 5^e ordre, d'un sévère astigmatisme aux grands angles et d'une courbure de champ assez importante. Quand il est focalisé à mi-distance des plans focaux sagittaux et tangentiels, les étoiles apparaissent comme des cercles, rendant ce type de télescope bien adapté à l'observation à large champ et l'astrophotographie. Comme sur les autres télescopes de type Cassegrain, le télescope Ritchey-Chrétien possède un tube optique très court et une conception compacte pour une longueur focale donnée. Il offre de bonnes performances optiques hors-axe, mais il reste relativement rare à cause du coût élevé de fabrication du miroir primaire. La conception Ritchey-Chrétien se rencontre le plus souvent sur les télescopes professionnels à haute performance.

Les courbures des deux miroirs dans la conception Ritchey-Chrétien sont calculées par les relations suivantes :

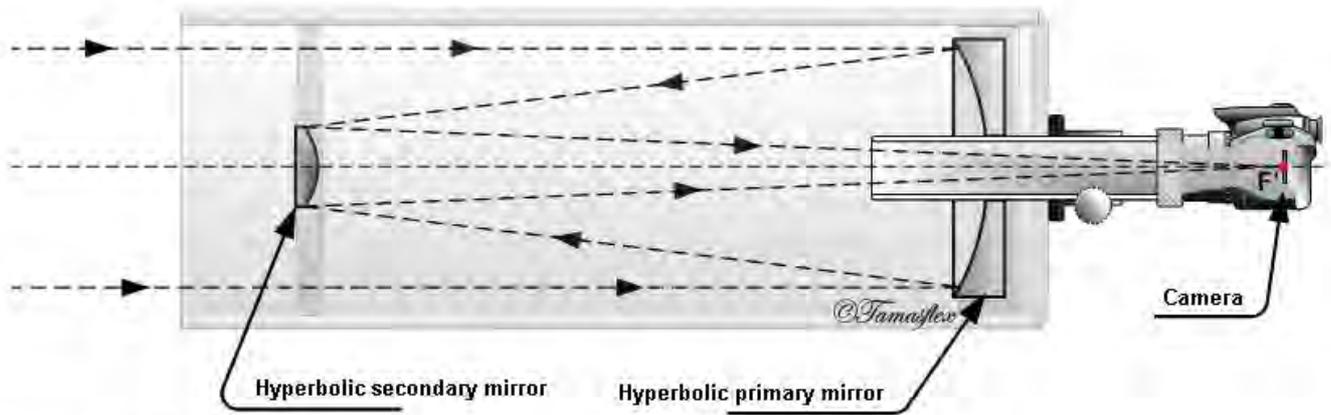
$$C_1 = \frac{(B - F)}{2DF} \quad C_2 = \frac{(B + D - F)}{2DB}$$

où :

- C_1 et C_2 sont les coefficients de déformation de Schwarzschild des miroirs primaire et secondaire, respectivement,
- F est la longueur focale effective du système complet,
- B est la longueur focale arrière, égale à la distance entre le miroir secondaire et le foyer,
- D est la distance entre les deux miroirs.

Un choix approprié de B , D et de F permet d'obtenir *toutes* les configurations de télescope.

Les courbures hyperboliques sont difficiles à vérifier avec les équipements utilisés par les constructeurs amateurs ou les fabricants artisanaux. Cependant, les fabricants d'optique professionnelle et les groupes de recherche importants vérifient leurs miroirs avec des interféromètres. Un Ritchey-Chrétien ne demande donc pas d'équipement supplémentaire, pour un large gain en performances.



Ritchey - Chrétien (RCT)

Liste partielle de grands télescopes Ritchey-Chrétien

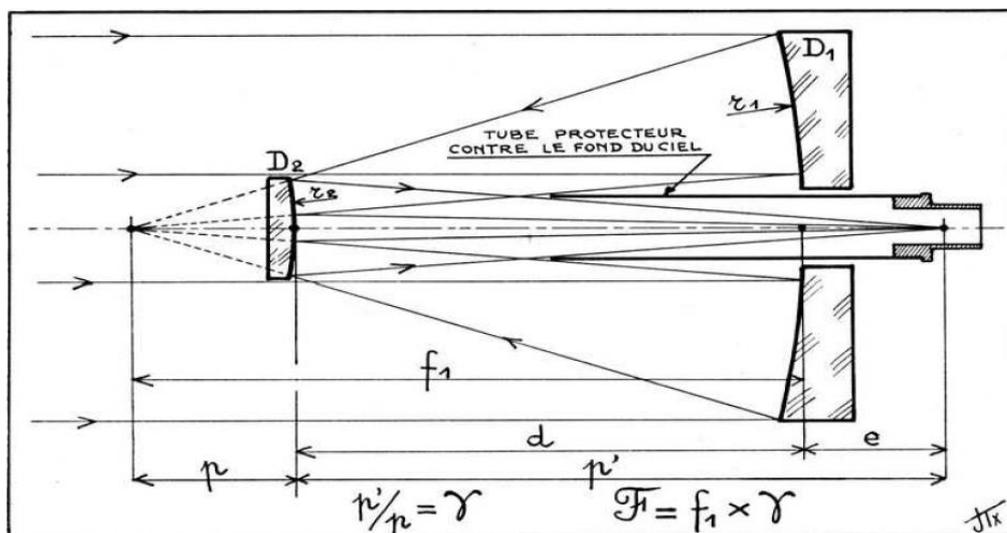
La plupart des grands et très grands télescopes terrestres et en orbite sont maintenant de type Ritchey-Chrétien, notamment :

- Les deux télescopes de 10 m de l'observatoire Keck
- Les quatre télescopes de 8,2 m du Very Large Telescope au Chili
- Les deux télescopes de 8 m de l'observatoire Gemini
- Le Gran Telescopio Canarias de 10,4 m à l'observatoire du Roque de los Muchachos
- Le télescope Subaru de 8,2 m à l'observatoire du Mauna Kea
- Le télescope spatial Hubble de 2,4 m actuellement en orbite autour de la Terre
- Le télescope spatial Herschel infrarouge de 3,5 m

Ritchey proposa que le télescope Hale de 200 pouces (5 m) du Mont Palomar soit un Ritchey-Chrétien. Sa conception aurait fourni des images plus nettes sur un champ d'observation plus large. Mais Ritchey et Hale se brouillèrent. Hale refusa d'adopter la nouvelle conception avec ses courbures complexes et Ritchey quitta le projet (étant donné les grands délais de construction, Hale pouvait être pardonné d'avoir voulu éviter un risque). La proposition de Ritchey sera plus tard validée, car le télescope Hale fut le dernier télescope de grande taille à posséder un miroir primaire parabolique.

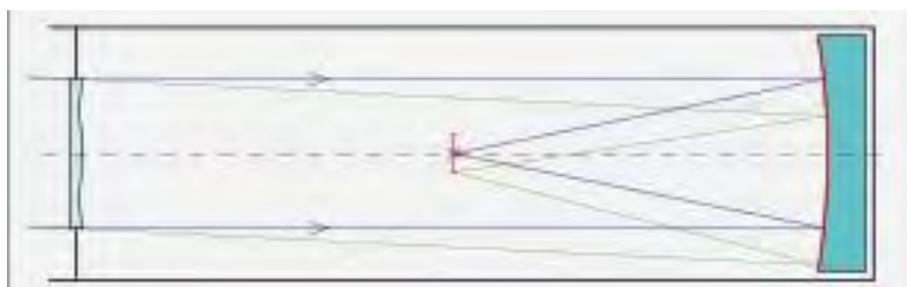
I) Télescope Dall-Kirkham (1950)

Dans la famille des télescopes courts constitués de deux miroirs, le télescope proposé par Dall & Kirkham est des plus simple à réaliser par l'amateur, si l'on excepte le Grégorien. En effet, alors que le Cassegrain nécessite un secondaire hyperbolique difficile à exécuter, le Dall-Kirkham se contente modestement d'un miroir secondaire sphérique. Plus facile et économique à réaliser qu'un Cassegrain, mais assez peu répandu.



J) Télescope de Schmidt, ou « chambre » de Schmidt (1930)

Une **chambre de Schmidt** est un type de télescope astronomique construit de sorte à garantir un important champ de vue tout en limitant les aberrations optiques. Des télescopes similaires sont la chambre de Wright et le télescope de Lurie-Houghton. La chambre de Schmidt fut inventée en 1930 par Bernhard Schmidt. L'originalité du dispositif optique mis au point par Bernhard Schmidt est l'étendue de son champ, obtenue grâce à l'utilisation d'un miroir sphérique diaphragmé à son centre de courbure. Le champ ainsi obtenu est généralement de l'ordre du millième de la surface totale du ciel, au moins 100 fois plus important que le champ d'un télescope traditionnel. Ses composants optiques sont un miroir principal sphérique facile à réaliser et une lentille asphérique de correction, appelée lame correctrice de Schmidt, située au centre de courbure du miroir principal. Le détecteur est placé sur la surface focale, au centre de la chambre. Les chambres de Schmidt ont des surfaces focales courbées, ce qui contraint les dispositifs d'observation à suivre cette courbure. Dans certains cas, on construit des détecteurs courbés, parfois, on maintient un film à l'aide de vis où en faisant le vide au-dessous. Enfin, on utilise parfois une lentille supplémentaire, planoconvexe, qui permet d'utiliser des détecteurs plans : il s'agit des chambres de Schmidt-Väisälä.



Applications

La chambre de Schmidt est généralement utilisée pour établir des statistiques et pour suivre des programmes de recherche qui nécessitent de couvrir une large partie du ciel. Cela inclut la recherche de comètes, d'astéroïdes et la surveillance des novae. De plus, on peut surveiller avec ce genre de télescopes les satellites terrestres. Dès le début des années 1970, Celestron commercialise une chambre de Schmidt de 17 cm. La chambre fut adaptée dans l'usine et faite à base de matériaux à faible coefficient de dilatation pour éviter les déformations ultérieures. Les premiers modèles obligeaient le photographe à couper et développer individuellement des vues de film 35 mm, puisque le dispositif ne permettait de placer qu'une vue à la fois. Près de 300 exemplaires furent produits. Une autre utilisation des chambres de Schmidt était populaire : retourné, il pouvait servir de projecteur. Certains furent ainsi utilisés dans les cinémas, les modèles plus modestes étant parfois utilisés par des particuliers.

L'exemplaire le plus connu et le plus productif est le télescope Samuel Oschin, à l'observatoire du Mont Palomar. Il fut utilisé par le National Geographic pour ses projets POSS, POSS-II, Palomar-Leiden, et d'autres projets. Le télescope utilisé au LONEOS (*Lowell Observatory Near-Earth-Object Search*) est également une chambre de Schmidt. Le plus grand modèle d'une chambre de Schmidt est hébergé à l'observatoire Karl-Schwarzschild. En France, l'exemplaire le plus puissant est implanté au Centre de recherches en géodynamique et astrométrie (CERGA), au Plateau de Calern.

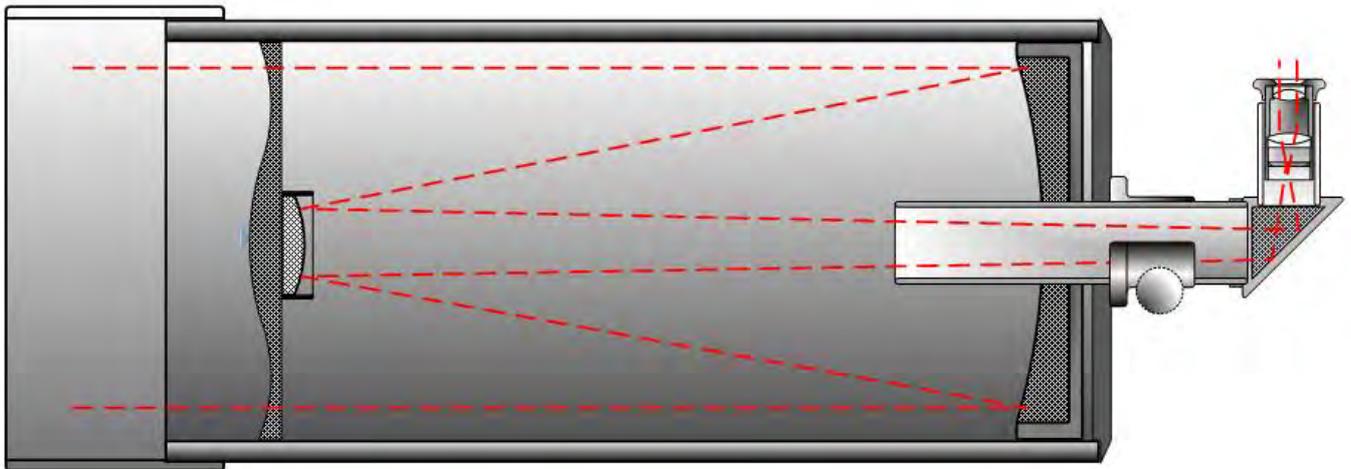
Sélection de grandes chambres de Schmidt classées par année			
Observatoire	Diamètre	Année(s)	Note
Palomar	40 cm	1936	Le premier en Amérique du Nord
Palomar	122 cm	1948	Le télescope Samuel Oschin
Hambourg	80 cm	1954	Déplacé à Calar Alto en 1974
Observatoire Karl-Schwarzschild	200 cm	1960	Le plus grand diamètre
Observatoire Kvistaberg	100 cm	1963	Le plus grand de Scandinavie
La Silla	100 cm	1971	ESO
UK Schmidt Telescope	120 cm	1973	Dans l'hémisphère sud
Photomètre Kepler	95 cm	2009	Le plus grand en orbite

K) Télescope Schmidt-Cassegrain (1970)

Le **télescope Schmidt-Cassegrain** est un dispositif optique de type catadioptrique, composé de deux miroirs, un miroir primaire concave (généralement sphérique) et un miroir secondaire convexe, ainsi que d'une lentille appelée lame de Schmidt. Il s'agit d'une évolution du dispositif réflecteur proposé en 1672 par Laurent Cassegrain, amélioré en s'appuyant sur la chambre de Schmidt développée par Bernhard Schmidt en 1931.

De conception proche du télescope de type Cassegrain, le télescope Schmidt-Cassegrain présente toutefois quelques particularités notables :

- le miroir primaire parabolique sur le télescope de Cassegrain devient un miroir sphérique, plus simple et moins coûteux à fabriquer;
- pour corriger les aberrations sphériques engendrées par le miroir primaire, une lame de Schmidt est placée en entrée du télescope.



Télescope Schmidt-Cassegrain

Avantages pratiques

Le télescope Schmidt-Cassegrain remporte depuis les années 1970 un vif succès auprès des amateurs, avant tout car il propose un bon rapport qualité/prix, lié principalement à l'utilisation de miroirs sphériques, peu coûteux à produire industriellement. Il assure une assez bonne polyvalence, avec un rapport f/D voisin de 10, faisant de lui un instrument moyennement lumineux, mais autorisant de forts grossissements (de l'ordre de 2 fois son diamètre compté en mm), grâce à une distance focale élevée. Il se destine ainsi particulièrement à l'observation et la photographie de la Lune et des planètes, et l'observation visuelle des objets classiques du ciel profond. Un réducteur de focale (fréquemment de rapport 0,6) peut lui être adjoint pour augmenter le champ couvert. Sa compacité remarquable (la longueur du tube est inférieure au double de son diamètre) permet à l'amateur de le transporter assez aisément, pour les instruments jusqu'à un diamètre de 300 mm. Comme tout télescope, son utilisation nécessite un bon alignement des trois dispositifs optiques qui le composent (les deux miroirs et la lame de Schmidt). Cette opération, appelée collimation, est simple sur ce type de télescope et n'exige pas l'utilisation d'équipement particulier, notamment car les miroirs sphériques n'ont pas d'axe privilégié, et l'alignement de leur centre avec l'axe optique s'avère suffisant. L'opération consiste généralement à régler l'orientation du miroir secondaire à l'aide de trois vis, au jugé, en pointant une étoile.

Propriétés optiques

Basé sur l'utilisation de miroirs, il présente peu, voire pas d'aberrations chromatiques, ce qui le rend intéressant pour l'observation d'objets assez lumineux. En revanche, il avoue ses limites en matière de « coma », phénomène peu gênant en observation visuelle, mais qui le rend moins efficace en photographie astronomique, le bord du champ marquant une forte déformation en forme de chevelure (« coma » en latin). Les fabricants ont depuis développé des formules optiques corrigeant le phénomène, pour les astrophotographes. Enfin, la surface de focalisation n'est pas plane : lorsque la mise au point est faite sur le centre de l'image (dans l'axe optique), le bord du champ d'observation n'est pas net. Là aussi, le phénomène s'avère pénalisant en imagerie, et des modèles plus évolués, incluant une correction ont été mis au point par

différents fabricants, au prix d'un coût sensiblement plus élevé. L'obstruction centrale créée par le miroir secondaire placé devant le primaire est comprise entre 30 et 37 % en diamètre, soit 10 à 14 % en surface, et limite la performance en contraste.

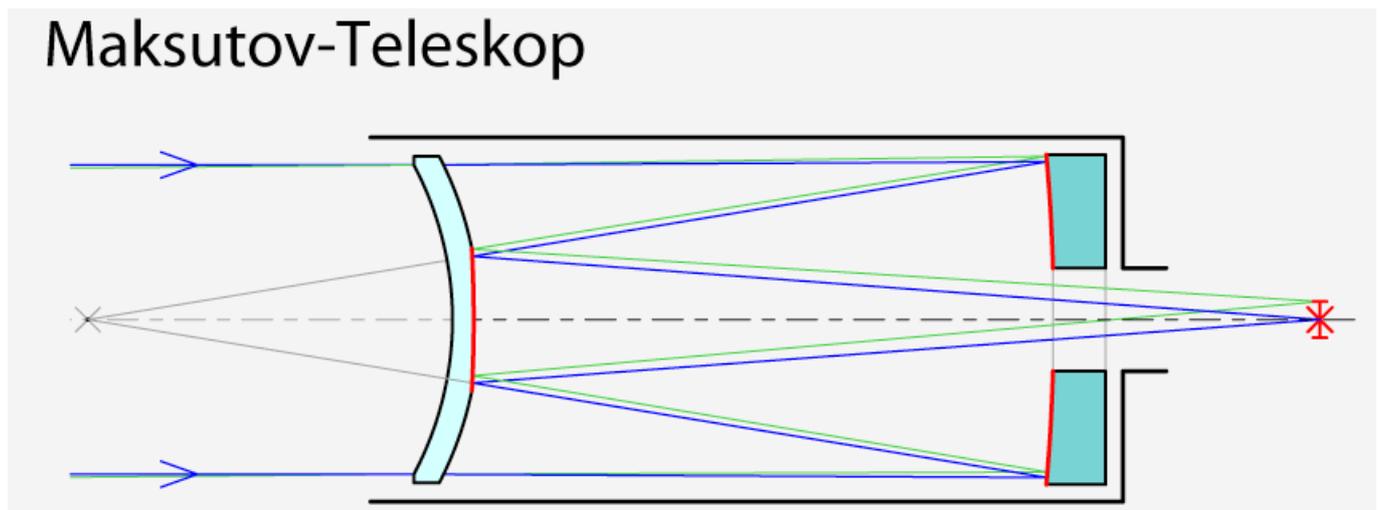
Versions et variations

Il existe plusieurs versions différentes de ce télescope :

- les miroirs sont le plus souvent sphériques : les coûts de fabrication en sont réduits, formant un compromis intéressant avec l'aplanétisme imparfait de l'image, au moins pour l'observation visuelle.
- la lame de Schmidt est généralement située à proximité du plan focal (qui en réalité n'est pas tout à fait plan) du miroir primaire, pour une bonne compacité, laquelle est un point fort de ce type de télescope.
- la lame de Schmidt peut aussi être axée sur le centre de la sphère incluant le miroir primaire. La qualité optique du résultat est favorable à cette disposition, mais l'instrument est alors beaucoup plus long (environ le double du premier cas). Dans cette configuration, le miroir secondaire est placé idéalement concentrique au miroir primaire, c'est-à-dire légèrement à l'intérieur de la lame de Schmidt, compte tenu qu'il est généralement très incurvé.

L) Télescope Maksutov-Cassegrain (1941)

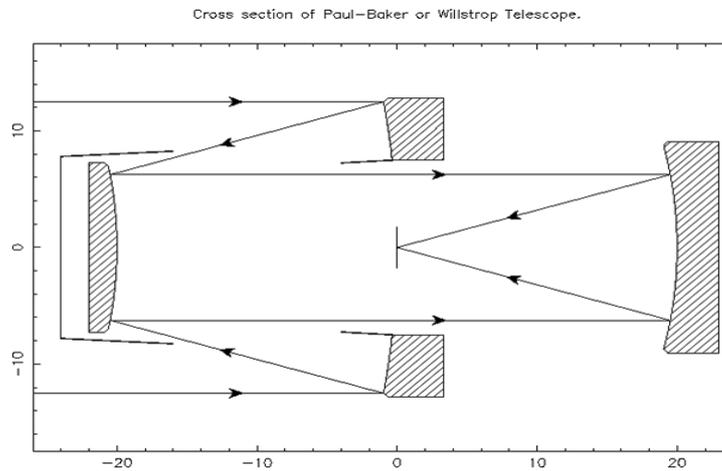
Un **télescope de type Maksutov-Cassegrain** est un télescope catadioptrique composé d'un miroir sphérique et d'un ménisque légèrement divergent. La lentille fait généralement le même diamètre que le miroir et est placée à l'entrée du télescope afin de servir de correcteur d'aberrations telles le coma et l'aberration chromatique. Ce télescope a été inventé en 1941 par l'opticien russe Dmitri Dmitrievitch Maksutov, qui s'est inspiré du montage de la chambre de Schmidt. Les télescopes de type Maksutov-Cassegrain se vendent dans le domaine de l'astronomie amateur depuis les années 1950.



M) Télescopes anastigmatiques à trois miroirs

Un **télescope anastigmatique à trois miroirs** est un télescope anastigmatique construit avec trois miroirs courbes, permettant de minimiser les trois principales aberrations optiques – l'aberration sphérique, la coma et l'astigmatisme. Cette conception est principalement utilisée pour obtenir de larges champs de vue, beaucoup plus importants qu'avec des télescopes ayant seulement une ou deux surfaces courbes.

Un télescope ayant seulement un miroir courbe, tel qu'un télescope de Newton, aura toujours des aberrations. Si le miroir est sphérique, il souffrira d'aberration sphérique. Si le miroir est parabolique pour corriger l'aberration sphérique, alors il souffrira nécessairement de coma et d'astigmatisme hors-axe. Avec deux miroirs courbes, tels que dans un télescope Ritchey-Chrétien, la coma peut également être minimisée. Ceci permet d'avoir un plus large champ de vue, et l'astigmatisme résiduel est symétrique autour des objets distordus, permettant de faire de l'astrométrie sur l'ensemble du champ de vue. Cependant, l'astigmatisme peut être réduit en rajoutant un troisième élément optique courbe. Quand cet élément est un miroir, le résultat est un *système anastigmatique à trois miroirs*. En pratique, la conception peut comporter un nombre quelconque de *miroirs de repliement* plans, utilisés pour diriger le chemin optique dans des configurations plus compactes.



*Télescope anastigmatique à trois miroirs de type Paul ou Paul–Baker. Une conception de type Paul a un miroir primaire parabolique avec des miroirs secondaires et tertiaires sphériques.
Une conception de type Paul–Baker modifie légèrement le secondaire pour aplatir le plan focal.*

De nombreuses combinaisons de trois miroirs peuvent être utilisées pour annuler l'ensemble des aberrations du troisième ordre. En général, celles-ci nécessitent de résoudre un ensemble d'équations relativement compliquées. Cependant, quelques configurations sont néanmoins assez simples pour pouvoir être conçues à partir de quelques concepts intuitifs.

Télescope de Paul

La première combinaison fut proposée en 1935 par Maurice Paul. L'idée de base derrière la solution de Paul est que les miroirs sphériques, avec une obstruction d'ouverture au centre de courbure, ont *seulement* de l'aberration sphérique – pas de coma ni d'astigmatisme (mais ils produisent une image sur une surface courbe ayant un rayon égal à la moitié de celui du miroir sphérique). Donc si l'aberration sphérique peut être corrigée, un très large champ de vue peut être obtenu. Ceci est similaire à la conception de Schmidt conventionnelle, mais le télescope de Schmidt réalise cela avec une lame de correction réfractive au lieu d'un troisième miroir.

L'idée de Paul fut de partir d'un compresseur de faisceau de Mersenne, qui ressemble à un Cassegrain constitué de deux paraboloides confocaux, les deux faisceaux d'entrée et de sortie étant collimatés. Le faisceau d'entrée comprimé est alors dirigé vers un miroir tertiaire sphérique, ce qui produit une aberration sphérique traditionnelle. L'idée clé de Paul est que le secondaire peut être remplacé par un miroir sphérique.

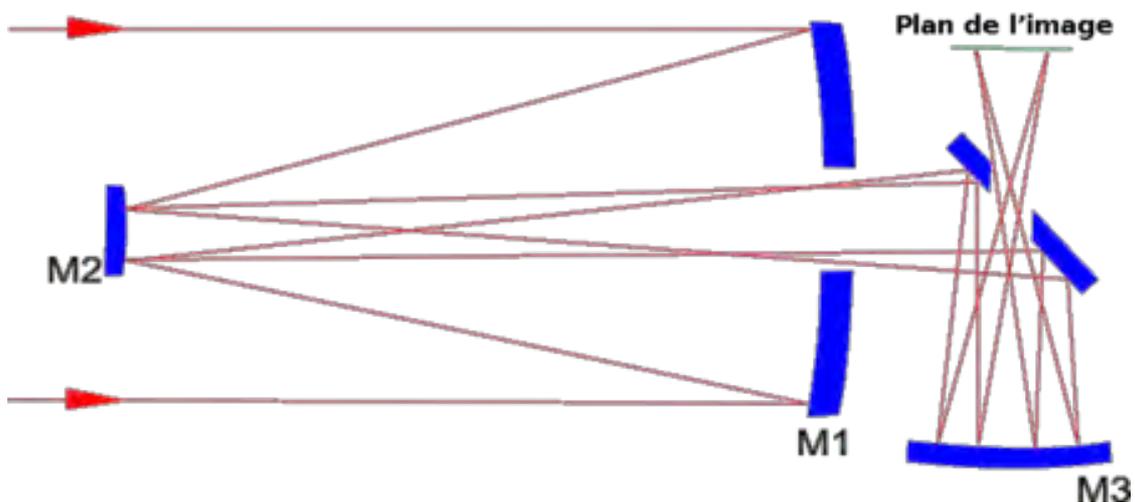
Une façon d'examiner cela est d'imaginer que le miroir tertiaire, qui souffre d'aberration sphérique, est remplacé par un télescope de Schmidt, avec une lame de correction en son centre de courbure. Si les rayons de courbure du secondaire et du tertiaire sont identiques, mais de signes opposés, et si le centre de courbure du tertiaire est placé directement au vertex du miroir secondaire, alors la lame de Schmidt serait placée sur le dessus du miroir secondaire parabolique. Par conséquent, la lame de Schmidt nécessaire pour rendre le miroir tertiaire équivalent à un télescope de Schmidt est éliminée par le paraboloides représenté par le secondaire convexe du système de Mersenne, car chacun corrige la même quantité d'aberration sphérique, mais de signe opposé. Par ailleurs, comme le système de Mersenne + Schmidt est la somme de deux systèmes anastigmatiques (le système de Mersenne est anastigmatique comme le système de Schmidt), le système résultant est également anastigmatique, du fait que les aberrations de 3^{ème} ordre sont additives. De plus, le secondaire est désormais plus facile à fabriquer. Cette conception est également appelée **Mersenne–Schmidt**, puisqu'elle utilise une configuration de Mersenne comme correcteur d'un télescope de Schmidt.

Télescope Paul–Baker

La solution proposée par Paul avait un plan focal courbe, mais cela fut corrigé dans la conception Paul–Baker, introduite en 1969 par James Gilbert Baker³. La conception Paul–Baker augmente l'espacement entre les miroirs secondaire et tertiaire et transforme le miroir secondaire sphérique en miroir elliptique, ce qui corrige la courbure de champ et aplatit le plan focal.

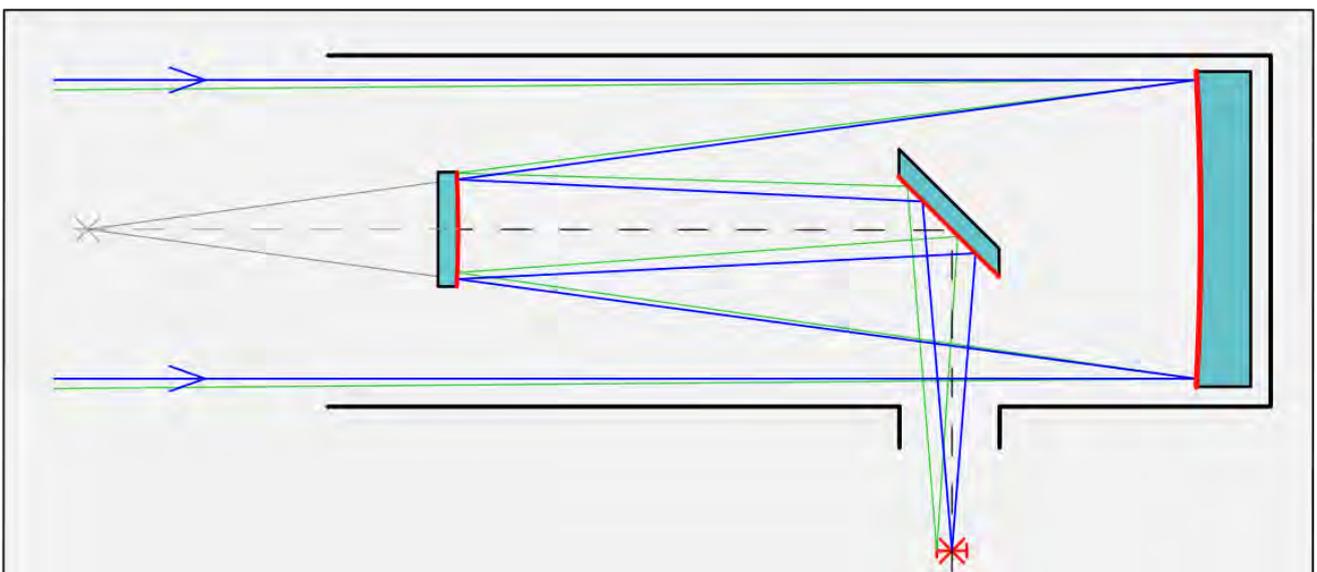
Télescope Korsch

Un ensemble plus général de solutions fut développé par Dietrich Korsch en 1972. Un **télescope Korsch** est corrigé de l'aberration sphérique, de la coma, de l'astigmatisme et de la courbure de champ et peut avoir un large champ de vue tout en ayant peu de lumière parasite dans le plan focal. Un **télescope Korsch** est un télescope de type Cassegrain comportant trois miroirs qui présente l'avantage de limiter la quantité de lumière parasite et de former une image plate sur le détecteur. Ce type de montage optique est utilisé par les télescopes spatiaux James Webb et Euclid ainsi que par certains satellites d'observation de la Terre. Ce sera ce type de télescope qui sera utilisé sur le James Webb Space Telescope (JWST).



Exemples

- Le télescope spatial James Webb est un système anastigmatique à trois miroirs, de type Korsch.
- Le télescope spatial Euclid utilisera un télescope Korsch.
- Le télescope de l'observatoire Vera-C.-Rubin (anciennement appelé *Large Synoptic Survey Telescope*) est un système anastigmatique à trois miroirs modifié de type Paul-Baker.
- Le Télescope géant européen (ELT) sera de type anastigmatique à trois miroirs, avec deux miroirs plans supplémentaires de repliement, de type Nasmyth, une autre variante du Cassegrain (voir ci-dessous).



Télescope Nasmyth, avec son miroir tertiaire qui renvoie le faisceau latéralement vers l'extérieur, comme le ferait le secondaire d'un télescope de type Newton

Voir ce télescope en détail à :

<http://gap47.astrosurf.com/index.php/ressources/telescopos-exceptionnels/telescopos-de-leso/cerro-armazones/>

N) Les plus grands télescopes terrestres

En 2008, il existe 23 télescopes terrestres dont le diamètre du miroir est supérieur à 4 mètres. Ils sont regroupés dans cette **Liste des plus grands télescopes optiques terrestres**, triés par ordre décroissant de diamètre équivalent du miroir primaire.

Diamètre miroir primaire	Nom	Lieu	Altitude
10.0	Keck1 (1993) Keck2 (1996)	Mauna Kea, Hawaï	4150 m
8.3	Subaru (1999)	Mauna Kea, Hawaï	4100 m
8.2	Antu (1998)	VLT Cerro Paranal, Chili	2635 m
	Kueyen (1999)		
	Melipal (2000)		
	Yepun (2001)		
8.1	Gemini Nord (1999)	Mauna Kea, Hawaï	4100 m
	Gemini Sud (2001)	Cerro Pachon, Chili	2737 m
6.5	Monolithic Mirror Tel. (1999)	Mt. Hopkins, Arizona, USA	2600 m
	Magellan (1999)	Las Campanas, La Serena, Chili	2282 m
6.0	Bolshoi Teleskop Azimutalnyi (1976)	Zelentchuk, Caucase, Russie	2070m
5.0	Hale (1948)	Palomar Mountain, Californie, USA	1900 m
4.2	William Herschel (1987)	Observatorio del Roque de los Muchachos	2400 m
4.0	Victor Blanco (1974)	Cerro Tololo, Chili	2200 m
3.9	Anglo-Australian (1971)	Siding Spring Obs.	1145 m
3.8	Mayall (1973)	Kitt Peak, Arizona, USA	2100 m
	UKIRT, infrarouge (1985)	Mauna Kea, Hawaï	4200 m
3.7	AEOS, militaire, tracking satellites	Maui, Hawaï	3058 m
3.6	"3m60" (1977)	European South ⁿ Obs. Cerro La Silla, Chili	2400 m
	Canada-France-Hawaï (1979)	Mauna Kea, Hawaï	4200 m
	Telescopio Nazionale Galileo (1997)	La Palma, Iles Canaries, Espagne	2370 m
3.5	MPI-CAHA (1984)	Calar Alto, Espagne	2200 m
	New Technology NTT (1989)	European Southern Obs.	2400 m
	ARC (1994)	Apache Point, New Mexico, USA	2788 m
	WIYN (1994)	Kitt Peak, Arizona, USA	2100 m
	Starfire, US Air Force (1994)	Kirtland AFB, New Mexico, USA	1900 m
3.0	Shane (1959)	Lick Observatory	1300 m
	NASA IRTF	Mauna Kea, Hawaï	4160 m
	NODO, miroir liquide,	New Mexico, USA	2758 m
2.7	Harlan Smith (1969)	Mt. Locke, Texas, USA	2100 m
2.6	BAO	Byurakan Astrophysical Observatory	1405 m
	Shajn (1961)	Crimean Astrophysical Observatory	600 m
2.5	Hooker (1917)	Mt. Wilson, Californie, USA	1700 m
	Isaac Newton (1984)	Observatorio del Roque de los Muchachos La Palma, Iles Canaries, Espagne	2382 m
	Nordic Optical (1988)		
	du Pont	Las Campanas Observatory	2282 m
	Sloan Digital Sky Survey	Apache Point, New Mexico, USA	2788 m
2.45	CHARA (2000)	Mt. Wilson, Californie, USA	1700 m

2.4	Hiltner	Kitt Peak, Arizona, USA	2100 m
	Hubble Space Telescope (1990)	HST en orbite,	600 000
2.3	WIRO, infrarouge	Jelm Mtn., Wyoming, USA	2900 m
	ANU	Siding Spring Obs.	1165 m
	Bok (1969)	Steward Obs	2100 m
	Vainu Bappu (1986)	Indian Institute of Astrophysics	700 m
2.2	ESO-MPI (1984)	Cerro La Silla, Chili	2335 m
	MPI-CAHA (1979)	Calar Alto, Espagne	2200 m
	UH	Mauna Kea, Hawaï	4200 m
2.0	Bernard Lyot (1980)	Pic du Midi, France	2850 m
2.0	2m optical infrared telescope (2000)	Hanle, Himalaya, Inde	4500 m
1.93	CNRS (1958)	Saint Michel de Haute Provence, France	650 m

VI Les radio-télescopes

Un **radiotélescope** est un télescope spécifique utilisé en radioastronomie pour capter les ondes radioélectriques émises par les astres. Ces ondes radio, bien que plus ou moins prédites par certains physiciens comme Thomas Edison et Oliver Lodge, ne sont véritablement découvertes qu'au début des années 1930 par Karl Jansky lorsqu'il cherche l'origine de certaines interférences avec les transmissions radio terrestres. Depuis cette époque qui marque le début de la radioastronomie, les radiotélescopes sont utilisés en fonction des longueurs d'onde, aussi bien pour l'étude du Soleil, que pour celle des régions de formations stellaires, des jets de microquasars et de noyaux actifs de galaxies, ou des études cosmologiques.



Le radiotélescope d'Arecibo, sur l'île de Porto Rico. Avec ses 305 mètres de diamètre, c'était la plus grande antenne sphérique du monde, jusqu'en 2016 où le télescope FAST chinois l'a dépassé (500 mètres). Cette antenne construite sur un site naturel concentre les ondes radio venant du ciel sur les antennes secondaires suspendues sur les câbles du haut. Puisque l'antenne primaire ne peut pas bouger, le radiotélescope bouge pour pointer vers différentes régions du ciel en mettant en mouvement l'antenne réceptrice (dôme) le long du chemin métallique incurvé. Il était exploité depuis 2018 par l'université de Floride. Mais il s'est effondré : En novembre 2020, à la suite de deux ruptures de câbles ayant occasionné de nombreux dégâts, la National Science Foundation annonce le démantèlement du radiotélescope d'Arecibo après 57 ans de service. Le 1^{er} décembre 2020, les câbles restants cèdent à leur tour et la plate-forme supportant les émetteurs et les récepteurs tombe sur le réflecteur en contrebas. La rupture des câbles endommage également leurs piliers en béton, dont la partie supérieure se brise.

Les radiotélescopes sont formés de surfaces collectrices, constituées de grillages métalliques, dont le maillage doit être plus petit que la longueur d'onde captée. La taille des radiotélescopes varie également en fonction de la fréquence de l'onde captée. Ainsi, pour des signaux de basse fréquence (grande longueur

d'onde), les radiotélescopes devront avoir une surface collectrice suffisamment grande pour reconstituer une image radio nette. Les miroirs des radiotélescopes doivent vérifier les mêmes contraintes en ce qui concerne la forme de la surface réfléchissante que les télescopes optiques. Pour donner un exemple, la forme du miroir sphérique du radiotélescope de Nançay ne s'éloigne jamais de plus de 5 mm de la forme d'une sphère.

Le radiotélescope de Nançay (dans le Cher, en France) est le troisième du monde par sa surface collectrice. Sa géométrie est particulière : un grand collecteur plan recueille les ondes radio, qui se réfléchissent vers un second miroir sphérique. Après réflexion sur ce deuxième miroir, les ondes convergent vers un collecteur, disposé sur un charriot qui se déplace en fonction de la trajectoire de la source dans l'espace. Le diamètre des plus grands radiotélescopes orientables est compris entre 50 et 100 m; leur résolution atteint environ 1 minute d'arc, soit sensiblement celle de l'œil humain aux longueurs d'onde visibles. Pour atteindre de plus hautes résolutions, on fait travailler un réseau d'antennes. Le plus grand télescope de ce type est le Very Large Array qui devrait être d'ici peu supplanté par le Allen Telescope Array.



Le « Very Large Array » près de Socorro, au Nouveau Mexique (USA)

Le **Very Large Array (VLA)** est un champ de 27 antennes paraboliques qui, ensemble, forment un radiotélescope. Les antennes identiques, larges de 25 m chacune, sont mobiles sur des voies de chemin de fer disposées selon un tracé formant un immense Y (deux branches de 21 km et un pied de 19 km) dépendant du National Radio Astronomy Observatory. Les 27 antennes ont chacune leur propre récepteur, les signaux de chaque récepteur étant transmis à un site central où ils sont combinés : l'image haute résolution ainsi obtenue équivaut à celle d'un très grand radiotélescope, dont le diamètre serait égal à la distance maximale séparant les antennes. La résolution angulaire maximale pouvant être atteinte est d'environ 0,05 seconde d'arc. Le Very Large Array a été rebaptisé du nom de Karl Jansky en mars 2012, suite au vote d'internautes.

Création du VLA

Voté en août 1972, commencé en 1973, terminé en 1980. Coût : 78,5 millions de \$ (de 1972).

Comment il fonctionne ?

Le VLA est un *interféromètre*. Cela veut dire qu'il travaille en multipliant les données de l'ensemble de chaque paire de télescopes pour former le dessin ou l'image des interférences. La structure de ces images interférencielles, comment elles varient avec le temps alors que la terre tourne, reflète la structure des radio-sources du ciel : nous pouvons prendre ces images et utiliser une technique mathématique appelée les transformées de Fourier pour créer des cartes.

Qui l'utilise ?

Le VLA est d'abord (et surtout) utilisé par les astronomes du monde entier. Il est aussi utilisé pour des études atmosphériques et météorologiques, le traçage des satellites et d'autres utilisations scientifiques.

Situation

Plaines de San Agustin, à l'ouest de Socorro, Nouveau Mexique (USA).

Latitude = 34°04'43,497" nord

Longitude = 107°37'03,819" ouest

Altitude = 2124 m

Dimensions

Chaque antenne mesure 25 mètres de diamètre et pèse 230 tonnes.

L'assemblage : il y a quatre configurations : forme « A », avec une séparation maximum des antennes de 36 km; forme « B », 10 km; forme « C », 3.6 km; et forme « D », 1 km. Les télescopes sont changés parmi ces configurations environ tous les quatre mois.

Résolution

La résolution du VLA est déterminée par la taille de l'assemblage (jusqu'à 36 km). A la plus haute fréquence (43 GHz) cela donne une résolution de 0,04 secondes d'arc : c'est suffisant pour voir une balle de golf distante de 150 km. Mais, bien sûr, peu de balles de golf contiennent des radio-émetteurs de grande puissance...

Divers

Vitesse de rotation : 40° par minute en azimuth, 20° par minute en élévation.

Angle d'élévation minimale : 8° au-dessus de l'horizon.

Fréquences couvertes : de 74 à 50.000 MHz (de 400 à 0,7 cm).

Les données ainsi recueillies équivalent à la résolution d'une antenne allant jusqu'à 36 km de large avec la sensibilité d'une antenne de 130 m de diamètre.

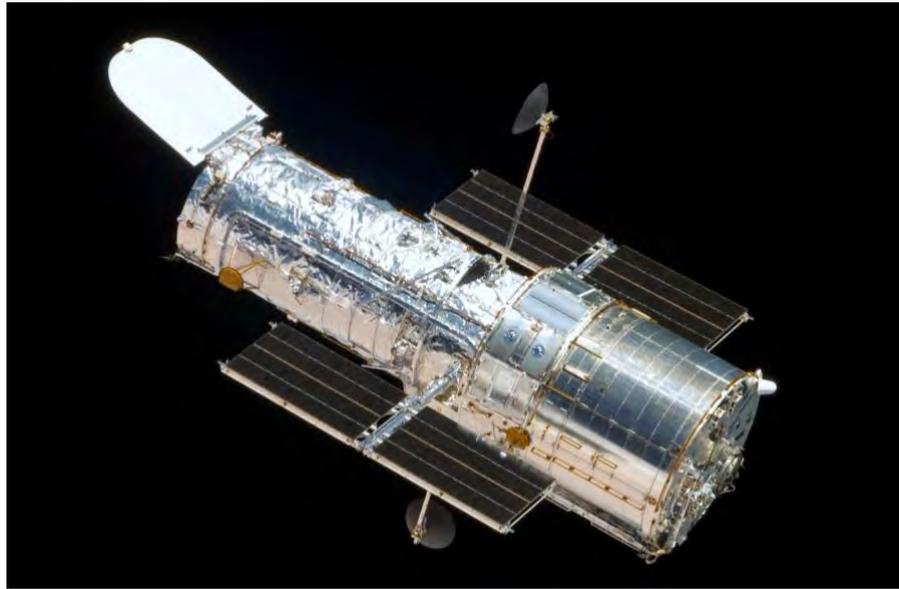


Diverses vues des antennes du radiotélescope « Very Large Array » au Nouveau Mexique

Voir au chapitre XII, Iconographie, certaines vues prises par ce radiotélescope.

VII Les télescopes dans l'espace

A) Dans le Visible



Hubble (NASA/ESA)

On ne présente plus ce magnifique instrument exploité conjointement par les agences américaines et européennes, et qui a révolutionné l'astrophysique. Il va fêter son 33^{ème} anniversaire en orbite et fonctionne toujours merveilleusement. Il faut dire qu'il a subi plusieurs interventions *in situ*, la dernière ayant eu lieu en 2009. Il devrait tenir le coup encore quatre ans, en attendant l'arrivée prévue de son successeur, le *James Webb Telescope*, en 2018. Son programme le plus marquant est peut-être le *Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey (CANDELS)*. L'objectif de CANDELS est d'explorer l'évolution galactique dans l'Univers très jeune, en observant les premières graines des grandes structures galactiques à plus de 13 milliards d'années lumière...



Kepler (NASA)

Le télescope **Kepler** a lui aussi révolutionné son petit monde. Spécialisé dans la détection de très faibles variations de luminosité d'étoiles, son objectif était de détecter des **exoplanètes**. Depuis son lancement en mars 2009, le nombre d'exoplanètes détectées par Kepler se monte à pas moins de 961 planètes confirmées et 2903 candidates en attente de confirmation (chiffres datant de février 2014). Sa mission initiale s'est brutalement interrompue le 11 mai 2013 suite à la défaillance de l'une de ses roues gyroscopiques, l'empêchant dorénavant de se positionner avec précision. Mais il pourrait encore être exploité sous une forme dégradée.

Les Autres Télescopes Spatiaux...

Il n'y a pas que **Hubble**... Le *télescope spatial* Hubble est sûrement le plus emblématique des télescopes spatiaux, lui qui permet d'imager les profondeurs de l'Univers dans le visible et le proche Ultra-Violet avec une résolution époustouflante. Mais il existe de nombreux autres télescopes spatiaux fournissant des données passionnantes aux astrophysiciens du monde entier, dont nous parlons souvent ici. A l'heure où, après 24 ans de services, Hubble vit ces dernières années en orbite, faisons donc un tour au pays des télescopes spatiaux en activité ou dont les données sont encore exploitées... Ces grands instruments sont pour la plupart spécialisés dans une famille d'observations, une plage de longueurs d'ondes, des ondes radio aux rayons gamma.

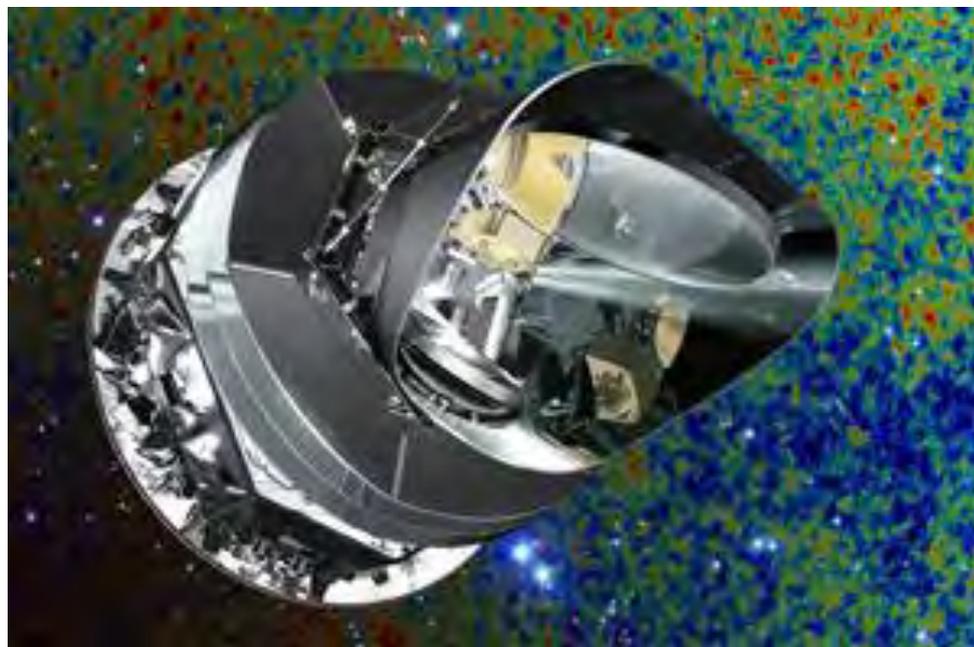
B) Ondes Radio

Il existe très peu de télescopes spatiaux dédiés aux ondes radios. Peu intéressant car on reçoit bien la plupart des ondes radio depuis la Terre. On peut citer les suivants :



Spektr R (Astro Space Center, Lebedev Physics Institute, Russie)

Radiotélescope spatial russe développé par l'Institut de physique Lebedev, il a été lancé le 18 juillet 2011. Spektr R est placé sur une orbite fortement elliptique de $10\,000\text{ km} \times 390\,000\text{ km}$ avec une période de 9,5 jours. Il a la particularité d'être muni d'une antenne géante de 10 mètres de diamètre. Il doit être utilisé avec des radiotélescopes terrestres pour réaliser de l'interférométrie à très longue base.



Planck (ESA)

Planck a cessé ses prises de données en octobre 2013 faute d'hélium-3 pour refroidir ces détecteurs, mais ses données sont toujours en cours de dépouillement après une première fournée de très beaux résultats sur le fond diffus cosmologique (CMB) l'année dernière. Planck détecte **les ondes radio de type micro-ondes** de la première lumière de l'Univers, dont le spectre thermique vaut 2,73 degrés Kelvin. Il scanne le ciel entier de manière à fournir une cartographie complète des fluctuations de température minuscules qui existent dans le fond diffus. Il permet également de déterminer les caractéristiques détaillées de ce rayonnement primordial, comme par exemple sa polarisation.

C) Ondes submillimétriques et Infra-Rouge

Herschel (ESA)

Herschel est le plus grand télescope dédié à l'infra-rouge jamais construit, il est muni d'un miroir de 3,5 m de diamètre. Sa mission de 4 ans s'est terminée en avril 2013, mais ces nombreuses données sont encore exploitées aujourd'hui. Son objectif était de fournir des observations dans les domaines de l'infrarouge lointain et du submillimétrique (longueurs d'ondes comprises entre 55 à 672 μm) pour étudier des phénomènes astrophysiques comme la formation des étoiles, la naissance et l'évolution des galaxies ainsi que la chimie du milieu interstellaire. Il a été lancé en 2009 en même temps que le satellite Planck par Ariane. Sa position est particulière car il est situé au point de Lagrange L2, un des points d'équilibre gravitationnels dans le système Soleil-Terre. *Herschel* suit donc la Terre dans sa révolution autour du Soleil.



Le télescope Herschel



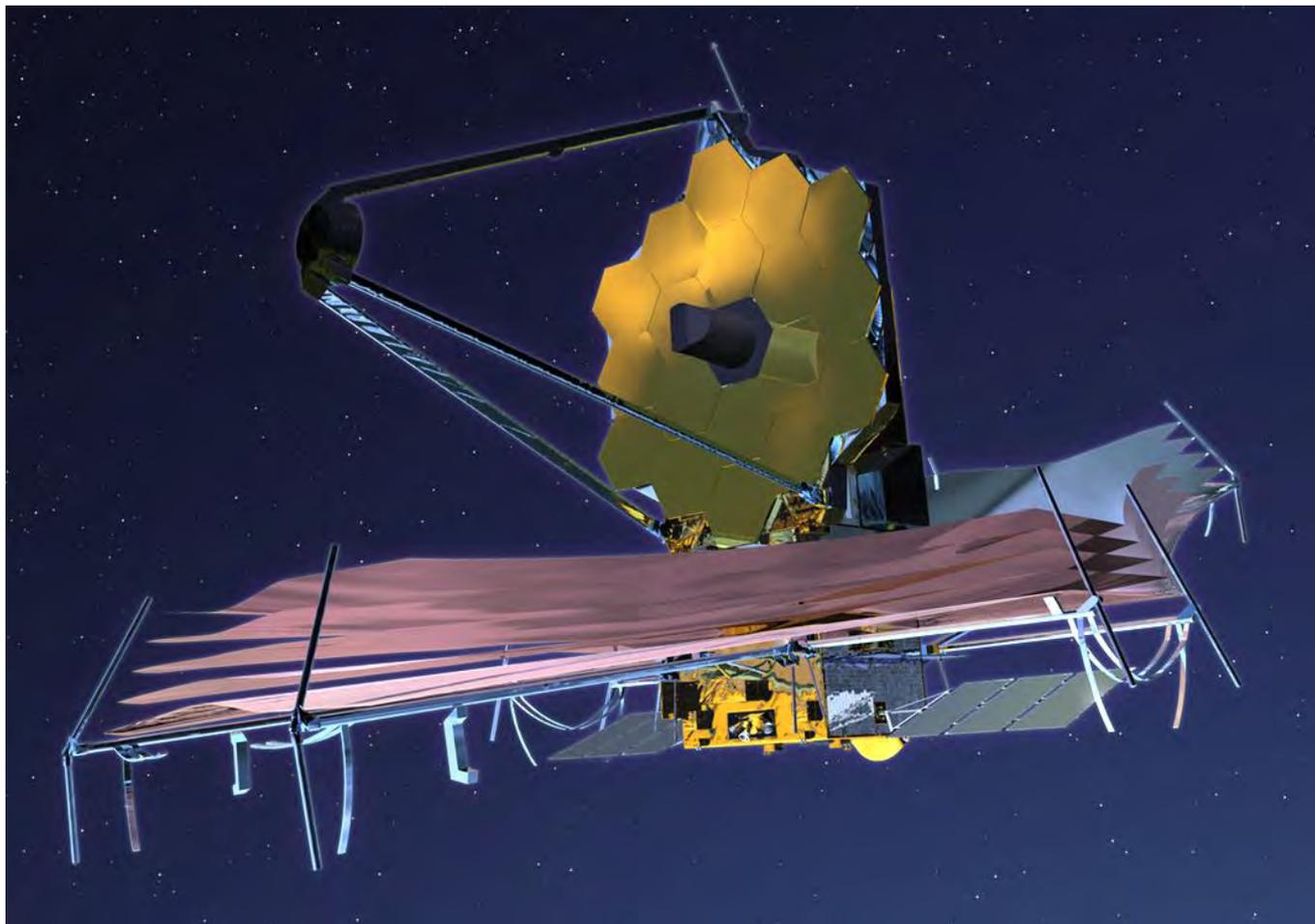
Le télescope Spitzer (NASA)

Spitzer Space Telescope (SST) est un des grands programmes de la NASA. Il a été lancé en 2003 pour imager l'Univers uniquement en infra-rouge. Ce télescope doit son nom au fameux astronome américain Lyman Spitzer, qui fut l'un des premiers à démontrer, dès 1946, quel serait l'intérêt d'envoyer un télescope en orbite. Spitzer est en orbite non pas autour de la Terre, mais autour du Soleil. Une grande partie de ces instruments n'est plus exploitable depuis 2009 depuis qu'il a consommé la totalité de son hélium liquide servant à refroidir le système de détection. Mais une seconde famille d'instruments fonctionne toujours à un peu plus haute température et Spitzer continue de fournir des données très intéressantes sur les phénomènes comme la naissance des étoiles, des exoplanètes de type « jupiters chauds », les nuages de gaz et de poussières, et même des informations nouvelles sur les anneaux de Saturne...

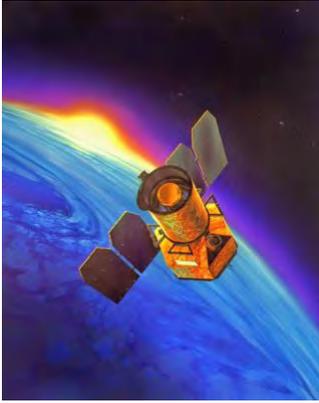
James Webb Space Telescope (NASA-ESA-CSA)

Le *James-Webb* (JWST, pour l'anglais James Webb Space Telescope) est un télescope spatial servant d'observatoire fonctionnant principalement dans l'infrarouge, développé par la NASA avec la participation de l'Agence spatiale européenne (ESA) et de l'Agence spatiale canadienne (ASC). Plus grand et plus onéreux télescope spatial à son lancement, le JWST est conçu pour poursuivre les travaux du télescope spatial *Hubble*, en effectuant toutefois ses observations dans des longueurs d'onde plus longues. Son lancement a lieu le 25 décembre 2021 par une fusée Ariane 5 ECA. Il est placé au point de Lagrange L2 et se trouve donc en orbite héliocentrique, à 1,5 million de km de la Terre. Sa première image de qualité scientifique produite par le télescope est publiée en juillet 2022.

Les observations du JWST sont centrées sur l'infrarouge proche et moyen, tout en incluant une partie du spectre située dans le domaine du visible (longueurs d'onde allant de 0,6 à 28 μm). Par sa résolution, sa surface collectrice et la bande spectrale couverte, il surpasse largement *Hubble* pour l'observation dans l'infrarouge, mais, contrairement à celui-ci, il ne peut observer ni l'ultraviolet, ni l'intégralité de la lumière visible. Malgré la grande taille de son miroir primaire (6,5 m de diamètre contre 2,4 m pour *Hubble*), sa masse de 6 200 kg est deux fois plus faible que celle de son prédécesseur. Son pouvoir de résolution atteint 0,1 seconde d'arc et il peut collecter une image neuf fois plus rapidement que *Hubble*. Le JWST emporte quatre instruments : la caméra NIRCam fonctionnant dans le proche infrarouge, le spectro-imageur MIRI dans le moyen infrarouge, le spectrographe NIRSpec dans le proche infrarouge et le spectro-imageur NIRISS, également dans le proche infrarouge.

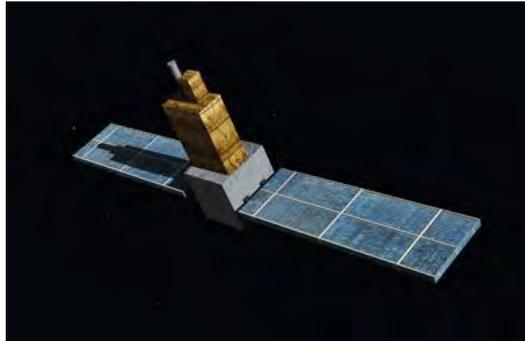


D) Ultra-Violet



GALEX (NASA)

GALEX est un télescope assez modeste, de 50 cm de diamètre avec une longueur focale de 3 mètres. Il a la particularité d'avoir été lancé (en 2008) par une minifusée *Pegasus* larguée par un avion. Sa mission a pris fin le 28 juin 2013. Comme son nom l'indique, **Galaxy Evolution Explorer** était dédié à l'étude de l'évolution des galaxies, et notamment comment elles se forment et comment elles produisent leurs étoiles. Ses données sont encore en cours d'exploitation. Il explorait le ciel sur une plage de longueurs d'ondes comprises entre 0,13 et 0,28 μm .

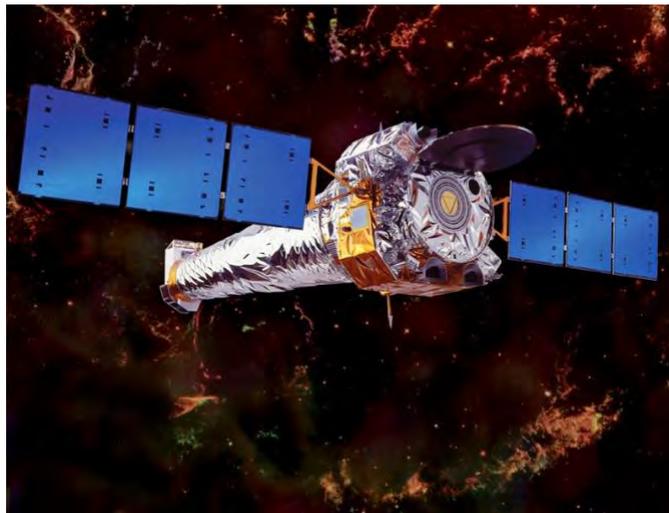


HISAKI (JAXA)

Le système solaire a lui aussi droit à être observé de près par des télescopes en orbite, dont ce **HISAKI**, mis en orbite en septembre dernier. Sa mission de courte durée (de l'ordre de 1 an initialement) a pour objectif d'étudier les atmosphères des planètes de notre système, ainsi que leurs magnétosphères. Ce petit télescope de 350 kg 100% japonais travaille en ultra-violet lointain (jusqu'à des photons d'une dizaine de nanomètres de longueur d'onde, soit une centaine d'électron-volts).

E) Rayons X

Les télescopes spécialisés dans les rayons X foisonneraient presque au-dessus de nos têtes, sans doute parce que les rayons X ont un peu de mal à être détectés à travers l'atmosphère terrestre...



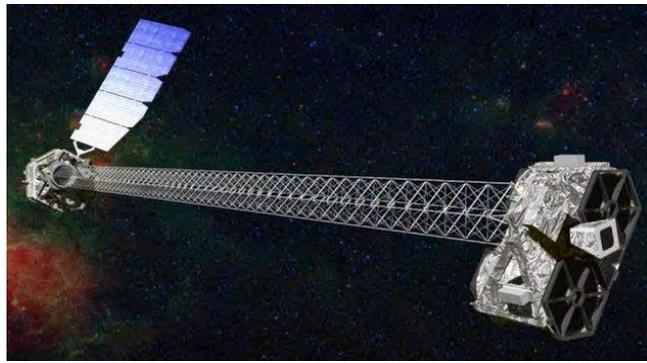
CHANDRA (NASA)

L' "observatoire à rayons X", comme les américains l'appellent, va bientôt fêter son 15^{ème} anniversaire en orbite. Chandra est non seulement un phénomène de longévité, mais aussi un instrument à l'efficacité redoutable. Ce télescope doit son nom au célèbre astrophysicien indien Subrahmanyan Chandrasekhar, disparu en 1995. Il permet de produire des images des zones d'émissions de rayons X, avec une forte prédilection pour les trous noirs de toutes les tailles. **Chandra** explore l'Univers dans ses lieux les plus violents et a permis de très nombreuses découvertes, petites ou plus grandes.



XMM NEWTON (ESA)

XMM Newton est un peu la réponse européenne à Chandra. Seulement plus jeune de quelques mois, il a été mis en orbite en décembre 1999, juste avant le bug qui n'eut jamais lieu... Il est parfaitement complémentaire, (pour ne pas dire redondant) de Chandra. *XMM* signifie *X-ray Multi-Mirror*. Il a un air de ressemblance avec son cousin américain. La technologie pour détecter les rayons X est effectivement semblable, utilisant une série de miroirs cylindriques sur lesquels les rayons X sont diffusés en incidence rasante. Ces télescopes doivent ainsi être très longs. Il arrive que certaines études nécessitant des observations en rayons X exploitent à la fois des données de *Chandra* et des données de *XMM-Newton*.



NuSTAR (NASA)

En anticipation de la fin de vie prévisible de Chandra, la relève a été mise en route sous la forme de ce très long NuStar, qui a été déployé en 2012. J'en avais parlé au moment de sa mise en orbite. NuSTAR (*Nuclear Spectroscopic Telescope Array*) est exclusivement dédié à l'observation des rayons X dits « durs », c'est-à-dire relativement énergétiques, qui sont produits principalement en périphérie des trous noirs supermassifs. **NuSTAR** s'intéresse aux rayons X ayant une énergie comprise entre 5 keV et 80 keV, c'est-à-dire dans la plage encore inconnue, située entre ce qu'observe le télescope Chandra et ce que détecte le télescope Fermi (rayons gamma).

F) Rayons Gamma



FERMI (NASA)

Celui-là, on l'aime bien, non pas parce qu'il porte du grand physicien italien qui découvrit Ettore Majorana, mais parce qu'il produit des découvertes majeures dans le domaine des astroparticules. Fermi est un télescope qui ne détecte que des photons dont l'énergie dépasse plusieurs GeV, c'est à dire les photons les plus énergétiques de l'Univers. Il a notamment à son actif la détection du photon gamma le plus énergétique jamais détecté par l'Homme (94 GeV). Fermi est utilisé pour étudier les phénomènes les plus violents comme les GRB, les trous noirs, mais aussi indirectement des phénomènes liés à la matière noire (annihilation ou décroissance de particules exotiques).



INTEGRAL (ESA)

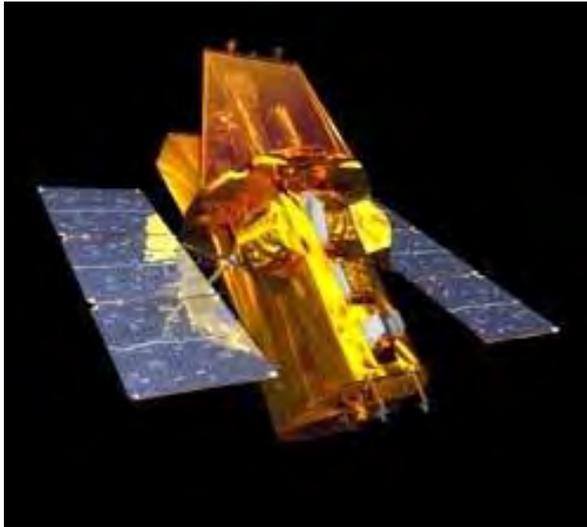
Avant FERMI, il y avait **INTEGRAL**, lancé par les européens en octobre 2002, 6 ans avant FERMI. Et **INTEGRAL** (*International Gamma Ray Astrophysics Observatory*) est toujours actif et fonctionnel. Il est doté de plusieurs instruments : un imageur (entre 15 keV et 10 MeV), un spectromètre (entre 20 keV et 8 MeV), un détecteur à anticoincidence (toutes énergies) et même un détecteur de rayons X (3 à 35 keV)... Il permet d'étudier les mêmes types de cibles que Fermi, de l'énergie à l'état pur!



AGILE (ISA)

Les italiens se sont mis en tête de lancer leur propre télescope à rayons Gamma. **AGILE** (*Astro-Rivelatore Gamma a Immagini Leggero*) est en fait un télescope mixte gamma et rayons X. Lancé par une fusée Indienne en 2007, il est lui aussi muni de plusieurs instruments, à la manière de INTEGRAL, mais en plus petit format (352 kg contre 4 tonnes pour son grand frère européen). Il peut imager des sources gamma avec une énergie maximale de 50 GeV, soit plus élevée que INTEGRAL, mais avec une bien moins bonne résolution spatiale.

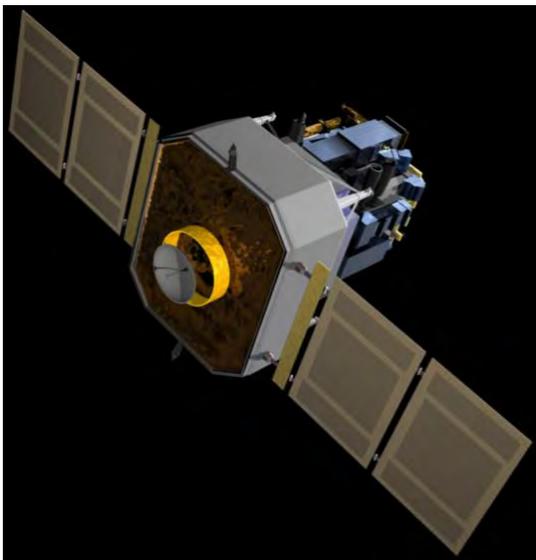
G) Multi-longueurs d'ondes



Swift (NASA)

Celui-là est un télescope un peu particulier, il est polyvalent. Il peut observer à la fois dans l'ultra-violet, les rayons X et les rayons gamma. Son objectif est de détecter les premiers instants des bouffées de rayonnement gamma (les fameux GRB). **Swift** a la faculté de se positionner très vite (d'où son nom) dès qu'il reçoit des rayons gamma, pour mesurer la première lumière de décroissance accompagnant la bouffée de rayonnement et surtout transmettre la position du GRB aux observatoires terrestres pour qu'ils prennent le relais.

Il faut également noter qu'il existe une grande famille de télescopes qui sont dédiés exclusivement à l'étude du Soleil dans diverses longueurs d'onde, notamment :



SoHO (ESA+NASA)

L'Observatoire solaire et héliosphérique, en anglais Solar and Heliospheric Observatory, en abrégé SoHO, est un observatoire solaire spatial placé en orbite autour du Soleil. Son objectif essentiel est l'étude de la structure interne du Soleil, des processus produisant le vent solaire et de la couronne solaire.

Pour mener à bien sa mission, le satellite SoHO, d'une masse de 1,8 tonne, emporte 12 instruments permettant d'effectuer des observations à la fois in situ et à distance.



SDO (Solar Dynamics Observatory – NASA) :

Le SDO de la NASA est aussi un télescope spatial, mais il est en orbite géosynchrone contrairement à SoHO qui est héliocentrique. Il surveille également le Soleil en permanence.

VIII Les montures des instruments astronomiques

La monture est la partie mobile qui supporte et permet d'orienter l'instrument. Ces montures s'appliquent tant aux télescopes qu'aux lunettes astronomiques. Il existe deux grands types de monture : les montures équatoriales et les montures azimutales.

A) Les montures équatoriales

Une **monture équatoriale** est un dispositif comportant un axe de rotation parallèle à l'axe de rotation terrestre. Elle permet de suivre facilement un astre lors de son parcours dans la voûte céleste. La monture supporte généralement un instrument d'observation astronomique, tel qu'un télescope ou une lunette. Elle fut perfectionnée en 1774 par Jesse Ramsden.

Principe

Les étoiles, comme le Soleil, se lèvent à l'est et se couchent à l'ouest, dans un grand mouvement apparent de rotation de l'ensemble de la voûte céleste. Ce phénomène est dû à la rotation de la Terre. A l'œil nu, le phénomène est peu évident sur une durée courte. En revanche, si l'on observe une étoile à l'aide d'un télescope, plus le grossissement sera élevé, plus l'étoile semblera se déplacer vite. Il faudra donc compenser son mouvement en permanence pour assurer une observation pendant quelques minutes, voire quelques secondes.

Cela est possible avec une monture azimutale, qui est conceptuellement plus simple, mais le suivi doit alors se faire par la rotation simultanée de l'instrument autour de deux axes. C'est envisageable (bien que peu pratique) en observation visuelle, lorsque le grandissement est modéré, mais plus difficile à réaliser précisément.

Le principe de la monture équatoriale consiste donc à aligner un des deux axes avec l'axe de rotation de la Terre (l'axe polaire). Le dispositif comporte deux avantages essentiels :

- le suivi du mouvement des objets célestes peut ainsi se faire avec un seul axe uniquement (appelé axe de déclinaison).
- L'axe de déclinaison opère une rotation de l'instrument autour de l'axe polaire, ce qui compense exactement le mouvement apparent des étoiles (qui « tournent » autour de l'axe des pôles). C'est ainsi tout le champ couvert qui tourne et s'adapte à la rotation de la Terre, alors qu'une monture azimutale ne suit finalement que le point situé exactement au centre de l'objectif, de sorte que les autres points vont décrire des arcs de cercles à l'intérieur de l'image. Le phénomène est limité pour l'astrophotographie en poses courtes, mais s'avère significatif sur plusieurs minutes, et lorsque la zone visée est proche du pôle.

Description



Une monture équatoriale type EQ-2 équipée d'un moteur sur un axe

La monture équatoriale est constituée principalement d'un axe, dit axe polaire ou horaire ou ascension droite (AD), qui porte l'instrument d'observation (au moyen d'une fourche ou d'une platine munie d'une queue d'aronde). Cet axe est gradué en heures (0-24). L'axe des déclinaisons, perpendiculaire à l'axe polaire, est gradué en degrés (+90° à -90°). Pour être opérationnelle, la monture équatoriale nécessite un réglage appelé *mise en station*, qui consiste à mettre en parallèle l'axe polaire de la monture avec l'axe de rotation de la terre (Nord géographique). Pour cela, on modifie l'inclinaison et l'orientation dans le plan horizontal de l'axe polaire. L'inclinaison dans le plan vertical correspond à la latitude du site d'observation. L'orientation de l'axe polaire de la monture doit pointer soit vers le Nord (dans l'hémisphère Nord) ou vers le Sud (dans l'hémisphère Sud).

Lorsque la monture est mise en station, l'axe polaire doit pointer vers le pôle céleste qui se trouve à trois quarts de degré de α Ursae Minoris, dite l'étoile polaire dans l'hémisphère nord, cet écart varie lentement avec le temps à cause de la précession des équinoxes. Cela signifie que l'axe polaire de la monture est parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Ainsi, la rotation de l'instrument autour de cet axe permet de suivre l'ascension droite de la sphère céleste, et la rotation autour de l'autre axe change la déclinaison. Avec certains équipements, il est parfois nécessaire - en cours d'observation - d'effectuer un *retournement* de cet axe dans une position symétrique, opération parfois délicate.

À noter que cette mise en station peut s'effectuer avec l'aide d'un viseur polaire qui est en quelque sorte un chercheur placé à l'intérieur de l'axe polaire de la monture (ce qui est le cas en particulier pour les montures équatoriales allemandes). Ce dispositif permet grâce à un réticule spécifique gravé dans le viseur polaire de pointer aisément le pôle nord vrai pour mettre la monture correctement en station. On notera aussi que selon les fabricants ce réticule est différent : il peut être conçu pour être utilisé par triangulation sur trois étoiles ou encore exiger de l'utilisateur une orientation du dispositif en fonction de l'heure et de la longitude du lieu d'observation. Par conséquent, ces dispositifs généralement intégrés à la monture équatoriale sont rotatifs, et il y a donc lieu de temps à autre de vérifier que l'axe de rotation ne soit pas légèrement décalé par rapport à celui du corps de la monture (légers déplacements dus notamment aux transports du matériel astronomique). Le réglage de ce viseur polaire se fait généralement à l'aide de trois petites vis placées à 120°. À noter enfin que certains fabricants placent le viseur polaire à l'extérieur du corps de la monture. Celui-ci est alors déporté à l'aide d'un support à la manière d'un chercheur et oblige à des réglages de parallélisme plus fréquents. Cette disposition moins pratique reste néanmoins heureusement assez rare. Sur les montures motorisées, moteur électrique entraîne l'axe polaire en rotation, à une vitesse donnée : 1 tour par 24 heures pour le suivi du soleil, 1 tour par 23 h 56 min 4,09 s (qui est la durée du jour sidéral) pour le suivi du mouvement des étoiles, et un peu moins (-3,7 % en moyenne) pour le suivi de la lune.

La régularité et la précision ainsi que la qualité de la mise en station sont les critères indispensables pour faire de la photographie astronomique à long temps de pose.

Dans les montures plus élaborées, tous les axes sont motorisés. Un calculateur peut être couplé à un récepteur GPS (le GPS permet de connaître la longitude, la latitude et le temps du lieu d'observation à partir du Temps Universel), ce calculateur permet de corriger les erreurs de mise en station après la visée d'étoiles guides et autorise un pointage automatique vers l'objet à observer : il suffit d'entrer les coordonnées célestes de l'objet, ou de le sélectionner dans une liste. Ce type de monture automatisée est appelé plus communément monture « GOTO ».

Types de montures

On distingue deux grandes familles de montures équatoriales : les montures allemandes d'une part, et les montures à fourches et anglaises de l'autre.

Les montures allemandes

La pièce principale est en forme de T dont la jambe correspond à l'axe polaire et la barre à l'axe des déclinaisons. Un contrepoids doit équilibrer le poids de l'appareil d'observation. La monture allemande est très utilisée pour les télescopes de type Schmidt Cassegrain, les lunettes et les télescopes de type télescope de Newton de petites dimensions, en version manuelle ou motorisée. La monture elle-même est compacte et offre une bonne précision pour des tubes optiques suffisamment légers. Les limites de la monture allemande résident avant tout dans l'utilisation de contrepoids qui augmentent d'autant les charges (pour la monture elle-même et pour l'utilisateur s'il veut déplacer l'ensemble), et induisent des contraintes et

flexions, nuisibles à la précision du suivi. Les tubes longs peuvent aussi limiter les rotations en heurtant la monture en position extrême. Cela signifie donc qu'il est nécessaire de prévoir au préalable les positions à venir du tube par rapport à la monture durant une nuit d'observation, en particulier dans le cadre de la pratique de l'astrophotographie nécessitant l'utilisation de la monture orientée sur un même objet durant plusieurs heures de poses.

Les montures à fourche et anglaises (aussi nommées montures à berceau)

La monture équatoriale à fourche est fondamentalement une monture azimutale dont l'axe d'azimut (vertical) est incliné pour se confondre avec l'axe polaire. Cette disposition est peu utilisée car elle induit un porte-à-faux important, qui la rend inutilisable pour des instruments lourds. La monture anglaise correspond à une amélioration de la monture à fourche, proposé par un opticien anglais : Jesse Ramsden en 1791.

Elle consiste à maintenir l'axe polaire par ses deux extrémités au lieu d'une seule, supprimant ainsi le porte-à-faux. La fourche devient ainsi un berceau. Le dispositif s'en trouve très encombrant, mais ses grandes qualités mécaniques et sa bonne stabilité permettent un excellent suivi, et lui ont valu d'être utilisé sur certains instruments de taille respectable (comme le télescope Hooker de 2 50 m de l'Observatoire du Mont Wilson). Il est à noter que sa conception lui interdit de viser les zones très proches de l'axe polaire, qui sont occultées par le support supérieur de l'axe. En pratique, ce type de monture n'est utilisé que sur des instruments fixes, pour lesquels le réglage de l'axe polaire est marginal.



Monture équatoriale allemande légère



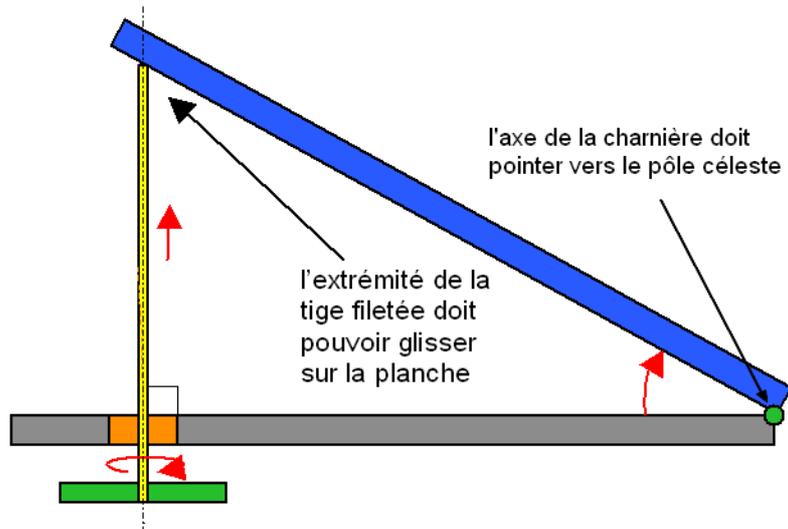
*Télescope de Hooker (2,5 m)
sur monture anglaise*

Monture équatoriale en fer à cheval

Dérivées des montures des grands télescopes (type 5 m du Palomar ou CFH de 3,60 m à Hawaii), les montures équatoriales en fer à cheval ne sont vendues qu'avec certains télescopes de la marque américaine JMI (NGT 18). Surbaissées et parfaitement stables, ce sont des montures idéales pour les grands Newton, mais totalement inadaptées aux Cassegrain et autres Schmidt-Cassegrain, pour lesquels l'arrière du miroir principal doit être accessible.

Autres types de montures équatoriales

La planche équatoriale ou table équatoriale est une monture simple, fabriquée par les astronomes amateurs. Différentes conceptions sont adaptées au type d'appareil d'observation qu'elle doit porter :



- pour un appareil photo ou un télescope léger (de courte focale), une planche équatoriale à vis : une tige filetée écarte deux planches qui pivotent autour d'une charnière dont l'axe est orienté vers le pôle céleste. De nombreuses variantes existent sur ce principe, dans le souci de réduire ou d'annuler l'erreur de suivi induite par la géométrie de l'engin (erreur *de tangente*).
- pour un télescope de Dobson, une table équatoriale à secteur lisse, selon le principe développé dans les années 1970 par Adrien Poncet.

Une **mise en station** est un réglage qui concerne les télescopes équipés d'une monture équatoriale. Elle consiste à régler l'axe horaire de la monture pour le rendre parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Ce réglage permet d'observer un astre pendant de longues périodes en suivant sa trajectoire par une simple rotation du télescope sur cet axe horaire.

Parmi les nombreuses méthodes existantes, on peut en distinguer trois principales : la méthode approchée, basée sur le pointage direct de α Ursae Minoris (l'étoile polaire); la méthode de Bigourdan qui permet une mise en station avec une étoile quelconque; et la méthode de King, basée sur l'analyse de photographies à longue pose. D'une manière générale, une mise en station consiste à régler d'une part l'*inclinaison* de l'axe horaire, et d'autre part son *orientation*.

Description d'une monture équatoriale

Une monture équatoriale est constituée de 4 axes : Bien repérer les quatre axes avant de commencer. Pour ce repérage, on décrit les axes à partir du trépied pour finir au tube du télescope :

- L'axe d'orientation (azimut) est l'axe vertical qui permet à l'ensemble de la monture équatoriale de tourner sur elle-même de 360° . Sa base est fixée au trépied.
- L'axe de latitude est un axe horizontal qui permet à la partie supérieure de la monture équatoriale de pivoter de 180° mais on le règle une fois pour toutes sur la latitude du lieu d'où l'on observe. Sa base est fixée sur l'axe d'orientation (azimut).
- L'axe horaire ou axe d'ascension droite (RA pour right ascension en anglais), permet à la partie supérieure de la monture équatoriale de pivoter sur 360° . Il est gradué en heures car il permet de suivre le mouvement d'un astre lors de la rotation terrestre. Sa base est fixée à l'axe de latitude.
- L'axe de déclinaison, enfin : sa base est fixée à l'extrémité de l'axe horaire et son extrémité est fixée au tube du télescope lui-même. Il permet au tube du télescope de pivoter sur 360° .

Pour l'observation :

- L'axe horaire est celui qui porte le télescope, il peut pivoter sur lui-même et sert à suivre l'ascension droite d'un astre
- L'axe de déclinaison est à l'extrémité de l'axe horaire, il relie celui-ci au tube du télescope et permet de le faire basculer pour suivre la déclinaison

Pour la mise en station :

- L'axe de latitude est horizontal, il est situé à la base de l'axe horaire et permet d'en régler l'inclinaison; certaines montures bon marché ont une inclinaison fixe de 40 ou 45°
- L'axe d'orientation (azimut) est un axe vertical qui permet de faire pivoter l'ensemble de la monture à droite ou à gauche; la monture est quelquefois solidaire de son support, dans ce cas il faut faire pivoter tout le support.

Méthode approchée

Le réglage approché d'une monture est pratique pour les observations de courte durée. Certaines montures équatoriales de type allemand sont équipées d'un viseur polaire qui facilite encore ce réglage. Sur une monture à fourche, elle nécessite l'emploi d'un coude qui renvoie l'image à 90°. Tout d'abord, le support de la monture (généralement un trépied) doit fournir un support parfaitement horizontal, et si la monture est de type allemand, elle doit être correctement équilibrée.

Réglage à vue

Desserrer la vis de l'axe horizontal primaire (l'axe de latitude), une graduation permet de la régler sur la latitude du site d'observation, puis resserrer provisoirement la vis, Pivoter le tube du télescope sur ses axes horaire et de déclinaison pour le rendre parallèle à l'axe horaire. Bloquer les freins des axes horaires et de déclinaison, Orienter le tube du télescope vers l'étoile polaire en faisant pivoter la monture, ou le trépied si la monture est solidaire de celui-ci, en pointant à vue dans la direction de l'étoile polaire. À la fin de l'opération, l'étoile polaire devrait être visible dans le chercheur. Pour obtenir une meilleure précision, on peut s'aider de celui-ci.

Réglage avec le chercheur

Le chercheur permet d'affiner le réglage à vue. Pour cela, l'instrument doit être muni d'un chercheur réticulé qui doit être préalablement réglé pour être parallèle au tube du télescope. Après un premier réglage à vue, les freins des axes horaire et de déclinaison doivent être maintenus serrés. Pivoter le chercheur sur lui-même pour que les croisillons du réticule soient vertical et horizontal; noter que l'image rendue par le chercheur est renversée droite-gauche et haut-bas Desserrer légèrement la vis de réglage de latitude et incliner plus ou moins l'instrument pour amener l'étoile polaire sur le croisillon horizontal Lorsque le réglage est satisfaisant, resserrer définitivement la vis de l'axe de latitude; le réglage obtenu reste valable pour toute observation menée ultérieurement sur le même site ou à la même latitude Pivoter la monture (ou le trépied) pour amener l'étoile polaire au centre du réticule Bloquer définitivement le plateau de la monture; dans tous les cas, veiller à ne plus bouger le trépied Les freins des axes horaire et de déclinaison peuvent être débloqués, l'axe horaire est maintenant parallèle à l'axe de rotation de la Terre. La rotation de l'axe horaire suit l'ascension droite, et celle de l'axe de déclinaison suit la déclinaison. La mise en station de la monture par cette méthode offre une précision qui ne dépasse généralement pas 2°.

Réglage avec le viseur polaire

Le viseur polaire se présente comme une petite lunette et possède un réticule éclairé ou non, il est situé pour une monture Allemande à l'intérieur de l'axe horaire creux. Le réticule se présente comme un cercle centré sur l'axe optique (qui correspond au pôle nord céleste), ce cercle représente l'écart de l'étoile polaire avec le pôle nord céleste pour un certain nombre d'années. Ce cercle possède sur sa circonférence un petit cercle qui représente la position de l'étoile polaire. Cette position dépend de la date, de l'heure et du lieu d'observation. Pour l'hémisphère sud le réglage s'effectue avec la constellation d'octant.

Régler la platine de la monture à l'horizontale à l'aide d'un niveau à bulle.

À l'aide des molettes de réglage en azimut et latitude, faire apparaître dans un premier temps l'étoile polaire dans le viseur polaire.

Le viseur polaire comporte une échelle graduée qui représente un calendrier avec une graduation pour chaque jour. Cette échelle comporte aussi dans sa partie intérieure une échelle de longitude : en général de 20° Est à 20° Ouest.

La monture autour du viseur polaire possède une échelle graduée en heure. Régler en premier la longitude du lieu d'observation en tournant l'échelle graduée du viseur polaire. Faire correspondre la date du jour

d'observation avec l'heure d'observation en faisant tourner à la main le télescope sur son axe horaire, bloquer les freins de la monture sur cette position.

Affiner les réglages en azimuth et latitude pour que l'étoile polaire soit placée à l'intérieur du petit cercle qui indique la position théorique de celle-ci à l'heure et à la date d'observation considérées.

La précision du réglage avec ce principe est de quelques minutes d'arc.

Nota : Du fait de la précession des équinoxes l'étoile polaire se déplace lentement au cours du temps par rapport au pôle nord céleste, ce qui nécessite le remplacement du viseur polaire au bout de plusieurs années.

B) Les montures azimutales (ou altazimutales)

La **monture azimutale** est une monture simple équipant les lunettes d'approche d'un grossissement imposant une certaine stabilité et d'orientation sur leur trépied. Elle comporte un axe vertical, ou encore axe d'azimut, et un axe horizontal, également appelé axe de hauteur. Cette disposition permet d'orienter facilement l'instrument de visée. Les plus petites lunettes et les télescopes amateurs en sont équipés par défaut, au vu de la simplicité de sa mise en œuvre, la verticale pouvant n'y être qu'approximative. Sa réalisation mécanique est beaucoup plus simple que la plupart des montures équatoriales.

A contrario, la monture équatoriale permet de suivre facilement l'astre visé et observé, un seul des mouvements devant être suivi, pour compenser la rotation de la Terre vis-à-vis du ciel. Son principal défaut étant l'exigence de son alignement parfait sur l'étoile polaire par une mise en œuvre plus fastidieuse, pour les installations mobiles ou provisoires. L'équilibre du tube étant aussi plus problématique et *les opérations de retournement* quelquefois folkloriques.

Les montures azimutales peuvent être motorisées afin de compenser la rotation de la voûte céleste. La compensation est réalisée par des moteurs et un asservissement informatique, les défauts des deux rotations par rapport aux objets célestes observés, permettant ainsi d'éviter (comme sur la monture équatoriale) la rotation de l'image optique dans le champ observé. Ces défauts compensés permettent d'engager des poses de photographie astronomique toujours longues pour accumuler plus de lumière des sources faibles observées (nébuleuses, constellations).

Ce suivi sur les deux axes ne rend pas pour autant la monture directement apte à la photographie du ciel. En effet, quand les mouvements sont compensés en hauteur et azimuth, le champ observé tourne lentement et accomplit une rotation complète en un jour sidéral. Pour comprendre ce phénomène, il suffit d'imaginer que l'instrument est pointé vers le pôle céleste : aucun mouvement n'est alors nécessaire en hauteur ni en azimuth. En revanche, il est clair que le champ visé tourne apparemment autour du pôle céleste. La platine supportant l'instrumentation peut être mise en rotation afin de compenser cet effet. Cet accessoire porte parfois le nom de « dérotateur de champ ».

Une monture azimutale permet de déplacer le tube optique parallèlement et perpendiculairement au sol. En tout autre lieu que les pôles et l'équateur, il convient de composer ces deux mouvements pour suivre les astres qui, eux, se déplacent " en biais " par rapport à l'horizon. Pour suivre la Lune à fort grossissement, par exemple, vous devrez sans cesse agir sur les deux mouvements, ce qui, naturellement, fait vibrer l'instrument et ne facilite guère l'observation des détails. Pour un observateur débutant, enfant ou adulte, l'utilisation d'une monture azimutale est remarquablement aisée, car il suffit de poser l'instrument sur un sol à peu près plat et d'observer : on peut difficilement faire plus simple.

Les télescopes de Dobson, qui sont des Newton de (très) grand diamètre dédiés à l'observation visuelle, sont constitués d'un tube optique et d'une monture azimutale trapue. Tout est simplifié à l'extrême sur ce type d'instrument. Il n'y a par exemple aucun système de freinage sur les axes de la monture, car le tube est parfaitement équilibré et repose sur des patins de Téflon qui assurent une friction suffisante pour qu'il reste toujours dans la position où on le laisse. Naturellement, pour compenser la rotation de la Terre, il faut déplacer le tube à la main d'autant plus fréquemment que le grossissement employé est fort. C'est vraisemblablement l'instrument idéal pour un observateur novice qui apprend généralement à pointer et suivre un objet céleste en moins de 5 minutes. C'est également l'instrument idéal de ceux pour qui l'observation visuelle est un plaisir sans cesse renouvelé et qui ne désirent pas se lancer dans la photographie traditionnelle ou l'imagerie électronique. Dans le commerce, le prix d'un Dobson de 300 mm correspond à peu près à celui d'une lunette apochromatique de 80 mm. Et pour cette somme, il est possible de construire

un Dobson de 400 mm. Dans sa version non motorisée, ce type de monture équipe les lunettes et les télescopes amateurs utilisés principalement pour l'observation visuelle. La monture des télescopes Dobson est un exemple de réalisation mécanique simplifiée dans ce domaine.

Les grands télescopes scientifiques construits depuis la fin du XX^e siècle utilisent également une monture de ce type, à la place de l'ancienne monture équatoriale, plus lourde, plus coûteuse mécaniquement et nécessitant un abri de plus grande taille.

C) Les montures motorisées

La plupart des montures supportant des télescopes ou des lunettes astronomiques sont motorisées et/ou motorisables. Seuls les instruments d'entrée de gamme ne le sont pas et doivent être déplacés « à la main » ou avec des petites rallonges que l'on fait tourner dans les deux sens pour déplacer l'axe de visée sans avoir à « pousser » l'instrument.

Il existe de plus en plus d'instruments équipés de montures azimutales (ou équatoriales) entièrement motorisées et pilotées par ordinateur. Il suffit alors de pointer deux étoiles connues (ou l'étoile polaire) pour étalonner le programme de suivi, puis l'ordinateur s'occupe du reste. Ces instruments sont équipés d'une fonction " Go To " qui permet un pointage automatique de milliers d'astres inclus dans leur mémoire ou de millions si on les connecte à un ordinateur équipé d'un programme de cartographie stellaire. Naturellement, ces montures calculent aussi les éphémérides des corps du système solaire, ce qui permet par exemple un pointage des planètes en plein jour ou dans le crépuscule lors des conjonctions invisibles à l'œil nu.

On peut aussi désormais installer sur n'importe quel type de monture des "encodeurs électroniques" reliés à une raquette de commande qui reprend toutes les fonctions des montures informatisées. Si l'instrument n'est pas motorisé, la fonction "Go To" est manuelle, le pointage correct étant indiqué par un signal lumineux ou sonore. Un Dobson équipé de tels encodeurs devient à moindres frais une véritable machine à observer !

Les montures motorisées ont trois buts (sans parler du confort et de la rapidité d'utilisation) :

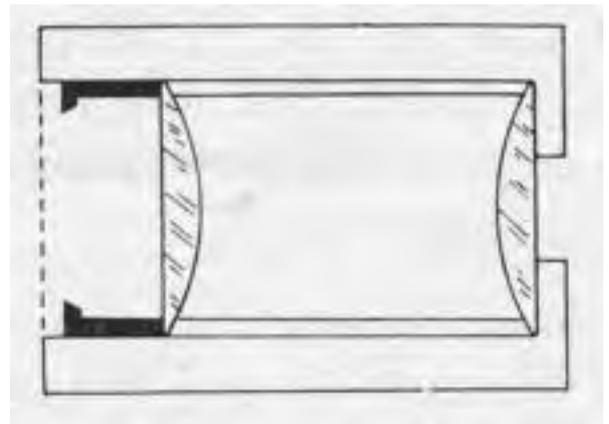
- 1) Compenser le mouvement de rotation de la Terre et assurer ainsi le « suivi » de l'objet que l'on regarde sans craindre de le perdre, surtout avec des forts grossissements. Ce mouvement des étoiles et des planètes est légèrement différent de celui de la Lune. Un excellent suivi est indispensable pour faire de l'astrophotographie qui nécessite généralement des poses longues (à l'exception de la Lune, Jupiter et Saturne à petits grossissements).
- 2) Pouvoir aller, une fois la mise en station assurée, directement à un objet céleste répertorié dans une base de données tenant compte de l'endroit où l'on se trouve sur la planète, du jour et de l'heure. Cette fonction « GoTo » est assurée par un ordinateur qui a en mémoire une grande bibliothèque d'objets et leurs emplacements dans le ciel. Cet ordinateur peut être déporté pour les gros instruments et doté de logiciels adaptés ou bien être incorporé dans le système de motorisation comme dans la plupart des instruments de ce type que l'on trouve dans le commerce.
- 3) Fournir l'utilisation d'une « raquette » qui permet de déplacer l'axe de vision d'une façon manuelle avec des boutons permettant le déplacement dans les quatre directions. Cette raquette permet généralement des déplacements à une ou plusieurs vitesses.

La motorisation d'une monture équatoriale est plus simple que celle d'une monture azimutale dans la mesure où, si la mise en station a été réalisée correctement (étoile polaire, couple d'étoiles, etc.), un seul moteur est nécessaire au suivi. Pour une monture azimutale il faut mettre en œuvre simultanément les deux moteurs, ce qui est généralement assuré d'une manière informatique.

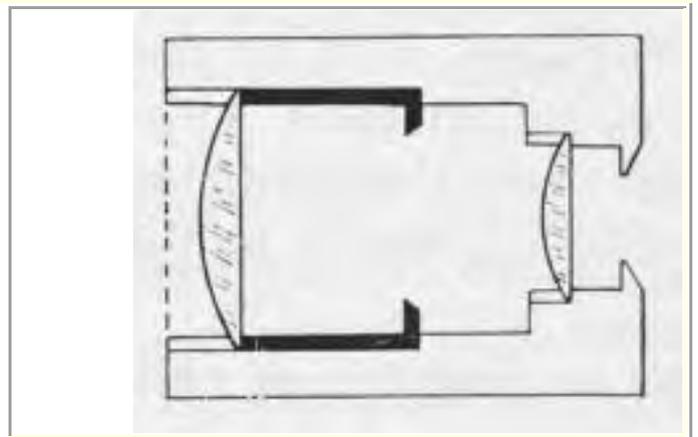
IX Les oculaires – Les grossissements

Il existe quatre sortes d'oculaires :

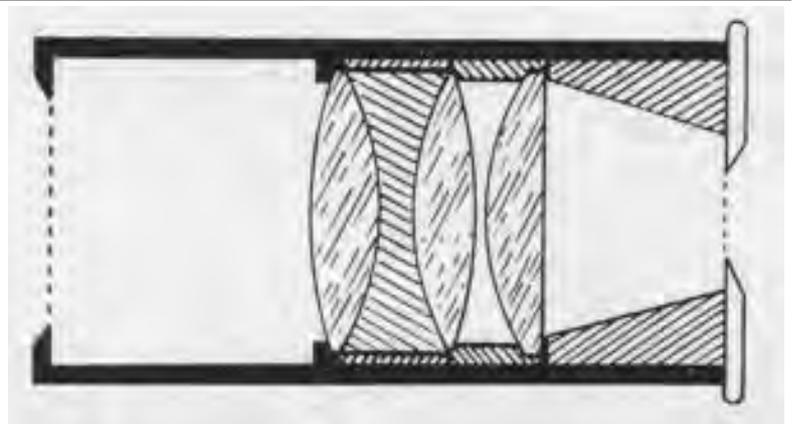
Oculaire positif de Ramsden : c'est une loupe composée de deux lentilles plan-convexes non accolées (les convexités se regardant). L'ensemble est placé au-delà de l'image réelle fournie par l'objectif. Oculaire économique convenant mieux aux lunettes qu'aux télescopes. Champ généralement limité à 30° .



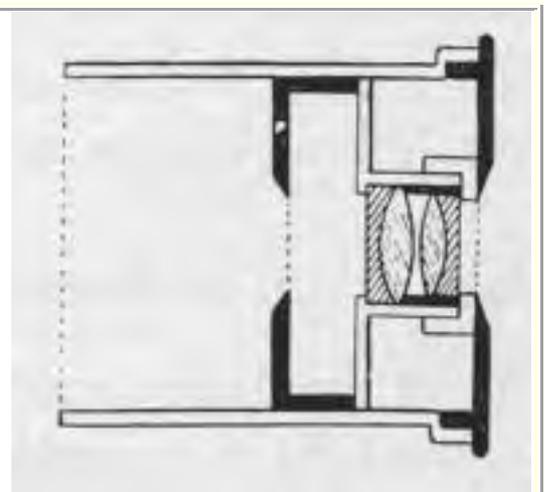
Oculaire négatif de Huygens : l'image réelle fournie par l'objectif vient se former entre deux lentilles plan-convexes (les convexités tournées vers l'objet). Cette image est examinée par la plus petite lentille située près de l'œil. Un premier verre appelé "verre de champ" collecte les rayons issus de l'objectif et les rabat sur le "verre de l'œil". Le champ est ordinairement de 45° . Oculaire très employé pour les longues-vues et lunettes astronomiques. Usage déconseillé avec un télescope ouvert à $f/6$ ou $f/8$.



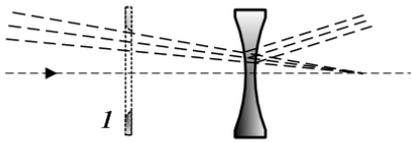
Oculaire orthoscopique : dans cet oculaire, la lentille d'œil est plan-convexe, face plane vers l'œil. La lentille de champ se compose de deux biconvexes collées de part et d'autre d'une biconcave. Le champ est généralement de 40° . C'est un oculaire universel, excellent aussi bien pour les lunettes que pour les télescopes.



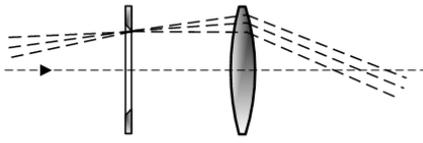
Oculaire de Plössl : il se compose de deux groupes plan-concave et biconvexe se faisant face. Le champ varie entre 48° et 50° . Oculaire idéal pour tous les instruments, mais assez coûteux s'il est traité anti-reflets.



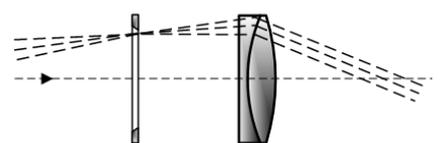
Les principaux types d'oculaires pour télescopes et/ou lunettes (avec leurs années d'invention)



Oculaire galiléen 1609

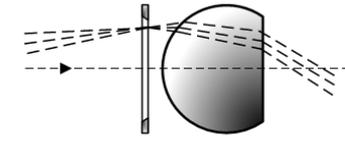


Oculaire de Kepler 1610



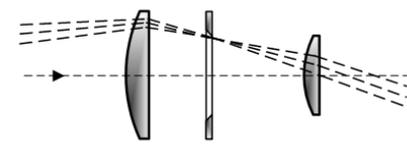
Dolond

Oculaire de Dolond 1760



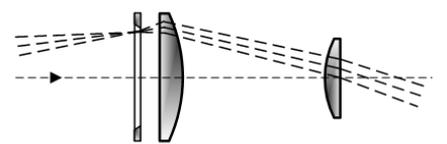
Herschel

Oculaire de Herschel 1768



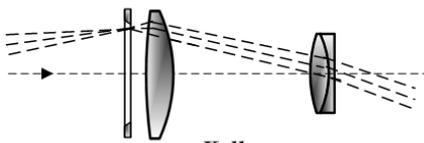
Huygens

Oculaire de Huygens 1703



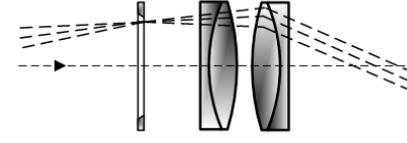
Ramsden

Oculaire de Ramsden 1783



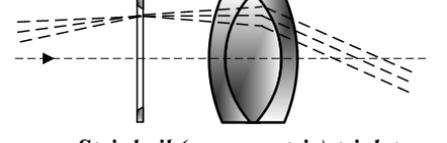
Kellner

Oculaire de Kellner 1849



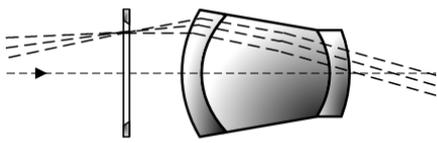
Plössl

Oculaire Plössl 1860



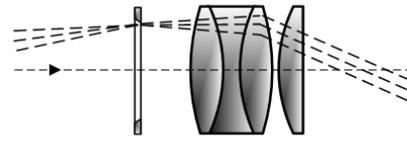
Steinheil (monocentric) triplet

Oculaire Steinheil 1880



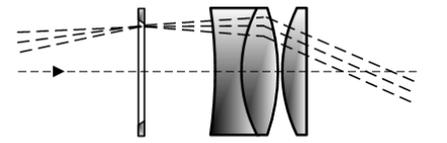
Monocentric

Oculaire monocentrique 1880



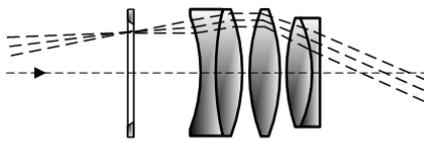
Orthoscopic

Oculaire orthoscopique 1880



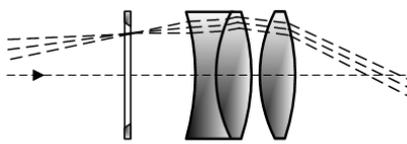
König

Oculaire König 1915



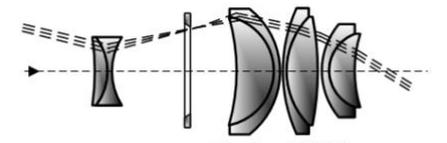
Erfle

Oculaire Erfle 1917

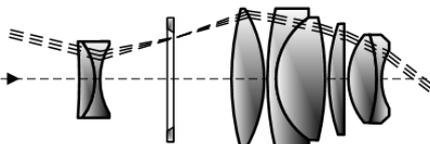


RKE

Oculaire RKE 1970



Nagler (1979)

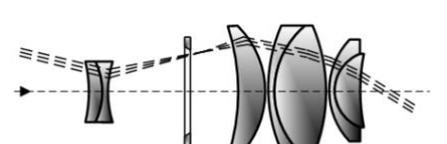


Nagler_2

Oculaire Nagler 2 1988



Un cas particulier : le binoculaire



Nagler (1981)

Oculaire Nagler 1979-1981

Choisir un oculaire :

Le choix de l'oculaire détermine le grossissement de l'objet observé, mais ce n'est pas si simple que ça... :

1. **Le coulant** : il s'agit du diamètre extérieur de la jupe de l'oculaire, et donc du diamètre intérieur du porte-oculaire. Il existe le diamètre japonais qui est de 24,5 mm et le diamètre américain qui est de 31,75 mm. Enfin, certains porte-oculaires sur les instruments les plus puissants reçoivent en plus le diamètre de 50,8 mm.
2. **La focale** : c'est d'elle que va dépendre le grossissement obtenu. Selon que l'on cherche un astre, que l'on observe une galaxie, la Lune ou Jupiter, les grossissements utilisés ne sont pas les mêmes. C'est pour cela qu'il faut une gamme d'oculaires. C'est la seule façon d'obtenir, à chaque fois la meilleure image possible.
3. **La qualité** : chaque oculaire porte, gravés, la focale et une ou plusieurs lettres, voire un nom. Il s'agit de la formule optique. Les indications ci-après vous permettront de connaître le niveau de qualité en fonction de ces lettres ou de ce nom.
 - Qualité ordinaire : H. HM. R. SR.
 - Qualité moyenne : AH. K. MA. SMA.
 - Très bonne définition : OR ou Orthoscopique
 - Haute définition : OR HD ou Orthoscopique haute définition; PL ou Plössl; Eudiascopique; Super Plössl
 - Très haute définition : Panoptic; AVW ou Lanthanum
 - Spéciaux grand champ à haute définition : Nagler; Nagler 2; Wide Field; SWA ou Super Wide Angle; UWA ou Ultra Wide Angle; Televue Ethos.
4. **Le champ visuel** : c'est la portion d'espace que l'on aperçoit lorsqu'on regarde à travers l'oculaire. Ce champ dépend du champ de l'oculaire (champ apparent ou CA) et du grossissement. L'observation de la Lune, de la voie lactée ou des amas ou nébuleuses requiert le champ le plus important possible pour être véritablement spectaculaire. Un grand champ facilite également le pointage des astres.
5. **Choix du grossissement** : une bonne gamme d'oculaires doit se composer des éléments suivants :
 - **Le grossissement minimum** : c'est celui qui est le plus lumineux et qui offre le maximum de champ. La focale de l'oculaire qui donne le grossissement minimum se calcule en multipliant par 7 le rapport d'ouverture (f/D). Exemple : un télescope 200/1200 a un rapport d'ouverture de : $1200/200 = 6$. L'oculaire donnant le plus faible grossissement utilisable a donc une focale d'environ $6 \times 7 = 42$ mm.
 - **Le grossissement moyen** : c'est celui que l'on utilise pour observer la Lune en entier et pour l'observation des amas, galaxies et nébuleuses. C'est un oculaire dont la focale est égale à 3 fois le rapport d'ouverture. Par exemple, avec un 115/900, le grossissement moyen est égal à : $(900/115) \times 3 = 23,5$ mm ; on choisira la focale la plus proche, soit 25 mm.
 - **Le grossissement utile** : c'est celui que l'on choisit pour observer les détails à la surface de la Lune ou des planètes. Il est donné par un oculaire dont la focale est comprise entre $f/D \times 1,5$ et $f/D \times 0,7$. On a intérêt à en avoir plusieurs qui couvrent cette plage pour sélectionner, à chaque observation, celui qui donnera la meilleure image en fonction de la turbulence du moment.
 - **Le grossissement maximum** : indispensable pour séparer les étoiles doubles et, lorsque la turbulence est faible, pour la Lune et Saturne. La focale de l'oculaire correspondant est égale à $f/D \times 0,5$.

Rappelons que le grossissement d'un télescope ou d'une lunette astronomique est déterminé par deux choses : la longueur focale de l'instrument et la longueur focale de l'oculaire qui lui est associé, selon la formule : $\text{grossissement} = \text{focale du télescope} / \text{focale de l'oculaire}$

Donc, le grossissement d'un télescope de longueur focale de 1900 mm doté d'un oculaire de 12 mm est donc de : $1900/12 = 158,33$ fois. Si vous y mettez un oculaire de 5 mm, votre grossissement sera de $1900/5 = 380$ fois.

6. **Oculaires parafocaux** : cela signifie que lorsqu'on change d'oculaire dans la même série, la mise au point ne change pratiquement pas.
7. **Champ de vision** : pour déterminer le champ de vision, il suffit de diviser le champ apparent de l'oculaire par le grossissement. Pour chaque oculaire, le champ apparent (CA) est indiqué en degré, après la focale (dans les tableaux qui suivent).

X La lumière, les filtres correcteurs

A) La lumière, spectre visible et au-delà

La lumière telle qu'elle est connue dans le monde est un mélange de différentes longueurs d'ondes. La répartition de ces longueurs d'ondes se perçoit, dans des conditions d'éclairement suffisant, comme la couleur. Le spectre visible est une faible partie de l'ensemble des ondes électromagnétiques. Les fréquences supérieures à la limite supérieure, correspondant à une couleur bleu-violet au violet sont désignées jusqu'à une certaine limite par le terme d'ultra-violet ou U.V.; celles qui sont de fréquence inférieure à la limite inférieure au rouge sont appelées infra-rouges. La limite du spectre visible est arbitraire ; la sensibilité de l'œil diminue progressivement, et la limite en fréquence dépend du niveau que l'on considère comme négligeable (1%, 0,1% de la meilleure sensibilité, par exemple). On donne en général les valeurs de longueur d'onde de 400 à 700 nanomètres (nm), des valeurs simples à retenir, allant jusqu'à une sensibilité de moins de 1% du maximum. Les tables photométriques vont de 360 à 830 nm ; mais on peut remarquer que toutes les longueurs d'ondes inférieures à 450 nm se perçoivent comme des couleurs d'un bleu profond très peu différentes, et que toutes les longueurs d'onde supérieures à 630 nm donnent, de même, la même impression visuelle rouge. La largeur de bande de la lumière visible par les animaux peut varier quelque peu par rapport aux capacités visuelles des êtres humains. Les différents facteurs qui déterminent l'absorption optique des molécules pigmentaires dans les trois types de cônes (*L*, *M* et *S*) et les bâtonnets sont au centre des préoccupations de la photométrie et de la colorimétrie. La perception des couleurs est rendue possible par les différences entre les spectres d'absorption des pigments des cônes. Les bâtonnets, plus sensibles que les cônes, quant à eux permettent la vision nocturne, sans perception de couleur grâce à un pigment nommé rhodopsine (ou pourpre rétinienne) ayant un spectre d'absorption plus large. Après la transformation de la lumière en influx nerveux par les cônes, les cellules ganglionnaires, toujours dans l'œil, agglomèrent les influx nerveux de plusieurs centaines de cônes pour transmettre au cerveau, par le nerf optique, des influx nerveux correspondant à la sensation colorée. Le cerveau interprète comme luminosité ou contraste l'influx issu de la coïncidence des perceptions entre cônes *L* et *M*, comme situation de la couleur sur un axe jaune-bleu la différence de perception entre la luminosité et les cônes *S*, et comme situation de la couleur sur un axe rouge-vert la différence des influx entre les cônes *L* et *M*. L'adaptation visuelle change les caractères de la perception pour la faire correspondre à l'éclairement de la scène vue, et aux rapports perçus entre les surfaces du champ visuel. La correspondance entre lumière définie physiquement et la perception est assez lâche en général. Les êtres vivants, en dehors d'un contexte technologique, n'ont aucun avantage à mesurer la lumière. La vision leur sert à identifier les objets à distance. Les animaux porteurs des caractères les plus à même de favoriser cette fonction ont gagné un avantage dans la sélection naturelle et les ont propagés.

Les observations astronomiques ont été réalisées depuis que l'homme existe : on aperçut des lumières dans le ciel : le Soleil, la Lune, des étoiles au firmament, des étoiles filantes... et l'on se rendit compte que cela gouvernait le cycle des journées (alternance jour–nuit), et le cycle des saisons (durée du jour tout au long de l'année). Le feu produisait également de la lumière. Dans la représentation du monde des Grecs, le feu (Soleil) était l'un des quatre éléments fondamentaux, puisque l'on se rendit compte que la combustion produisait une lumière comparable au phénomène observé en provenance du Soleil ou des étoiles. L'astronomie moderne apparaît lorsque Galilée, ayant découvert le secret de la lunette hollandaise (inventée à la fin du XVI^e siècle), en améliore les performances pour l'utiliser en astronomie (voir lunette astronomique). La photographie permet aussi de fixer sur le papier les images obtenues par les télescopes, ce qui en rend la diffusion beaucoup plus aisée. Au XX^e siècle, on applique les théories électromagnétiques à l'observation astronomique : après la Seconde Guerre mondiale, on met au point des télescopes qui recueillent les ondes électromagnétiques dans le spectre radio, les radiotélescopes, ainsi que des télescopes observant les infrarouges ou les ultraviolets. Cela présentait l'avantage de permettre de découvrir de nouveaux objets célestes. Ainsi naquit la radioastronomie. On emploie aussi maintenant des télescopes spatiaux pour éviter la pollution atmosphérique. Actuellement, les astronomes font moins d'« observations » à l'œil nu. Les astronomes amateurs continuent néanmoins d'observer le ciel avec des lunettes astronomiques, basées sur un système de lentilles, qui sont dans leur principe équivalentes à celle qu'employa Galilée à partir de 1609, ou avec des télescopes, basés sur un système de miroirs, qui sont dans

leur principe équivalents à celui que présenta Isaac Newton en 1672 à la Royal Society (à noter toutefois l'évolution notable du télescope de type Cassegrain et de ses variantes).

B) Les filtres atténuateurs : filtres solaires, lunaires, polarisants

Filtre lunaire et/ou polarisant

Ce filtre est utilisé lors de l'observation de la Lune qui est très lumineuse et peut créer un éblouissement. On utilise donc un filtre gris neutre, vissé dans l'oculaire. Le filtre gris neutre lunaire peut être avantageusement remplacé par un **filtre polarisant** constitué de deux polariseurs : par rotation, on peut modifier la transparence du filtre pour l'optimiser au type d'observation que l'on souhaite faire, d'une atténuation de 0 à 100%.

Filtre solaire

Observer le soleil avec un télescope va définitivement détruire la rétine de l'œil concerné en une fraction de seconde. C'est extrêmement dangereux et irréversible. C'est pourquoi on utilise des filtres solaires. Le filtre utilisé pour l'observation visuelle du soleil est généralement réalisé avec une feuille de Mylar ou équivalent, ou encore une vitre de verre spécialement traitée, toujours placée *devant* l'instrument et non plus *dans l'oculaire*. La lumière traversant l'ensemble de l'instrument est ainsi déjà filtrée. Ce type de filtre divise par 100 000 la luminosité. Des filtres un peu moins puissants (densité 3.8 au lieu de 5) sont réservés à la photographie du soleil. Ces filtres ne restituent pas les couleurs visibles du soleil. On distingue les filtres solaires standard de protection, qui permettent d'observer uniquement les taches solaires et les filtres solaires H-alpha, beaucoup plus chers, qui permettent d'observer également les protubérances solaires.

Nota : certains instruments pour débutants sont parfois fournis avec un "filtre solaire" ressemblant au filtre lunaire, mais plus sombre, qui est à proscrire absolument, en raison de son niveau de sécurité insuffisant et des risques de cécité encourus : la chaleur importante atteinte dans le tube optique en raison de la luminosité solaire peut faire éclater le filtre et ainsi supprimer sa protection.

C) Les filtres de couleur

Pour comprendre le fonctionnement des filtres, il faut tout d'abord avoir une idée de ce qu'est la lumière, c'est une onde électromagnétique. Une onde est un système qui se déplace, comparable au déplacement d'un ensemble de vagues. Le terme électromagnétique précise la nature de ces vagues. La lumière est caractérisée par sa longueur d'onde ; c'est la distance entre deux sommets de vagues qui se suivent. L'œil interprète les différentes longueurs d'ondes comme des couleurs différentes : pour le bleu, la longueur d'onde est d'environ 400 nm (nanomètre, 1 nm = 10⁻⁹ mètre), pour le rouge, la longueur d'onde se situe aux environs de 700 nm. En fait, l'œil ne peut percevoir qu'une très petite partie du spectre électromagnétique. Les rayonnements ayant des longueurs d'ondes invisibles portent des noms. Dans l'ordre des plus petites vers les plus grandes : Rayons γ , Rayons X, Rayons ultraviolets, Visible, Rayons infrarouges, ondes millimétriques et radio.

Un filtre est une pièce optique (généralement une lame en verre à faces parallèles) dont le rôle est de modifier la nature de la lumière qui le traverse. On trouve notamment des filtres colorés destinés à l'observation planétaire, mais pas uniquement. L'amateur a tendance à augmenter le diamètre de son télescope pour avoir plus de lumière, mais on peut alors se demander pourquoi utiliser un filtre qui absorbe une partie de la lumière. En fait, malgré une certaine absorption de la lumière, nous allons voir que les filtres peuvent améliorer de façon parfois spectaculaire les observations.

Un filtre de couleur est une lame de verre teintée qui empêche le passage de la lumière complémentaire à sa propre couleur : un filtre vert coupe le violet, un filtre bleu coupe le magenta... Ces filtres permettent donc de faire ressortir certains détails tout particulièrement en observations planétaires. Il faut donc utiliser un filtre de la couleur complémentaire de ce que l'on veut observer : Un filtre bleu foncera la tache rouge de Jupiter, un filtre orange renforcera les régions verdâtres de Mars, faisant ainsi ressortir les détails peu contrastés. Tous ces filtres peuvent être utilisés en visuel comme en photographie, seuls ou combinés. Toutes les marques commercialisant des filtres utilisent des chiffres pour repérer leurs couleurs (référence de la marque Wratten déposée par Kodak). Voici les codes des couleurs les plus utilisées : 8 jaune léger, 11 jaune-vert, 12 jaune, 15 jaune, 21 orange, 23 rouge léger, 25 rouge, 29 rouge foncé, 38 bleu foncé, 47

violet foncé, 56 vert léger, 58 vert, 74 vert foncé, 80 bleu, 82 bleu très léger, 92 rouge très foncé, 96 filtre de densité gris neutre.

Pour comprendre pourquoi certains filtres assombrissent les détails de surface, il faut se dire qu'un filtre éclaircit les structures qui ont la même couleur que lui et assombrit les détails de la couleur complémentaire. Le résultat est un contraste global plus élevé et une image dans laquelle certains détails seront plus apparents. En fait la plupart des amateurs ne considèrent souvent que l'augmentation du contraste car tous les objets semblent prendre la même couleur que le filtre... sauf si vous photographiez le sujet en noir et blanc. Aussi pour bien comprendre quels sont les effets d'un filtre coloré sur une image, consultez les livres consacrés à la photographie... en noir et blanc ! Prenons un autre exemple. Si vous voulez observer la tache rouge de Jupiter lors de son passage au méridien par exemple, sa couleur étant brun-orangé, sous filtre orange elle paraîtra incolore. Il faut donc utiliser la couleur complémentaire de l'orange pour que cette structure apparaisse sombre par contraste, soit le bleu ciel ou le cyan très pâle selon la tonalité.

Cela signifie aussi que vous pouvez utiliser un filtre bleu ciel ou cyan sur une planète bleutée pour faire ressortir tous les détails jaunes-orangés. Ceci explique pourquoi on préconise également d'utiliser des filtres de la couleur de la planète que vous observez, un filtre orange W21/W23A ou rouge W25/W29 par exemple pour pénétrer les brumes de Mars et augmenter le contraste des détails de surface ou un filtre vert W57 ou bleu W47 pour observer les ceintures rougeâtres presque pourpres qui entourent Jupiter.

Mais comment connaître la couleur complémentaire d'une autre ? Lorsque les couleurs fondamentales sont mélangées il est en effet très difficile de connaître la couleur complémentaire d'une tonalité précise sans utiliser de logiciel graphique (où il suffit d'inverser la couleur).

Ceci dit, un filtre de contraste utilisé pour observer une planète naturellement brillante peut vous jouer des tours. Si vous observez Mars (orangée), Jupiter ou encore Vénus (jaunâtres) devant un ciel bien noir et dans un oculaire présentant un grand contraste (très lumineux), il peut arriver que les tonalités de cette planète apparaissent dans leur couleur complémentaire. Cet effet est provoqué par le rapport de contraste entre la planète et le fond du ciel. Vous pouvez observer des détails jaunes ou verts par exemple sur Mars alors qu'ils sont réellement bleutés (diffusion de la lumière sur de la glace) ou oranges ou rosés, c'est l'effet de contraste simultané. Aussi, tous les nuages "jaunes" que l'on voit sur Mars durant les tempêtes de sable, ne sont peut-être pas aussi jaunes qu'ils paraissent. Comment le savoir ? Réalisez une photographie RGB, elle sera objective !

Sur les conseils de divers observateurs et des spécialistes de l'ALPO voici les principaux filtres à utiliser pour observer les planètes:

- Mercure : orange W23A, jaune W15
- Vénus : bleu W46, violet W47 (ainsi que UV et IR pour la photographie)
- Mars : orange W23A, rouge W25, W29, bleu W 80A, violet W47 (ainsi que IR pour la photographie)
- Jupiter : vert W57, violet W47, jaune W12, magenta W30, rouge W25, bleu W80A
- Saturne : vert W57, bleu W80A
- Uranus et Neptune : jaune-vert W12, vert W57, magenta W30.

En résumé, l'utilisation des filtres de couleur peut avoir trois buts bien différents :

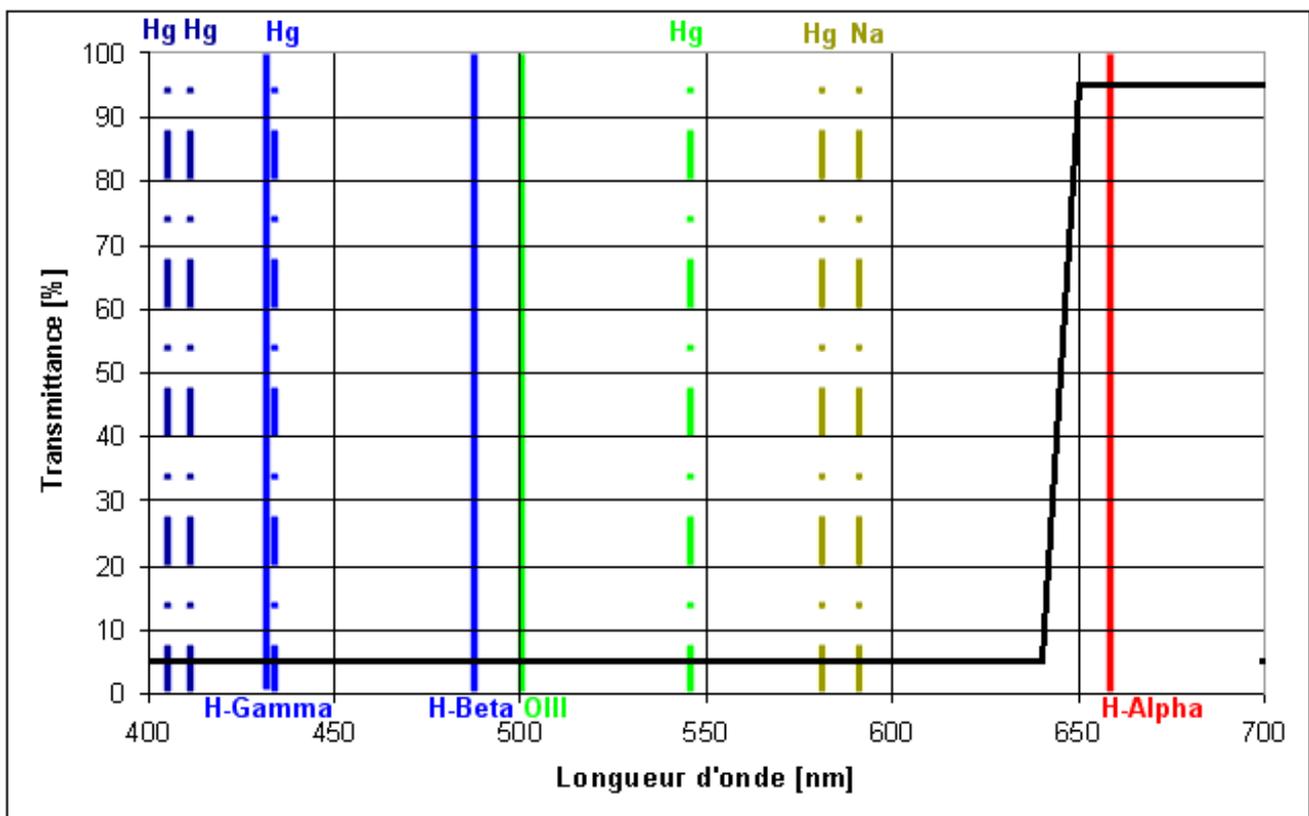
- 1) Pour l'observation ou l'astrophotographie en couleurs, renforcer ou affaiblir certaines couleurs selon l'effet souhaité sur telle ou telle planète, pour y voir des détails précis (couleurs de Mars, Grande Tache Rouge de Jupiter, bandes nuageuses, anneaux de Saturne, etc.).
- 2) Renforcer ou affaiblir les contrastes quand on fait de l'astrophotographie monochromatique (ou en Noir et Blanc).
- 3) Quand on fait de l'astrophotographie dans le ciel profond, ce qui nécessite souvent de très longues pauses à répétition, on peut être amené à faire des séquences de photos dans chacune des trois couleurs (Rouge, Vert et Bleu), souvent associées à des photos sans filtre, et/ou à des filtres interférentiels. Ensuite, on « empile » les photos grâce à un (ou des) logiciel(s) de traitement d'images pour avoir le résultat définitif.

D) Les filtres sélectifs ou interférentiels

Un filtre interférentiel est un filtre obtenu par dépôt sous vide de minces couches de divers matériaux sur une lame de verre. Ces couches produisent des interférences constructives (laissent passer la lumière) dans certaines longueurs d'ondes et des interférences destructives (bloquent la lumière) dans certaines autres longueurs d'ondes. Selon la complexité du filtre, il sera possible de laisser passer ou de couper une ou plusieurs bande(s) spectrale(s). On utilise ces filtres à deux fins : pour observer une ou des longueur(s) d'onde(s) particulière(s) (pour les nébuleuses par exemple) ou pour couper la pollution lumineuse due à l'éclairage urbain. Ces filtres peuvent être employés pour l'observation visuelle ou la photographie.

La lumière, que ce soit celle des nébuleuses ou celle de l'éclairage urbain, se divise en deux parties importantes : il y a le **continu** qui se retrouve à toutes les longueurs d'ondes, c'est-à-dire dans toutes les couleurs. C'est ce qui compose la lumière blanche. Il y a ensuite les **raies spectrales** (ou raies d'émission) qui sont produites à des longueurs d'ondes bien particulières selon l'élément chimique qui en est la source. Par exemple, l'hydrogène émet une raie rouge à 656.3 nm (H-Alpha), une raie bleue à 486.1 nm (H-Beta), etc. L'oxygène ionisé deux fois émet surtout une raie verte à 500.7 nm. Ce sont ces longueurs d'ondes particulières qui forment le **spectre** d'une nébuleuse et ce sont elles qu'on désirera observer. Quant à la pollution lumineuse, elle est surtout produite par le mercure qui émet plusieurs raies (404.7, 435.8, 546.1, 577.0 et 579.1 nm) et le sodium qui produit deux raies intenses dans le jaune à 589.0 et 589.6 nm. Les lampes au mercure et au sodium produisent aussi un continu car le gaz qu'elles contiennent est sous haute pression. Plus la pression est faible, plus le continu diminue.

Dans le graphique ci-dessous, on affiche la transmittance des filtres (de 0 à 100%) en fonction de la longueur d'onde qui s'étend de 400 nm (bleu) à 700 nm (rouge). Ainsi, les courbes noires indiquent quelles sont les longueurs d'ondes que les filtres transmettent (valeur près de 100%) et celles qu'ils coupent (valeur près de 0%). Les raies nébulaires et les raies produites par l'éclairage urbain sont superposées aux graphiques.



Si on désire photographier une nébuleuse en isolant une longueur d'onde donnée, un filtre H-Beta, OIII ou H-Alpha fera l'affaire. On obtiendra cependant des images essentiellement en noir et blanc. Si on désire prendre des photos en couleurs, il faudra alors utiliser un filtre qui couvre la plus grande partie du spectre, sans pour autant laisser passer les raies parasites du mercure et du sodium. Examinons ces filtres plus en détails.

Filtres à nébuleuses

Les filtres de la première catégorie sont conçus de manière à ne laisser passer que quelques longueurs d'ondes spécifiques, i.e. quelques raies spectrales. Celles-ci sont H-Alpha, OIII ou H-Beta. Ces raies sont produites par l'hydrogène et l'oxygène doublement ionisé (O⁺⁺). Ces trois raies spectrales sont présentes dans les nébuleuses. Les filtres à nébuleuses, s'ils sont utilisés sur des objets présentant un spectre continu important comme les étoiles, les amas, les galaxies, etc., vont modifier les couleurs et ne préserveront pas leur équilibre. Il faut donc être conscient de cela lorsqu'on désire faire de la photo. Par exemple, les filtres OIII et H-Beta sont monochromatiques. Cela signifie qu'ils ne laissent passer qu'une seule longueur d'onde. La photo sera donc en noir et blanc! Voici la description de quelques filtres qu'on retrouve sur le marché. Les traits continus représentent des raies d'émission nébulaires tandis que les traits discontinus représentent les raies d'émission produites par les lampes à vapeurs de mercure ou de sodium. N'oubliez pas que la pollution lumineuse contient aussi une partie de continu (dans toutes les longueurs d'ondes).

1) Deep-Sky (ou LPR) et BB

Filtre Deep Sky : Ce filtre améliore le contraste entre l'objet observé et le fond du ciel en assombrissant le fond du ciel. Il permet l'observation de nébuleuses à partir d'endroits pollués par la lumière des villes. Il bloque toute la lumière émise par les lampes au mercure à basse et haute pression, des lampes au sodium et il bloque aussi la lumière des néons. Il transmet le reste du spectre visible. La nébuleuse d'Orion, M42, est renversante vue à travers ce filtre... Peut aussi être utilisé sur la planète Mars pour en faire ressortir les caps polaires. Attention : Bien que ces filtres, appelés aussi LPR (« Light Pollution Reject ») aident à l'observation, il vaut mieux s'éloigner des villes pour en profiter pleinement...

Les filtres BB (« Blue Blocking ») bloquent la lumière bleue et UV. Leur transmission commence à 500 nm. Ils sont notamment destinés à la recherche d'exoplanètes par les amateurs (éclairés !).

2) OIII (lire O 3)

Ce type de filtre isole les bandes de 496 nm et 501 nm du spectre lumineux et bloque toutes les autres longueurs d'onde du spectre visible, permettant ainsi l'observation de nébuleuses planétaires et de nébuleuses diffuses. Ces longueurs d'onde sont celles de l'oxygène triplement ionisé, d'où son nom de O3 ou OIII. Ce filtre nous permet l'observation d'objets tels la nébuleuse du Voile ou *Dentelles du Cygne* (NGC6960, 6992, 6995). On peut aussi, par exemple, faire l'observation des nébuleuses Hélix (NGC 7293) et de la Rosette (NGC 2238).

3) H α

Il existe un filtre coloré réservé à la photographie du ciel profond avec des caméras CCD noir et blanc : le filtre H α (lumière émise par l'hydrogène ionisé). C'est un filtre ne laissant passer que les longueurs d'ondes plus grandes que celle de l'hydrogène ionisé (656 nm), donc un rouge profond et l'infrarouge. La longueur d'onde H α est émise par les nébuleuses et l'œil y est quasiment insensible en vision nocturne. Par contre les émulsions photographiques comme le TP2415 y sont très sensibles. En fait, ce filtre est à peu près l'équivalent du filtre n°92. Certains filtres H α ne laissent pas non plus passer les infrarouges, seulement les H α . Ce filtre permet de révéler des détails extrêmement ténus dans les nébuleuses, habituellement masqués par la pollution lumineuse, qu'elle soit d'origine lunaire ou artificielle. La raie H-alpha à 656.3 nm est celle de l'élément chimique le plus abondant de l'Univers (l'hydrogène). Lorsque l'image H-alpha est combinée avec les images obtenues avec les filtres Rouge (R), Vert (V) et Bleu (B), on obtient une image en couleurs beaucoup plus contrastée et détaillée que celle obtenue avec un capteur couleur classique.

4) H β

Les filtres Hydrogène-Beta sont parfois le seul moyen d'observer certaines nébuleuses extrêmement diffuses, telles que la Tête de Cheval, les nébuleuses California ou du Cocon. Ils bloquent toutes les longueurs d'onde du spectre visible, excepté celle de la raie d'émission Hydrogène-Beta. En limitant la bande passante à 12 nm de large pour la raie Hydrogène-Beta, centrée sur 486,1 nm, il devient possible de mettre en évidence de fins détails dans les nébuleuses et d'assombrir le fond du ciel, augmentant d'autant le contraste. Ces filtres sont recommandés uniquement pour les instruments de moyen et grand diamètres, disposant de bonnes conditions d'observation, car la transmission est extrêmement faible.

5) UHC ou NB

Le filtre UHC ou NB (Narrow Band) pour « bande étroite » est conçu pour isoler les longueurs d'ondes ionisées OIII Oxygène (496nm et 501nm) et la longueur d'onde Hydrogène-Béta (486nm) émises par la plupart des nébuleuses à émissions et nébuleuses planétaires. Ce filtre délivre d'excellents résultats sur des objets comme Orion, la nébuleuse de la Lagune le Cygne et bien d'autres encore. C'est en fait une sorte de combinaison de OIII et H β .

6) Autres filtres

Filtre SII, Centré sur la longueur d'onde du SII, il délivre une augmentation maximale du contraste et ce même sous un ciel fortement pollué. Ce filtre donne tout son potentiel sur des objets tels que les nébuleuses planétaires et nébuleuses. Ce filtre bloque toutes les longueurs d'ondes issues des lumières parasites des éclairages publics, en particuliers le mercure (Hg) et le Sodium (Na). Le rayonnement infrarouge, pour lequel les capteurs CCD sont très sensibles est également coupé. L'utilisation du filtre SII conjointe au filtre OIII et H α permet de créer des images en trichromie identiques aux étonnantes images obtenues avec le télescope spatial Hubble, telles que la très célèbre image des "Piliers de la création." Dans les images la couleur verte montre l'hydrogène ionisé obtenu par l'intermédiaire d'un filtre H α , le rouge montre le sulfure ionisé obtenu à travers un filtre SII et le bleu représente l'oxygène ionisé capturé avec un filtre OIII. Outre le caractère inhabituel de ces images, l'utilisation conjointe des filtres SII, OIII et H α permet d'obtenir des images beaucoup plus détaillées que celles produites par l'imagerie trichrome habituelle.

Filtres anti-IR : Ce filtre coupe les infrarouges et est conçu pour être utilisé avec les caméras CCD. Les capteurs CCD sont extrêmement sensibles à une large gamme de longueurs d'ondes, y compris dans l'infrarouge. Sans filtrage de l'infrarouge les images CCD sont très différentes de celles que l'on a l'habitude de voir. Les IR, transmis par l'ensemble des composantes optiques (lentilles, miroirs, oculaires de projection, Barlow) ont pour effet de produire un phénomène de halo plus ou moins marqué autour des objets. Ce phénomène apparaît même sur de très bonnes optiques apochromatiques.

7) Généralités sur les filtres

La manière la plus simple d'utiliser des filtres en astronomie (**tous les types de filtres sauf les filtres solaires**) est d'acquérir des filtres en verre qui sont sertis dans un porte-filtre en aluminium anodisé qui est fileté sur ses deux faces afin de pouvoir visser d'un côté le filtre au système optique (oculaire, renvoi à 90°, lentille de Barlow, etc.), de l'autre à une autre bague filetée si nécessaire. L'éventail des filtres colorés satisfera l'amateur le plus exigeant. Ces filtres disposent d'un pas de vis adapté aux oculaires de 31,75 mm (il en existe aussi pour les oculaires de 50,8 mm).

Pour ceux qui utilisent beaucoup les filtres couleur, il existe aussi des roues à filtres qui permettent rapidement de changer de filtre sans avoir à dévisser et revisser les filtres lors de chaque changement (voir ci-dessous).



XI L'astrophotographie

L'**astrophotographie**, souvent appelée simplement **astrophoto**, est une discipline de l'astronomie et de la photographie qui consiste à photographier des objets célestes.

Histoire : La première utilisation de l'astrophotographie est créditée à John William Draper le 23 mars 1840 pour un daguerréotype de la Lune. La première photographie stellaire est quant à elle attribuée à Bond et Whipple. Il s'agit également d'un daguerréotype, mais de l'étoile Véga, principale étoile de la constellation de la Lyre. Ce cliché a été réalisé dans la nuit du 16 au 17 juillet 1850 avec la lunette de l'observatoire de l'université Harvard. Le premier objet du ciel profond photographié est la grande nébuleuse d'Orion, prise le 30 septembre 1880 par Henry Draper, le fils de John William Draper avec un instrument de 28 cm de diamètre sur une plaque photographique au collodion humide. À la même époque, en Grande-Bretagne, Andrew Ainslie Common réalise aussi une photographie de la nébuleuse le 28 février 1883 dans son observatoire à Ealing, près de Londres. Celle-ci révélera plus de détails que l'œil humain ne put en percevoir. Ce cliché, résultat d'une pose de 60 minutes, a été fait au foyer d'un télescope de type Newton de 91 cm de diamètre et valut à son propriétaire la médaille d'or de la Royal Astronomical Society en 1884. En France, sous l'élan des frères Paul et Prosper Henry, qui avaient déjà réalisé des clichés du ciel à l'aide d'un instrument de leur fabrication, les 56 membres du congrès international d'astronomie tenu à Paris en avril 1887 décident de créer la Carte du Ciel. Cette entreprise, commencée en 1889, impliquera 18 observatoires situés dans le monde entier. En une soixantaine d'années, le projet couvre quasiment tout le ciel. Il prend fin officiellement en 1970. En 1909, le célèbre télescope de 60 pouces (1,52 m) du mont Wilson est mis en service. Équipé de plaques photographiques révolutionnaires, ces dernières enregistreront des astres 100 fois plus faibles qu'auparavant, mais au prix d'une dizaine d'heures de pose réparties sur plusieurs nuits. En 1918, un autre télescope de 100 pouces (2,54 m) est installé à côté et ces deux instruments, alors les plus puissants du monde, serviront à prouver que les nébuleuses spirales, comme on les nommait à l'époque, sont en fait d'autres galaxies et n'appartiennent pas à notre Voie lactée. C'est le célèbre astronome Edwin Hubble en 1924, qui à l'aide de ces mêmes télescopes prouvera ce fait en découvrant des céphéides dans les nébuleuses M31 (la Galaxie d'Andromède), M33 (la Galaxie du Triangle) et NGC 6822 (la Galaxie de Barnard). En 1949, au Mont Palomar, l'installation de deux télescopes géants pour l'époque révolutionnera une fois de plus la photographie stellaire en offrant des clichés astronomiques d'une précision si grande qu'ils sont encore utilisés de nos jours. Il s'agit du télescope Hale de 5 mètres de diamètre et d'un télescope de Schmidt de 1,22 m de diamètre célèbre pour avoir réalisé le « Sky Atlas » de 1950 à 1958.

Ces clichés étaient réalisés avec les toutes récentes plaques photographiques Kodak 103a, utilisées jusque dans les années 1980. Ces clichés montraient des étoiles 10 fois plus faibles que celles des clichés réalisés au mont Wilson mais avec seulement 30 min de pose.

Malgré tout, depuis les années 1970 et l'invention du capteur CCD par les laboratoires Bell Telephone en 1969, les plaques photographiques disparurent peu à peu des observatoires professionnels pour plusieurs raisons :

- Absence de réciprocité aux faibles éclaircissements ;
- Sensibilité accrue ;
- Linéarité photométrique ;
- Facilité de stockage de l'information.

Même si dans les mêmes années, des progrès avaient été faits dans le domaine des émulsions photographiques (hypersensibilisation) et dans les procédés d'amplification de la lumière, les années 1980 ont vu la mort de la photographie dans les observatoires professionnels. Désormais, les capteurs CCD sont partout et le plus gros capteur CCD (en fait une mosaïque de 12 capteurs CCD élémentaires) est celui équipant le télescope CFHT (Canada France Hawaï Telescope) avec 100 millions de pixels. Dans la course ultime à l'image la plus parfaite, la plus précise et la plus lointaine, il a été décidé de construire un télescope qui serait complètement affranchi des turbulences atmosphériques et des caprices de la météo. Dans cette optique, le Télescope spatial Hubble a été lancé en avril 1990 afin d'étudier les confins de l'univers et d'apporter des réponses aux astronomes sur les galaxies et les quasars lointains. Muni d'un miroir de 2,40 m de diamètre et opérant hors de l'atmosphère, il est capable d'enregistrer des astres aussi faibles que la magnitude 30 soit 100 fois plus faibles que le 5 m du Mont Palomar en 1949.

On peut distinguer plusieurs catégories d'astrophotographie :

- l'astrophotographie *lunaire*, qui concerne la Lune;
- l'astrophotographie *planétaire*, qui concerne les 7 autres planètes du système solaire et leurs satellites;
- l'astrophotographie *de ciel profond*, qui, par opposition aux précédentes, s'intéresse aux objets célestes de faible magnitude, comme les galaxies, les nébuleuses, etc.;
- l'astrophotographie à *grand champ*, qui vise à la recherche d'astres errants tels que les comètes ou les astéroïdes ou qui vise la photographie de constellations en entier;
- la *photographie solaire*, qui étudie les changements d'apparence de la photosphère et de la chromosphère du Soleil, en particulier l'évolution des taches solaires.



Ciel profond (Nébuluse de l'Amérique du Nord)



Photographie d'une éclipse solaire

Les trois premières catégories sont généralement en ordre croissant de difficulté de réalisation. Ainsi, photographier la Lune peut se faire avec l'appareil photo seul. La principale difficulté de cette catégorie d'astrophoto est d'éviter la surexposition. Après la Lune, les planètes sont les objets les plus faciles à repérer et observer. Cependant, en saisir les détails invisibles à l'œil nu est un peu plus difficile. Une mauvaise maîtrise de l'astrophoto planétaire entraîne un disque blanc de la planète en question.

Matériel et techniques

Le matériel et les techniques utilisés peuvent varier selon la catégorie d'astrophotos réalisées.

L'astrophotographe peut ainsi faire des astrophotographies :

- Sur trépied
- Sur monture avec suivi manuel ou motorisé
 - au foyer
 - en afocale
 - avec une planchette équatoriale, dont la construction est accessible à tout bricoleur

Selon le matériel utilisé, les techniques vont différer légèrement. Cependant, les grandes lignes demeurent les mêmes pour tout type d'astrophotos :

- Préparation du matériel (Mise en station),
- Sélection de l'objet à photographier,
- Sélection de la technique et du capteur (webcam, appareil photographique numérique, CCD...)
- Sélection de la focale (grand champ, zoom, télescope, lentille de Barlow...)
 - Sélection du temps des poses (durée en secondes : 30 s, 60 s...)
 - Sélection des filtres
- La prise de vues
 - Le sujet,
 - Les darks : ce sont les photos prises avec le même temps de pose que les photos du sujet mais avec le cache sur l'objectif. Cela permet de révéler le signal thermique et une partie du bruit numérique.
 - Les flats : en français « plage lumineuse uniforme » (P.L.U.) : ces photos sont réalisées en mode « Priorité Ouverture » sur une surface uniformément éclairée, sans modifier notamment la mise au point. Cela permet de révéler le vignettage et les éventuelles taches dans le train optique.
 - Les *offset* : ce sont les photos prises avec le temps de pose le plus rapide disponible sur l'appareil photo numérique. Cela permet de révéler le signal de lecture du capteur.
- Le traitement
 - Prétraitement (organisation, sélection)
 - Traitement (alignement, addition...)
 - Post-traitement (amélioration)

XII Iconographie

Radioastronomie : le VLA



Les galaxies "Taffy" : Cette image composite montre le résultat d'une collision entre deux galaxies, UGC 813 (à droite) et UGC 816 (à gauche). Les émissions optiques des étoiles apparaissent en couleurs naturelles, émissions radio de 21 cm de longueur d'onde de l'hydrogène atomique interstellaire (HI), le gaz est vu en bleu, et l'émission radio continue à 1.4 GHz en rouge. UGC 813 et UGC 816 étaient des galaxies lenticulaires normales avant leur collision de face à une vitesse de 1,6 millions de km/h il y a environ 50 millions d'années. Les disques des étoiles et les nuages denses de gaz moléculaire sont passés les uns à travers les autres sans grand dommage et maintenant se séparent. Les nuages diffus d'hydrogène HI ne peuvent pas s'interpénétrer et ont été arrêtés entre les galaxies ou rejetés au loin en longues queues générées par les forces de marée. Les disques de champs magnétiques sont fixés par de denses nuages moléculaires et sont étirés comme des fils de caramel (taffy en anglais) entre les galaxies alors qu'elles se séparent. Le « pont » de champs magnétiques et les électrons arrachés des disques par la collision produit cette émission de « fond radio » représentée en rouge. Le naufrage de ce crash-test cosmique contient des preuves quant à la collision elle-même et la nature des galaxies normales, en fonction de leur comportement après une telle collision.

Chercheurs : J. J. Condon (NRAO), G. Helou (IPAC) and T. H. Jarrett (IPAC).

Composition d'image : J. M. Uson

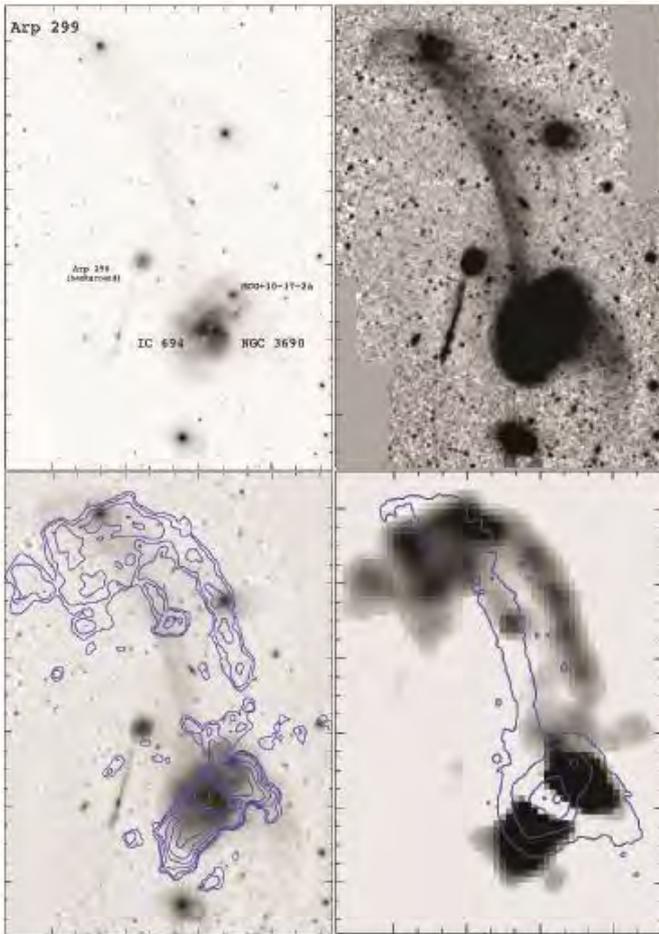
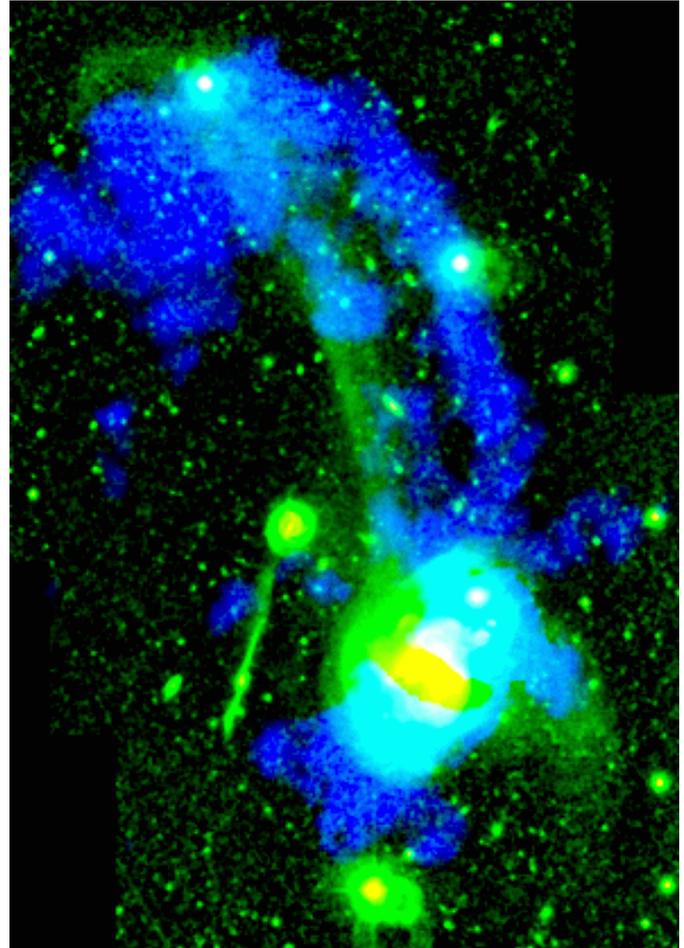


Figure 1. **The IR luminous merger Arp 299.**
HI: VLA C+D-array. Lower left: 21" resolution, contours= $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2} \times 2''$. Lower right: 35" resolution. **Optical:** UH 88" B-band, FOV= $9' \times 12'$.
Notes: There is a small HI detected companion 10' to the west of Arp 299.
Reference: Hibbard, J. E., & Yun, M. S. 1999, AJ, 118, 162.



*Une image composite (à droite) de la lumière optique (verte et jaune) et du gaz d'hydrogène froid (bleu) dans la galaxie particulière **Arp 299**, appelée aussi NGC 3690/IC 694. Arp 299 est le résultat de deux galaxies spirales qui sont dans un processus de collision et de fusion en un seul objet. Les observations d'hydrogène atomique (en bleu dans l'image), prises avec le Very Large Array, révèlent une gigantesque queue de HI (Iodure d'hydrogène) s'étendant sur 55 000 années-lumière depuis le corps principal des galaxies en train de fusionner (à gauche, une vue alternative des mêmes données). Curieusement, la queue gazeuse est décalée de la queue optique (en vert), un phénomène inattendu et pour l'instant inexplicable*

Table des matières

I	Généralités sur l'optique	1
II	L'œil	2
III	La lunette astronomique	8
IV	Les jumelles	14
V	Les télescopes	17
A)	Généralités	17
B)	Télescope de Newton	22
C)	Les Dobsons	24
D)	Télescope de Herschel	27
E)	Télescope de Gregory	27
F)	Télescope de Cassegrain	28
G)	Télescope de Schwarzschild	30
H)	Télescope Ritchey-Chrétien	30
I)	Télescope Dall-Kirkham	31
J)	Télescope de Schmidt, ou « chambre » de Schmidt	32
K)	Télescope Schmidt-Cassegrain	33
L)	Télescope Maksutov-Cassegrain	34
M)	Télescopes anastigmatiques à trois miroirs (Paul – Paul-Baker – Korsch)	34
N)	Les plus grands télescopes terrestres	37
VI	Les radio-télescopes	39
VII	Les télescopes dans l'espace	42
A)	Dans le visible	42
B)	Ondes radio	43
C)	Ondes submillimétriques et Infra-Rouge	44
D)	Ultra-Violet	46
E)	Rayons X	46
F)	Rayons Gamma	47
G)	Multi-longueurs d'ondes	49
VIII	Les montures d'instruments astronomiques	50
A)	Les montures équatoriales	50
B)	Les montures azimutales (ou altazimutales)	55
C)	Les montures motorisées	56
IX	Les oculaires – Les grossissements	57
X	La lumière, les filtres correcteurs	60
A)	La lumière, spectre visible et au-delà	60
B)	Les filtres atténuateurs : filtres lunaires, solaires, polarisants	61
C)	Les filtres de couleur	61
D)	Les filtres sélectifs ou interférentiels	63
1.	Deep-Sky ou LPR ou BB	64
2.	OIII (lire O 3)	64
3.	H α	64
4.	H β	64
5.	UHC ou NB	65
6.	Autres filtres	65
7.	Généralités sur les filtres	65
XI	L'astrophotographie	66
XII	Iconographie	69
Annexe 1 : Objets astronomiques observables à l'œil nu depuis la Terre		A/B