

# universcience

## Comment fonctionnent les lunettes astronomiques et les télescopes ?

À partir de 15 ans



Département Éducation et Formation (JK)  
[educ-formation@universcience.fr](mailto:educ-formation@universcience.fr)

Avril 2020

# Comment fonctionnent les lunettes astronomiques et les télescopes ?

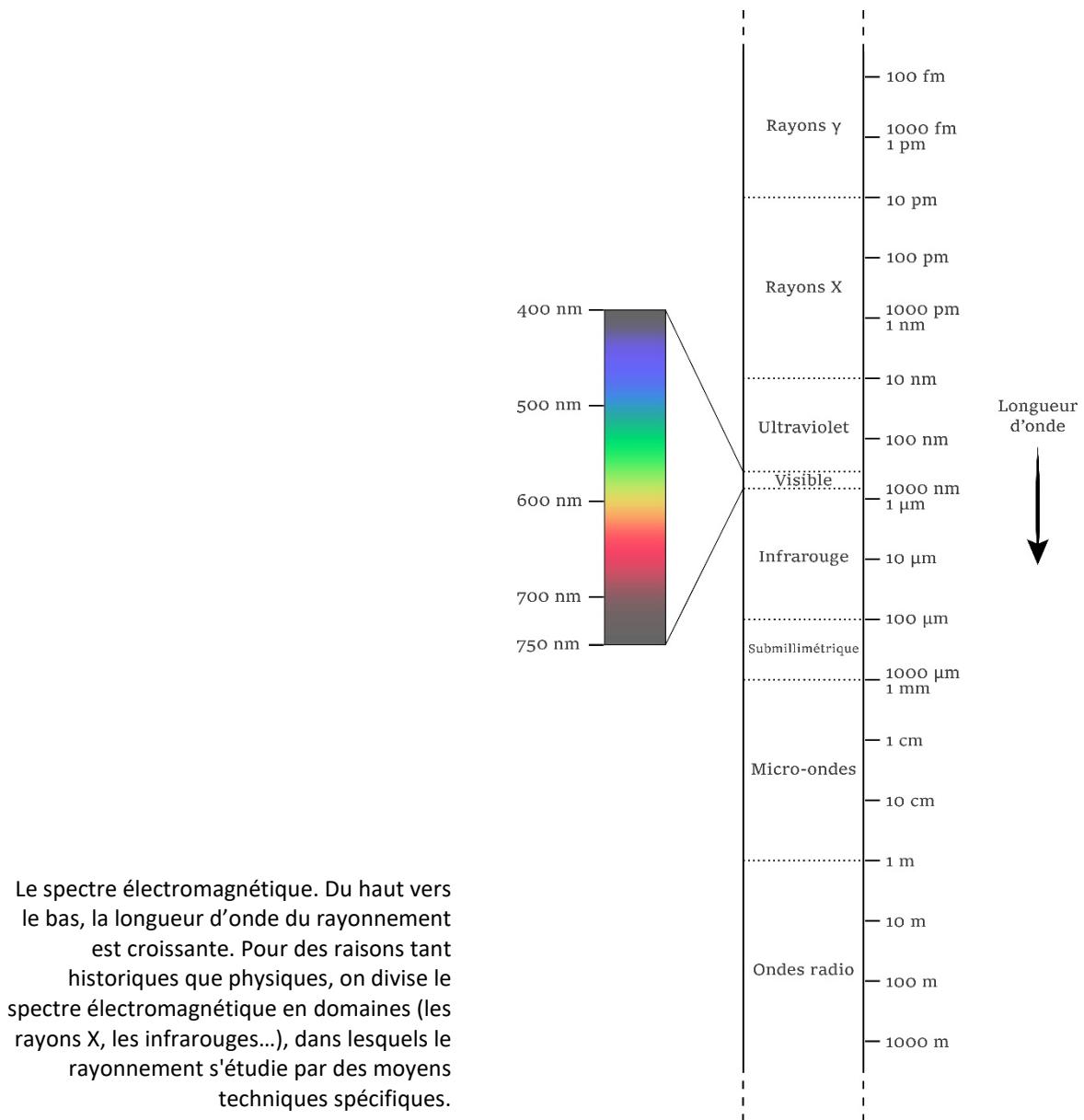
La lumière, les lumières	3
Comment fonctionne notre œil ?	4
L'œil, un instrument remarquable mais limité en astronomie	5
La lunette	6
La lunette de Galilée	6
La lunette de Kepler ou <i>lunette astronomique</i>	6
Faiblesses potentielles des lunettes	7
Les jumelles	9
Le télescope	10
Le télescope de type Newton	12
Le télescope de type Cassegrain	12
Faiblesses potentielles des télescopes	13
Intérêt des instruments d'optique présentés	14
Les oculaires	16
Les montures	17
Les accessoires	18
Que s'attendre à voir et avec quel instrument	19
Au-delà du visible	20
Les télescopes spatiaux	27
Annexe 1     Construction optique et calcul du grossissement de la lunette de Galilée	28
Annexe 2     Construction optique et calcul du grossissement de la lunette astronomique	33
Annexe 3     L'échelle des magnitudes	38
Annexe 4     Quelques exemples de diamètres apparents	41

Sauf indication contraire, les schémas et les illustrations ont été réalisés par Johan Kieken (Universcience). Photographie de couverture : le télescope spatial *Hubble* photographié depuis la navette spatiale *Atlantis* en 2009 (mission STS-125). Il s'agissait de la cinquième et dernière mission d'entretien du télescope.

## La lumière, les lumières

La lumière peut être décrite comme une onde électromagnétique, c'est-à-dire comme la propagation d'une oscillation couplée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Comme toutes les ondes, les rayonnements électromagnétiques sont caractérisés par leur longueur d'onde. Il est très pratique de les classer par longueur d'onde. On obtient alors un spectre électromagnétique.

**L'œil n'est sensible qu'à une infime partie du spectre électromagnétique**, le spectre visible, qui s'étend d'environ 400 nm (violet extrêmement sombre) à 750 nm (rouge à peine perceptible).



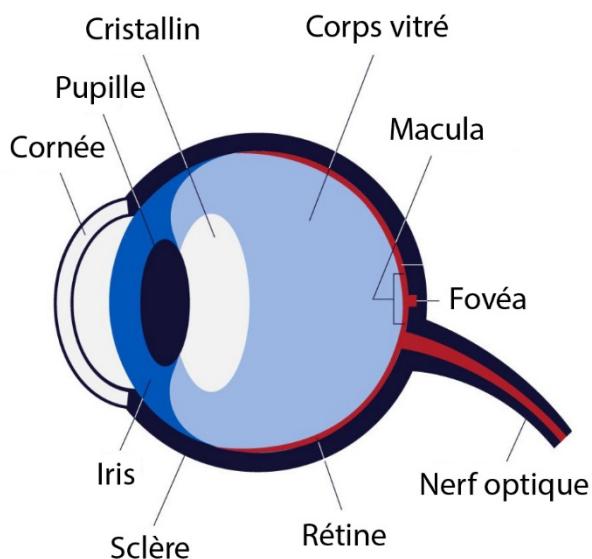
## Comment fonctionne notre œil ?

Tout d'abord, la lumière passe à travers la cornée, une membrane transparente en forme de dôme. C'est le premier élément réfractif de l'œil.

La lumière pénètre dans l'œil par une ouverture appelée pupille. L'iris – la partie colorée de l'œil – contrôle la quantité de lumière que la pupille laisse entrer et agit comme un diaphragme. Ensuite, la lumière passe à travers le cristallin. Comme la cornée, le cristallin est une lentille convergente naturelle. Ces deux organes travaillent de concert pour concentrer les rayons lumineux sur la rétine, qui joue le rôle d'écran au fond de l'œil.

Le cristallin peut modifier sa courbure sous l'action des muscles ciliaires. Une image nette peut donc se former sur la rétine même si l'objet est proche de l'œil : on parle d'accommodation.

Lorsque la lumière frappe la rétine, des cellules spéciales appelées photorécepteurs la transforment en signaux électriques. Ceux-ci sont transmis au cerveau par le nerf optique. Finalement, le cerveau transforme les signaux en images : vous voyez !



Anatomie simplifiée de l'œil.

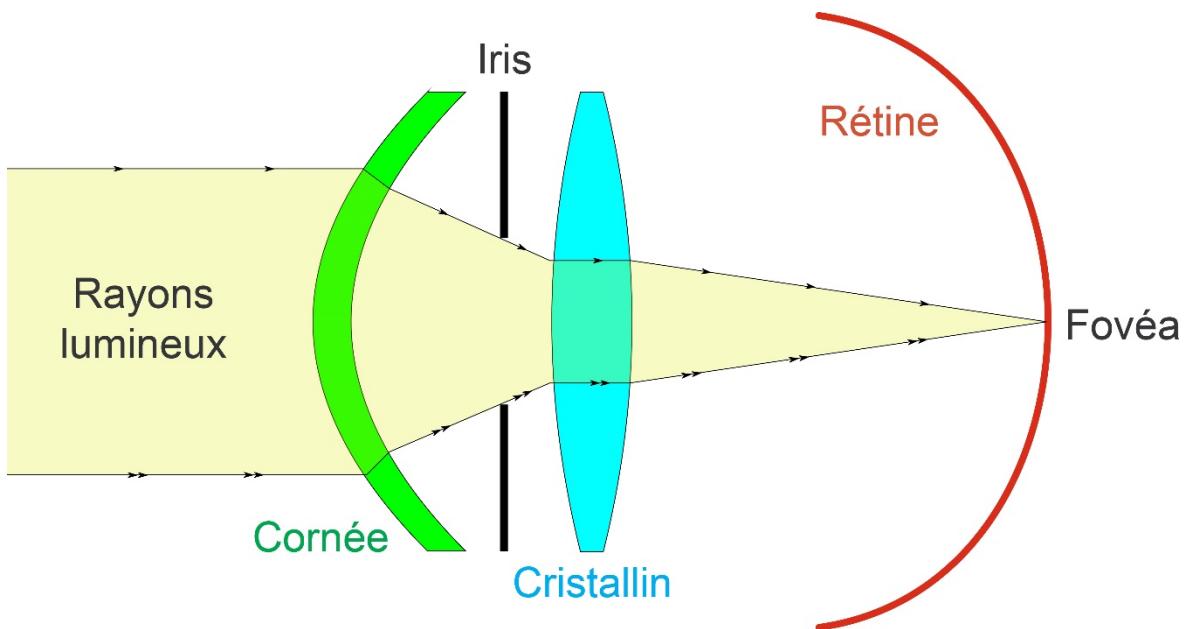
La sclère est la membrane blanche et opaque qui forme le « blanc » de l'œil. Le corps vitré est une substance transparente, gélantineuse qui remplit la cavité oculaire derrière le cristallin. La macula est la zone de la rétine où la concentration en cônes (des photorécepteurs permettant de distinguer les couleurs) est maximale. La fovéa, située dans le prolongement de l'axe optique de l'œil, est la zone centrale de la macula, celle où la vision des détails est la plus précise en éclairage diurne. Elle n'est peuplée que de cônes.

Les bâtonnets (des photorécepteurs permettant la vision nocturne) sont répartis sur la rétine périphérique.

Crédit : National Eye Institute, un des instituts américains de santé.

D'un point de vue optique, on peut modéliser l'œil comme un système composé :

- d'un diaphragme (l'iris) ;
- de deux lentilles convergentes (cornée + cristallin) caractérisées par leur distance focale, équivalentes à une seule lentille convergente ;
- d'un écran (la rétine)



Modèle optique de l'œil. Crédit : [Yann Gavet](#).

## L'œil, un instrument performant mais limité en astronomie

La sensibilité de l'œil est limitée, entre autres, par le diamètre de notre pupille (4 à 7 mm suivant l'âge). Loin de la pollution lumineuse des villes, sous un ciel bien sombre, on peut distinguer 3 000 étoiles environ, blanches dans leur immense majorité car la sensation de couleurs n'est manifeste que pour les plus brillantes – de plus, certaines sont réellement blanches. Si nos yeux étaient plus sensibles, nous pourrions en distinguer bien plus.

La résolution angulaire de l'œil vaut une minute d'arc ( $1'$ ), soit un soixantième de degré. Cela reste toutefois trop faible pour voir les astres autrement que sous la forme de points, mis à part la Lune et le Soleil.

Les instruments d'optique – jumelles, lunette, télescope – permettent de s'affranchir de ces limites physiologiques. Ce sont de véritables « entonnoirs » à photons. La quantité de lumière qu'ils captent est proportionnelle à la surface de leur objectif. Plus son diamètre est important, plus on recueillera de lumière et plus on verra des objets faibles. Leur pouvoir séparateur s'évalue en seconde d'arc ( $"$ ).

## La lunette

Une lunette est un instrument d'optique qui trouve certainement son origine dans les Pays-Bas du début du XVII<sup>e</sup> siècle. Galilée (1564 – 1642) la perfectionne et l'utilise pour observer le ciel de manière systématique à partir du mois d'août 1609.

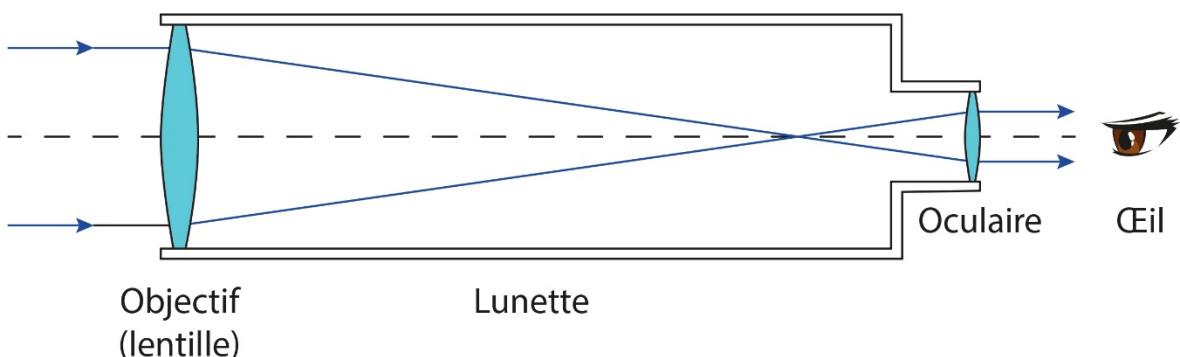
**Une lunette possède une lentille comme objectif et utilise la réfraction de la lumière** pour fonctionner. Le dispositif permettant d'agrandir l'image produite par l'objectif est une lentille, l'**oculaire**. Objectif et oculaire sont disposés de part et d'autre d'un tube fermé.

### La lunette de Galilée

Galilée se sert d'une lentille divergente en guise d'oculaire. La lunette ainsi construite donne directement une image droite (non inversée) mais virtuelle : impossible, par exemple, de placer dans cet instrument un réticule qui aurait permis de l'utiliser comme un viseur. De plus, la marche divergente des rayons lumineux en sortie implique un faible grossissement et un petit champ visuel. L'annexe 1 vous donne la construction optique et le calcul du grossissement de la lunette de Galilée.

### La lunette de Kepler ou *lunette astronomique*

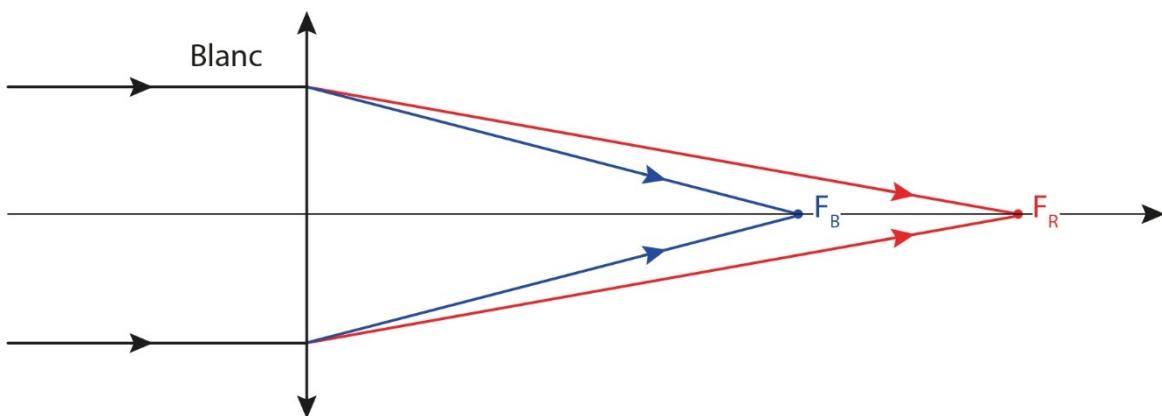
Il revient à Johannes Kepler (1571 – 1630) en 1611 d'expliquer dans sa *Dioptrique* le fonctionnement de la lunette de... Galilée. Kepler propose en outre une amélioration : remplacer la lentille divergente de l'oculaire de la lunette par une lentille convergente. Certes, l'image ainsi formée est inversée – ce qui n'est finalement pas gênant lorsqu'on observe le ciel – mais elle est réelle et l'on gagne nettement en confort visuel : en sortie, les rayons lumineux correspondant aux différents points de l'image convergent sur la pupille de l'observateur. Ni le grossissement ni le champ visuel ne sont limités par le principe même de l'instrument. L'annexe 2 vous donne la construction optique et le calcul du grossissement de la lunette astronomique. Vous comprendrez pourquoi ce grossissement se calcule en divisant la distance focale de l'objectif par celle de l'oculaire.



## Faiblesses potentielles des lunettes

Déjà, les lunettes de grand diamètre sont difficiles à construire car il est presque impossible de fabriquer une lentille de plus de 1 m sans défaut (présence de bulles, etc.) En outre, comme celle-ci est tenue en bout de tube, les contraintes mécaniques sur la lunette sont importantes.

De plus, le verre des lentilles est un matériau dispersif : la valeur de l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde de la radiation incidente considérée. La lentille sépare donc les différentes radiations monochromatiques qui étaient « mélangées » dans la lumière polychromatique incidente. Les images présentent alors le défaut d'être irisées. On appelle ce phénomène *aberration chromatique*. Les rayons bleus convergent plus que les rayons verts, les rayons verts convergent plus que les jaunes qui, eux-mêmes, convergent plus que les rouges. On obtient ainsi une zone focale le long de l'axe optique et la mise au point ne peut être effectuée simultanément pour toutes les couleurs.



Comment réduire l'aberration chromatique ? On peut :

- utiliser un verre de haute qualité faiblement dispersif ou un cristal de fluorure de calcium ( $\text{CaF}_2$ ) appelé *fluorine* ;
- ajouter en entrée un filtre ne laissant passer qu'une bande spectrale étroite ;
- utiliser un doublet achromatique, un doublet de lentilles accolées dont les formes sont étudiées pour que l'aberration chromatique propre à une lentille soit contrebalancée par l'autre. L'emploi de trois lentilles, apportant une correction encore meilleure, mène au triplet apochromatique ;
- comme Newton, traiter le problème à la base, se passer de lentilles et construire le premier télescope !



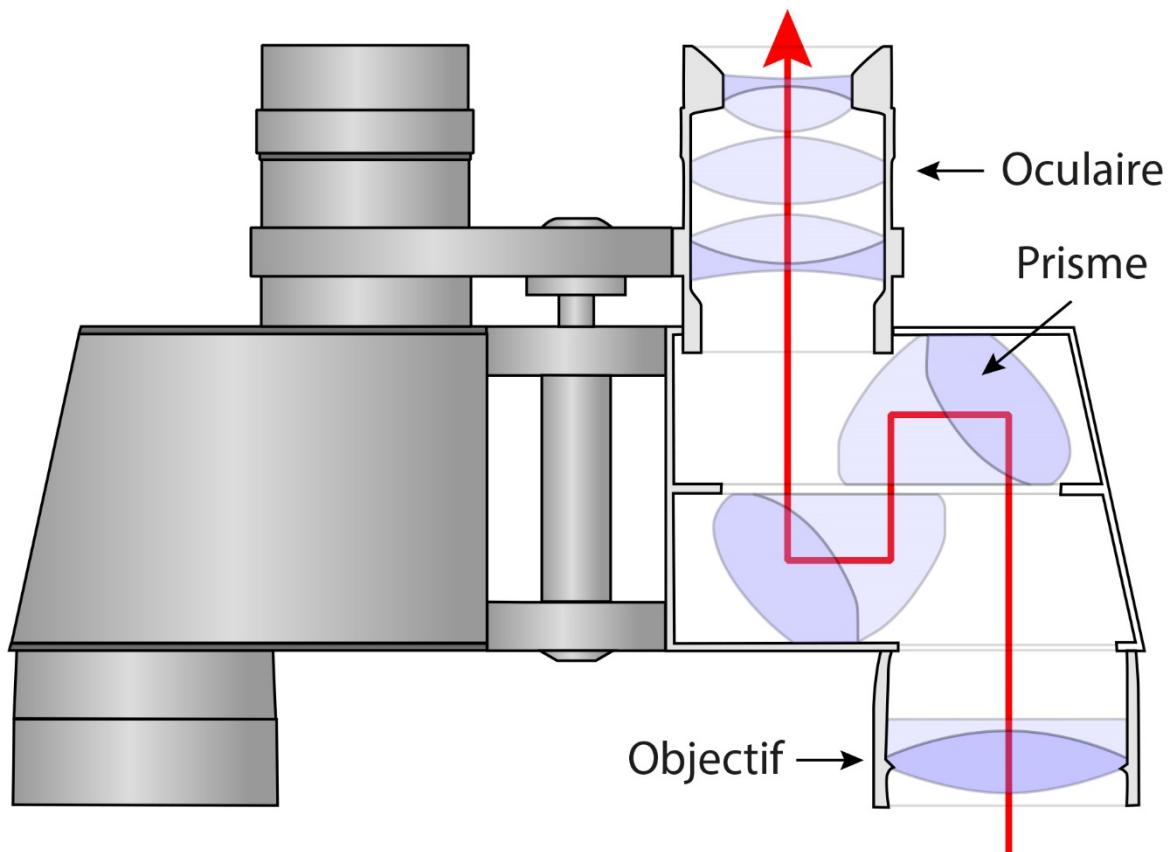
Une lunette d'initiation valant une centaine d'euros.  
Le diamètre de son objectif est de 70 mm et sa focale de 700 mm.



Une lunette apochromatique haut de gamme d'une valeur de 7000 €. Le diamètre de son objectif est de 150 mm et sa focale de 1050 mm. La monture équatoriale, très stable, est motorisée et bénéficie d'un système de pointage automatique.

## Les jumelles

Les jumelles ne sont rien d'autre qu'un ensemble de deux lunettes symétriques montées en parallèle. Grâce à un dispositif composé de prismes, on redresse les images inversées fournies par les lunettes tout en limitant l'encombrement de l'instrument.



Crédit : d'après [Antiliver](#).

Sur les jumelles, on trouve toujours deux nombres  $a$  et  $b$  écrits sous la forme  $a \times b$ , comme, par exemple,  $7 \times 50$  ou  $10 \times 60$ . Le premier nombre donne le grossissement et le second, le diamètre de l'objectif exprimé en millimètres. Des jumelles  $10 \times 50$  grossissent ainsi dix fois et sont pourvues d'objectifs de cinquante millimètres de diamètre.

Les jumelles  $7 \times 50$  et  $10 \times 50$  sont idéales pour l'observation du ciel. Elles combinent une bonne luminosité et un poids ainsi qu'un encombrement encore supportables.

## Le télescope

Convaincu par ses expériences que les lentilles seront toujours, par nature, affligées d'aberrations chromatiques et sachant que la réflexion sur un miroir ne présente pas ce défaut, Isaac Newton (1643 – 1727) s'engage dans la construction d'un nouvel instrument d'optique, le télescope.

Le télescope de Newton est opérationnel dès 1668 et sa présentation à la *Royal Society* en 1671 déclenche des réactions enthousiastes.

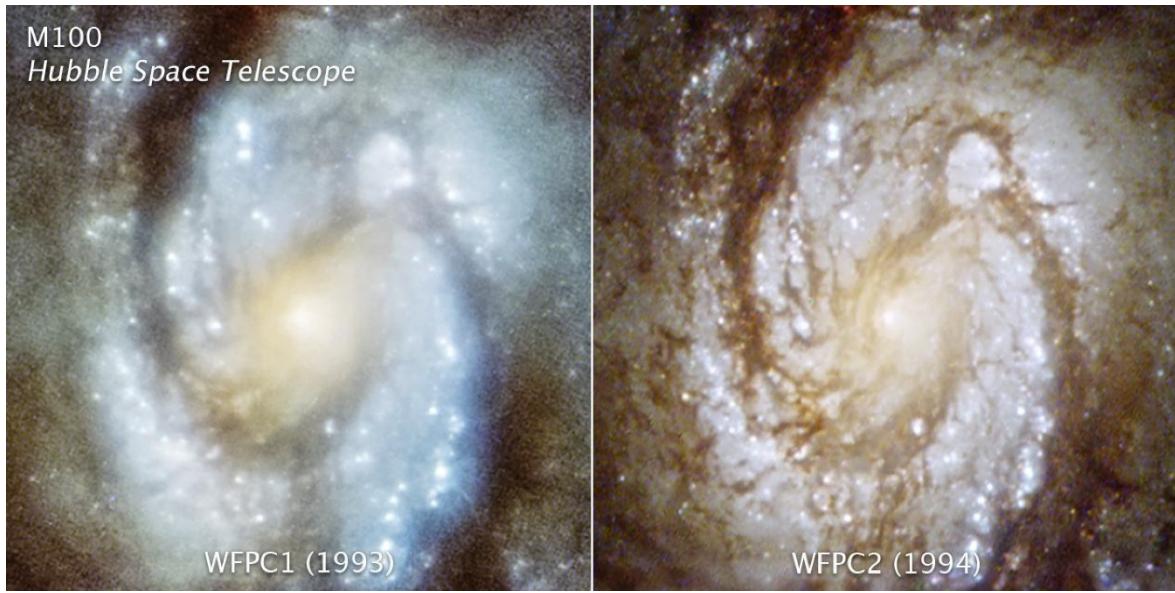
**Un télescope possède un miroir comme objectif et utilise la réflexion de la lumière pour fonctionner.** Comme pour la lunette, le dispositif permettant d'agrandir l'image produite par l'objectif est une lentille, l'**oculaire**. Le grossissement d'un télescope se calcule également en divisant la distance focale de l'objectif par celle de l'oculaire.

Newton a donné à son miroir une forme sphérique, plus facile à usiner que la forme parabolique largement adoptée aujourd'hui. Certes, les télescopes sont dénués d'aberration chromatique. Ils peuvent être toutefois le sujet d'aberrations géométriques qu'ils partagent avec les lunettes, liées au fait que les lentilles et les miroirs utilisés en optique ne vérifient pas exactement les conditions de stigmatisme rigoureux :

- l'aberration de sphéricité, due au fait que les rayons provenant du bord et du centre de l'optique ne se focalisent pas au même point ;
- l'aberration de coma. Elle déforme et allonge les étoiles en bordure de champ, les faisant ressembler à des petites comètes d'où le nom de cette aberration ;
- l'aberration d'astigmatisme. Si l'objectif ne présente pas une symétrie de révolution parfaite, sa distance focale varie autour de l'axe optique. On n'obtient pas la même netteté dans le plan de mise au point selon la direction ;
- l'aberration de courbure de champ. Elle provient du fait que l'image d'un objet plan de grande dimension se forme sur une surface paraboloïdale et non sur un plan ;
- l'aberration de distorsion, qui provoque une déformation globale de l'image.

Il est possible de réduire ces aberrations en choisissant une courbure particulière de la surface de la lentille ou du miroir, en utilisant un diaphragme, plusieurs lentilles dont les défauts se compensent, par un traitement numérique de l'image, etc.

Le miroir primaire du télescope spatial *Hubble*, lancé en 1990, souffrait d'une aberration de sphéricité. On s'est rapidement rendu compte qu'il était trop plat à sa périphérie, de... 2,2 millièmes de millimètres (un cinquantième de l'épaisseur d'un cheveu !) : les rayons réfléchis par le centre et la périphérie du miroir ne convergeaient pas au même point, ce qui rendait les images floues. Heureusement, le défaut de courbure s'avérait homogène et, dans le cadre d'une mission de maintenance assurée par la navette spatiale *Endeavour* en 1993, on le corrigea via un dispositif optique baptisé COSTAR (pour *Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement*) présentant la même anomalie mais inversée.



Le cœur de la galaxie spirale M100 observée par le télescope spatial *Hubble* avant correction de son optique (à gauche) et après l'installation du système correcteur COSTAR (à droite).

Crédit : NASA / ESA / STScI / Judy Schmidt.

Les miroirs monolithiques des plus grands télescopes terrestres font 8,4 m. Au-delà, on utilise des miroirs segmentés. Ainsi, le miroir du futur ELT (*Extremely Large Telescope*) européen de 39,3 m de diamètre sera composé de 798 éléments hexagonaux de 1,45 m de « diamètre ». Il sera soutenu par 30 000 supports qui corrigent en temps réel les efforts dus aux mouvements de flexion et de déformation générés par le vent et la rotation du miroir. Situé au nord du Chili, sur le Cerro Armazones (3060 mètres d'altitude), il devrait voir sa première lumière en 2025.

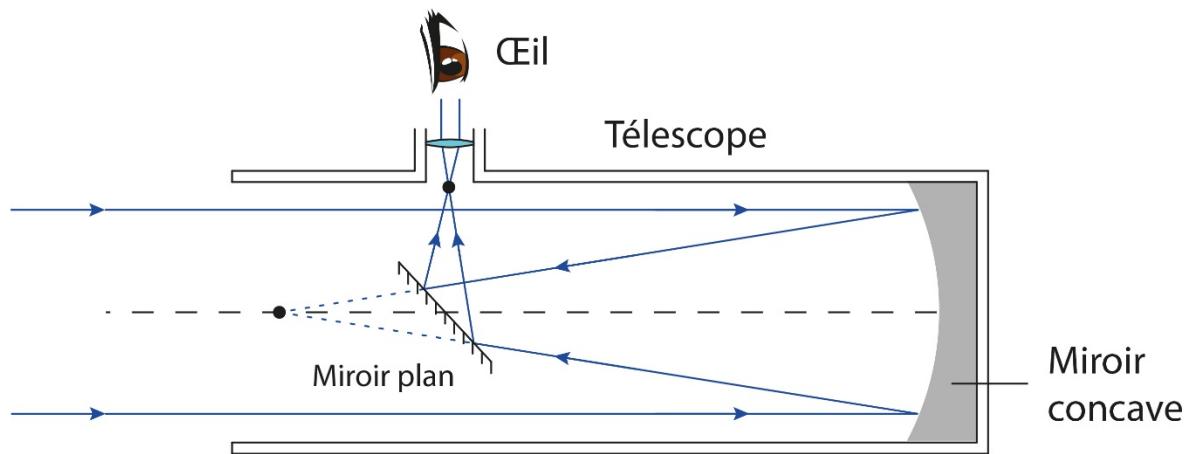


Les télescopes européens ELT et VLT comparés à l'Arc de Triomphe. Le VLT (pour *Very Large Telescope*) est un ensemble de quatre télescopes de 8,20 m de diamètre chacun, situé dans le désert d'Atacama au Chili.

Crédit : Observatoire européen austral.

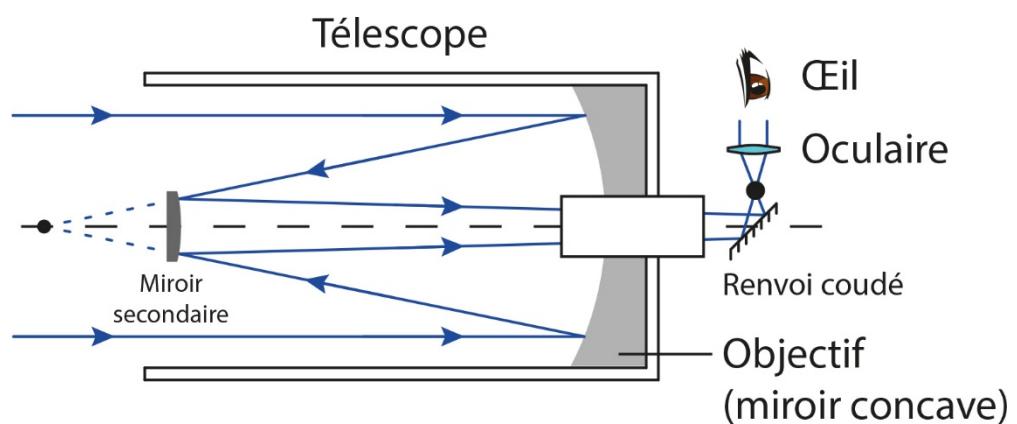
## Le télescope « Newton »

Le miroir primaire collecte la lumière et la réfléchit vers un miroir secondaire plan et incliné de 45°. Sa fonction est de dévier la lumière hors de l'axe optique pour éviter, bien évidemment, que la tête de l'observateur n'occulte les rayons lumineux. La lumière est ensuite récupérée par un oculaire et donc par l'œil. Les avantages du télescope par rapport à la lunette n'apparaîtront vraiment qu'au XIX<sup>e</sup> siècle, lorsque la course au diamètre sera lancée : absence d'aberration chromatique, facilité de construction et de polissage des miroirs par rapport au même travail sur les lentilles, perte de luminosité minime lors des réflexions sur les miroirs par rapport aux pertes subies lors de la traversée de la lentille.



## Le télescope « Cassegrain »

Dans ce type de télescope, le miroir primaire est toujours concave et parabolique mais le miroir secondaire n'est plus plan : on lui donne une forme convexe et hyperbolique. Le miroir primaire est percé en son centre et les axes optiques coïncident. Le miroir secondaire renvoie la lumière à travers le trou du miroir primaire vers l'oculaire. La présence d'un renvoi coudé sur notre schéma rend l'observation plus confortable.



Il existe de nombreux autres types de télescopes, dont voici trois représentants :

- le « Schmidt-Cassegrain ». Il diffère du télescope « Cassegrain » par son miroir primaire sphérique et non plus parabolique et dispose en entrée d'une lentille appelée *lame de Schmidt* pour corriger l'aberration de sphéricité engendrée par le miroir primaire ;
- le « Maksutov-Cassegrain », composé d'un miroir sphérique et d'un ménisque (une lentille dont les deux rayons de courbure sont de même signe) divergent ;
- le « Ritchey-Chrétien », dont les miroirs primaire et secondaire sont hyperboliques, lui permettant ainsi de s'affranchir des aberrations de sphéricité et de coma. Le télescope spatial *Hubble* est du type Ritchey-Chrétien.

Les premiers miroirs étaient en bronze, un alliage de cuivre et d'étain. Aujourd'hui, on dépose sur un miroir en verre, sous vide, une couche d'aluminium de quelques millièmes de millimètres par condensation de vapeurs d'aluminium. Cette aluminisation doit être répétée après quelques années à cause de l'altération du pouvoir réfléchissant par l'oxydation de la couche réfléchissante.

### Faiblesses potentielles des télescopes

Avec leur tube ouvert, les télescopes sont plus sensibles aux turbulences atmosphériques que les lunettes. La présence du miroir secondaire sur le trajet des rayons lumineux introduit une diminution de la quantité de lumière reçue par le miroir primaire et une diminution du contraste de l'image.



Un télescope d'initiation de type Newton. Avec 114 mm d'ouverture et 900 mm de focale, il est sans doute le télescope le plus connu des amateurs.



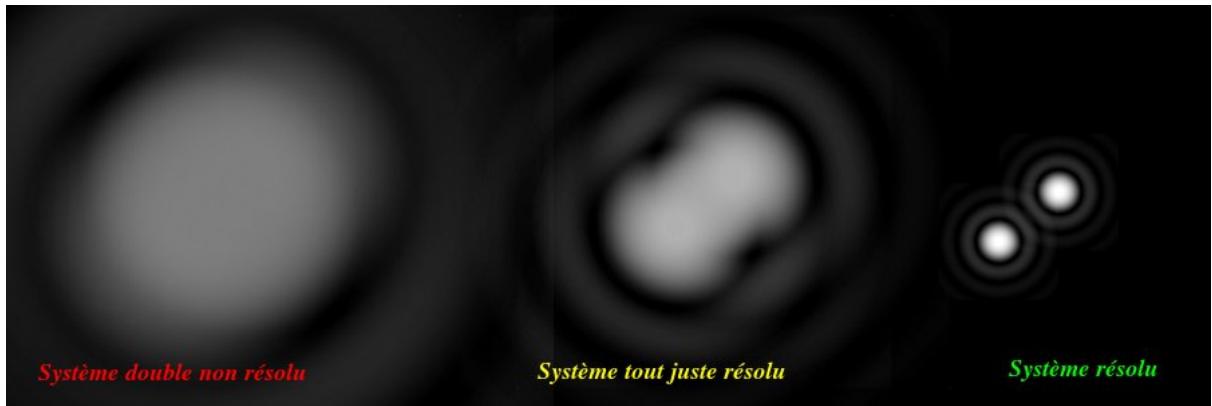
Un télescope haut de gamme d'une valeur supérieure à 10 000 €. Le diamètre de son objectif est de 355 mm et sa focale de 3 910 mm. La monture équatoriale, très stable, est motorisée et bénéficie d'un système de pointage automatique.

## Intérêt des instruments d'optique présentés

Jumelles, lunette astronomique et télescope présentent deux intérêts considérables.

→ Ils permettent de discerner des détails plus fins qu'à l'œil nu.

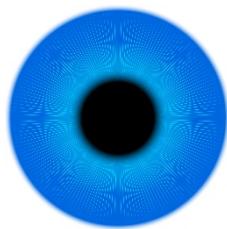
La résolution angulaire  $\theta$  atteinte par un instrument d'optique est fonction de son diamètre  $D$  et de la longueur d'onde  $\lambda$  à laquelle on observe selon la formule  $\theta = \frac{1,22\lambda}{D}$ . Si l'on exprime  $D$  et  $\lambda$  dans la même unité, la valeur de  $\theta$  sort directement en radian. Il convient alors de la multiplier par  $\frac{180}{\pi}$  pour l'avoir en degré, puis par 3600 pour l'obtenir en seconde d'arc ("'). Établie théoriquement par le physicien Lord Rayleigh (1842 – 1919), cette formule confirma les résultats empiriques obtenus plus tôt par l'astronome William Rutter Dawes (1799 – 1868) en testant la limite de résolution angulaire d'observateurs sur des étoiles binaires serrées de luminosités égales.



Une étoile double n'est pas résolue par un télescope de petit diamètre. Elle l'est par un télescope de diamètre plus important. Crédit : ASM / [Benjamin Mollier](#).

La pupille d'un adolescent peut s'ouvrir jusqu'à 7 voire 8 mm lorsque sa vision est complètement adaptée à l'obscurité. Celle d'un jeune trentenaire se dilate jusqu'à 6,5 mm, l'ouverture diminuant d'environ 0,5 mm par décennie. Ainsi, la pupille d'un sexagénaire s'ouvrira jusqu'à 5 mm au mieux.

Prenons donc une pupille ouverte à 6,5 mm, qui observe à une longueur d'onde de 550 nm, un jaune-vert au cœur du spectre visible. Avec la formule de Rayleigh, on obtient alors une résolution de  $21''$  soit environ  $0,35'$ . Compte-tenu de la variation de l'ouverture maximale de la pupille avec l'âge, du fait que la pupille n'est que rarement dilatée à son maximum et de l'étendue du spectre visible, on donne généralement la valeur de  $1'$  ( $60''$ ) au pouvoir de résolution de l'œil. Que représente  $1'$  ? C'est l'angle sous-tendu par une pièce de 2 € vue à une distance un peu inférieure à 90 m.



Pour la même longueur d'onde :

- une paire de jumelles de 50 mm de diamètre permet de voir des détails de  $2,8''$  ;
- un télescope de 8 pouces (203 mm) de diamètre descend à  $0,68''$  ;
- le télescope spatial *Hubble*, lui, atteint  $0,058''$  ;
- chacun des quatre éléments du *Very Large Telescope* parvient à  $0,017''$  ;
- Enfin, l'*Extremely Large Telescope* européen touchera du doigt des détails de  $0,0035''$ .

Les résolutions angulaires calculées sont théoriques, sauf pour le télescope *Hubble*, situé au-delà de notre atmosphère. En effet, pour évaluer la qualité véritable des images fournies par les instruments d'optique, il est d'obligatoire d'intégrer la turbulence atmosphérique, qui dégrade les images. On utilise pour cela le concept de « seeing », qui est une mesure de la qualité de la visibilité. Il s'évalue également en secondes d'arc. Il n'est pas rare d'avoir, en ville, un seeing de plusieurs secondes d'arc. Un télescope de 8 m n'y obtiendrait pas d'image plus précise qu'un télescope de 10 à 20 cm de diamètre ! Les conditions optimales d'observation se trouvent dans les observatoires de haute altitude (Mont Graham en Arizona, Cerro Paranal et Cerro Armazones au Chili, Mauna Kea sur l'île d'Hawaï, île de La Palma dans les Canaries) où le seeing descend parfois à quelques dixièmes de seconde d'arc. Un tel seeing n'est toutefois pas suffisant pour exploiter pleinement le potentiel des très grands télescopes. On a donc développé une technique appelée *optique adaptative*. Elle permet de corriger en temps réel les effets de la turbulence atmosphérique grâce à un miroir déformable. Les instruments munis d'une optique adaptative peuvent alors atteindre leur résolution angulaire théorique.

→ Ils collectent plus de lumière que l'œil et permettent d'accéder à des objets plus faibles.

Nous vous renvoyons ici à l'annexe 3, « L'échelle des magnitudes ».

## Les oculaires

Les oculaires sont constitués de lentilles qui introduisent des aberrations plus ou moins bien corrigées. Ils sont interchangeables et le diamètre du coulant – la jupe cylindrique qui réalise par serrage la liaison mécanique avec l'instrument – est normalisé. Il n'est pas rare que les astronomes amateurs possèdent une dizaine d'oculaires, en fonction de l'objet à observer. Les oculaires à grand champ apparent (plus de 80°) sont chers mais ils apportent un confort indéniable et procurent un sentiment d'immersion appréciable.



Trois oculaires grand angle, de focale 4 mm, 7 mm et 16 mm. Montés sur un télescope classique du commerce de 203 mm de diamètre et 2032 mm de focale, ils donnent accès à des grossissements respectifs de 508, 290 et 127 fois.

## Les montures

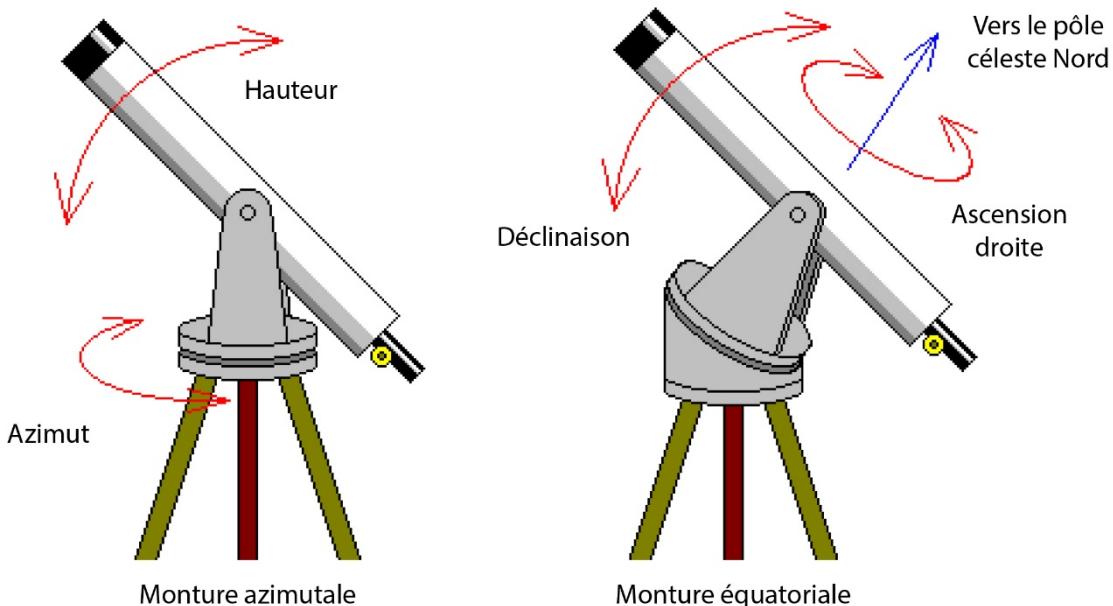
Pour plus de confort, il est déjà possible de munir une paire de jumelles d'une monture. Celle-ci s'avère indispensable aux instruments plus encombrants comme la lunette et le télescope. Il existe deux types principaux de montures : la monture azimutale et la monture équatoriale.

→ la monture azimutale

C'est la monture la plus simple car elle n'a qu'un axe horizontal et un axe vertical. Elle permet un pointage intuitif. On l'appelle monture azimutale parce que l'angle de rotation autour de l'axe vertical, compté à partir du sud, s'appelle l'azimut.

→ la monture équatoriale

Toutes les étoiles semblent se déplacer dans notre ciel d'un mouvement d'est en ouest appelé mouvement diurne. Elles en font un tour complet en 23 h 56 min 4 s. Pour qu'une lunette reste braquée sur une étoile, il suffit donc, après l'avoir orientée une fois, de la faire participer à la rotation d'ensemble de la voûte céleste, c'est-à-dire de la faire tourner autour d'un axe parallèle à l'axe des pôles, à la vitesse angulaire d'un tour tous les 23 h 56 min 4 s. Une monture équatoriale possède un axe de rotation parallèle à l'axe des pôles.



L'ascension droite et la déclinaison sont associées au système de coordonnées équatoriales. Elles sont les équivalents, sur la sphère céleste, de la longitude et de la latitude terrestres.

Les deux types de monture peuvent être motorisées pour suivre automatiquement l'astre sur lequel l'instrument d'optique est pointé. Certaines sont fournies avec un système Go-To : il est alors possible de sélectionner l'objet de son choix dans une base de données intégrée. Les moteurs alignent ensuite automatiquement l'instrument d'optique sur l'objet et le maintiennent centré dans l'oculaire. Effet garanti !



La monture de gauche, azimutale, est sommaire. La monture de droite, équatoriale, l'est beaucoup moins.  
Sa raquette de commande sert à piloter le système Go-To.

## Les accessoires

### Le trépied

Il accueille la monture et supporte l'instrument. Comme la monture, il doit être solide et suffisamment lourd pour ne pas osciller au moindre souffle de vent ou à la plus petite vibration.

### Le chercheur

Il s'agit d'un viseur souvent muni d'un réticule. Il doit impérativement être ajusté parallèlement au tube de l'instrument. Il présente l'intérêt de faciliter le pointage grâce à son champ visuel plus important que celui de la lunette ou du télescope sur lequel il est fixé.

### Le filtre solaire

Observer le Soleil à l'œil nu sans protection est dangereux, très dangereux. Le [Syndicat National des Ophtalmologistes de France](#) indique que les risques sont de deux natures :

- des lésions cornéennes à type de kératite, douloureuses mais réversibles en quelques jours ;

- Des lésions rétiniennes à type de brûlures rétiniennes liées à l'effet thermique du rayonnement solaire et à un effet photochimique sur les cellules rétiniennes particulièrement fragiles. Cet effet peut être irréversible et conduire à une altération définitive de la vue.

Avec un instrument d'optique, dont la fonction est de concentrer la lumière, la situation peut vite devenir dramatique : un simple regard dans l'oculaire peut mener à la cécité totale en une fraction de seconde !

Si vous souhaitez observer notre belle étoile à la lunette ou au télescope, il est **obligatoire** d'utiliser un filtre, à placer avant même l'entrée des rayons lumineux dans l'instrument. Les petits filtres à visser sur les oculaires sont à proscrire impérativement. Les filtres utilisés pour l'observation visuelle du Soleil sont généralement réalisés en films Mylar®, un polymère. De tels filtres, particulièrement opaques, divisent le flux solaire par un facteur supérieur à 100 000. Avec eux, l'observation est sans danger et vous pourrez mettre en évidence les taches solaires. Les filtres H $\alpha$  donnent également accès aux protubérances solaires... mais sont beaucoup plus chers.

## Que s'attendre à voir et avec quel instrument

Une simple paire de jumelles 7 × 50 ou 10 × 50 vous ouvre littéralement une fenêtre sur un nouveau monde. Sous un bon ciel, des dizaines de milliers d'étoiles se révèlent. De nombreuses étoiles doubles, qu'elles soient liées par la gravitation ou simplement le résultat d'un effet de perspective, se dévoilent. Avec un champ visuel beaucoup plus étendu que celui d'une lunette ou d'un télescope, elles sont l'instrument idéal pour observer les amas ouverts d'étoiles, les comètes, les nébuleuses et les galaxies les plus lumineuses comme M31, la célèbre galaxie d'Andromède.

Dans le système solaire, de nouveaux objets sont détectables : les planètes Uranus et Neptune, les astéroïdes Cérès, Vesta et Pallas, le plus gros satellite de Saturne (Titan) et les quatre satellites galiléens de Jupiter (Io, Europe, Ganymède et Callisto) apparaissent sous forme de points. La Lune, elle, montre ses cratères les plus imposants.

Une lunette d'initiation de 60 à 80 mm de diamètre donne accès à de nombreux cratères lunaires. Près du terminateur, au niveau de la frontière entre la partie éclairée et celle plongée dans l'obscurité, les reliefs sont accentués par l'éclairage rasant. Une lunette rend perceptible les phases de la planète Vénus, les bandes équatoriales de Jupiter et les anneaux de Saturne – quelle expérience émouvante ! Mars prend la forme d'un petit confetti couleur caramel. Plus loin de nous, la Voie lactée resplendit et présente des concentrations d'étoiles inattendues.

Avec un instrument plus conséquent (un télescope de 200 mm de diamètre, par exemple), des millions d'astres sont désormais à votre portée. Une vie ne suffirait pas à en exploiter le potentiel. Le pointer vers la Lune vous donnera l'impression saisissante de la survoler dans un astronef, l'œil rivé au hublot. Les amas globulaires succèderont aux nébuleuses planétaires, Uranus et Neptune deviendront des petites billes verte et bleue et Mars révélera sans peine ses calottes polaires. Peut-être aurez-vous même la chance de découvrir une supernova dans une galaxie lointaine ?

Enfin, si vous avez l'opportunité de mettre l'œil à un très gros télescope (600 mm voire plus), demandez à ce que l'on vous montre la nébuleuse d'Orion (M42) si elle est visible : cette nébulosité grisâtre dans un 200 mm se parera de bleu, de rouge et de vert. Quant à la galaxie des Chiens de chasse (M51), sa subtile structure spirale sera un régal pour les yeux.

**Le plus important, avant de plonger dans l'observation du ciel avec un instrument, est d'apprendre à connaître celui-ci à l'œil nu.**

Reconnaître les constellations principales (la Grande Ourse, Orion, Cassiopée, etc.) à l'aide d'une carte du ciel et les cinq planètes visibles à l'œil nu, savoir s'orienter grâce à l'étoile Polaire, être le témoin et comprendre l'origine du mouvement diurne, du mouvement annuel et de la succession des saisons... croyez-nous, ces étapes ne sont pas superflues et la progression dans ces domaines est gratifiante.

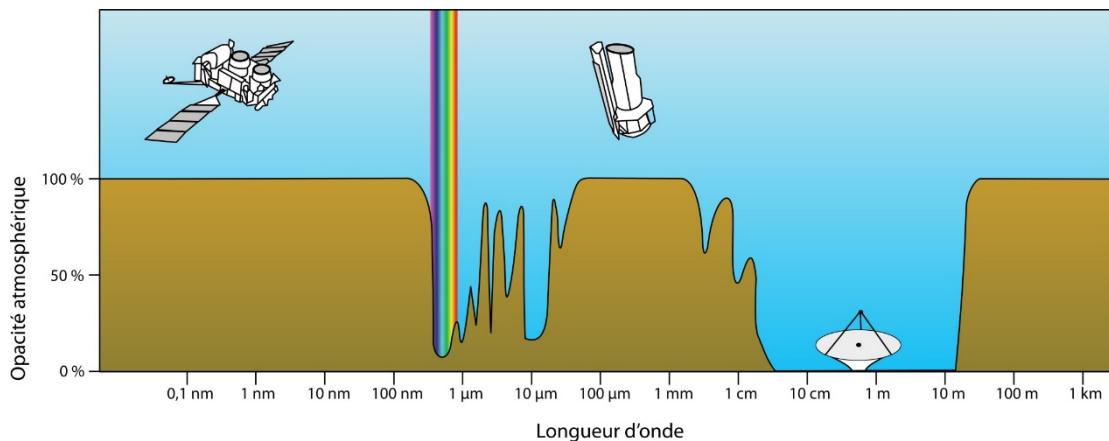
**Si vous décidez de sauter le pas, faites-vous accompagner !** Combien de lunettes et de télescopes dorment au-dessus des armoires parce que leurs propriétaires, laissés à eux-mêmes, s'en sont vite lassés... Internet regorge de forums animés par des astronomes amateurs compétents qui se feront un plaisir de vous guider. Les plus connus sont [Webastro](#) et [Astrosurf](#).

N'hésitez pas à vous inscrire à un club. L'[Association Française d'Astronomie](#) propose une liste actualisée des clubs et autres lieux d'accueil du public en rapport avec l'astronomie. La densité du réseau français est d'ailleurs surprenante !

## Au-delà du visible

Le spectre visible ne représente qu'une toute petite partie du spectre électromagnétique, qui s'étend des rayons γ (longueurs d'onde inférieures au millième de nanomètre) très énergétiques aux ondes radio kilométrique. Bien heureusement pour la vie, tous les photons émis par le Soleil n'atteignent pas la surface de notre planète. En effet, l'atmosphère joue le rôle d'un filtre : elle ne laisse pas passer les rayons γ, les rayons X, une partie des ultraviolets et une partie du rayonnement infrarouge. Il a donc fallu attendre l'avènement du spatial pour exploiter ces domaines riches en information.

Au sol, on dispose donc de quelques fenêtres en dehors du visible, situées dans l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radio.



Opacité de l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde.  
D'après une image de la NASA adaptée par [Mysid](#).

### ✚ Le domaine infrarouge

Nous avons déjà vu que les grands observatoires étaient construits loin des villes et plus particulièrement en haute montagne pour bénéficier d'une atmosphère stable sans turbulence et pour éviter la pollution lumineuse provenant de l'éclairage artificiel nocturne. Ce que nous pouvons ajouter maintenant, c'est qu'avoir la majeure partie de la vapeur d'eau sous soi est indispensable à qui veut observer dans le domaine infrarouge. En effet, la vapeur d'eau atmosphérique, déjà gênante dans le visible, est un absorbant puissant dans ce domaine de longueur d'onde. On trouve donc au sommet des montagnes, en plus des télescopes travaillant dans le visible, des télescopes sensibles au rayonnement infrarouge. Citons en exemple VISTA (pour *Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) et son miroir de 4,1 m, UKIRT (pour *United Kingdom Infra-Red Telescope*) et son miroir de 3,8 m et IRTF (pour *NASA Infrared Telescope Facility*) et son miroir de 3 m. Le premier est situé à l'observatoire du Cerro Paranal (Chili) et les deux autres au sommet du Mauna Kea à Hawaï.



Le télescope VISTA travaille entre 0,85 et 2,3 µm, dans l'infrarouge proche. Il n'est équipé que d'un seul instrument, VIRCAM (pour *Vista InfraRed CAMera*), une caméra de trois tonnes contenant seize détecteurs sensibles à l'infrarouge. Crédit : Observatoire européen austral.

#### ✚ Le domaine radio

Avec leur taille imposante, les radiotélescopes sont impressionnantes. Ainsi, FAST (pour *Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope*) affiche un diamètre de 500 m. Il est construit dans un bassin naturel du comté du Pingtang, au sud-ouest de la Chine.



Le radiotélescope sphérique de cinq cents mètres d'ouverture. Crédit : Ou Dongqu / Xinhua / ZUMA.



Vue aérienne du radiotélescope d'Effelsberg, géré par l'Institut Max-Planck de radioastronomie. Doté d'un diamètre de 100 m, il étudie les rayonnements venant du ciel entre 7 et 90 cm. Crédit : Dr. G. Schmitz.

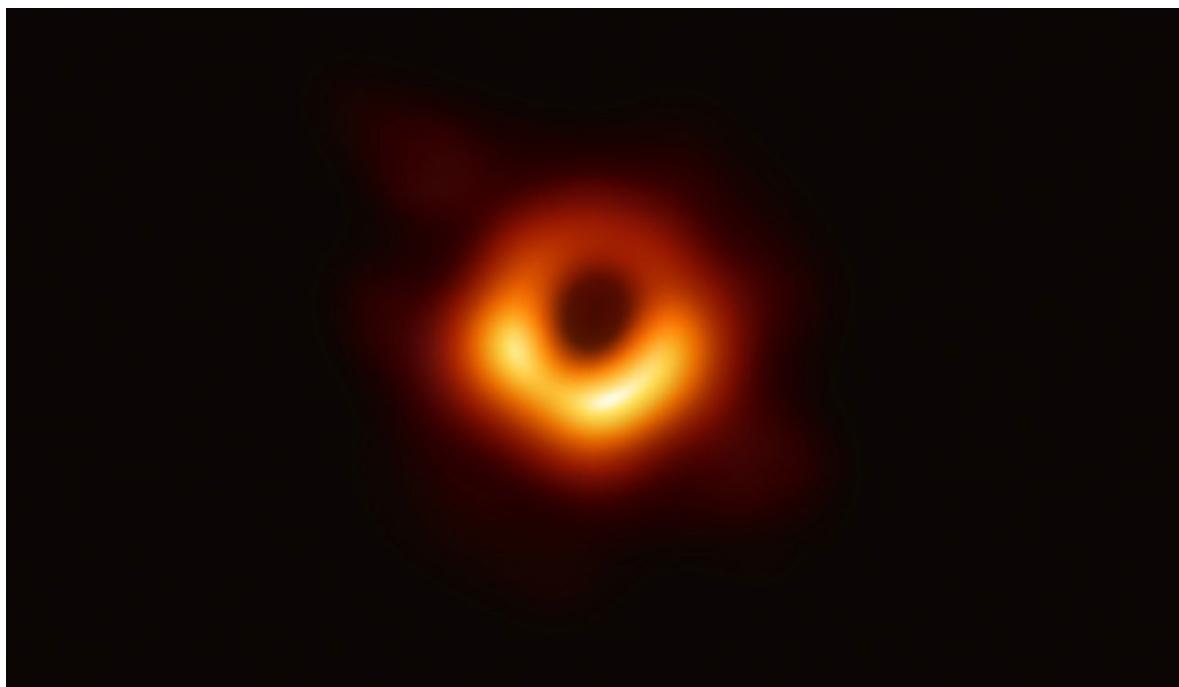
Sachant que les plus gros défauts en surface doivent avoir une taille inférieure au dixième de la longueur d'onde pour que celle-ci assure une bonne réflexion des ondes, l'antenne des radiotélescopes n'a pas besoin d'être façonnée aussi parfaitement que le miroir des grands télescopes optiques. Aussi, l'antenne est souvent constituée de grillages métalliques, avec un maillage plus ou moins lâche.

Le problème des radiotélescopes est leur faible pouvoir de résolution angulaire  $\theta$ . Rappelons-nous que  $\theta = \frac{1,22\lambda}{D}$  où  $D$  est le diamètre de l'objectif et  $\lambda$  la longueur d'onde à laquelle on observe. Ici,  $\lambda$  ne se mesure plus en nanomètres, mais en centimètres voire en mètres ! Ainsi, un radiotélescope de 100 m utilisé pour observer la raie de transition de l'hydrogène neutre à 21 centimètres aura une résolution spatiale de plusieurs minutes d'arc. Une performance très mauvaise, malgré la taille colossale de l'antenne !

Il existe heureusement une technique permettant de surmonter cette déficience. Elle porte le nom d'*interférométrie*. Elle consiste à combiner les signaux recueillis par plusieurs télescopes et à les faire interférer. On obtient alors un instrument virtuel dont le pouvoir de résolution angulaire est égal à celui qu'aurait un télescope beaucoup plus grand que chacune des composantes de l'interféromètre.

L'interférométrie est très complexe à réaliser dans le domaine optique mais l'est beaucoup moins dans le domaine radio. On l'applique avec succès depuis plusieurs décennies. Le projet le plus ambitieux mené à terme récemment est ALMA (pour *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*), un réseau international de 66 antennes de 7 m et 12 m de diamètre, installé sur un haut plateau du désert de l'Atacama au Chili. Travaillant à des longueurs d'onde comprises entre 0,32 et 3,6 mm, les antennes d'ALMA peuvent simuler un radiotélescope de 16 km de diamètre dans leur configuration la plus vaste. La résolution angulaire alors atteinte descend à 0,02'' à 1,3 mm.

À plus grande échelle, l'interférométrie à très longue base (VLBI) emploie des radiotélescopes pouvant être distants de plusieurs milliers de kilomètres. Ce type d'installation a, par exemple, permis de prendre la première image du trou noir supermassif au centre de la galaxie elliptique M87.

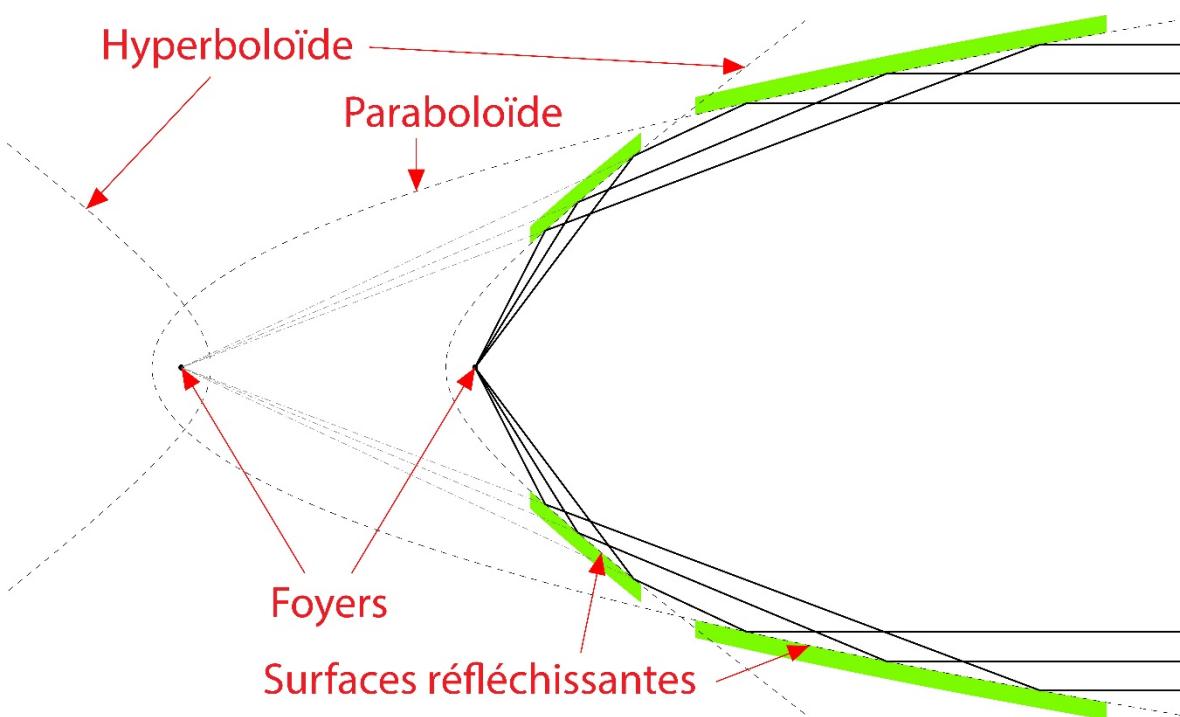


L'*Event Horizon Telescope* (Télescope de l'horizon des événements) — un réseau de huit radiotélescopes répartis sur toute la planète — a été conçu pour capturer des images de trous noirs. Voici le trou noir qui se terre au cœur de la galaxie M87. Crédit : Event Horizon Telescope.

## À l'autre bout du spectre électromagnétique : les domaines X et $\gamma$

Les rayons X et  $\gamma$  sont caractérisés par des longueurs d'onde minuscules... si courtes d'ailleurs qu'elles sont plus petites que la distance moyenne des atomes formant la surface des miroirs : ils les traverseraient ou seraient absorbés sans même s'y réfléchir.

L'idée est d'incliner les miroirs suffisamment pour que les rayons les frappent sous une incidence très faible, typiquement  $10'$  à  $2^\circ$ . Ils peuvent alors être réfléchis et, à l'aide d'un jeu de miroirs à l'agencement bien pensé, focalisés sur un détecteur. Ce type de télescope utilisé dans le domaine des rayonnements X s'appelle un télescope Wolter, du nom du physicien allemand Hans Wolter (1911 – 1978).



L'un des trois types de surfaces optiques utilisées pour composer un télescope Wolter.

Crédit : Andreas 9384

Toutefois, plus la longueur d'onde du rayonnement est petite, plus l'angle d'incidence doit être faible et plus l'instrument devient long. Aussi, si l'on souhaite étudier des rayonnements de longueur d'onde plus courte (et donc encore plus énergétiques, comme les rayons X dits *durs* et les rayons  $\gamma$ ), il faut changer de tactique et utiliser la technique du télescope à masque codé pour en localiser la source.

On interpose entre le détecteur et la source du rayonnement  $\gamma$  un masque opaque mais percé de trous. Frappé par les photons  $\gamma$ , le masque projette son « ombre » sur un plan formé par des détecteurs. Les propriétés des sources de rayonnement d'origine peuvent ensuite être reconstruites mathématiquement à partir de cette ombre.

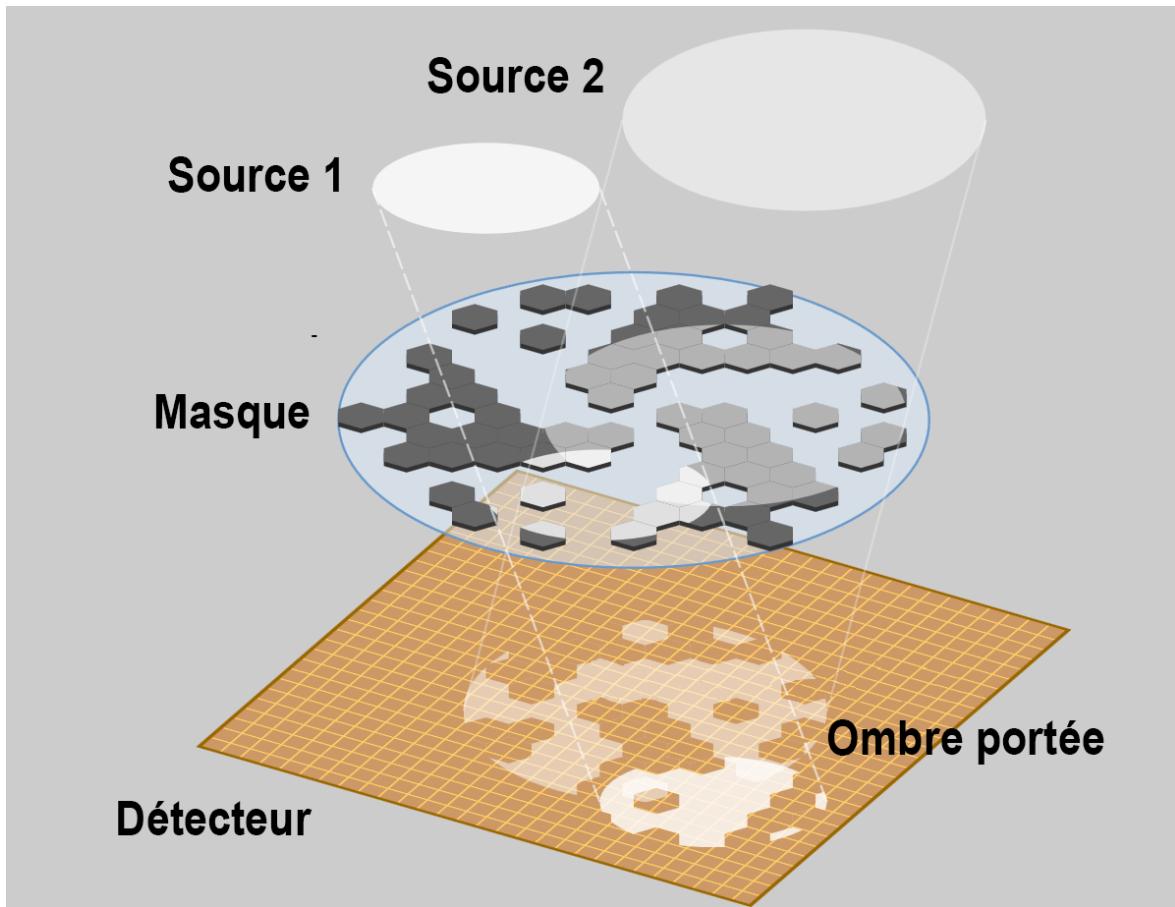
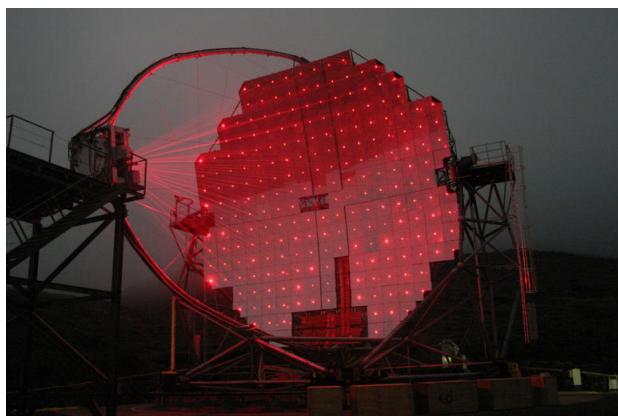


Schéma d'un télescope à masque codé avec deux sources éclairant le détecteur. Crédit : [Cmglee](#).

#### Les télescopes non optiques

Le télescope à imagerie Tcherenkov atmosphérique détecte indirectement les rayons γ les plus énergétiques en observant la gerbe de particules qu'ils produisent par effet Tcherenkov en entrant dans l'atmosphère terrestre, sous la forme de flashes bleutés.



MAGIC (pour Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes) est un système de deux télescopes à imagerie Tcherenkov atmosphérique situé à l'observatoire du Roque de los Muchachos sur l'île de La Palma dans les Canaries. Lorsqu'il y a du brouillard la nuit, les lasers utilisés pour aligner les petits miroirs deviennent visibles. Crédit : [Robert Wagner](#).

On affuble aussi parfois du nom de télescope des instruments destinés à la détection de particules autres que les photons. Ainsi, les télescopes à neutrinos – des particules sans charge, à la masse infime et interagissant très peu avec la matière – ressemblent plus à de gigantesques piscines enterrées qu'à des télescopes.

## Les télescopes spatiaux

Les télescopes mis en orbite autour de la Terre ou autour du Soleil bénéficient de conditions d'observation parfaites. Ils ne sont, bien évidemment, pas gênés par l'atmosphère, atteignent leur pouvoir de résolution angulaire théorique et peuvent observer à toutes les longueurs d'onde. Toutefois, l'environnement spatial est particulièrement agressif. Il faut les protéger du froid extrême de l'espace et des contraintes mécaniques qu'il implique, des radiations solaires et cosmiques, des particules chargées (protons, électrons, ions) qui sont un réel danger pour les matériaux de surface et surtout pour les composants électroniques, très vulnérables.

Voici quelques exemples de télescopes spatiaux parmi les plus célèbres.

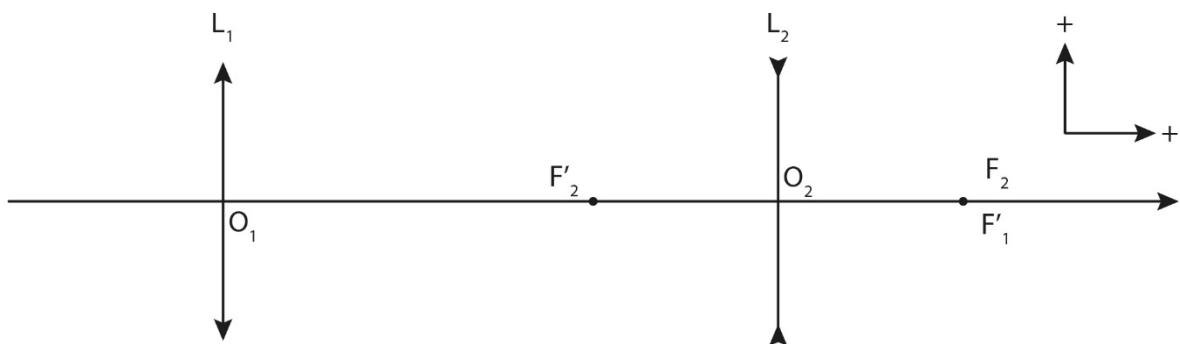
- ✓ **Rayons  $\gamma$**  : *Granat* (Russie, 1989-1999), *Compton Gamma Ray Observatory* (CGRO, États-Unis, 1991-2000), *International Gamma Ray Astrophysics Laboratory* (INTEGRAL, Europe, 2002-), *Niels Gehrels Swift Observatory* (États-Unis, 2004-), *Fermi Gamma-Ray Space Telescope* (États-Unis, 2008-)
- ✓ **Rayons X** : *Röntgensatellit* (ROSAT, États-Unis et Allemagne, 1990-1999), *BeppoSAX* (Italie et Pays-Bas, 1996-2002), *Chandra X-ray Observatory* (États-Unis, 1999-), *XMM-Newton* (Europe, 1999-)
- ✓ **Ultraviolet** : *International Ultraviolet Explorer* (IUE, Europe, États-Unis et Grande-Bretagne, 1978-1996), *Extreme Ultraviolet Explorer* (EUVE, États-Unis, 1992-2001), *Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer* (États-Unis, France et Canada, 1999-2007), *Galaxy Evolution Explorer* (GALEX, États-Unis, 2003-2013)
- ✓ **Visible** : *Hubble Space Telescope* (HST, États-Unis et Europe, 1990-), *Hipparcos* (Europe, 1989-1993), *Kepler* (États-Unis, 2009-2018), *Gaia* (Europe, 2013-)
- ✓ **Infrarouge** : *IRAS* (États-Unis, 1983), *Infrared Space Observatory* (ISO, Europe, 1995-1998), *Spitzer Space Telescope* (États-Unis, 2003-2020), *Herschel Space Observatory* (États-Unis et Europe, 2009-2013), *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE, États-Unis, 2009-)
- ✓ **Micro-ondes** : *Cosmic Background Explorer* (COBE, États-Unis, 1989-1993), *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP, États-Unis, 2001-2010), *Planck* (Europe, 2009-2013)
- ✓ **Radio** : *Spektr-R* (Russie, 2011-2019)

Certains télescopes peuvent explorer l'Univers dans différents domaines de longueur d'onde. Ainsi, le télescope spatial *Hubble* est sensible aux rayonnements infrarouge, visible et ultraviolet et *Niels Gehrels Swift Observatory* l'est aux rayonnements  $\gamma$ , X, ultraviolet et visible.

## Annexe 1 Construction optique et calcul du grossissement de la lunette de Galilée

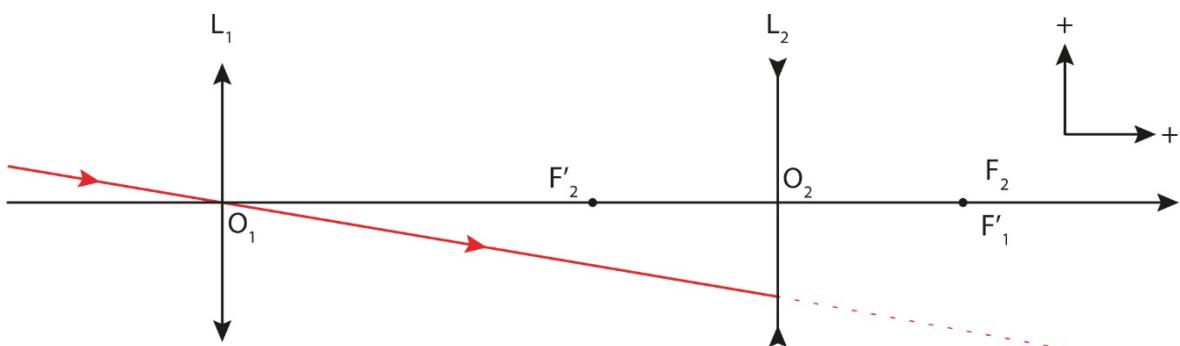
### Construction optique de la lunette de Galilée

- ① L'objectif ( $L_1$ ) est une lentille convergente de centre  $O_1$  et de grande focale  $O_1F'_1 = f'_1$ . Son foyer image est  $F'_1$ . L'oculaire ( $L_2$ ) est une lentille divergente de centre  $O_2$  et de focale plus petite  $O_2F'_2 = f'_2$ . Son foyer image est  $F'_2$  et son foyer objet  $F_2$ .

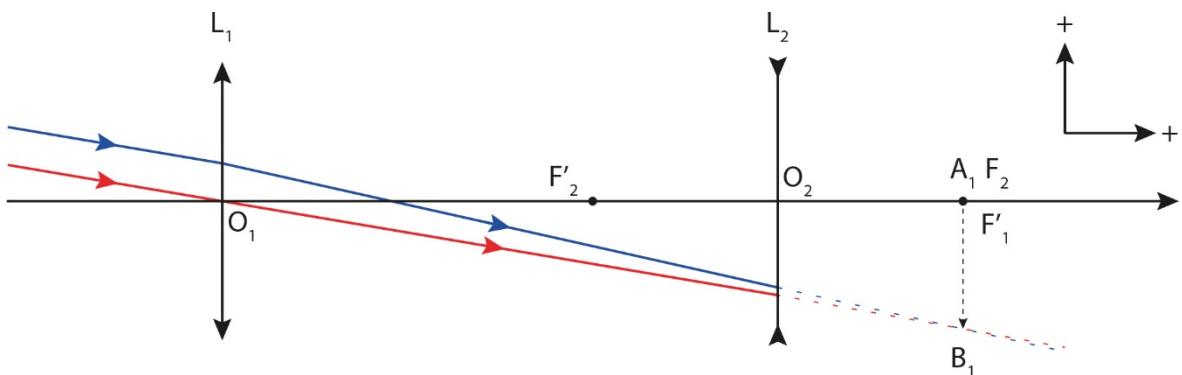


Le système doit être afocal et laisser ressortir de façon parallèle des rayons qui sont entrés parallèles : **le foyer image de l'objectif ( $L_1$ ) doit donc être confondu avec le foyer objet de l'oculaire ( $L_2$ )**. En effet, comme on considère que l'objet observé se trouve à l'infini, ses rayons arrivent parallèles sur ( $L_1$ ) et son image se trouve dans le plan focal image de l'objectif. Or, le plan focal image de l'objectif étant confondu avec 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'a pas besoin d'accommoder (les myopes et les hypermétropes doivent, eux, compenser par un réglage sur l'oculaire).

- ② Soit un rayon passant par le centre optique de la lentille ( $L_1$ ) : il n'est donc pas dévié par elle. Voyons maintenant comment obtenir l'image intermédiaire qui se forme dans le plan focal image de l'objectif, c'est-à-dire dans le plan passant par  $F'_1$  et parallèle à ( $L_1$ ).



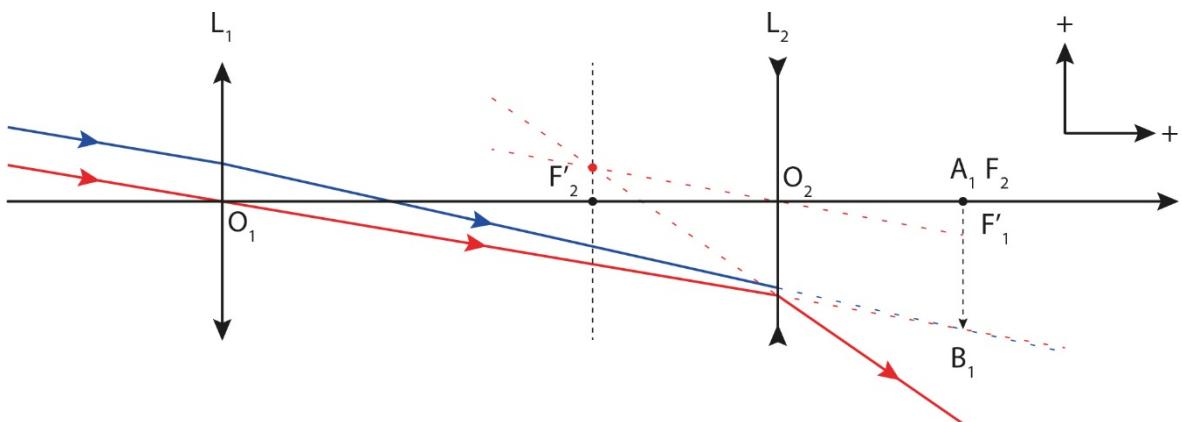
③ Le rayon bleu arrive parallèlement au premier rayon. Les deux rayons étant parallèles, leur intersection est un foyer secondaire image appartenant au plan focal image de l'objectif ( $L_1$ ).



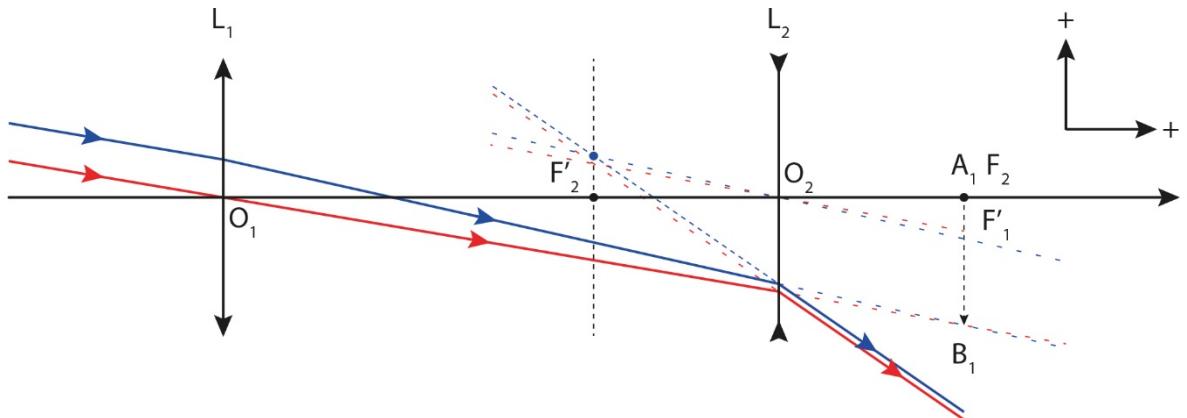
L'image intermédiaire est  $A_1B_1$ . Elle est virtuelle.

Qu'arrive-t-il maintenant aux rayons bleu et rouge ? Pour le savoir, on utilise des rayons parallèles à ces deux rayons et passant par  $O_2$ , le centre optique de ( $L_2$ ).

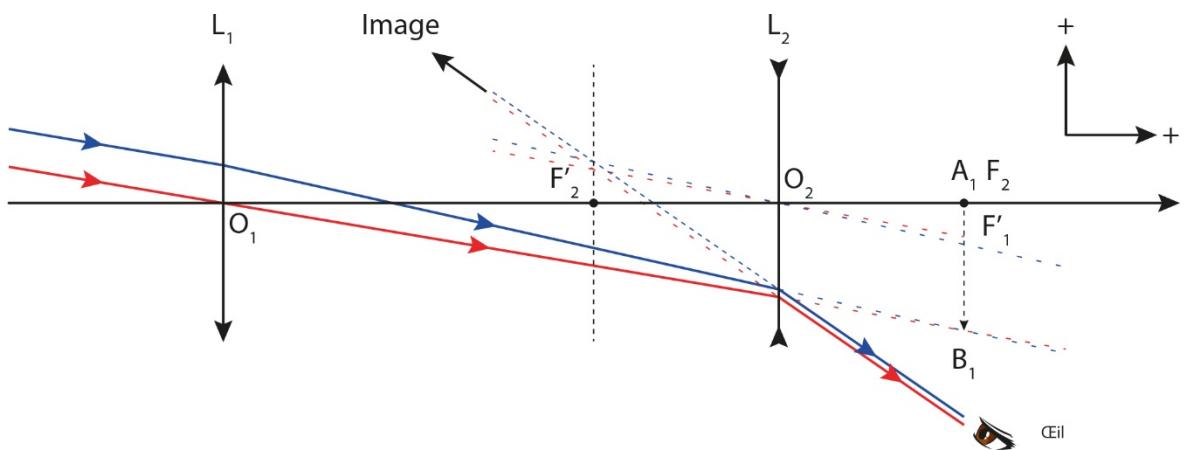
④ On commence par le rayon rouge. On lui trace une parallèle passant par  $O_2$ , en pointillés rouges. On sait que, lorsque deux rayons parallèles arrivent sur une lentille divergente, leur prolongement semble provenir d'un même foyer secondaire image. Ce foyer secondaire est le point rouge sur le schéma. Il est situé au-dessus de  $F'_2$ . On peut alors prolonger le rayon rouge sous  $B_1$ .



⑤ On effectue le même travail pour le rayon bleu. On lui trace une parallèle passant par  $O_2$ , en pointillés bleus. Le foyer secondaire est alors le point bleu sur le schéma. Il est situé au-dessus de  $F'_2$  mais également au-dessus du point rouge, non indiqué ici. On peut alors prolonger le rayon bleu sous  $B_1$ .

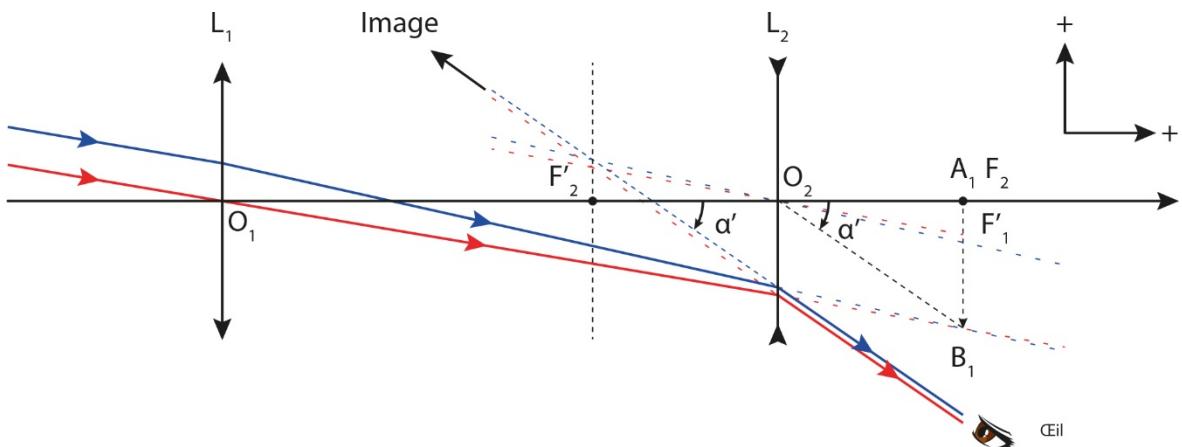


⑥ L'image finale est au-dessus de l'axe optique (elle est droite) et, pour la voir, il faut placer son œil en-dessous.



## Calcul du grossissement de la lunette de Galilée

- ① Calculons d'abord l'angle  $\alpha'$  sous lequel on voit l'image.

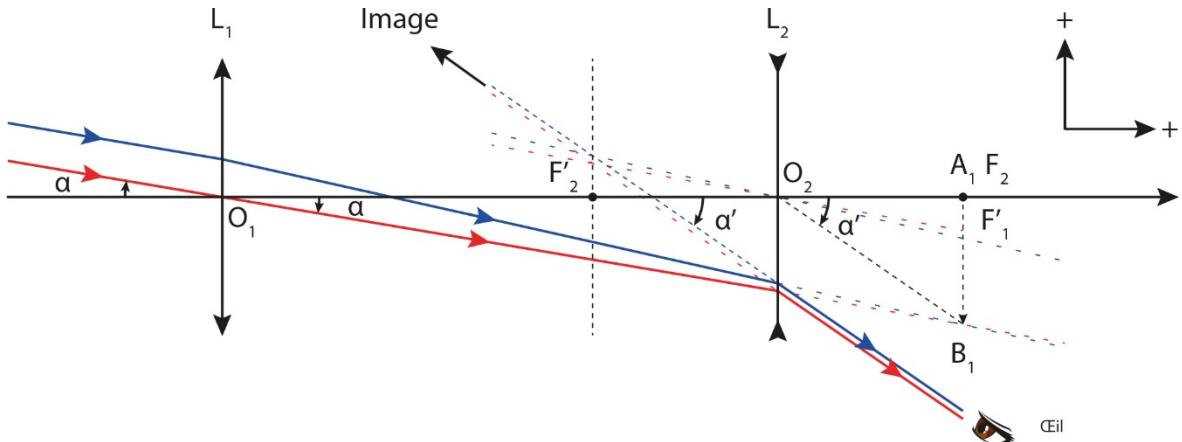


L'angle  $\alpha'$  étant en réalité tout petit, on peut l'assimiler à sa tangente. À l'aide du triangle  $(O_2A_1B_1)$ , on obtient :

$$\alpha' \approx \tan(\alpha') = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2F_2}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2} < 0.$$

Gardez en mémoire que ( $L_2$ ) étant une lentille divergente, sa distance focale est négative.

- ② Examinons maintenant le cas de l'angle  $\alpha$ .



À l'aide du triangle  $(O_1A_1B_1)$ , on obtient :

$$\alpha \approx \tan(\alpha) = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1F'_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_1} < 0.$$

**Par définition, le grossissement  $G$  est le rapport entre  $\alpha'$  et  $\alpha$ .** On a donc :

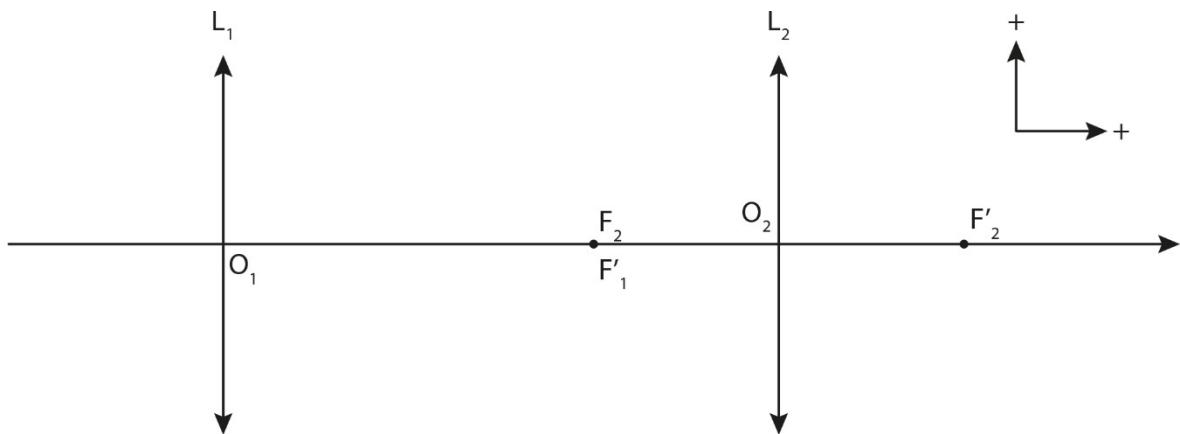
$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2} \times \frac{f'_1}{A_1B_1} = -\frac{f'_1}{f'_2} > 0.$$

On retrouve bien que le grossissement est positif : l'image est donc droite.

## Annexe 2 Construction optique et calcul du grossissement de la lunette astronomique

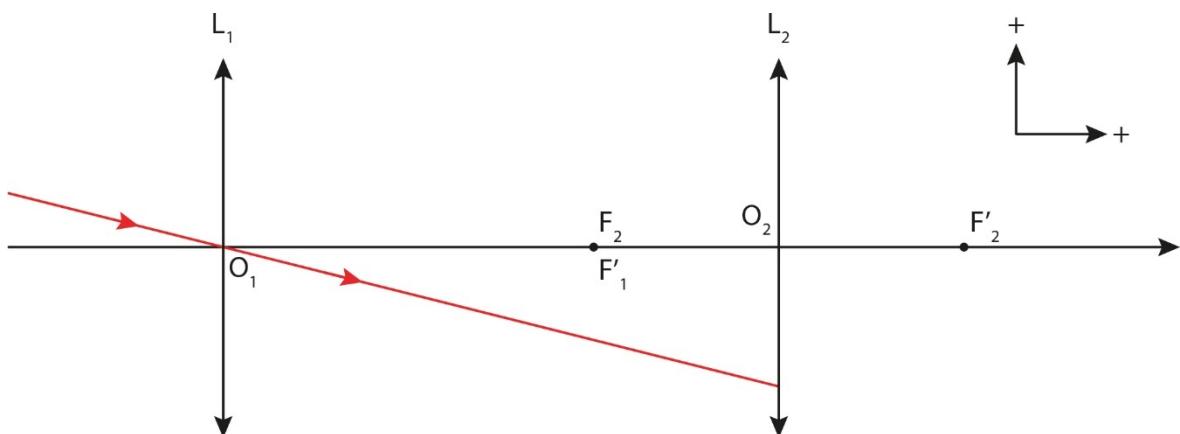
### Construction optique de la lunette astronomique

- ① L'objectif ( $L_1$ ) est une lentille convergente de centre  $O_1$  et de grande focale  $O_1F'_1 = f'_1$ . Son foyer image est  $F'_1$ . L'oculaire ( $L_2$ ) est une lentille convergente de centre  $O_2$  et de focale plus petite  $O_2F'_2 = f'_2$ . Son foyer image est  $F'_2$  et son foyer objet  $F_2$ .

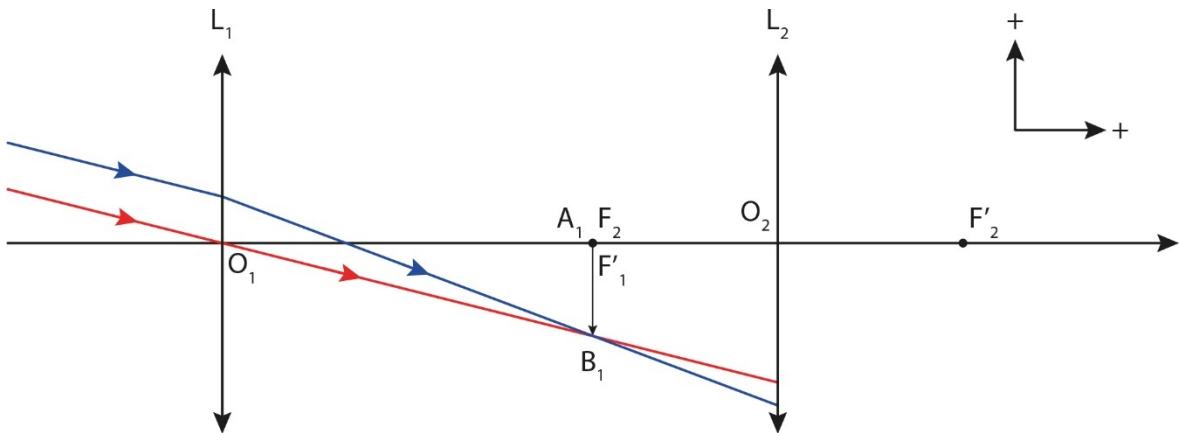


Le système doit être afocal et laisser ressortir de façon parallèle des rayons qui sont entrés parallèles : comme précédemment, **le foyer image de l'objectif ( $L_1$ ) doit être confondu avec le foyer objet de l'oculaire ( $L_2$ )**.

- ② Soit un rayon passant par le centre optique de la lentille ( $L_1$ ) : il n'est pas dévié par elle. Voyons maintenant comment obtenir l'image intermédiaire qui se forme dans le plan focal image de l'objectif, c'est-à-dire dans le plan passant par  $F'_1$  et parallèle à ( $L_1$ ).

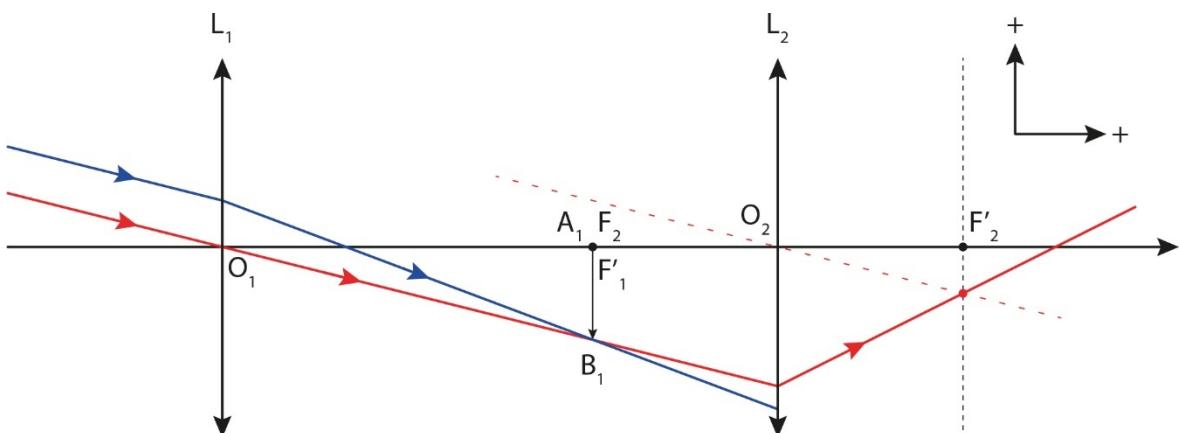


③ Le rayon bleu arrive parallèlement au premier rayon. Les deux rayons étant parallèles, leur intersection est un foyer secondaire image appartenant au plan focal image de l'objectif ( $L_1$ ).

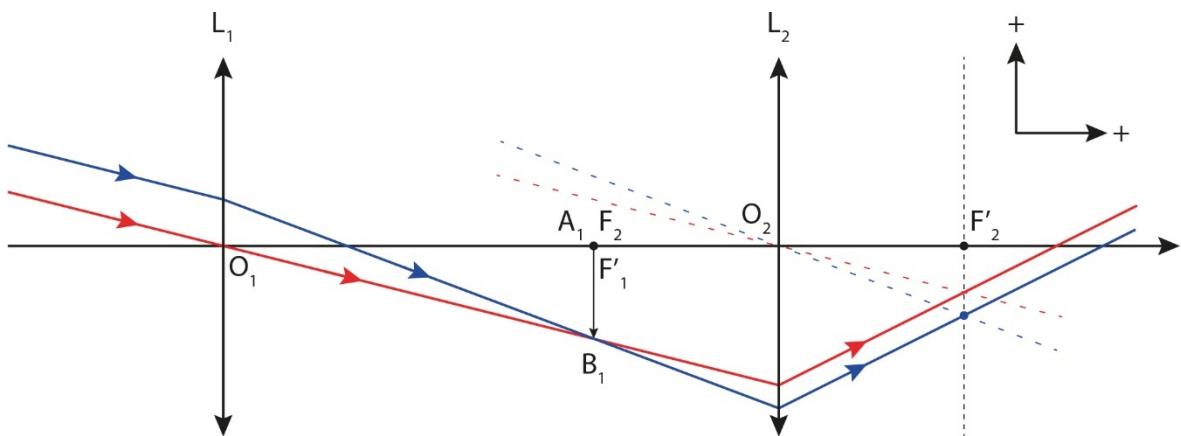


L'image intermédiaire est  $A_1B_1$ . Elle est réelle et on pourrait la recueillir sur un écran. Qu'arrive-t-il maintenant aux rayons bleu et rouge ? Pour le savoir, on utilise des rayons parallèles à ces deux rayons et passant par  $O_2$ , le centre optique de ( $L_2$ ).

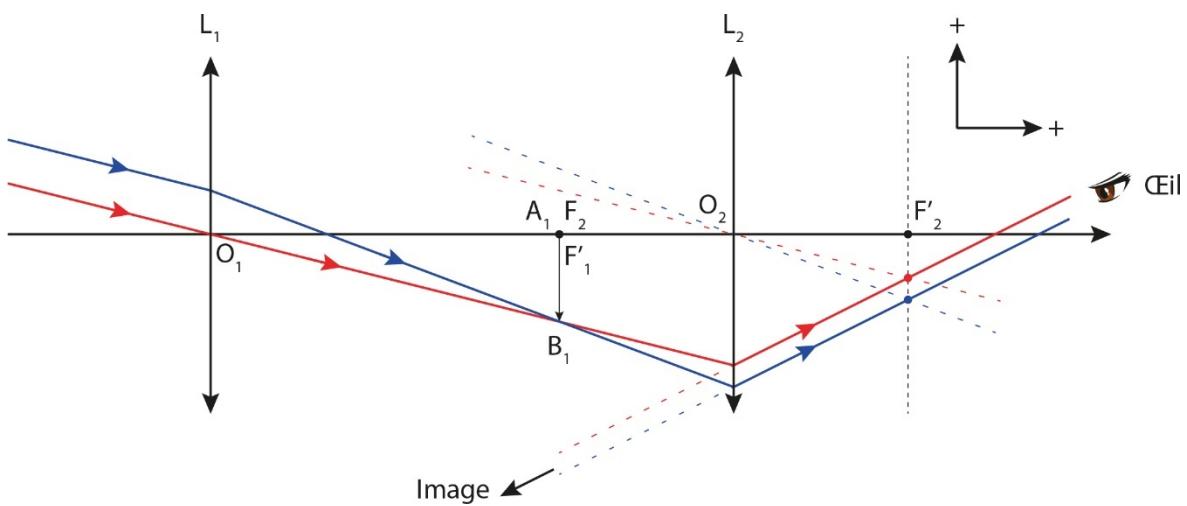
④ On commence par le rayon rouge. On lui trace une parallèle passant par  $O_2$ , en pointillés rouges. On sait que, lorsque deux rayons parallèles arrivent sur une lentille convergente, ils se croisent au niveau du plan focal image, en un foyer secondaire image qui est le point rouge sur le schéma. Il est situé sous  $F'_2$ .



⑤ On effectue le même travail pour le rayon bleu. On lui trace une parallèle passant par  $O_2$ , en pointillés bleus. Le foyer secondaire image est alors le point bleu sur le schéma. Il est situé sous  $F'_2$  mais également sous le point rouge, non indiqué ici.

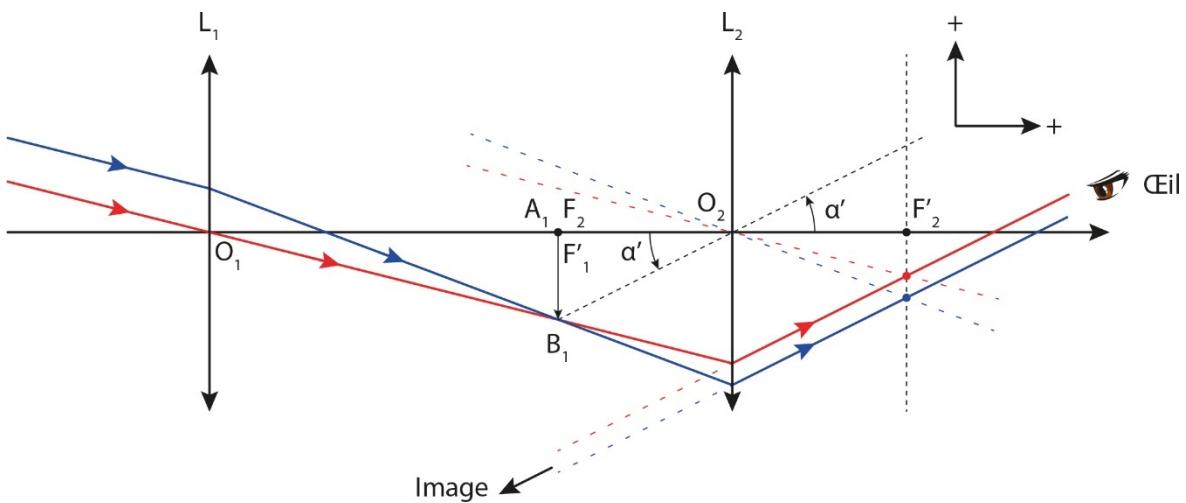


⑥ L'image finale est sous l'axe optique (elle est inversée) et, pour la voir, il faut placer son œil au-dessus de lui.



## Calcul du grossissement de la lunette astronomique

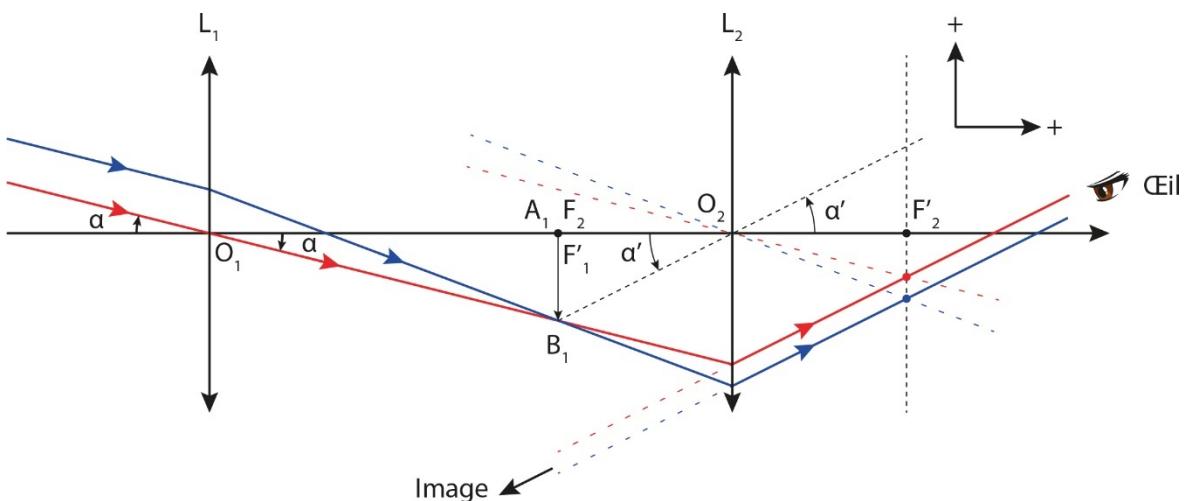
① Calculons d'abord l'angle  $\alpha'$  sous lequel on voit l'image.



L'angle  $\alpha'$  étant en réalité tout petit, on peut l'assimiler à sa tangente. À l'aide du triangle  $(O_2A_1B_1)$ , on obtient :

$$\alpha' \approx \tan(\alpha') = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2F'_2}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2} > 0.$$

② Examinons maintenant le cas de l'angle  $\alpha$ .



À l'aide du triangle  $(O_1A_1B_1)$ , on obtient :

$$\alpha \approx \tan(\alpha) = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1F'_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_1} < 0.$$

**Par définition, le grossissement  $G$  est le rapport entre  $\alpha'$  et  $\alpha$ .** On a donc :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2} \times \frac{f'_1}{A_1B_1} = -\frac{f'_1}{f'_2} < 0.$$

Le grossissement est négatif : l'image est donc inversée.

## Annexe 3 L'échelle des magnitudes

Pour quantifier l'éclat apparent d'un astre, on utilise l'échelle des **magnitudes**. Elle s'inspire des travaux d'Hipparque, un grand astronome grec du II<sup>e</sup> siècle avant notre ère. Celui-ci classait les étoiles en « grandeur ». Les étoiles les plus brillantes étaient de 1<sup>re</sup> grandeur. Celles qui l'étaient un peu moins étaient qualifiées de 2<sup>e</sup> grandeur, etc. Les étoiles de 6<sup>e</sup> grandeur étaient à la limite de visibilité. Les astronomes modernes ont repris le système de classement d'Hipparque en y intégrant la transcription mathématique de la perception de l'œil.

Le système des magnitudes est beaucoup plus étendu que celui d'Hipparque : des objets très brillants auront une magnitude négative (comme Vénus) et les magnitudes supérieures à 6 caractériseront les objets nécessitant un instrument d'optique pour être détectés.

**Plus la magnitude d'un astre est élevée, moins il est brillant.**

Le tableau suivant recense les magnitudes de quelques astres d'intérêt.

Astre	Magnitude
Le Soleil, vu depuis la Terre	-26,7
Pleine lune	-12,7
Vénus	-4,9 à -3,9
Jupiter	-2,9 à -1,6
Mars	-2,9 à +1,8
Sirius (étoile la plus brillante du ciel nocturne)	-1,5
Canopus (2 <sup>e</sup> étoile la plus brillante du ciel nocturne)	-0,7
Saturne	-0,5 à 1,3
Véga (étoile principale de la constellation de la Lyre)	0,0
Étoile polaire	2,0
Étoiles les plus faibles visibles à Paris	≈ 3
Uranus	5,3 à 5,9
Limite de l'œil, sous un ciel bien sombre	≈ 6
Neptune	7,8 à 7,9
Avec une paire de jumelles de 50 mm de diamètre	≈ 9 – 10
Avec un télescope de 200 mm de diamètre	≈ 13 – 14
Pluton (planète naine)	13,6 à 16,0
Avec un télescope de 600 mm de diamètre et 30 minutes de temps de pose <sup>i</sup>	≈ 22
Avec le télescope spatial <i>Hubble</i> (miroir de 2,4 m de diamètre) et 23 jours de temps de pose	31,5
Avec le futur télescope spatial <i>James Webb</i> (miroir de 6,5 m de diamètre, lancement prévu en mars 2021)	≈ 34

Attention, l'échelle des magnitudes n'est pas linéaire ! Un astre de magnitude 6 n'est pas trois fois moins brillants qu'un astre de magnitude 2 ni deux fois plus brillant qu'un astre de magnitude 12. Il s'agit en fait d'une échelle logarithmique inverse. Constatant qu'une différence de 5 grandeurs correspondait à une différence de luminosité d'environ 100, l'astronome Norman Robert Pogson (1829 – 1891) définit l'échelle des magnitudes de la façon suivante : **une différence de 5 magnitudes correspond exactement à une différence de luminosité de 100**. Par conséquent, une différence de magnitude de 1,0 correspond à un rapport de luminosité de  $\sqrt[5]{100}$  soit environ 2,512.

Ainsi, une étoile de magnitude 7 est :

- cent fois moins lumineuse qu'une étoile de magnitude 2 ;
- 2,512 fois plus lumineuse qu'une étoile de magnitude 8 ;
- cent fois plus lumineuse qu'une étoile de magnitude 12.

Il ne nous reste qu'à choisir une étoile de référence pour fixer l'échelle. Lorsqu'il inventa l'échelle des magnitudes vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, Pogson choisit l'étoile Polaire ( $\alpha$  de la Petite Ourse), dont il fixa la magnitude à 2. On s'aperçut ensuite que l'éclat de l'étoile Polaire était variable et l'on choisit comme nouvelle référence Véga ( $\alpha$  de la Lyre), à laquelle on imposa une magnitude nulle. Toutefois, à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, on se rendit compte que Véga était aussi très légèrement variable. On utilise donc depuis des sources lumineuses stables en laboratoire pour calibrer les mesures.

De manière générale, si  $m_1$  et  $m_2$  sont les magnitudes de deux astres et  $E_1$  et  $E_2$  leur éclat (que l'on peut exprimer dans une unité aussi barbare que le  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ), on a la relation :

$$\frac{E_2}{E_1} = 10^{0,4(m_1-m_2)} \approx 2,512^{m_1-m_2} \quad \text{Équation (1)}$$

→ Appliquons cette relation au Soleil et à la Lune et demandons-nous combien de fois l'astre des jours (indice 2) est plus brillant que la pleine lune (indice 1).

Avec  $m_1 = -12,7$  et  $m_2 = -26,7$ , il vient :

$$\frac{E_2}{E_1} = 10^{0,4(-12,7+26,7)} = 10^{5,6} \approx 400\,000$$

Vue depuis la Terre, le Soleil est environ 400 000 fois plus lumineux que la Lune.

→ Si notre œil était plus sensible, combien pourrions-nous voir d'étoiles dans le ciel ?

Dans cette expérience de pensée, supposons notre œil trente fois plus sensible que la normale. Il aurait alors accès à des astres trente fois plus faibles que la magnitude 6. Quelle magnitude pourrait-il atteindre ?

Pour le savoir, il suffit, dans l'**équation (1)**, de remplacer  $m_2$  par 6 et  $E_1$  par  $1/30 \times E_2$ .

Après simplification, on obtient  $30 = 10^{0,4(m_1 - 6)}$  soit  $m_1 = 9,7$ .

L'œil aurait alors accès à la magnitude 9,7. Des tables comme celles que l'on trouve dans l'ouvrage *Astrophysical Quantities* de Clifton Allen (éd. Springer-Verlag, 2002 pour la 4<sup>e</sup> édition) fournissent une estimation du nombre d'étoiles visibles jusqu'à une magnitude donnée pour l'ensemble du ciel. Après avoir divisé ce nombre par deux pour tenir compte du fait qu'en un lieu donné, on ne voit qu'un hémisphère céleste, on atteint 125 000 étoiles.

### Magnitude limite d'un instrument d'optique

Il est possible de relier le diamètre de l'objectif d'une lunette ou d'un télescope à la magnitude limite à laquelle il peut accéder. En première approximation, le gain en magnitude d'un instrument est  $5 \log_{10} \left( \frac{D_1}{D_2} \right)$  où  $D_1$  est le diamètre de l'objectif et  $D_2$  le diamètre de la pupille de l'œil. Comme nous l'avons vu,  $D_2$  varie au cours de la vie. En prenant  $D_2 = 6,5$  mm, un télescope muni d'un miroir de 10 pouces (254 mm) fournirait donc un gain d'environ 8 magnitudes au-delà de ce qui pourrait être observé sans lui. Ainsi, si on se trouve sur un site où la magnitude limite de l'œil est de 5, le télescope permettra de voir des astres aussi faibles que la magnitude 13. Dans les faits, un télescope permet de voir des étoiles beaucoup plus faibles car, à des grossissements élevés, l'arrière-plan est assombri et le contraste augmenté. Notre télescope de 254 mm atteindra facilement la magnitude 15 avec un grossissement supérieur à 250 fois.

Une formule donnant une valeur plus proche de la réalité de la magnitude limite  $M$  d'un instrument à fort grossissement est  $M = m - 2 + 2.5 \times \log(D \times G \times T)$  où :

- $m$  est la magnitude limite visuelle (jusqu'à 6 suivant la qualité du ciel) ;
- $D$  est le diamètre de l'objectif en millimètre ;
- $G$  est le grossissement ;
- $T$  est le facteur de transmission de l'instrument, compris généralement entre 0,6 et 0,9.

La magnitude limite présentée ici est purement visuelle : l'observateur a l'œil collé à l'oculaire. Il est toujours possible d'accéder à des magnitudes plus faibles en remplaçant l'oculaire par un appareil photographique ou une caméra CCD et en leur imposant la prise de poses longues. Des logiciels de traitement d'images offrent désormais la possibilité d'ajouter numériquement des poses courtes.

## Annexe 4      Quelques exemples de diamètres apparents

Dans un degré, il y a 60 minutes d'arc ( $60'$ ) et dans une minute d'arc, on compte 60 secondes d'arc ( $60''$ ). Le pouvoir de résolution de l'œil humain est d'environ  $1'$ . Cela signifie que deux points séparés par moins de  $1'$  seront vus comme un seul et même point.

Objet observé	Taille apparente
Distance angulaire entre l'extrémité du petit doigt et celle du pouce (bras tendu, main ouverte et doigts écartés)	Environ $20^\circ$
Distance angulaire entre l'extrémité du pouce et celle du poing (bras tendu, main fermée et pouce tendu)	Environ $15^\circ$
Taille apparente du poing fermé (bras tendu)	Environ $10^\circ$
Largeur apparente de l'index (bras tendu)	Environ $1^\circ$ , soit $60'$
Lune	De $29,3'$ à $33,5'$
Soleil	De $31,5'$ à $32,5'$
Vénus (planète)	De $9,5''$ à $65''$ , soit $1' 5''$
Pouvoir de séparation de l'œil humain	Environ $1'$ , soit $60''$
Jupiter (planète)	De $30,5''$ à $50''$
Mars (planète)	De $3,5''$ à $25,1''$
Neptune (planète)	De $2,2''$ à $2,4''$
Pluton (planète naine)	De $0,06''$ à $0,11''$
Pouvoir de séparation du télescope spatial <i>Hubble</i>	$0,06''$
Bételgeuse (étoile supergéante rouge)	$0,05''$
Sirius (étoile la plus brillante du ciel nocturne)	$0,006''$
Pouvoir de séparation du SVLBI (interféromètre radio)	$0,0001''$

Le Soleil et la Lune exceptés, les astres sont donc vus à l'œil nu sous la forme de points. Plus ou moins brillants certes, mais toujours sous la forme de points.

---

<sup>i</sup> La pose désigne l'exposition à la lumière de la surface sensible d'une pellicule autrefois, d'un détecteur numérique aujourd'hui. Le temps de pose est la durée de cette exposition.