

Histoire de lunettes et télescopes (1)

Daniel Bardin

Un parcours au travers des derniers siècles indique comment l'optique astronomique a permis de découvrir un univers jusque-là insoupçonné ; bouleversements des idées, inventions, progrès techniques et scientifiques se succèdent et continuent de nos jours, bien évidemment. Vous trouverez aussi dans ces pages quelques notes sur les aberrations optiques, les améliorations apportées par les verriers et les opticiens, les différentes combinaisons optiques, les tests de contrôles et les montures des instruments.

Ce numéro des Cahiers Clairaut ne contient que la première partie de cet article. Vous trouverez la suite sur les télescopes et les montures dans le prochain numéro.

Depuis l'émergence de la conscience humaine, nos très lointains ancêtres ont forcément tourné leurs regards vers le ciel. Toutes les grandes civilisations historiques nous ont légué des traces de leurs découvertes, quelquefois balbutiantes : expériences, méthodes, calculs, mesures et instruments ingénieux qui témoignent de l'insatiable curiosité des hommes pour le ciel.

Néanmoins, l'œil nu resta bien longtemps le seul capteur de la lumière venant des astres. À la fin du 16^e siècle, une invention optique allait permettre de scruter et de déchiffrer la voûte céleste avec une acuité jusqu'alors impensable, ouvrant ainsi la voie à la démarche scientifique moderne.

La lunette de Galilée

Les béquilles destinées à la correction des défauts de la vue étaient en usage dès la fin du 13^e siècle, au moins. Par ailleurs, dans un contexte assez embrouillé, les historiens citent les noms d'artisans lunetiers hollandais (Lipperhey, Mélius, et Janssen, entre autres) comme constructeurs des lunettes d'approche, à la fin du 16^e siècle. Considérées comme de simples curiosités, ces lunettes furent d'abord utilisées en secret par les militaires. En 1589, Giambattista Della Porta, souvent cité comme inventeur de la lunette, esquaissa une théorie de l'appareil à deux lentilles dans son ouvrage "Magia Naturalis".

Galilée (1564-1642) n'apprit qu'en avril ou mai 1609 l'existence de la lunette grâce à ses correspondants Fra Paolo Sarpi et, à Paris, Jacques Badouère (alias Jacob Badovere). Aidé par ses élèves dans son atelier de Padoue, Galilée entreprit aussitôt la construction d'une première

lunette grossissant modestement 3 fois ; le Musée de l'histoire de la science de Florence en expose deux autres qui grossissent 14 et 20 fois.

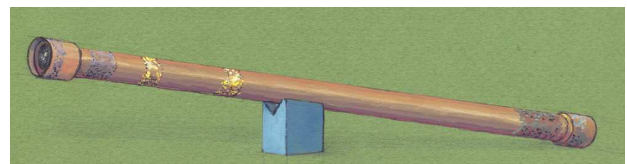


Fig. 1 Une lunette de Galilée. C'est avec un instrument de ce type, environ 30 mm de diamètre et 1m à 1,5 m de focale que Galilée a révolutionné l'astronomie.

Galilée utilisa aussitôt ces tubes optiques pour explorer le ciel. Parmi les lunettes construites par Galilée, la plus puissante avait un grossissement de 30. Satellites de Jupiter, relief lunaire, phases et diamètre apparent variable de Vénus, étoiles innombrables dans la Voie Lactée : dès le milieu de 1610, la physique d'Aristote était définitivement ébranlée. Les objectifs ont une trentaine de millimètres de diamètre et les distances focales évoluent aux alentours de 1 mètre à 1,50 mètre ; les oculaires, **divergents** et situés en avant du plan focal de l'objectif donnent une image à l'endroit c'est-à-dire conforme à l'objet observé.

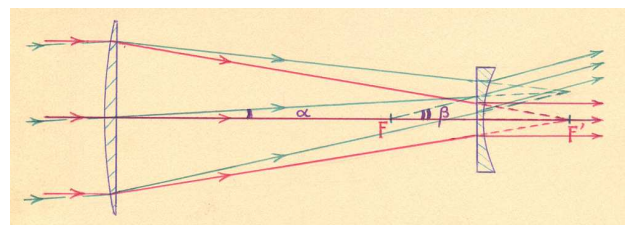


Fig. .2 Principe de la lunette de Galilée (objectif convergent et oculaire divergent). F', le foyer de l'objectif, coïncide avec le foyer arrière de l'oculaire; le grossissement est égal au rapport des angles β/α .

Avantages et inconvénients de sa lunette

Le verre des objectifs doit être clair et homogène, le polissage soigné ; ces lentilles simples et de faible diamètre captent cependant 20 à 25 fois plus de lumière que l'œil, ce qui permet de voir des astres invisibles à l'œil nu. En outre, les grossissements permis par des focales encore modestes sont néanmoins suffisants pour aboutir à un pouvoir séparateur bien meilleur que celui de l'œil limité à 1 minute d'angle ; la lunette révèle des détails, des formes et des surfaces là où l'œil ne voit qu'un point.

Cependant, lorsqu'on examine dans notre entourage un objet à l'aide d'une lentille divergente, cet objet est vu **plus petit qu'à l'œil nu, un peu flou et à l'endroit** ; c'est le cas de l'objectif de la lunette (pupille d'entrée) vu depuis l'oculaire. Le premier inconvénient de la lunette de Galilée reste donc l'étroitesse du champ observé : au travers de ses instruments, le génial pisan ne pouvait voir, au mieux, qu'une portion de ciel de 15 à 18 minutes d'arc de diamètre. Heureux hasard qui facilita la découverte : le ballet des satellites autour de Jupiter se déroule dans un champ comparable.

Contemporain de Galilée, Johannes Kepler (1571-1630) proposa dès 1611 de remplacer l'oculaire de Galilée par une lentille convergente nommée depuis "oculaire de Kepler". Cette formule optique ne fut vraiment adoptée qu'un demi-siècle plus tard en particulier sous l'impulsion de Christiaan Huygens (1629-1695) : elle donne un champ plus large où l'image est retournée (rotation de 180° dans son plan) et permettait déjà de placer au foyer des objets fins qui étaient les précurseurs des micromètres. À notre époque, l'observation visuelle utilise toujours des oculaires convergents mais composés de plusieurs lentilles donc beaucoup plus performants (voir le paragraphe sur les oculaires).

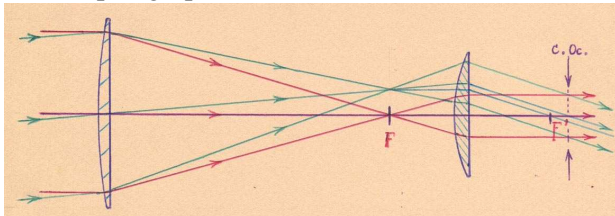


Fig. 3 F est le foyer image de l'objectif mais aussi le foyer objet de l'oculaire ; les faisceaux qui émergent de la lunette sont chacun faits de rayons parallèles et se croisent au niveau du cercle oculaire, là où passe toute la lumière qui a traversé l'objectif.

Progrès optiques

Les premières lunettes présentaient de nombreux défauts (voir l'encadré sur les aberrations à la fin de

cet article). Il a fallu plusieurs siècles pour arriver à les corriger presque en totalité.

Les astronomes du début du 17^e siècle observaient des champs célestes peu étendus et des objets assez brillants, compte tenu du faible diamètre des objectifs de lunettes et des oculaires à champ étroit (cf. § sur les oculaires). Ces observateurs découvrirent, par expérience, que la netteté des images s'améliorait sensiblement si l'on adoptait des focales très longues au regard du diamètre des lentilles, donc un très grand rapport F/D. Ils corrigeaient ainsi quelque peu, les aberrations chromatiques et celles de sphéricité ; ainsi, Chrysale eut l'occasion de brocarder "les longues lunettes à faire peur aux gens" en 1672 (Molière, Les Femmes Savantes, II, 7).

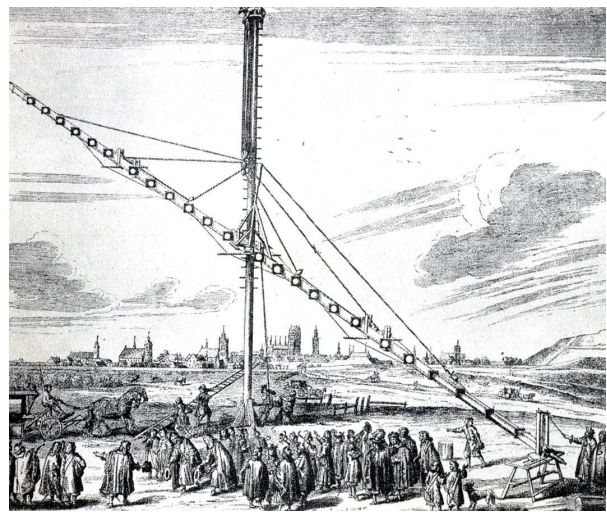


Fig. 4 La lunette du Polonais Hévelius (1611-1687) construite à Dantzig en 1673.

Comme toujours en sciences appliquées, et particulièrement en astronomie où les objets étudiés ne se trouvent pas à portée de main, les progrès émergent souvent des trouvailles techniques. Les verriers du 18^e siècle savaient produire du « verre au plomb » (le flint, comparable au cristal) plus réfringent que le verre ordinaire (le crown). C'est un avocat de Londres, Chester Moor Hall (1703-1771), qui démontra en 1733 qu'on pouvait tailler dans ces verres un objectif à deux lentilles : la convergente en crown et la divergente en flint (63 mm de diamètre à F/D = 11 environ pour ses premières lunettes). Leonhard Euler (1707-1783) avait proposé en 1747 des solutions étonnantes, certaines peu satisfaisantes : deux lentilles de verre enchâssant une lentille d'eau par analogie avec l'intérieur de l'œil humain. Après une longue polémique avec les idées d'Euler, John Dollond (1706-1761) construisit, à partir de 1758, des lunettes achromatiques convenables malgré des

diamètres encore modestes (il était alors difficile de produire de grands disques homogènes de flint).



Fig. 5 La correction du chromatisme n'est pas réalisable de manière égale dans tout le spectre ; pour l'observation visuelle, on choisit la meilleure correction autour de la longueur d'onde du vert-bleu qui correspond à la sensibilité dominante en vision nocturne.

En jouant sur les courbures des lentilles et sur les indices des verres, de nombreux physiciens s'occupant de dioptrique (partie de l'optique concernant la réfraction) produisirent des formules variées pour construire des objectifs composés ; Alexis Clairaut (1713-1765), dans trois mémoires fondamentaux sur les perfectionnements optiques des lunettes, puis Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) établirent les bases rigoureuses de ces calculs. Parmi leurs continuateurs, on trouve John Herschel (1792-1871), Carl-Friedrich Gauss (1777-1855), Joseph Johann von Littrow (1781-1840) et Ernst Abbe (1840-1905).

Il faut aussi citer quelques trouvailles ou réalisations qui constituent des avancées notables. Le Suisse Pierre-Louis Guinand (1748-1824) mit au point un remuage du verre en fusion qui permettait de couler des disques homogènes et exempts de défauts. Le physicien allemand Joseph von Fraunhofer (1787-1826), inventeur du spectroscope, construisit en 1824 une lunette pour l'observatoire de Dorpat (actuellement Tartu, en Estonie) : excellent objectif achromatique de 24 cm de diamètre et de presque 3 m de focale, monture équatoriale "allemande" qui servit de modèle novateur. Avec cet instrument, Wilhelm Struve mesura 3000 étoiles doubles, dont 2300 découvertes par lui.

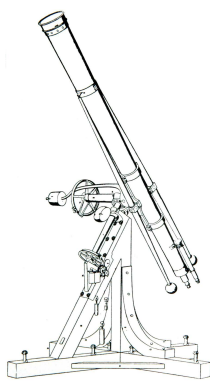


Fig. 6 La lunette de Dorpat.

James Lick (1796-1876), millionnaire américain, décida à l'automne de sa vie de faire construire un observatoire sur le mont Hamilton (Californie) à 1400 m d'altitude. Après bien des péripéties, de 1876 à 1888, la lunette (91 cm de diamètre et 17,60 m de focale) voit sa première lumière : Saturne. Les grandes lunettes atteignirent leur apogée en cette fin du 19^e siècle avant d'être abandonnées. À cela plusieurs raisons : les résidus d'aberrations ne sont plus négligeables lorsqu'on augmente le diamètre des objectifs, l'homogénéité des disques de verre est malgré tout délicate à obtenir et surtout les lentilles se déforment sous l'action variable de la gravité lorsqu'on incline la lunette en visant le ciel puisqu'elles ne sont maintenues que par leur bord. Pour ne pas réduire à néant la précision du polissage qui doit atteindre environ 1/30 de micromètre dans le cas des lentilles, on serait tenté d'adopter une grande épaisseur de verre pour rigidifier celles-ci mais le verre épais absorberait beaucoup de lumière ! La plus grande lunette toujours en service a 102 cm de diamètre pour 19,30 m de focale, elle se trouve à l'observatoire de Yerkes, à Williams Bay, non loin de Chicago (U.S.A.).

Les oculaires

En observation visuelle dans une lunette ou un télescope, l'oculaire moderne est convergent et joue un rôle précis : il sert de loupe pour examiner les détails minuscules de l'image fournie par l'objectif. Le grossissement de l'instrument doit être adapté à l'objet observé mais aussi à la turbulence atmosphérique locale ; c'est pourquoi il faut toujours disposer d'un lot d'oculaires soigneusement choisis et de focales différentes.

L'image aérienne de l'objectif donnée par l'oculaire se nomme le cercle oculaire (noté C.Oc. sur la figure 3) ; c'est le lieu où passent tous les rayons collectés par l'objectif, où l'œil doit se situer et qui ne doit pas mesurer plus que le diamètre de la pupille de l'œil, soit 6 mm. Le grossissement minimum γ – dit équipupillaire – d'un instrument a donc pour valeur le diamètre D de l'objectif en millimètres divisé par 6 ; la focale correspondante de l'oculaire vaut la mesure de D divisée par γ . Dans tous les cas, le grossissement se mesure également par le rapport des focales F / f (cf. fig.3). Le grossissement résolvant, intermédiaire, vaut D exprimé en millimètres ; c'est le cas où l'œil peut voir sous un angle de 1' les détails de l'image fournis par l'objectif. Pousser le grossissement un peu plus loin procure un certain confort mais ne s'avère nécessaire que dans des cas bien définis (en planétaire ou en détection et mesure d'étoiles

doubles par exemple) et si tous les autres paramètres sont optimaux. En effet, des considérations mettant en regard les caractéristiques de l'instrument, la luminosité et le contraste de l'objet observé, le pouvoir séparateur de l'œil et les lois de la diffraction permettent de situer la valeur du grossissement maximum à $D \times 2,5$ dans le cas où le

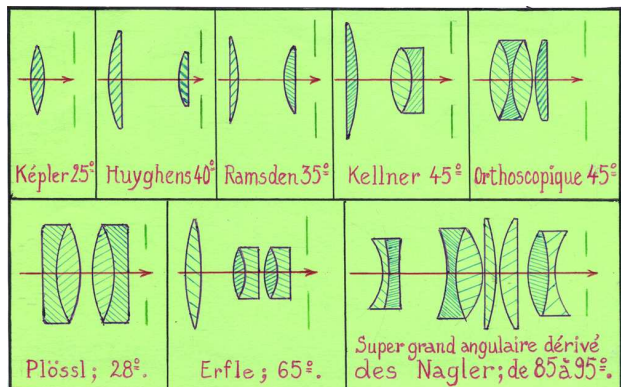


Fig. 6 Les principaux types d'oculaires.

télescope (ou la lunette) peuvent être considérés comme « parfaits » et l'atmosphère strictement limpide et calme (D étant toujours en mm).

Les progrès dans la conception des oculaires ont suivi ceux des objectifs ; de la lentille simple proposée par Kepler aux oculaires modernes composés de 8 lentilles, on a vu les aberrations de mieux en mieux corrigées et le champ de vision s'élargir à l'aide de formules optiques très élaborées. Le tableau de la figure 6 présente la vue en coupe de quelques oculaires avec indication moyenne du champ propre de chaque formule ; le champ observé sur le ciel vaut la valeur du champ propre de l'oculaire divisé par le grossissement de la lunette. Sur chaque schéma le trait interrompu vert, perpendiculaire à l'axe optique rouge, figure l'endroit où se trouve le cercle oculaire de chaque modèle.

LES ABERRATIONS

Les lentilles présentent un certain nombre de défauts qui sont détaillés ici. Dans un montage optique, toutes les aberrations sont présentes et additionnées à des degrés divers ; en fonction de l'usage qu'on prévoit de ce montage, la correction de certaines d'entre elles peut être moins poussée que d'autres.

Dans les croquis, certaines proportions et angles sont exagérés pour une meilleure lisibilité des phénomènes décrits.

L'aberration chromatique

Elle concerne toutes les lunettes réalisées avec des objectifs à lentilles simples : les images du ciel s'agrémentent de couleurs parasites qu'on ne peut attribuer aux objets visés. Ces auréoles bleues ou rouges qui bordent les étoiles sont dues à la réfraction de la lumière par les lentilles : le phénomène (cité depuis longtemps comme "phénomène des couleurs dans le verre cassé", en particulier par Sénèque) a été expliqué par Isaac Newton (1642-1727) qui montra à l'aide de prismes la décomposition de la lumière blanche par réfringence.

D'ailleurs, Newton comparait fort justement le bord d'une lentille convergente vue de profil au bord anguleux d'un prisme vu lui aussi de profil

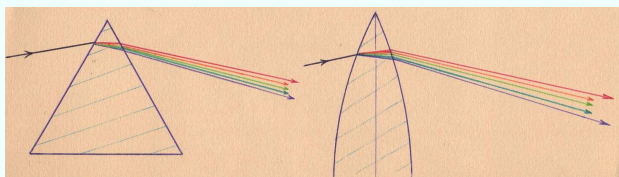


Fig. 7 Réfraction dans un prisme et une lentille.

Les rayons bleus, plus déviés, sont focalisés plus près de l'objectif que les rayons rouges ; l'angle dépend l'indice de réfraction des milieux traversés et des différentes longueurs d'ondes de la lumière.

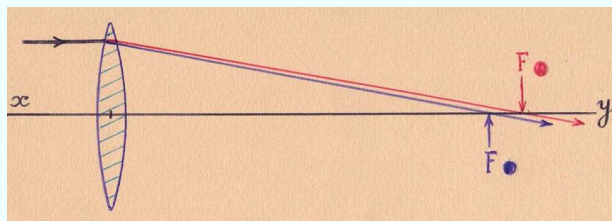


Fig. 8 Foyer rouge et foyer bleu.

On démontre que si le rapport entre focale et diamètre d'une lentille simple (F/D) s'accroît, l'aberration chromatique devient beaucoup moins gênante car les courbures des faces sont moindres.

Les autres aberrations

Les surfaces des lentilles et des miroirs destinés à l'optique sont obtenues par abrasion et polissage ; les gestes techniques de ces opérations aboutissent toujours dans un premier temps à des portions de sphères. L'analyse géométrique des trajets lumineux sur l'axe et en dehors de l'axe optique principal était loin d'être résolue à l'époque de Newton. Les opticiens modernes ont su, depuis, calculer et générer des surfaces paraboliques, hyperboliques et même asphériques qui sont destinées à corriger nombre de défauts dus aux surfaces sphériques. Voici quelles sont ces aberrations dites géométriques qui concernent autant les lentilles que les miroirs :

L'aberration de sphéricité

Elle est décrite et mesurée **sur l'axe optique** ; les rayons marginaux ont un foyer plus proche de l'objectif que les rayons centraux (figure 10). Le volume qui englobe le faisceau des rayons dans la zone focale se nomme la caustique. Comme pour l'aberration chromatique, mais pour une raison toute différente, l'aberration de sphéricité s'amenuise quand le rapport F/D de la lentille ou du miroir s'accroît.

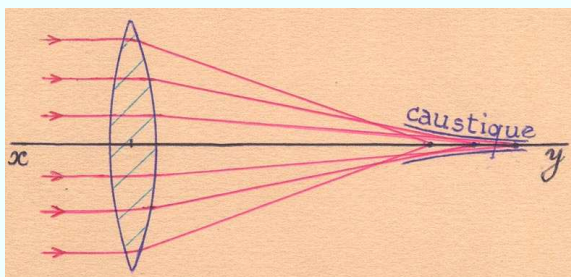


Fig. 10 Aberration de sphéricité

D'autres aberrations sont **hors de l'axe** optique :

L'astigmatisme

Dû à des différences de marche dans des plans croisés de rayons (ABF perpendiculaire à CDG sur la figure 11), ce défaut concerne les faisceaux lumineux qui atteignent l'objectif sous certaines inclinaisons mais peut aussi se trouver sur l'axe si l'objectif subit des contraintes mécaniques et ne conserve pas très précisément sa forme de révolution (problème des barilletts des lentilles ou des supports des miroirs).

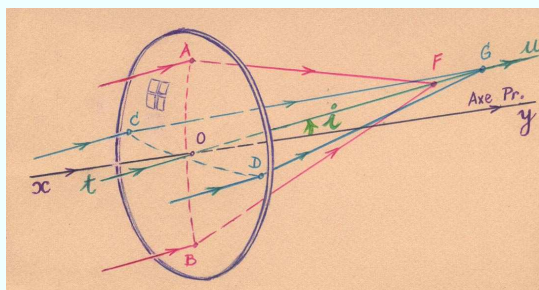


Fig. 11. L'axe principal de cette lentille se trouve en $x y$. Dans un faisceau incliné de l'angle \hat{i} par rapport à $x y$, on distingue deux plans perpendiculaires ayant l'axe $t u$ en commun : un plan horizontal qui passe par C, G et D et un plan vertical qui passe par A, F et B. Les foyers de chacun des plans ne sont pas à la même distance de la lentille.

La courbure de champ

Les images hors de l'axe sont nettes sur une surface concave et non pas dans le plan théorique qui passe par le foyer F (figure 12).

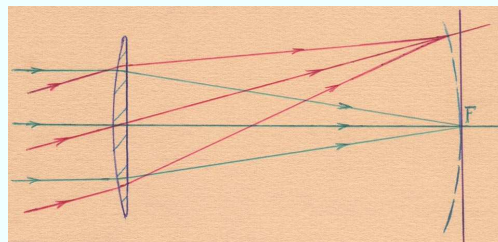


Fig 12. La courbure de champ.

La distorsion (figure 13)

Ce défaut est toujours difficile à combattre, à notre époque, dans les objectifs photographiques nommés "à grand angle" (90° de champ et plus) ; on y parvient assez bien par des combinaisons sophistiquées de lentilles multiples. En astronomie de position, pour des champs plus étroits (quelques degrés tout au plus), cette aberration doit être ramenée le plus près possible de zéro.

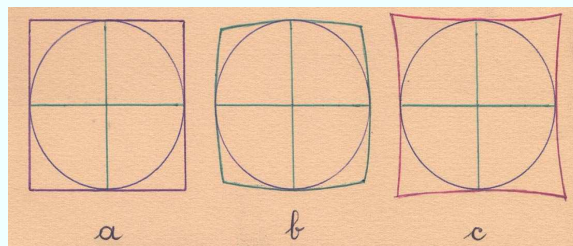


Fig. 13. Une mire *a*, strictement rectangulaire, est transformée en une image à bords incurvés par l'objectif : en "coussinet" en *b* et en "croissant", ou "barillet", en *c*.

La coma

Il s'agit d'une aberration extra-axiale mettant en jeu une succession de taches de diffraction qui s'étalent et s'affaiblissent, faciles à détecter sur les images d'étoiles en bordure d'un grand champ : des aigrettes en forme d'oiseaux dont la pointe et l'axe sont dirigés vers le centre du champ.



Fig. 14 La coma

NDLR : Nous n'avons pas assez de place pour passer entièrement l'article de Daniel Bardin. Vous trouverez la suite sur les télescopes et les montures dans le prochain numéro des Cahiers Clairaut.