



À la mesure du Ciel

Ce feuilleton est consacré à l'une des disciplines sans doute les plus méconnues sinon les plus austères de l'astronomie : l'astrométrie ou la mesure de la position des astres dans le ciel. Elle est aussi l'une des premières activités des astronomes de l'Antiquité. Elle est au fondement de l'astronomie. Sans elle et sans le gain en précision associé à cette branche, acquis au fil du temps jusqu'à nos jours, l'astronomie n'aurait pu se développer. Il était donc urgent de revenir aux racines de l'astronomie.

— par Pascal Descamps

L'ÈRE DES COUDÉS

Vers la fin du XIX^e siècle, un homme invente un nouveau type de télescope équatorial à l'Observatoire de Paris. Son ambition première vise à réduire l'inconfort des observateurs, ainsi que les inconvénients mécaniques et optiques des montures classiques. Son invention se révélera également particulièrement utile pour la résolution de certains problèmes récalcitrants de l'astronomie de position, et de façon plus inattendue, pour la mesure de la taille des planètes mineures, nouveau défi posé aux astrométristes de cette fin de siècle.

Lœwy, l'astrométriste humaniste

QUAND MORITZ LÖEWY (fig. 1) pénètre pour la première fois dans l'enceinte de l'Observatoire de Paris le 15 août 1860, il n'a encore que 27 ans, mais a déjà accompli différents travaux astronomiques à l'observatoire impérial de Vienne, si notables qu'ils ont été remarqués par Le Verrier qui l'a invité à venir travailler en France. De confession israélite, le jeune Lœwy s'est empressé de fuir le climat antisémite nauséabond qui se répand depuis une dizaine d'années en Autriche, où les Juifs se sont vus interdire l'accès aux professions d'enseignement en 1855. Dès l'année suivante, après avoir été formé, il devient observateur aux instruments méridiens (voir l'[épisode 9 : « L'Observatoire-factory »](#) paru dans la Lettre d'information de novembre 2023), ainsi qu'à l'équatorial de 0,38 m

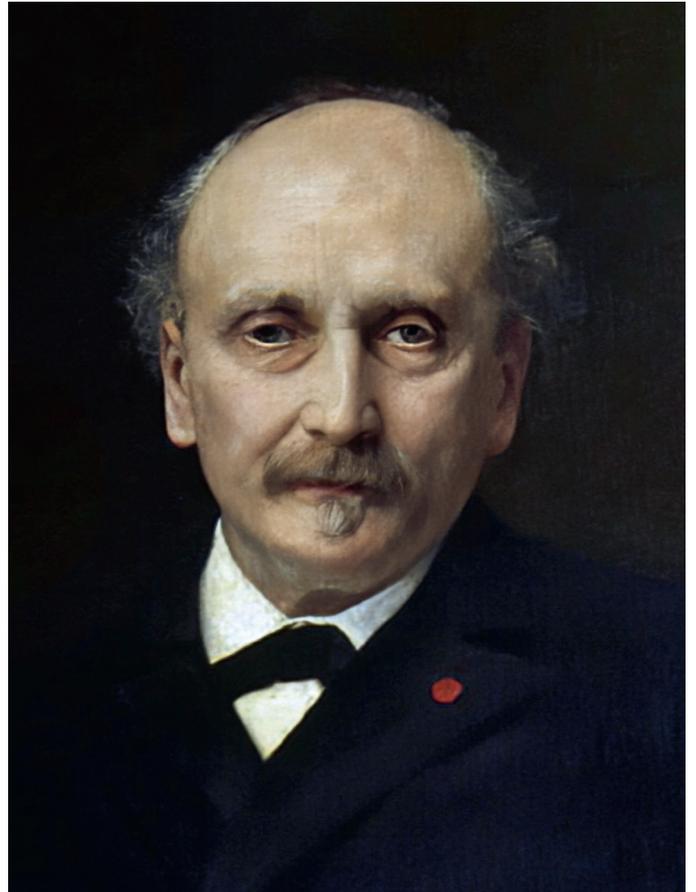


Fig. 1 - Maurice Lœwy (1833-1907).

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

qui se trouve sur la tour est du grand bâtiment de l'Observatoire. La même année, fait rarissime pour être souligné, il est nommé astronome adjoint, puis deviendra chef du service méridien. Naturalisé très rapidement, dès 1864, il transforme son prénom en Maurice et défendra Paris contre l'envahisseur prussien en 1870. Peu de temps avant, on s'en souvient (voir l'[épisode 9 : « L'Observatoire-factory »](#) paru dans la Lettre d'information de novembre 2023), aux côtés de douze de ses collègues astronomes, il

cosignait le 1^{er} février 1870 un mémoire collectif sur l'état de l'Observatoire de Paris, brocardant l'impérialisme et la direction autoritaire de Le Verrier. Ce mémoire visait à exposer les motifs de la remise de leur démission au ministre de l'Instruction publique, ce qui a provoqué la destitution de Le Verrier quelques jours plus tard. Amer retour de l'histoire vis-à-vis de son protecteur et mentor, dix ans après être entré à l'Observatoire. Cependant, il est l'un des rares à qui Le Verrier ne tiendra pas rigueur lors de son retour en grâce – et à la direction de l'Observatoire en 1873 après le décès accidentel de Charles-Eugène Delaunay (1816-1872) qui lui avait succédé, noyé lors d'une inspection de la fin des travaux de la rade artificielle de Cherbourg.

Durant la décennie des années 1870, Lœwy s'impose peu à peu comme l'une des figures éminentes de l'astronomie française. Les postes à responsabilité lui tendent les bras, il n'en refuse aucun sans pour autant abandonner ses travaux. En 1872, il devient membre du Bureau des longitudes. En 1873, il est élu sur le poste vacant à l'Académie des sciences laissé par Delaunay. Avec le contre-amiral Ernest Mouchez, il contribue à la naissance de l'observatoire du Bureau des longitudes en 1875 – dédié à la formation astronomique des navigateurs et des explorateurs – dans le parc Montsouris, qu'il codirigera pendant 15 ans. Le Bureau des longitudes le charge de l'édition de la *Connaissance des temps* (30 volumes) et de la partie astronomique de l'*Annuaire du Bureau des longitudes*. Du côté de l'Observatoire de Paris, il devient assistant du directeur en 1878 lorsque Mouchez en prend la direction, responsabilité qu'il continuera d'assumer durant la direction de Félix Tisserand (1845-1896). À la mort de Tisserand en 1896, il accède naturellement à la direction de l'Observatoire jusqu'à son décès subit le 15 octobre 1908 à l'âge de 75 ans lors d'une intervention à l'occasion d'une séance du conseil des observatoires.

Après la mort de Tisserand, Lœwy hérite également de la présidence du comité international permanent de la Carte du ciel en 1897 (voir l'[épisode 10 : « Le ciel à la carte »](#) paru dans la Lettre d'information de décembre 2023), circonstance lui permettant de manifester son esprit collaboratif humaniste et mondialiste en matière de science. Ainsi, quand la planète mineure Éros est découverte le 13 août 1898, il se saisit de l'occasion lors de la conférence astrophotographique de 1900 pour proposer une interruption temporaire de la Carte du ciel (voir l'[épisode 10 : « Le ciel à la carte »](#) paru dans la Lettre d'information de décembre 2023) et mettre en place une commission spéciale afin de profiter de l'opportunité du rapprochement prochain d'Éros avec la Terre en organisant une campagne d'observation systématique en divers lieux sur Terre. Il s'agit d'aborder « la solution d'un des plus grands problèmes de l'Astronomie, la détermination de la distance moyenne du Soleil à la Terre », autrement dit la mesure de la parallaxe solaire (voir l'[épisode 5 : « Deux planètes dans le Soleil »](#) paru dans la Lettre d'information de juin 2023). Selon Lœwy⁽¹⁾, « on était fondé à attendre, dans cette recherche, une exactitude plus grande que dans le passé, grâce à la découverte de la planète Éros, astre qui allait se trouver, à la fin de 1900, à une très faible distance de la Terre ». De nouveau, Lœwy est désigné comme président de cette commission spéciale qui elle-même se dote d'un comité exécutif constitué de quatre membres : Hendricus Bakhuyzen (1838-1923), directeur de l'observatoire de Leyde ; Stimson Brown (1854-1923), directeur de l'observatoire de Washington ; Ernst Hartwig (1851-1923), directeur de l'observatoire de Bamberg, et Lœwy, directeur de l'Observatoire de Paris. Sans surprise, Lœwy est désigné président de ce comité exécutif, chargé, en s'inspirant de l'avis de ses trois collègues, d'élaborer les détails du plan et de préparer tous les documents destinés à faciliter soit les travaux d'observations, soit la réduction de tous les résultats obtenus. Cinquante-huit ob-

(1) Séance du 17 février 1902 de l'Académie des sciences.

servatoires⁽²⁾ s'engagent dans cette nouvelle entreprise photographique internationale, succès phénoménal que Lœwy salue en des termes solennels forts qui témoignent du sens profond qu'il donne à son engagement personnel d'astronome en tant qu'homme, à l'occasion de son rapport annuel sur l'état de l'Observatoire pour l'année 1900 présenté le 9 mars 1901 devant le conseil de l'Observatoire :

Qu'il soit permis de faire ressortir le caractère spécial de cette nouvelle entreprise internationale. Elle offre dans l'histoire de la civilisation un exemple sans égal du désintéressement et de la solidarité dont sont animés ceux, quelle que soit leur patrie, qui ont voué leur vie à la recherche du progrès et de la vérité. Dans cette coopération de près de 60 Observatoires, la collaboration est intime et directe : durant six mois, dans chaque nuit favorable, une centaine d'astronomes, pénétrés de la même pensée, dirigent leurs lunettes vers le même objet céleste. Bien que disséminés sur toutes les régions du globe, ces travailleurs peuvent être comparés à des artisans qui édifient le même monument, où les efforts des uns sont nécessaires au succès des autres.

C'est un fait qui mérite d'être inscrit dans les annales du siècle qui vient d'expirer. Dans cette période brillante, à laquelle les découvertes de la science ont donné une grandeur incomparable, les peuples sont encore bien loin, en effet, du but idéal auquel l'humanité aspire : l'union et la concorde. Nous sommes heureux de constater que, fidèles à une longue tradition, les astronomes de tous les pays ont donné au monde le spectacle d'une confraternité qui ne saurait être dépassée.

C'est une des gloires de notre Exposition universelle d'avoir légué à la postérité un souvenir pareil.

De par son histoire personnelle et son caractère doux, Lœwy est un homme de paix et de coopération. Les honneurs viennent à lui plus qu'il ne les recherche. Issu de l'astronomie de position – de l'astrométrie dirait-on aujourd'hui –, Lœwy est un astronome de précision, une grande partie de sa carrière sera consacrée à l'étude des instruments et à l'amélioration de leur précision (divisions d'un cercle, constantes instrumentales d'un instrument méridien, flexion des instruments méridiens, amélioration des observations méridiennes par introduction du chronographe imprimant et du micromètre auto-enregistreur construit par Gautier). Lœwy est l'archétype de l'astrométriste dont la tâche première est la mesure de précision : mesure des positions, mesure des constantes fondamentales (parallaxe solaire, vitesse de la lumière, constante de l'aberration...), méthodes de mesure, traque des erreurs (instrumentales, personnelles, physique).

C'est en 1871 qu'il imagine un nouveau type d'instrument qu'il baptise « équatorial coudé ». Delaunay, alors directeur de l'Observatoire, soutient l'idée, mais la guerre et la mort de Delaunay empêcheront son exécution jusqu'au retour de Le Verrier...

(2) *Abbadia, Alger, Athènes, Bamberg, Berlin, Besançon, Bordeaux, Cambridge (Angleterre), Cambridge (États-Unis), cap de Bonne-Espérance, Catane, Charkow, Charlottesville, Christiania, Copenhague, Cordoba, Denver, Dublin, Düsseldorf, Édimbourg, Évanston, Flagstaff, Florence, Greenwich, Heidelberg, Helsingfors, Kasan, Kænigsberg, Leyde, Leipzig, Lisbonne, Lyon, Madison, Marseille, Minneapolis (États-Unis), Mount-Hamilton, New York, Nice, Northfield, Oxford, Padoue, Palerme, Paris, Potsdam, Poulkovo, Rome (Collège Romain), San Fernando, Strasbourg, Tachkent, Tacubaya, Teramo, Toulouse, Uccle (Belgique), Upsal, Vienne (Ottakring), Vienne (Währing), Washington, Williams-Bay.*

Un télescope tout confort

C'EST LORS DE LA SÉANCE du 7 janvier 1874 du conseil de l'Observatoire que Le Verrier annonce l'offre de M. Bischoffsheim de 20 000 francs pour la construction du premier équatorial coudé inventé par Loewy. Mais c'est insuffisant. Ce n'est qu'après l'arrivée de Mouchez à la direction de l'Observatoire que celui-ci réussit à convaincre Bischoff-

sheim d'allouer la somme de 25 000 francs incluant l'objectif, le ministère accordant de son côté une somme de 140 000 francs pour la construction de la cabane (le toit roulant) et du bâtiment abritant le nouvel instrument. Le premier équatorial de ce type sera achevé en 1882, équipé d'un objectif de 0,27 m.

Peut-être guidé par le souvenir de l'époque à laquelle il était lui-même simple observateur au sein

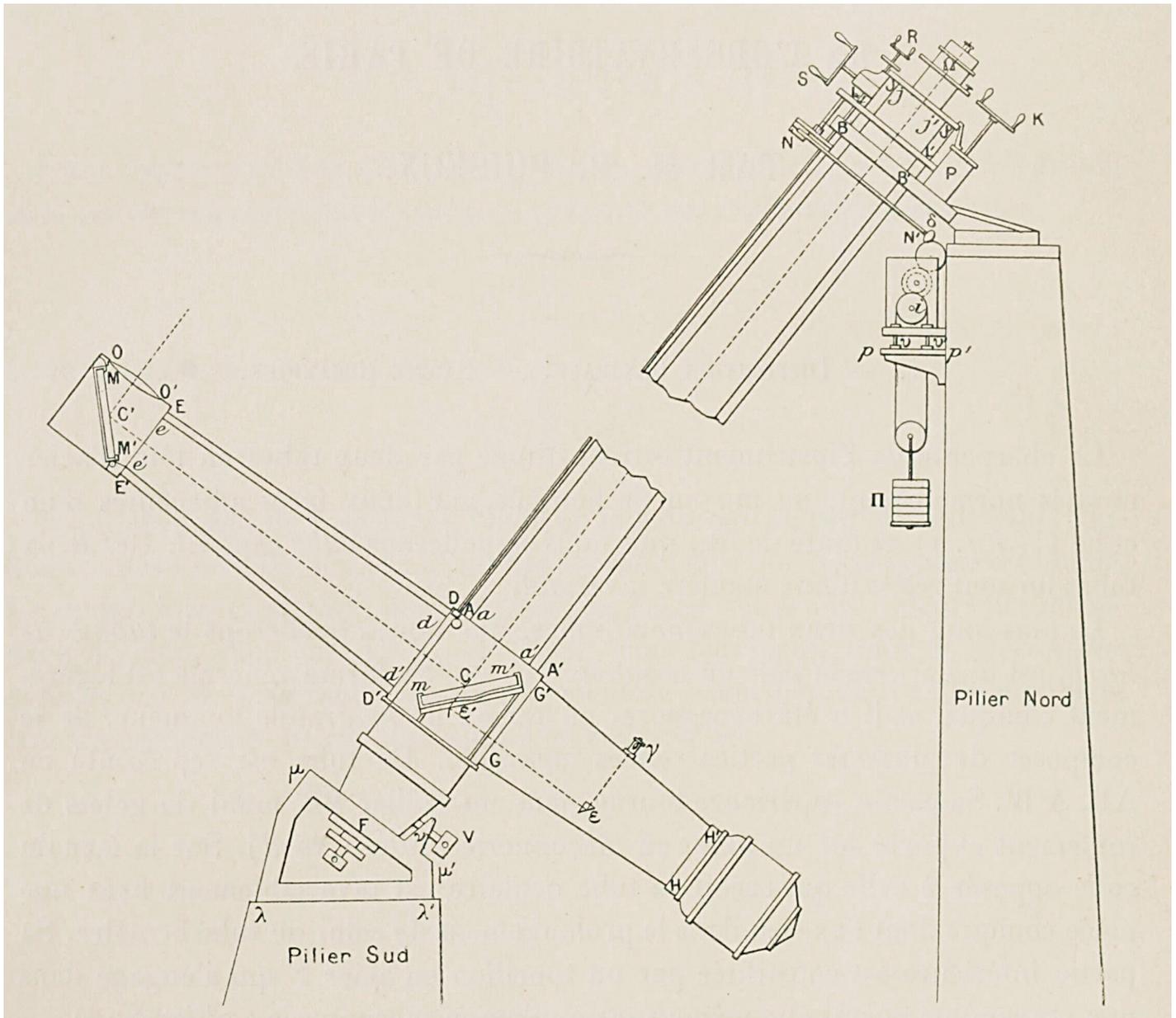


Fig. 2 - Structure de l'équatorial coudé.

Tiré de P. Puiseux, « Description du grand équatorial coudé de l'Observatoire de Paris », *Annales de l'Observatoire de Paris, Mémoires*, t. 21, Paris : Gauthier-Villars, 1895, p. D.1-D.35.

Domaine public (source gallica.bnf.fr/Bibliothèque nationale de France)

du service méridien lors de son arrivée à l'Observatoire, Lœwy conçoit un instrument astronomique en premier lieu destiné à améliorer les conditions de travail de l'observateur, en réduisant sa fatigue et la gymnastique continuelle imposée par les instruments classiques, qu'ils soient méridiens ou équatoriaux. Pour cela, il le dote de deux miroirs plans inclinés à 45° (fig. 2), dont la fonction est de guider un rayon lumineux parti d'un point quelconque du ciel en le renvoyant, par l'intermédiaire d'un tube

coudé, dans une direction fixe, celle de l'axe polaire, pour rencontrer en bout de course l'œil de l'astronome confortablement installé dans le fauteuil de son bureau d'observation, qui plus est, luxe inouï, disposerait du chauffage. Le naturaliste a le microscope pour analyser l'infiniment petit dans son bureau, l'astronome aura maintenant l'équatorial coudé pour observer l'infiniment grand depuis sa table de travail (fig. 3).

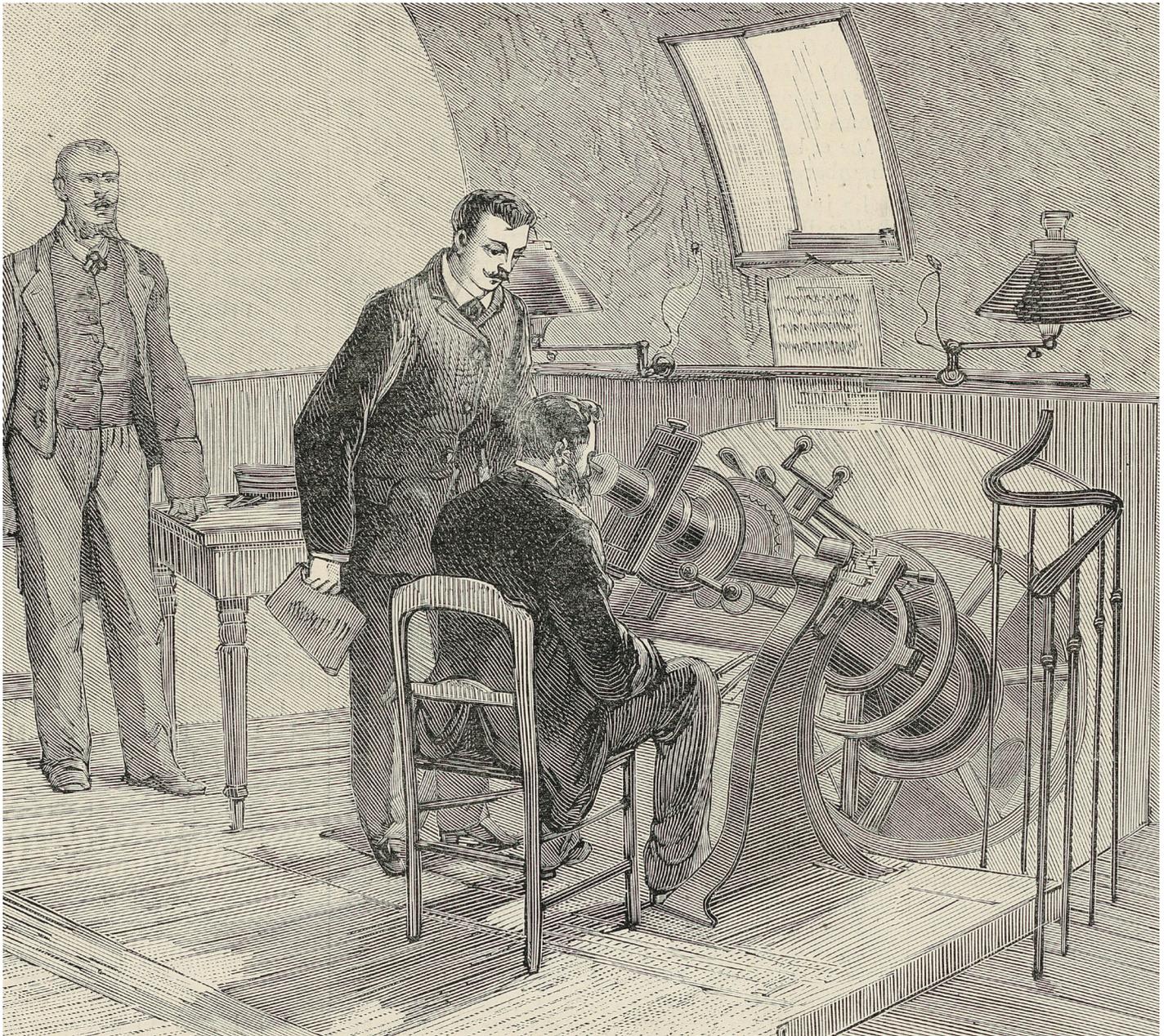


Fig. 3 - Le poste d'observation du nouvel équatorial coudé.

Tiré de l'Illustration d'octobre 1883.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Si ce nouvel instrument doit soulager le travail de l'astronome, sa conception vise également à supprimer les inconvénients techniques des lunettes équatoriales de l'époque. Une lunette équatoriale ordinaire est placée sur une monture dite « alle-

mande » pour laquelle l'axe de déclinaison, perpendiculaire à l'axe polaire, porte à faux tout le corps de la lunette (voir fig. 4). Ce dispositif pose des problèmes de stabilité.

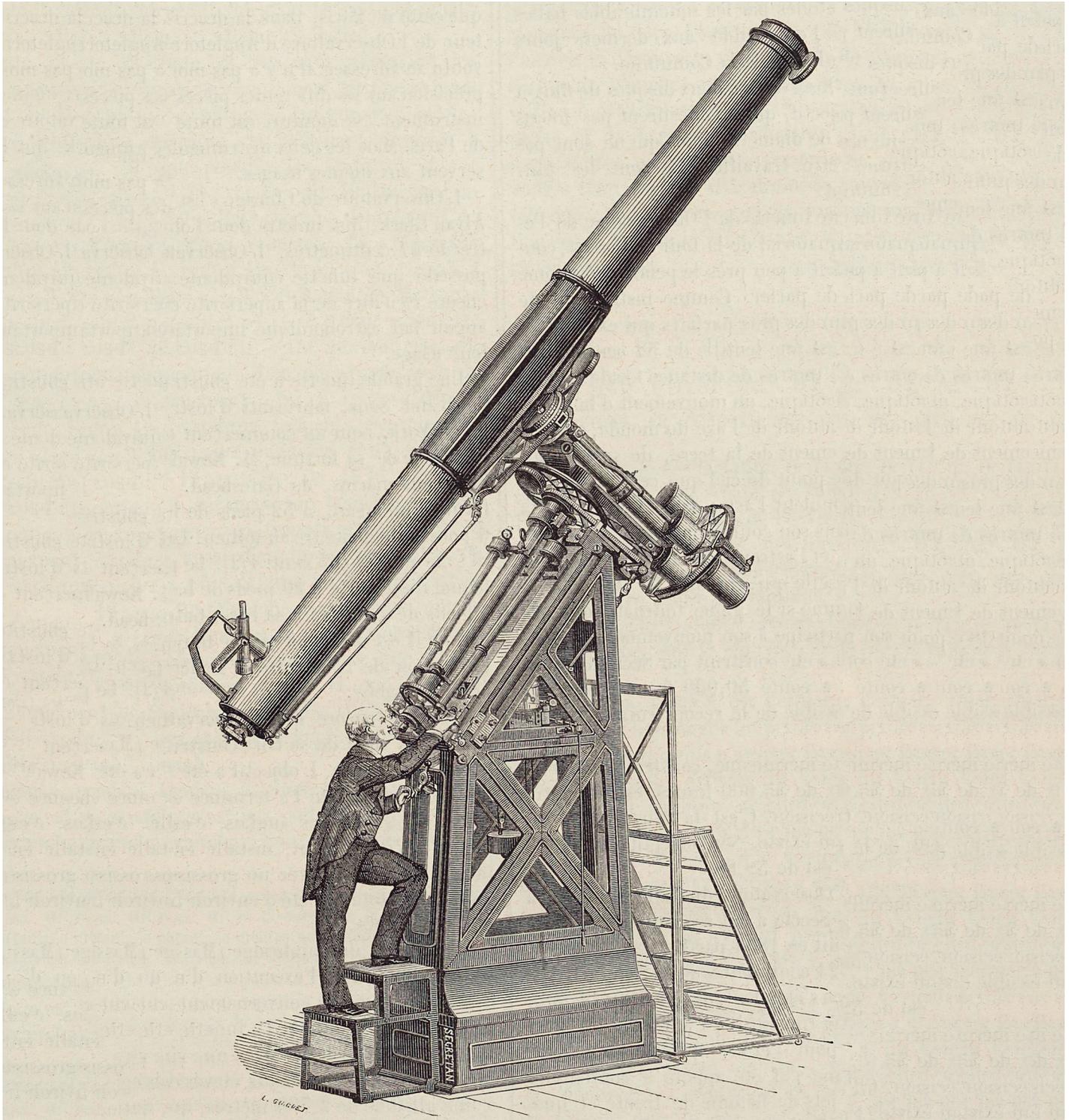


Fig. 4 - Grand équatorial de 0,38 m de l'Observatoire de Paris.

Tiré de *La Nature : revue des sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie*, n° 24, 15 nov. 1873, p. 373.

Domaine public (source [gallica.bnf.fr/Bibliothèque nationale de France](http://gallica.bnf.fr/Bibliothèque_nationale_de_France))

Ce défaut disparaît dans le nouveau dispositif imaginé par Lœwy, mais d'autres apparaissent comme nous le verrons par la suite. Avant cela, revenons sur le principe de l'équatorial coudé. Il se compose de deux tubes : un tube oculaire dirigé vers le pôle Nord de la sphère céleste qui peut recevoir un mouvement de rotation autour de son axe de figure, qui coïncide par conséquent avec l'axe du monde ; un second tube, le tube objectif qui se meut parallèlement au plan de l'équateur. À son extrémité, un cube

en fonte. Il est monté sur un tube concentrique situé à l'intérieur du tube objectif, susceptible de prendre un mouvement de rotation autour de l'axe de figure commun. L'une des faces du cube porte une ouverture où est inséré l'objectif dont l'axe est perpendiculaire à la face du cube. Son axe rencontre un premier miroir plan incliné à 45°. Le rayon se réfléchit ensuite sur un second miroir plan, également incliné à 45°, puis parcourt l'axe de rotation du tube oculaire pour rencontrer le plan focal de l'objectif (fig. 2).

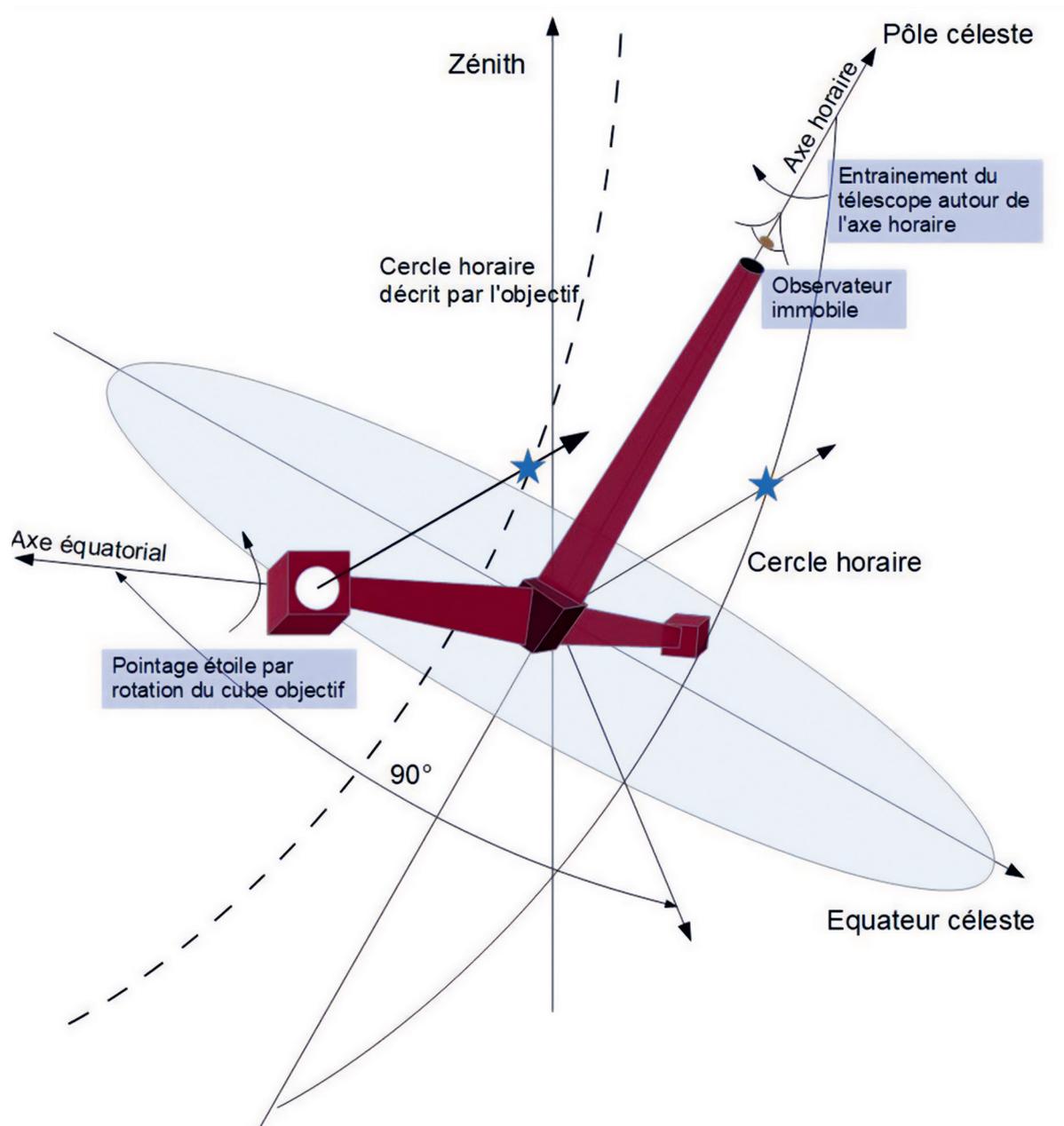


Fig. 5 - Principe de fonctionnement de l'équatorial coudé de Lœwy.

Crédits P. Descamps/IMCCE

Pour le pointage d'un astre, l'opérateur agit sur le tube oculaire (mouvement en ascension droite) pour diriger l'axe du tube objectif vers le point de l'équateur dont l'ascension droite est supérieure ou inférieure de six heures (soit 90°) à celle du point que l'on veut viser. Il agit ensuite sur le tube objectif intérieur (mouvement de déclinaison) de façon à faire décrire à l'axe principal de l'objectif le cercle horaire jusqu'à passer par le point choisi sur la sphère céleste (fig. 5). Lorsque Lœwy présente devant l'Académie des sciences ses premiers résultats obtenus à l'équatorial coudé (fig. 6) lors de la séance du 19 mars 1883, il résume ainsi tous les avantages du nouvel instrument :

Tous les organes destinés aux diverses manœuvres de l'instrument, les pinces de calage, le cercle de déclinaison, le cercle horaire, toutes les manettes pour opérer les mouvements rapides

ou les mouvements doux, se trouvent à portée de la main de l'observateur. On voit aisément que, par suite de cette disposition, l'observateur est à même d'explorer toutes les régions de l'espace sans quitter son siège. On reconnaît également que l'installation de cet instrument présente presque autant de fixité qu'une lunette méridienne, et de plus que, l'objectif tournant uniquement dans le sens de l'équateur, on a moins à craindre, après son réglage, le déplacement relatif des deux verres ; par suite de la stabilité de l'instrument et de la fixité de l'objectif, il est facile de comprendre que l'on peut effectuer la mesure de distances angulaires plus considérables. Pour procéder aux études, on recule la cabane roulante, qui découvre ainsi la lunette, tandis que l'observateur, installé sur son fauteuil à l'abri de toutes les intempéries du temps, peut se livrer à toutes les recherches astronomiques

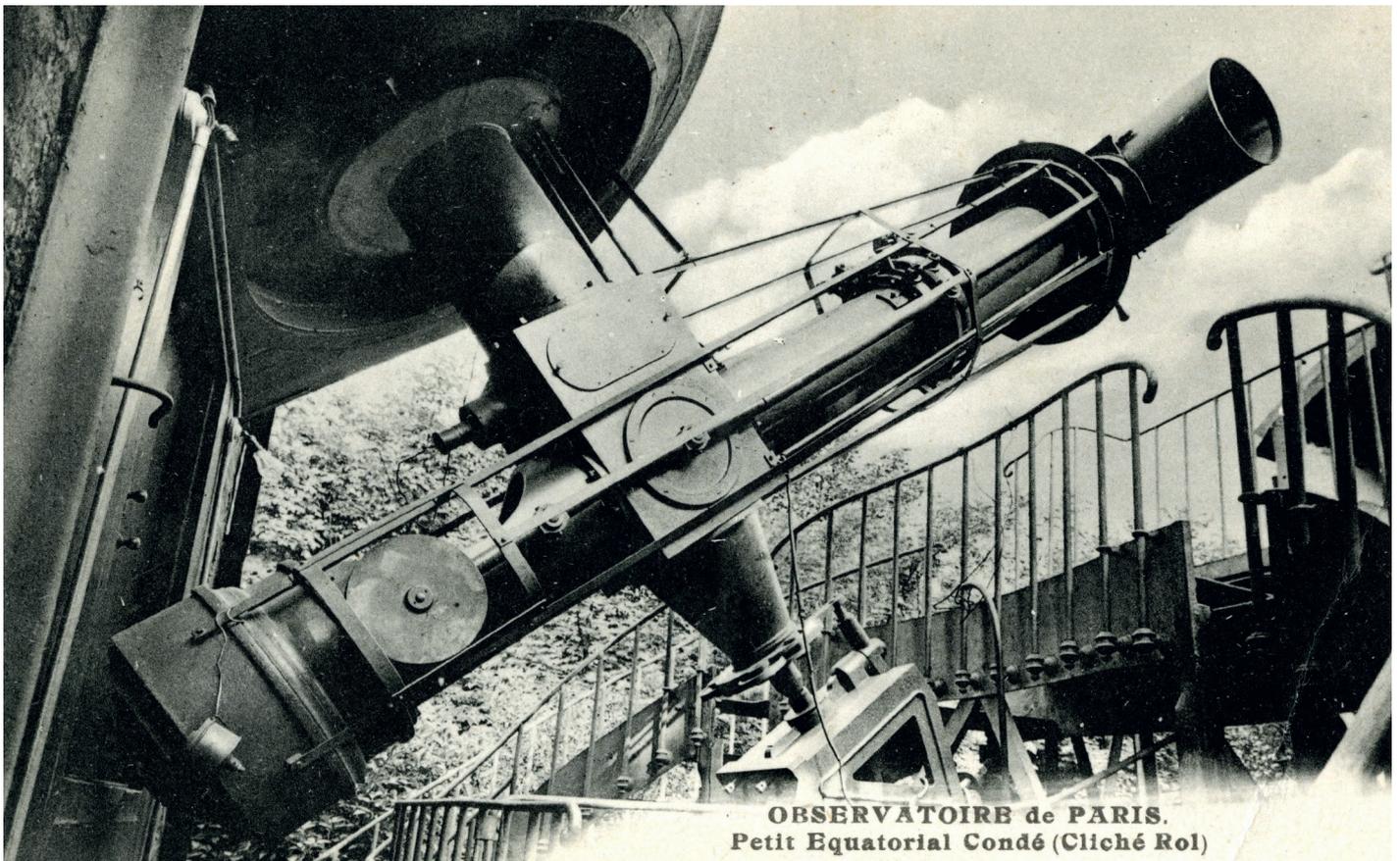


Fig. 6 - Premier équatorial coudé de l'Observatoire de Paris.

L'une des dernières photographies avant son démantèlement.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

dans les mêmes conditions qu'un naturaliste qui, dans son cabinet de travail, étudie à l'aide du microscope la structure ou l'organisation d'un corps quelconque.

Avec ce premier succès, Lœwy ne compte pas s'arrêter en si bon chemin, il imagine alors une nouvelle méthode de détermination de la constante de l'aberration – phénomène découvert par Bradley en 1728 (voir l'épisode 7 : « [Diviser pour mieux mesurer](#) » paru dans la Lettre d'information de septembre 2023) – en se servant des avantages de son coudé et en le munissant d'un double miroir plan taillé sur un bloc de verre unique.

L'aberration ne fait pas consensus

S I LE PHÉNOMÈNE de l'aberration annuelle des étoiles est connu depuis le premier quart du XVIII^e siècle, sa quantification précise est cependant toujours non assurée un peu plus de 150 ans plus tard. Rappelons que ce phénomène provoque un déplacement apparent de la position des étoiles par la combinaison de deux mouvements, celui de la Terre le long de son orbite autour du Soleil et celui de la lumière. Ce déplacement apparent se fait toujours dans le sens de la progression de la Terre dans l'espace (fig. 7).

Il s'exprime mathématiquement par l'intermédiaire d'une constante – l'une des constantes fondamentales de l'astronomie de position de la fin du XIX^e siècle – nommée *constante de l'aberration* k définie par le rapport de la vitesse de translation dans l'espace de la Terre v à la vitesse de la lumière c :

$$k = \frac{v}{c} = \frac{2\pi a}{cT\sqrt{1-e^2}} \quad [1]$$

Dans cette formule, a est le demi-grand axe de la Terre et T la période sidérale de la Terre. L'irruption de l'excentricité de l'orbite terrestre e résulte d'une correction apportée à la valeur de la vitesse moyenne v de la Terre sur son orbite prise égale à la moyenne entre la vitesse maximale (vitesse périégée) et la vitesse minimale (vitesse apogée). La détermination de la constante de l'aberration revêt donc une double importance : elle permet de connaître précisément les positions vraies des étoiles, mais constitue également, de façon plus cruciale, un moyen d'accéder à la valeur de la parallaxe solaire – en d'autres termes la distance moyenne Terre-Soleil – à partir de la connaissance de la vitesse de la lumière. En effet, l'aberration est directement fonction de la vitesse orbitale de la Terre et par conséquent de sa distance au Soleil. Par exemple, sur Neptune, dont la vitesse orbitale est de 5,4 km/s, l'aberration n'est que de 3,7", quantité que nous n'aurions pu mesurer avant le XIX^e siècle si nous avions été des Neptuniens ! La formule qui exprime cette relation entre la parallaxe solaire π et la constante de l'aberration k est la suivante :

$$\sin \pi = \frac{2\pi R_o}{kcT\sqrt{1-e^2}} \quad [2]$$

Dans cette formule, e est l'excentricité de l'orbite terrestre, c la vitesse de la lumière et R_o le rayon de la Terre.

L'aberration est généralement mesurée par l'observation de la variation de la déclinaison d'une étoile durant une année entière. Les premières valeurs réellement précises sont obtenues par Friedrich Bessel (1784-1846) à partir des observations de Bradley à Greenwich menées jusqu'en 1754 et publiées en 1818 dans ses *Fundamenta astronomiae*, $k = 20,475''$; par Friedrich Georg Wilhelm von Struve (1793-1864) au moyen d'observations à la grande lunette méridienne de Dorpat entre 1814 et 1821, $k = 20,445''$. Après l'édification de l'observatoire de

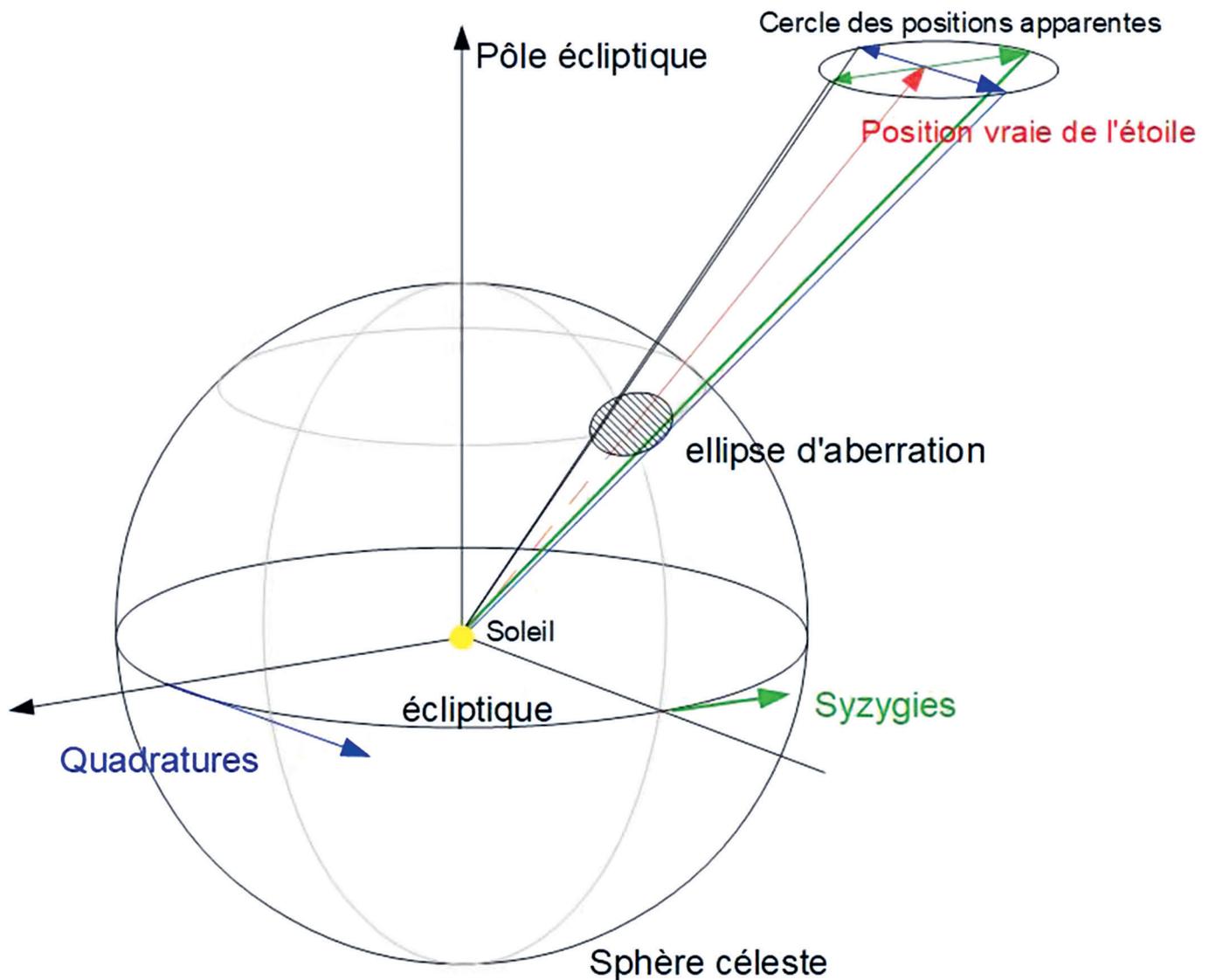


Fig. 7 - Schématisation de l'aberration annuelle des étoiles.

La distance du vrai lieu de l'étoile à son lieu apparent décrit un cercle dont le plan est parallèle à celui de l'écliptique, et par conséquent ce cercle se projette dans le ciel (sur la sphère céleste) en une ellipse, dont le grand axe est parallèle au plan de l'écliptique, le petit axe lui est perpendiculaire. Dans les syzygies (oppositions ou conjonctions de l'étoile et du Soleil), l'aberration est « toute en longitude » et la plus grande possible. Dans les quadratures, l'aberration est toute en latitude, l'étoile paraît à l'extrémité du petit axe de son ellipse.

Crédits P. Descamps/IMCCE

Pulkovo en 1843, son fils, Otto Wilhelm von Struve (1819-1905), publie en 1883 un synopsis des différentes mesures de la constante de l'aberration réalisées à l'observatoire de Pulkovo par différents observateurs (Struve, Schweize, Peters, Gylden, Wagner et Nyren) à l'aide des trois instruments méridiens disponibles. Les valeurs s'étalent entre 20,463" et 20,517" donnant une valeur moyenne est de 20,492".

Vers la fin du XIX^e siècle, le désaccord est encore profond entre les astronomes pour s'accorder sur une même valeur de l'aberration et donc de la parallaxe solaire (fig. 8). La constante de l'aberration est alors l'une des plus difficiles à déterminer. Lœwy décide en 1886 de s'y confronter, notamment en profitant des avantages de son nouvel instrument coudé.

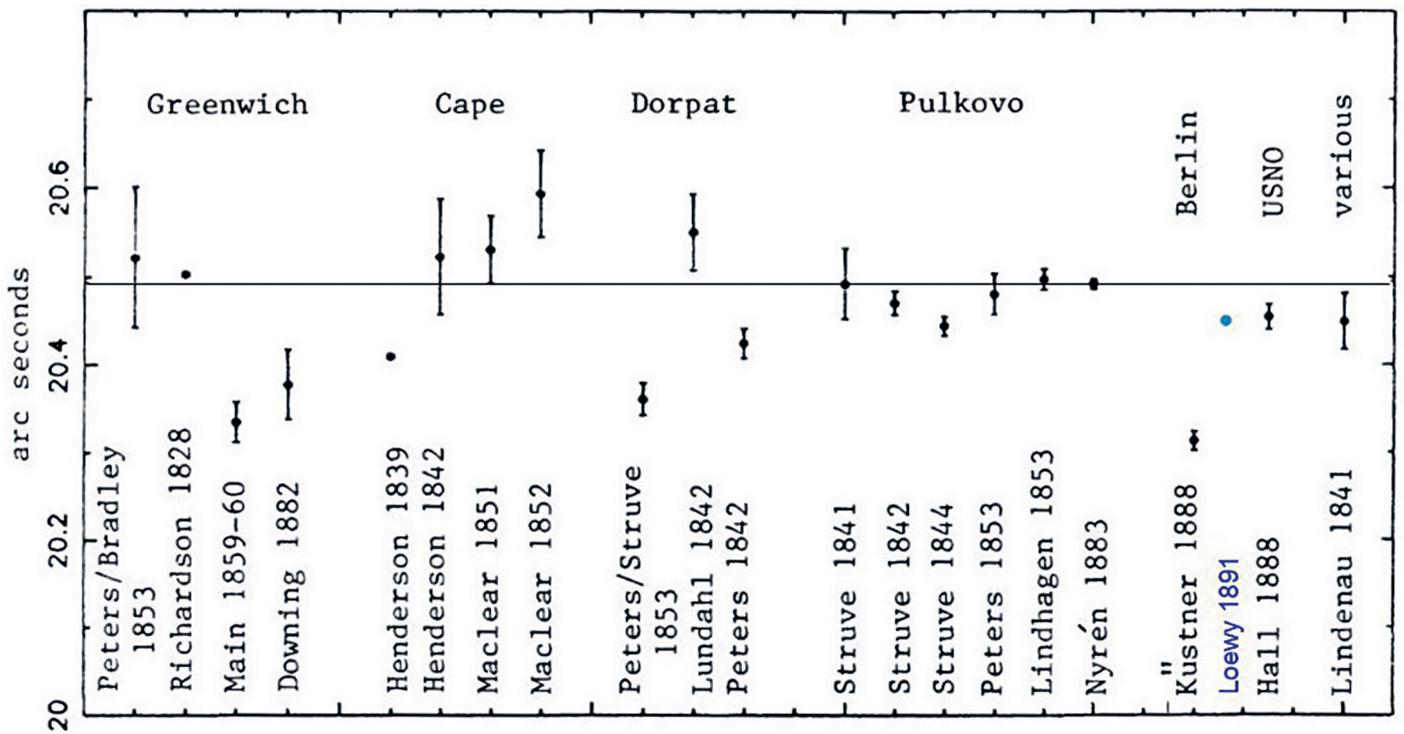


Fig. 8 - Valeurs de la constante de l'aberration mesurée entre 1828 et 1888 en différents observatoires d'après Harkness (1891) et Krisciunas (1990).

En trait horizontal plein, la valeur actuelle de la constante de l'aberration. La valeur obtenue par Loewy en 1891 ($20,447'' \pm 0,024''$) est ici reportée, bien qu'elle ne figure pas dans l'illustration originale.

Crédits Krisciunas (1990)

Un prisme argenté pour la mesure de l'aberration annuelle

LŒWY part du constat suivant :

Les méthodes employées jusqu'ici pour déterminer la constante de l'aberration ont conduit à des valeurs fort divergentes : les écarts dépassent plus de 20 fois les erreurs probables. C'est que ces diverses déterminations sont sujettes à des causes d'erreurs systématiques très difficiles à éliminer ; par exemple la méthode qui a donné jusqu'ici les meilleurs résultats, et qui déduit cette constante d'observations de latitude faites avec un instrument placé dans le premier vertical, suppose la latitude parfaitement invariable, ce qui est loin d'être

certain. Bien au contraire, on peut affirmer qu'il se produit des variations, au moins apparentes, et qui, tant qu'on ne saura pas en tenir compte, vicieront les résultats fournis par cette méthode.

Les méthodes ordinaires évoquées par Lœwy sont des méthodes absolues. Il s'agit de suivre et de mesurer la variation d'une grandeur, latitude ou déclinaison d'une étoile par exemple, en l'espace d'au moins six mois. La plupart du temps à l'aide d'instruments méridiens, mais aussi d'instruments installés dans le premier vertical – grand cercle de la sphère céleste perpendiculaire au méridien et passant par le zénith – idée mise en place par Friedrich Struve à l'observatoire de Pulkovo dès sa fondation en 1841. Il faut donc compter sur les incertitudes liées à la nutation du pôle terrestre ou tout autre mouvement en mesure de modifier la latitude du

lieu d'observation, et plus généralement sur toute erreur sur la position de l'équateur et de l'écliptique qui servent de plans de référence. Ces méthodes sont donc particulièrement exposées aux erreurs systématiques de toutes sortes.

Lœwy imagine par conséquent une méthode différentielle qu'il expose et développe dans une série de mémoires présentés à l'Académie des sciences dans les années 1886 et 1887. Elle revient à concevoir une sorte de compas céleste géant qui permet de mesurer de très grandes séparations angulaires formées par des couples d'étoiles. Le procédé différentiel en soi n'est pas nouveau, puisqu'il a déjà fait ses preuves lors des mesures des premières parallaxes stellaires

(voir l'épisode 8 : « [La troisième dimension](#) » paru dans la Lettre d'information d'octobre 2023). L'avantage de la méthode différentielle est l'élimination des erreurs qui proviennent de la précession et de la nutation, puisque la distance entre le couple d'étoiles n'est pas affectée par les mouvements de l'axe du pôle céleste ou de l'écliptique. Comment donc mesurer de très grandes distances angulaires dans le ciel ? Lœwy y répond par un double miroir placé en face de l'objectif de l'équatorial coudé, capable de tourner autour de l'axe du télescope et ainsi de regarder simultanément deux étoiles dans deux zones très séparées du ciel (fig. 9). Les distances entre ces étoiles sont affectées de la seule aberration. Les deux images sont ainsi rapprochées en les faisant se réfléchir sur les deux faces du miroir.

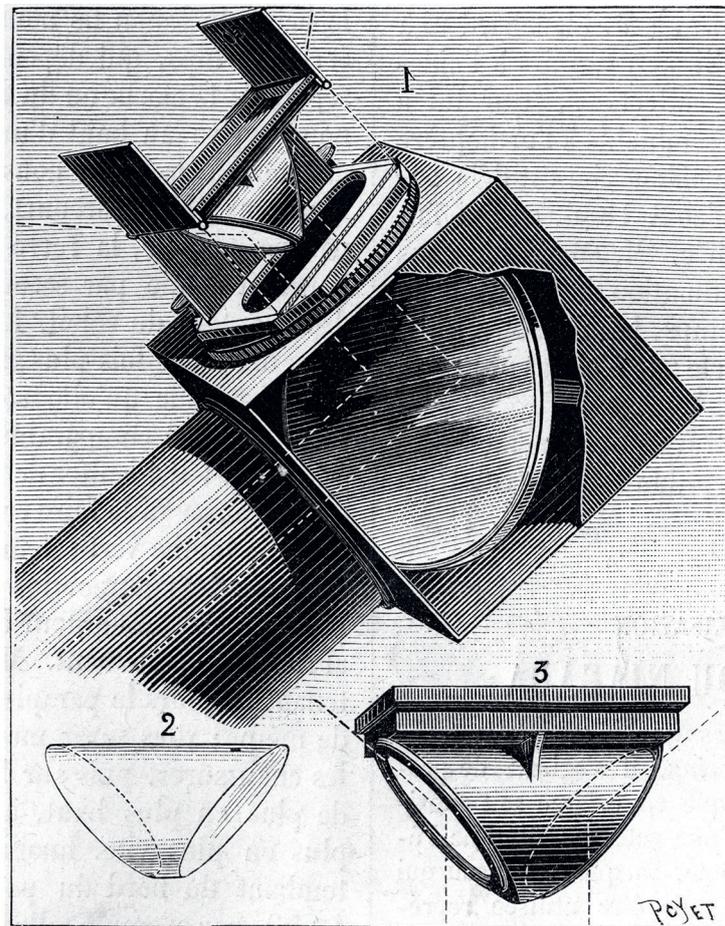


Fig. 9 - Dispositif imaginé par Lœwy pour la mesure de la constante de l'aberration.

Un double miroir taillé sur le même bloc de verre (2) est placé en avant de l'objectif du petit équatorial coudé avec ses couvercles que l'on baisse pour fermer les cubes lorsque l'observation est terminée (1). L'image 3 montre le prisme fixé dans sa monture. Le prisme peut avoir un angle au sommet de 45° ou de 60° .

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

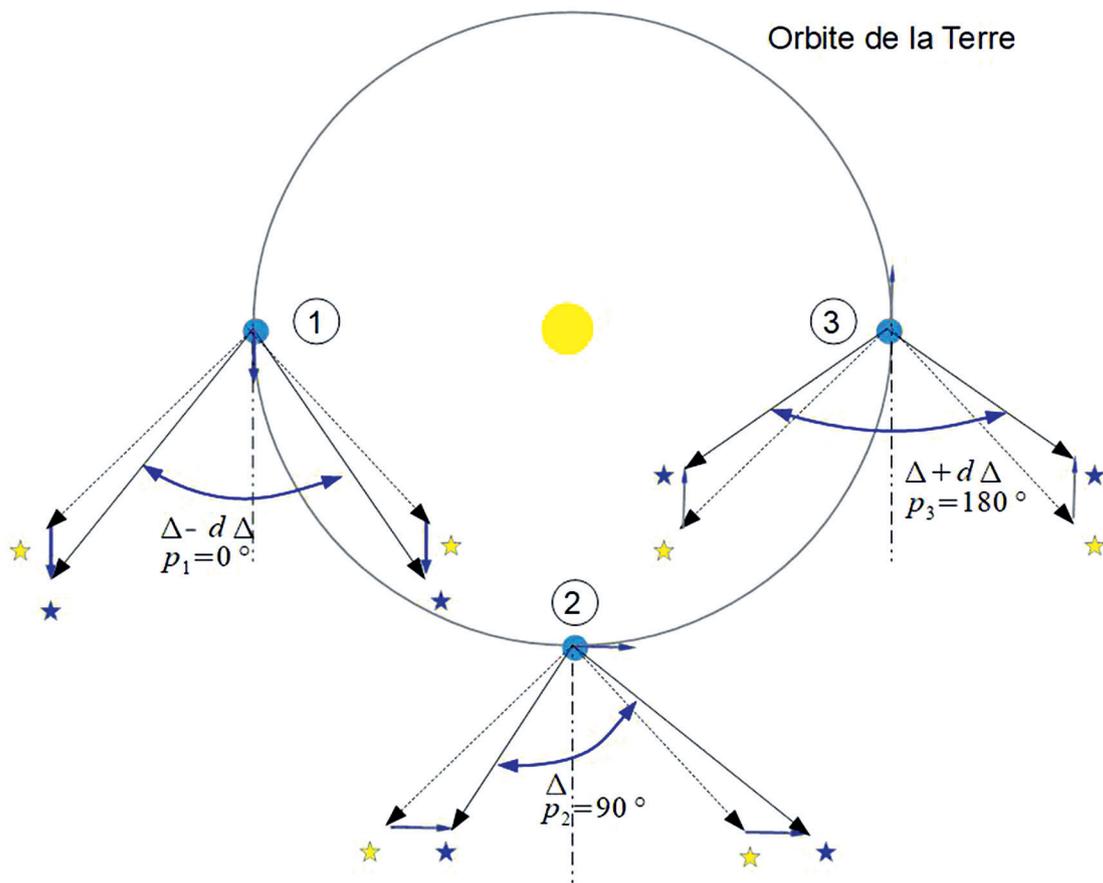
En toute vérité, il demeure un effet actif sur la distance angulaire apparente, celui de la réfraction. Quels que soient les plans choisis pour observer les astres (méridien, premier vertical ou autre), le problème de la correction de réfraction reste la cause principale d'erreurs difficiles à réduire. En revanche, le choix du cercle de hauteur – ou de l'observation à des hauteurs égales ou distances zénithales égales – reste le choix le plus judicieux, car il présente le très grand avantage d'opérer dans des conditions de réfraction quasi identiques. C'est le choix fait par Lœwy. Il démontre qu'en choisissant d'observer deux étoiles à une même hauteur, l'effet différentiel de la réfraction est une petite correction indépendante de la distance zénithale. Alors que dans les observations ordinaires de position, la réfraction croît rapidement lorsque la hauteur diminue (ou la distance zénithale augmente), dans le cas présent, il reste constant, uniquement fonction de l'angle du miroir double. C'est une propriété géométrique très générale qui se comprend par la compensation de deux effets antagonistes, lorsque la réfraction augmente proportionnellement à la tangente de la distance zénithale, dans le même temps, son influence sur la distance angulaire des deux étoiles diminue dans les mêmes proportions. Ce n'est pas exactement vrai cependant, car, en toute rigueur, la température et la pression atmosphérique varient d'une observation à l'autre, modifiant ainsi la loi de la réfraction. Ce faisant, Lœwy se situe dans les tendances de son époque pour la mise au point d'instruments spécialement conçus pour l'observation dans un cercle de hauteur donnée selon la méthode proposée par Gauss en 1808-1809 en vue de la détermination des coordonnées géographiques d'un lieu à partir des instants de passages d'étoiles à une même hauteur – méthode dite *des hauteurs égales*. Le premier instrument de ce type est à mettre au compte de Seth Chandler (1846-1913) de l'observatoire du *Harvard College* avec son almuncantar de 1883. Puis, au tournant du XIX^e siècle, entre 1900 et 1905, est imaginé l'astrolabe à prisme par Auguste Claude (1858-1938) et Ludovic Driencourt (1858-1940), qui sera notablement amélioré dans

les années 1950 par André Danjon (1890-1967) pour le rendre impersonnel.

En les observant une première fois lorsqu'elles sont à une même hauteur, puis une seconde fois six mois plus tard dans la même position, il est possible d'en déduire la valeur de la constante d'aberration k selon la formule obtenue par Lœwy, dans laquelle Δ est la séparation angulaire d'un couple d'étoiles, p l'angle de la médiane avec la direction du Soleil et $d\Delta$ la petite variation de l'arc angulaire produite par l'aberration qui sera la quantité observable à mesurer :

$$d\Delta = 2k \sin \frac{\Delta}{2} \cos p \quad [3]$$

Cette formule vaut pour des étoiles zodiacales pour lesquelles Lœwy montre que l'effet de l'aberration est le plus fort. En outre, le coefficient qui s'applique à la distance angulaire est sinon supérieur au moins égal à celui des méthodes ordinaires. Pour une paire donnée, l'effet est proportionnel au cosinus de l'angle entre la direction bissectant l'angle entre les directions des deux étoiles et la direction du mouvement de la Terre (fig. 10). Par un choix judicieux du couple d'étoiles, Lœwy montre que la variation de distance de deux étoiles provoquée par l'aberration peut au maximum se monter à $2\sqrt{2}k$ pour un miroir double ouvert à $A = 45^\circ$, donc pour des étoiles séparées angulairement d'environ 90° . Cette action est plus considérable que celle occasionnée sur les coordonnées de chaque étoile (variation égale à $2k$ au bout de six mois), de sorte que la mesure de l'aberration en est rendue plus précise. Pour un autre choix d'étoiles, en prenant $p_1 = 45^\circ$ et $p_2 = 135^\circ$, soit au bout de trois mois d'observation, l'effet induit de l'aberration est égal à $2k$, identique à ce qui est obtenu au bout de six mois avec les méthodes classiques absolues. En vérité, les observations se feront toujours pour $p_1 = 135^\circ$ et $p_2 = 225^\circ$ de façon à éviter la lumière du jour comme le dit Lœwy lui-même, ce qui donne « le grand avantage



$$E_{3,1} = 2d\Delta = 2k\sin\frac{\Delta}{2}(\cos(p_1) + \cos(p_3))$$

$$E_{3,1} = 2\sqrt{2}k \quad \text{si } \Delta = 90^\circ$$

Fig. 10 - Méthode de Lœwy.

Deux étoiles zodiacales séparées angulairement de 90° sont observées durant six mois. Les positions vraies sont repérées par les étoiles jaunes, les positions apparentes par les étoiles bleues. Le déplacement dû à l'aberration se fait selon la direction du mouvement de la Terre (flèches bleues). Selon le théorème de Lœwy : « l'action exercée par l'aberration sur le grand arc reliant deux étoiles est proportionnelle au cosinus de l'angle formé entre la médiane et la direction du mouvement ». Par conséquent, lorsque la médiane fait un angle de 90° avec la direction du mouvement (position 2), l'effet de l'aberration sur la distance angulaire est nul. Il est en revanche maximal lorsque la médiane se retrouve dans la même direction que le mouvement (positions 1 et 3).

Crédits P. Descamps/IMCCE

de pouvoir exécuter tout le travail dans le courant de la soirée ». La médiane se trouve alors très loin du Soleil, à une longitude différente de celle du Soleil de 135° à 225° . Lœwy fait remarquer que la méthode est encore plus avantageuse avec $A = 60^\circ$, mais plus l'angle du miroir double est grand, plus la hauteur du couple d'étoiles choisies s'abaissera, Lœwy donne ainsi pour $A = 90^\circ$, $h = 30^\circ$, et pour $A = 120^\circ$, $h = 14^\circ 29'$. Il mènera finalement ses observations et mesures avec un miroir double ouvert à 45° .

Grâce à ce miroir double et moyennant le choix de couples d'étoiles observées à la même hauteur et situées dans la zone de l'écliptique, Lœwy peut conclure que « l'aberration exerce sur la distance de deux étoiles une action plus considérable que sur les coordonnées de chaque étoile ; au point de vue de la solution rigoureuse du problème, le procédé basé sur la mesure de la distance présente donc une supériorité notable sur la méthode ordinaire reposant sur l'observation de l'une ou l'autre des deux

coordonnées d'un astre ». Par sa méthode, Lœwy trouve en 1891 la valeur $k = 20,447'' \pm 0,024''$. Ce type de mesure ne sera pas renouvelé ni tenté avec un miroir double ayant un angle de 60° . Lœwy entreprendra en 1893 avec Pierre Puiseux (1855-1928) une recherche visant à rassembler toutes les déterminations de la constante de l'aberration et, par une combinaison d'entre elles à l'aide d'une nouvelle pondération de chacune, à produire une valeur résultante de la constante de l'aberration.

George Cary Cosmtock (1855-1934), directeur de l'observatoire Washburn de l'université du Wisconsin, reprendra la méthode de Lœwy dès 1887, mais avec $A = 60^\circ$. Pour lui, l'hypothèse de la constance de A lors de mesures à six mois d'intervalle est difficilement recevable du fait des déformations thermiques. Il évalue l'erreur commise avec un prisme ouvert à 60° , et donc en attrapant des étoiles à grande distance zénithale, en obtenant empiriquement une loi des erreurs probables sur la valeur de la constante k . Il montre que cette ouverture doit être utilisée, car alors les erreurs systématiques qui proviennent de la déformation du prisme entre les époques d'observation sont éliminées. Avec près d'un millier de mesures, il publie en 1895 la meilleure détermination de la constante de l'aberration à cette époque, soit $20,443'' \pm 0,010''$ en faisant remarquer que si toutes les corrections liées aux erreurs personnelles systématiques sont négligées, il obtient alors la valeur de $20,499''$, laquelle se rapproche précisément de la valeur moyenne de $20,492''$ déduite de toutes les mesures faites par différentes méthodes et obtenue en 1883 par Asaph Hall (1829-1907).

Lors de la Conférence internationale des étoiles fondamentales – la première du genre – tenue à Paris du 18 au 21 mai 1896, organisée par le Bureau des longitudes et présidée par Lœwy qui en était le vice-président (Faye en était le président), réunissant les directeurs des différents services d'éphé-

mérides astronomiques (France, Grande-Bretagne, États-Unis, Russie, Allemagne, Pays-Bas), Simon Newcomb présente un rapport visant à homogénéiser les éphémérides par l'emploi d'un jeu unique de constantes fondamentales (précession, nutation, parallaxe, aberration, masses...). La conférence s'arrête sur une valeur du coefficient de l'aberration de $20,47''$. Cette valeur sera violemment critiquée par Seth Chandler qui, en 1898, dans un article publié dans *The Astronomical Journal*, reproche à Lœwy de ne pas considérer la petite variation de la latitude d'un lieu provenant du déplacement du pôle de rotation terrestre, phénomène nouveau qu'il avait lui-même découvert en 1891. Il s'agit d'une petite oscillation libre d'une dizaine de mètres d'amplitude du pôle instantané de rotation de la Terre et ayant une période de 433 jours environ. Cette oscillation induit des erreurs dans la détermination de la latitude, et donc dans les déclinaisons, de l'ordre de $0,03''$ qui sont très supérieures à l'erreur probable de détermination de la constante de l'aberration. Il déclare sans autre forme de procès :

D'après ses remarques sur le caractère et le poids qu'il attribue au résultat de W. Struve, il est évident qu'il a contribué de manière substantielle à définir sa valeur moyenne. Mais son refus de reconnaître la variation de latitude a dû gravement porter atteinte à cette valeur moyenne ; car il a été démontré que la détermination de Struve est gravement affectée des variations de latitude. Tout ce que l'on peut dire, c'est qu'il indique une constante quelque part entre $20,47''$ et $20,50''$. M. Lœwy a utilisé, sans changement, la valeur originale qui s'avère maintenant fallacieuse. Il est démontré que toutes les déterminations de l'aberration à partir des distances zénithales d'une seule étoile, d'un seul côté du pôle, sont fallacieuses. Jusqu'à ce qu'il le fasse, nous devons exclure sa détermination si elle contient des résultats obtenus de cette manière, ce qui est probable. Mais qu'il en soit ainsi ou non, le résultat de Lœwy est vicié.

De nos jours, la constante de l'aberration n'est plus une constante fondamentale, mais une constante dérivée. Depuis les assemblées générales de l'UAI (Union astronomique internationale) de 2009 et de 2012, elle se déduit des valeurs adoptées pour l'unité astronomique et pour la vitesse de la lumière. Ainsi, selon la résolution B2 de l'UAI 2012, l'unité astronomique a maintenant une valeur conventionnelle constante fixée exactement à $a = 1 \text{ au} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$ (par ce fait, la parallaxe solaire devient également une constante dérivée $\pi = 8,794\,143''$). Pour la vitesse de la lumière, selon la résolution B2 UAI 2009 et selon les nouvelles définitions du mètre et de la seconde (révision du Système international d'unités adoptée le 16 novembre 2018 par la 26^e CGPM – Conférence générale des poids et mesures – entrée en application le 20 mai 2019), $c = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s}$. Par ailleurs, la période sidérale de la Terre vaut $T = 365,256\,360$ jours et son excentricité $e = 0,0167$. À partir de la formule [1], on peut alors calculer la valeur précise dérivée de la constante de l'aberration $k = 20,492\,6535''$.

Lœwy recevra la médaille d'or de la Royal Astronomical Society en février 1889 pour l'invention de l'équatorial coudé et sa nouvelle méthode de détermination de la constante de l'aberration. Pour des raisons de santé, il ne pourra faire le voyage à Londres, mais déjà il voit plus grand pour son équatorial coudé.

Toujours plus grand ...

EN JANVIER 1884, dans un rapport présenté au conseil de l'Observatoire sur la nécessité de créer une succursale de l'établissement en dehors de la ville de Paris, Ernest Mouchez dresse un état des lieux catastrophique concernant les graves menaces que fait peser sur les observations la situation de l'Observatoire encerclé par la ville de Paris.

Peu après son arrivée à la tête de l'Observatoire, Mouchez entreprend de doter l'établissement d'une grande lunette équatoriale de 0,74 m de diamètre et de 15 m de longueur focale qui exige une gigantesque coupole de 20 m à 22 m de diamètre (fig. 11). Mais l'espace manque. C'est pourquoi, dès 1879, Mouchez obtient du conseil municipal de Paris la vente d'un ancien jardin à un prix suffisamment réduit pour que l'État se l'approprie. La première opération est l'établissement du petit équatorial coudé en 1882. Il ne reste plus qu'à mettre en place le projet de construction d'une grande lunette équatoriale sur les nouveaux terrains acquis. C'est alors que le sondage du sous-sol révèle l'existence de nombreuses galeries de carrières et de catacombes jusqu'à une profondeur de 25 m à 30 m. La consolidation du sous-sol est dès lors nécessaire, mais son coût absolument prohibitif met un terme au projet de grande coupole.

Lœwy n'a alors plus d'obstacle pour proposer, dans la séance de l'Académie des sciences du 3 novembre 1884, la construction d'un second équatorial coudé, à l'objectif plus grand et à la longueur focale inégalée. Il développe l'avantage énorme qu'il y a à augmenter le ratio focal F/D (longueur focale rapportée au diamètre de l'objectif), lequel demanderait de coûteux investissements dans le cadre d'un équatorial classique avec un dôme monumental. En outre, en augmentant la focale, on réduit d'autant les aberrations chromatiques et son pouvoir séparateur est augmenté jusqu'à atteindre la limite de séparation propre à un instrument de 0,27 m d'ouverture soit 0,5". Lœwy appuie sa requête par les témoignages enthousiastes devant la *Royal Astronomical Society* de deux illustres astronomes lors de leur passage à Paris. Le premier, David Gill (1843-1914), directeur de l'observatoire du cap de Bonne-Espérance :

À Paris, j'ai été particulièrement intéressé par l'équatorial coudé de M. Lœwy, j'étais très désireux de connaître la définition de cet instrument, elle dépend de deux réflexions

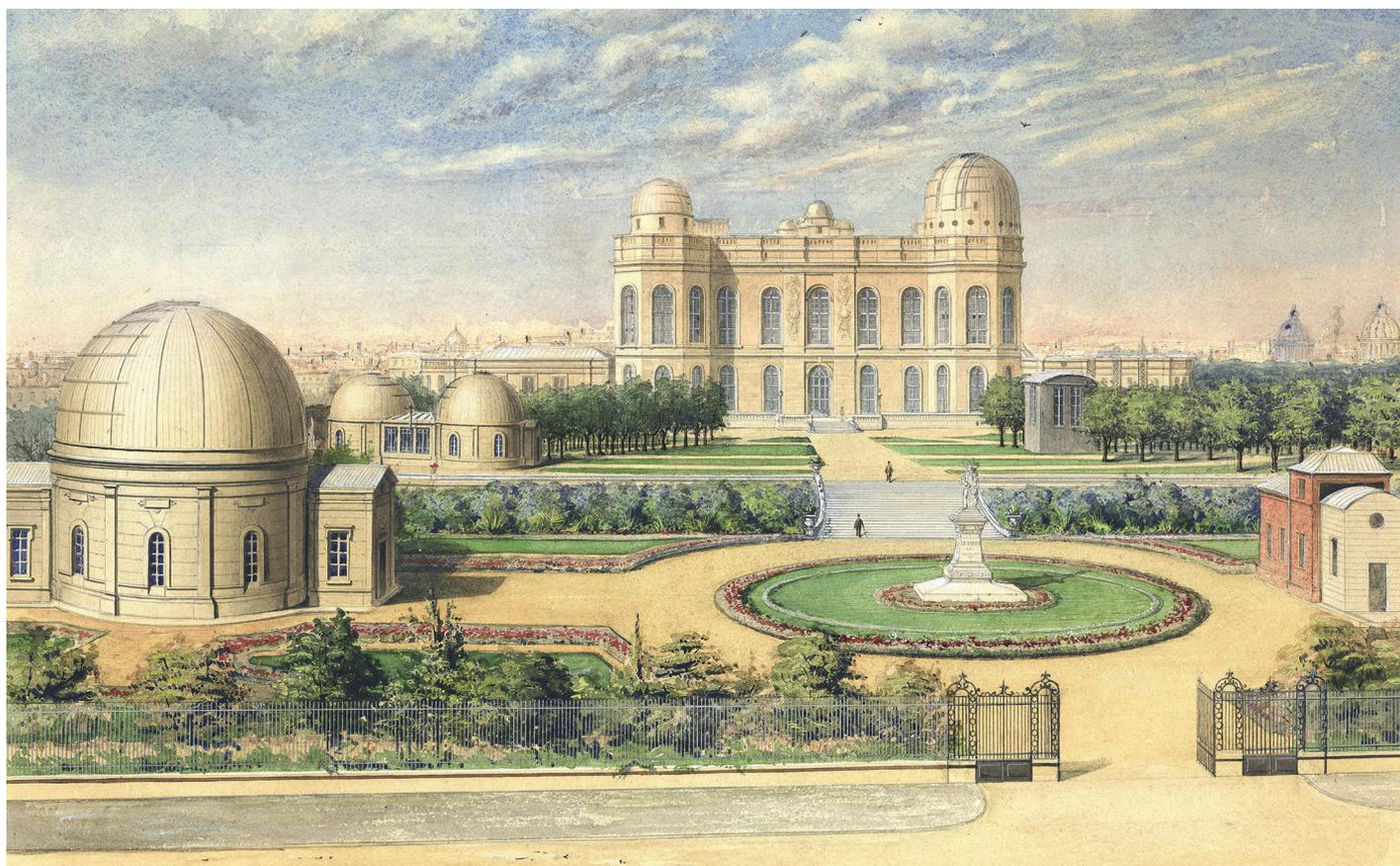


Fig. 11 - Projet d'agrandissement de l'Observatoire de Paris en 1882 et photographie montrant l'Observatoire en 1891.

Le petit coude apparaît à droite sur le dessin du projet de 1882. Au premier plan de la photographie de 1891, sur la gauche, le bâtiment abritant le grand coude qui a remplacé le projet de grande lunette équatoriale abandonné en 1884.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

sur deux miroirs plans. Il ne peut s'élever aucun doute sur l'avantage pratique de se trouver, par une nuit froide, installé dans une chambre confortable, au lieu de rester exposé aux intempéries dans un observatoire ordinaire. L'instrument est absolument stable ; quelle que soit la violence du vent, vous pouvez toujours observer d'une manière très aisée. Dans une belle nuit, vers 11h, nous nous rendîmes à l'Observatoire et nous dirigeâmes la lunette sur ω lion, et je suis obligé de dire que je n'ai jamais constaté d'anneaux de diffraction mieux définis que dans cet instrument. Ils étaient parfaitement circulaires, et, au foyer, le disque stellaire était tellement net que je ne l'avais jamais vu ainsi jusqu'à présent.

Le second, Norman Lockyer (1836-1920), astronome amateur de renom, n'hésitant pas à présenter l'équatorial coudé comme l'un des « instruments de l'avenir » :

Je suis très heureux d'entendre l'opinion du Dr Gill sur l'équatorial coudé, car je dois dire que je pense que c'est un des instruments de l'avenir. [...] S'il était question de monter un télescope de 27 ou 28 pouces, je voudrais le faire construire comme l'équatorial coudé, et pour une raison que le Dr Gill n'a pas indiquée, raison toute matérielle et budgétaire. [...] Si l'on peut réduire les frais d'installation des bâtiments à quelques centaines de livres sterling seulement, il est alors permis de ne pas regarder de si près à la perfection des anneaux de diffraction.

Lœwy peut ainsi terminer son intervention sur un vibrant plaidoyer en faveur de ce grand coudé à la focale démesurée :

Il nous reste à exprimer le vif regret de n'avoir pas aujourd'hui les moyens de construire un puissant équatorial coudé et de fournir ainsi d'une manière

complète la preuve de la valeur de ce système, convaincu que je suis, je le répète, qu'au point de vue purement optique même, cette lunette l'emporterait, à cause de l'achromatisme supérieur, sur un équatorial ordinaire de même ouverture. Jusqu'à présent, il n'a pas été possible, dans les grands instruments, en augmentant dans un certain rapport les objectifs, d'accroître dans le même rapport leurs qualités optiques ; avec le nouveau système et pour la première fois, il sera permis de réaliser cette condition si recherchée, si essentielle.

Il sera entendu. Après l'abandon du projet de grande lunette équatoriale, Mouchez convainc le ministre d'attribuer ce qu'il reste des fonds initiaux à la construction d'un grand coudé pour une somme finale de 400 000 francs avec deux objectifs interchangeables, dont un pour la photographie.

Le projet prend corps en 1888. Le grand coudé aura un objectif de 0,60 m avec une longueur focale de 18 m. Ainsi conçu, l'échelle au foyer sera de 100 μ m par seconde de degré. La Lune vue à travers un tel instrument aura alors une taille impressionnante de 18 cm. Certes des inquiétudes s'expriment sur la perte de lumière lors des réflexions sur les deux miroirs plans, ou au sujet de leur déformation sous l'effet de leur propre poids par flexion ou en raison des variations de température, ou encore au sujet de ces doubles tubes – intérieur et extérieur – au sein desquels des courants d'air peuvent naître du fait de leur inégale température. Lœwy a établi la théorie complète des équatoriaux coudés, tant les aspects optiques que mécaniques et notamment l'épineuse question des flexions. Il supervise la construction réalisée par Gautier. Quant à l'optique, elle est le résultat du travail des deux opticiens de génie, les frères Henry.

La construction du bâtiment abritant le grand cou-dé commence en mars 1889, et est achevée en avril 1890 pour une installation de la lunette en mars 1891 avec les premières observations dès l'été 1891. La construction métallique pèse 12 tonnes. Sa partie mécanique est d'une rare complexité, c'est un inventaire à la Prévert : tourillons, crapaudine, engrenage conique, cylindrique, galets, vis tangente, vis calente,

cercles dentés, poids moteur... La présence du bâtiment fait cependant obstacle au déplacement libre du tube objectif pour l'accès à certains angles horaires compris entre 8 h et 16 h. On ne peut donc viser que les points du ciel situés à moins de deux heures du méridien. Les réglages et les tests demanderont cependant beaucoup de temps tant le dispositif est complexe sur le plan mécanique (fig. 12, 13 et 14).

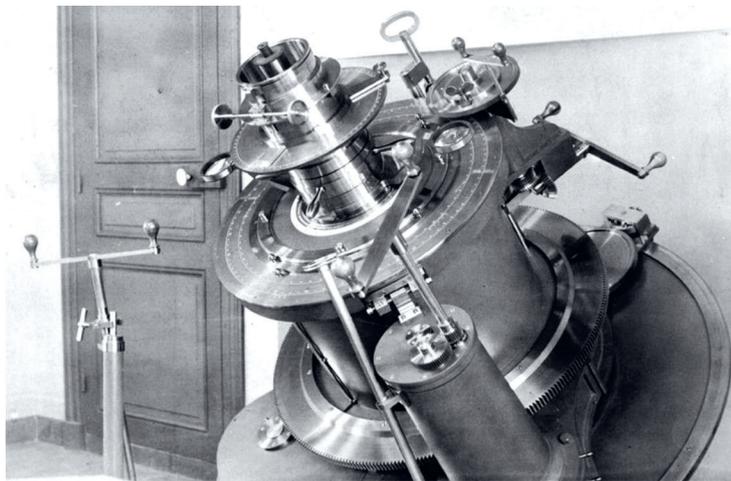
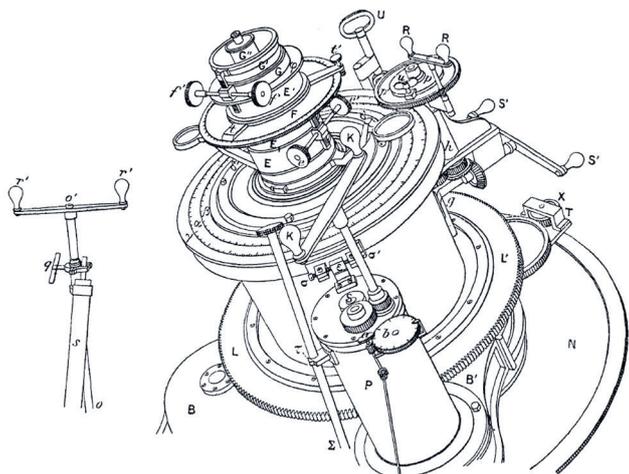


Fig. 12 - Le poste de commande de l'observateur au grand cou-dé.

On y distingue la manette K destinée à l'exécution des mouvements rapides en ascension droite, la manette S' pour les mouvements rapides en déclinaison, la manette r' (sur la gauche) commande par l'intermédiaire de la tige OO' la remontée du poids moteur – rondelles de plomb superposées – permettant le mouvement d'entraînement de la lunette sur une durée de 3 heures dont l'uniformité du mouvement est assurée par un régulateur à ailettes de Foucault. La couronne circulaire α divisée en 24 heures d'ascension droite est reliée au tube oculaire extérieur, et la couronne β est divisée de 0° à 180° pour les déclinaisons.

Crédits Puiseux (1895) (image de gauche), Bibliothèque de l'Observatoire de Paris (image de droite)

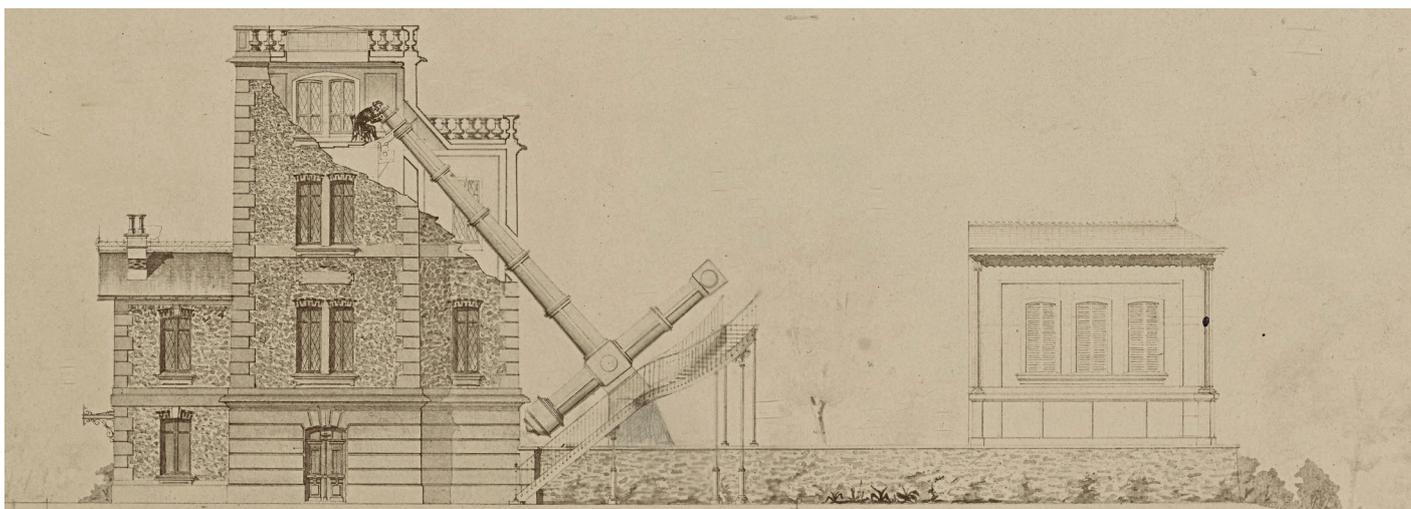


Fig. 13 - Plan de coupe du grand équatorial cou-dé, du bâtiment et toit roulant.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris



Fig. 14 - Le grand équatorial coude au début du xx^e siècle.

Crédits G. Blum/Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Alors que le 13 septembre 1892, Edward Barnard (1857-1923) découvre le cinquième satellite de Jupiter – Amalthée – à la grande lunette de l'observatoire Lick – la plus grande du monde avec une ouverture de 0,92 m –, Félix Tisserand, qui vient de succéder à Mouchez à la tête de l'Observatoire de Paris, annonce à la séance de l'Académie des sciences du 17 octobre 1892 que le nouveau satellite n'a pu encore être observé à l'Observatoire de Paris et que tous les espoirs sont maintenant placés dans le grand équatorial coude.

Naissance de l'astrométrie interférentielle

S I UNE VINGTAINE de parallaxes stellaires ont été mesurées dans le milieu du XIX^e siècle (voir l'[épisode 8 : « La troisième dimension »](#) paru dans la Lettre d'information d'octobre 2023), cependant le diamètre des étoiles, ou même des petites planètes, reste une *terra incognita*. L'idée commence à se répandre que celui-ci est très certainement imperceptible par rapport au diamètre apparent de l'image observée au foyer des lunettes et télescopes, puisqu'il reste invariablement insensible à toute augmentation du diamètre de l'ouverture ou à toute augmentation de la longueur focale.

En 1868, un physicien français Hippolyte Fizeau (1819-1896), dans un rapport prononcé devant l'Académie des sciences, fait cette simple remarque sur un ton anodin, « pour le dire en passant » :

Il existe pour la plupart des phénomènes d'interférence, tels que les franges d'Young, [...] une relation remarquable et nécessaire entre la dimension des franges et celle de la source lumineuse, en sorte que les franges d'une ténuité extrême ne peuvent prendre naissance que lorsque la source de lumière n'a plus que des dimensions angulaires insensibles ; d'où, pour le dire en passant, il est peut-être permis d'espérer qu'en s'appuyant sur ce principe et en formant, par exemple, au moyen de deux larges fentes très écartées, des franges d'interférence au foyer des grands instruments destinés à observer les étoiles, il deviendra possible d'obtenir quelques données nouvelles sur les diamètres angulaires de ces astres.

Fizeau, involontairement, jette ainsi les fondements de l'astrométrie interférentielle. Le phénomène d'interférence dont il parle est découvert par les expériences de Thomas Young (1773-1829) en 1803 qui, en admettant que la lumière se comporte comme une onde, déclare que « la lumière émise par une source qui atteint l'œil par deux chemins différents présente un maximum d'intensité si les longueurs des chemins sont séparées d'une distance égale à un multiple quelconque d'une certaine longueur ; et d'un minimum s'il s'agit d'un multiple impair de la moitié de cette longueur ; enfin cette longueur dépend de la couleur de la lumière ». Cette longueur dont il est question est la longueur d'onde de la vibration lumineuse. Par conséquent, deux vibrations lumineuses émises par une même source, mais ayant suivi et parcouru un chemin différent, se combinent entre elles pour former sur un écran un réseau de franges alternativement claires et sombres.

En 1850 et 1851, Fizeau développe ses idées, persuadé que les phénomènes d'interférence de la lumière peuvent permettre d'apprécier des dimensions angulaires stellaires beaucoup plus petites que celles produites au foyer des télescopes, lesquelles sont dictées par un autre phénomène lumineux, celui de la diffraction de la lumière par les bords de l'objectif qui limite la taille angulaire la plus petite observable au foyer d'un télescope.

Fizeau montre que si l'on prend deux fentes écartées d'une séparation d , la distance angulaire entre les franges (interfrange) vaut λ/d . Si le diamètre de la source est de cet ordre, les franges brillantes produites par un point quelconque du bord de la source se superposent aux franges sombres produites par le point de la source qui lui est diamétralement opposé, de sorte que les franges disparaissent pour laisser en lieu et place une plage de lumière uniforme. Il suffirait donc d'ajuster correctement la séparation des deux fentes pour obtenir la valeur du diamètre apparent d'un corps stellaire. La quantité λ/d est également le pouvoir séparateur du télescope lorsque d a pour valeur le diamètre de l'objectif. Ceci donne le plus petit diamètre observable par la méthode des franges.

L'idée de Fizeau tombe dans l'oubli. On doit sa résurrection et sa première mise en pratique une vingtaine d'années plus tard à un jeune astronome, Édouard Stephan (1837-1923). À cette époque, toute carrière en astronomie commence toujours par l'Observatoire de Paris qui est encore la seule institution nationale en la matière. Entré à l'Observatoire en 1862, très vite, Le Verrier le remarque et le nomme astronome adjoint pour le nommer en 1866 directeur adjoint chargé de la « succursale de Marseille ». Entre-temps, Le Verrier a également transféré en 1864 le grand télescope de Foucault de 80 cm de diamètre mis en service en 1862 à l'Observatoire de Paris (fig. 15). Promu astronome titulaire en 1872, il devient directeur de l'observatoire de Marseille. Dès 1873, Stephan reprend l'idée de

Fizeau et présente devant l'Académie des sciences le 13 avril 1874 sa tentative de mesure du diamètre apparent des étoiles.

Le télescope de Foucault est alors le plus grand instrument au monde. Stephan le munit d'un écran lunulaire afin de diaphragmer son ouverture dont les lunules sont découpées par deux cercles égaux

de 0,80 m. Leurs grands axes sont parallèles et distants de $d = 0,65$ m. Durant l'année 1873, Stephan applique son dispositif à l'observation de plusieurs étoiles, y compris Sirius. Toutes présentent des franges d'interférence. Il en résulte donc que les étoiles examinées ne peuvent posséder un diamètre apparent atteignant $\lambda/d = 0,158''$. Ces franges ont toujours été discernables seulement à partir d'un grossissement de 600 fois.

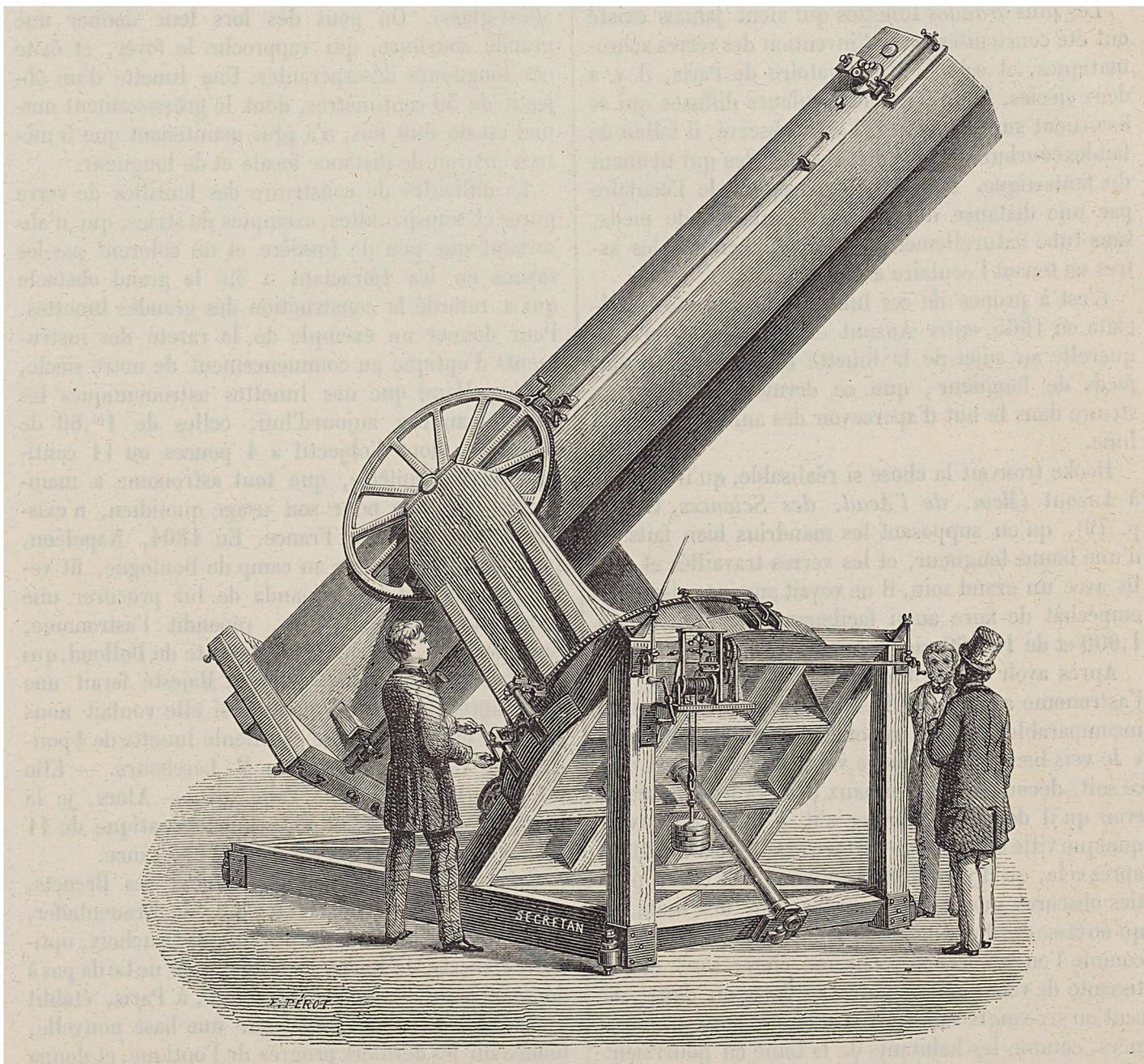


Fig. 15 - Télescope de 0,80 m de Foucault installé en 1864 à la « succursale de Marseille » de l'Observatoire de Paris.

Tiré de *La Nature : revue des sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie*, n° 24, 15 nov. 1873, p. 371.

Domaine public (source gallica.bnf.fr/Bibliothèque nationale de France)

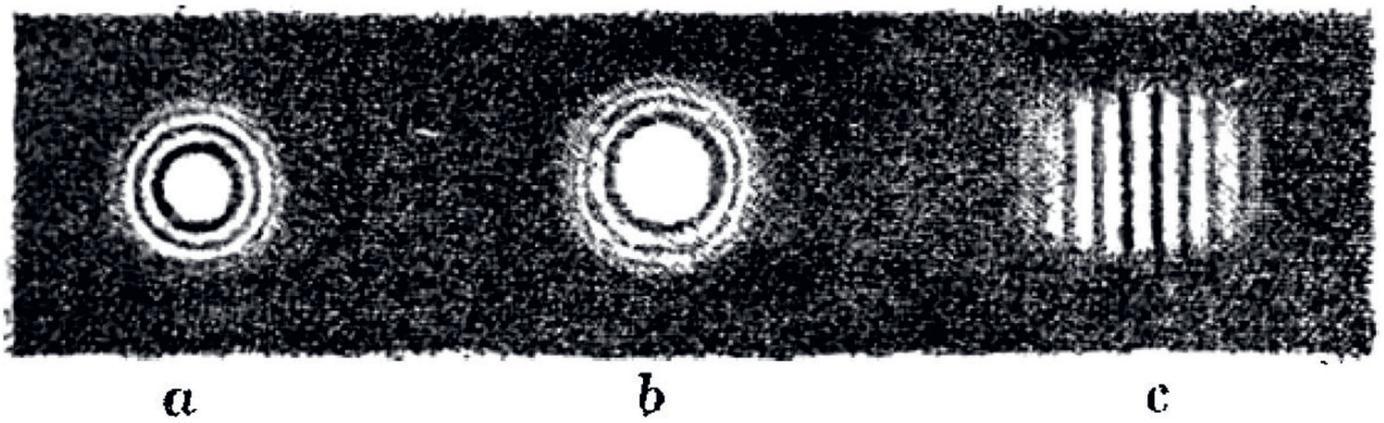


Fig. 16 - Apparence de l'image au foyer d'un télescope selon Michelson (1891).

a : image d'une source ponctuelle (étoile) ; b : image d'une source de taille angulaire finie ; c : image produite par deux fentes pratiquées sur le capuchon de l'objectif. Dans la tache centrale de la figure de diffraction, une série de bandes équidistantes parallèles aux fentes (ici verticales) apparaissent, la bande centrale est la plus brillante.

Crédits Michelson (1891)

De nouveau, après cette première tentative au cours de laquelle des franges d'interférence sont observées pour la première fois au foyer d'un télescope, la méthode entre en hibernation durant une vingtaine d'années. Elle redevient un objet d'intérêt tout d'abord en 1890 avec l'américain Albert Michelson (1852-1931), puis en 1898, en France, à l'Observatoire de Paris, aux foyers du grand équatorial coudé avec Maurice Hamy (1861-1936).

Jeu de masques

ALBERT MICHELSON est un physicien passé par l'*US Naval Observatory* de Washington qui est parti poursuivre ses études en Europe entre 1881 et 1883, puis revenu aux États-Unis pour être professeur de physique dans différentes universités. Il est notamment venu en France visiter le Collège de France et l'École polytechnique de Paris. Si son nom est principalement attaché à sa détermination expérimentale très précise de la vitesse de la lumière dès 1878, Michelson peut aussi être considéré comme le père véritable de l'astrométrie

interférentielle. En 1890, bien que ne faisant jamais référence aux travaux antérieurs de Fizeau et de Stephan, Michelson développe la théorie complète des méthodes interférentielles appliquées aux mesures astronomiques de précision. On sait depuis longtemps⁽³⁾ que même dans un télescope théoriquement parfait, l'image d'un point lumineux est composée d'une série de cercles concentriques dont le centre commun est une tache lumineuse résultant du phénomène de diffraction de la lumière (fig. 16, image a). Ce système de cercles peut être facilement observé en examinant n'importe quelle étoile brillante avec un télescope muni d'un diaphragme circulaire qui diminue l'ouverture effective. Dans le cas d'un objet de taille angulaire finie, l'image dessine un système d'anneaux complet autour de chaque point de l'image géométrique (fig. 16, image b). Les principales différences entre les deux images – source ponctuelle et source étendue – sont la plus grande taille du disque central brillant et la moindre clarté des anneaux qui l'entourent dans le cas d'une source étendue. Plus le disque apparent est grand, plus l'apparence de l'image correspond à celle de l'objet ; et plus l'objet est petit, plus il correspond à la figure de diffraction stellaire (fig. 16, image a), et plus il sera difficile de mesurer sa taille réelle.

(3) On The Undulatory Theory Of Optics: Designed For The Use Of Students In The University, Airy, 1866.

Cependant, si l'on couvre l'objectif d'un capuchon muni de deux fentes dont la largeur et la distance sont réglables, des phénomènes d'interférence lumineuse se superposent au phénomène de diffraction. Si une telle combinaison est focalisée sur une étoile brillante, au lieu d'une image de l'étoile, le foyer de l'instrument montre une série de bandes d'interférence colorées avec un centre blanc sur la tache centrale de diffraction, les bandes étant disposées de façon équidistante et parallèlement aux deux fentes. Ces franges sont alternativement sombres et brillantes (fig. 16, image c).

Michelson propose dans un premier temps d'utiliser la position de la frange centrale comme mesure astrométrique de la position de l'étoile dont la précision serait alors de 10 à 50 fois meilleure que celle obtenue par la mesure du centre de l'image télescopique de l'étoile considérée. Il souligne également l'un des avantages les plus prometteurs de la méthode : la mesure de la taille angulaire des petites sources lumineuses (satellites, astéroïdes, étoiles). L'observable est alors ce qu'il nomme la *visibilité* qui est une mesure du niveau de contraste des franges. Cette visibilité est une quantité numérique comprise entre -1 et 1, elle vaut 0 lorsque les franges disparaissent. Michelson montre que pour une séparation donnée des fentes, le réseau de franges n'est plus discernable à l'œil nu, sa visibilité étant alors très proche de 0. Si l'on continue à écarter les fentes, les franges réapparaissent, mais sont beaucoup moins lumineuses. Elles disparaissent de nouveau pour une nouvelle valeur de la séparation, mais sont beaucoup plus difficiles à observer en raison du très faible contraste. Il établit la relation correspondante qui existe entre la séparation des fentes (d) et la taille angulaire de la source (ε), en fonction de la longueur d'onde de la radiation (λ), exprimée en secondes de degré, pour la première disparition des franges d'interférence :

$$\varepsilon = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad [4]$$

Michelson applique sa méthode et son dispositif sur l'équatorial de 12 pouces (30 cm) de l'observatoire Lick du mont Hamilton en 1891. Les premières mesures du diamètre des satellites galiléens de Jupiter sont faites du 2 au 7 août 1891 (table 1, valeurs ramenées à la distance moyenne de Jupiter). Il indique une distance de 4 inches (10 cm) entre les fentes pour la disparition des franges. Remarquons que ces mesures sont indépendantes de l'instrument utilisé, celui-ci ne servant qu'à produire une image. Dans les méthodes classiques (observation directe de la taille de l'objet par des moyens micrométriques), la diffraction élargit les images focales, tandis que dans la méthode des franges, la diffraction ne joue aucun rôle dans la taille des franges et la netteté de celles-ci permet de bien saisir l'instant de leur disparition.

La méthode de Michelson trouve un écho en France auprès du jeune Maurice Hamy (fig. 17), entré comme élève astronome à l'Observatoire de Paris en 1884, nommé aide-astronome en 1887, puis astronome adjoint en 1893. Cette même année, il est chargé par Félix Tisserand de rédiger un mémoire sur les travaux de Michelson en interférométrie dans le Bulletin astronomique de l'Observatoire de Paris (T.X. de décembre 1893). Cinq ans plus tard, Hamy améliore et précise les résultats de la méthode en proposant un nouveau formulaire qui prend en compte la largeur des fentes. La méthode de Michelson appliquée à des astres de très faible luminosité se heurte à une difficulté majeure : la quantité de lumière passant par les fentes est insuffisante pour que l'œil puisse discerner les franges. Hamy propose donc d'augmenter la largeur des fentes (l) relativement (d) à leur écartement, mais il est alors nécessaire de corriger la formule [4] de la façon suivante :

$$\frac{\varepsilon d}{\lambda} = 1,22 + 0,94 \left(\frac{l}{d} \right)^2 + \dots \quad [5]$$

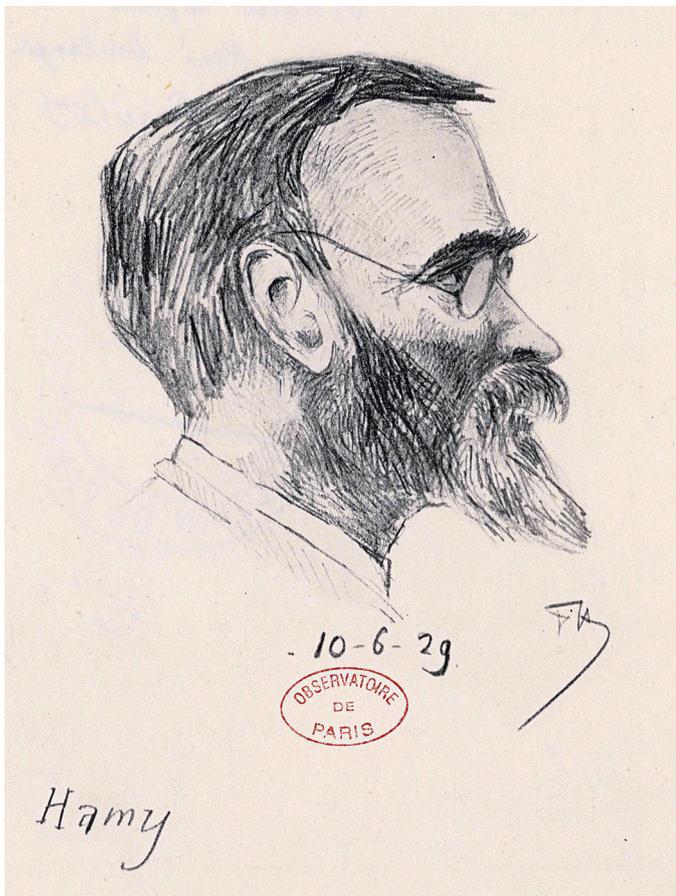


Fig. 17 - Maurice Hamy (1861-1936).

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Pour la radiation du visible, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, cela donne l'expression suivante immédiate dans laquelle l'écartement d est exprimé en millimètres :

$$\varepsilon d = 126",1 + 96",5 \left(\frac{l}{d} \right)^2 \quad [6]$$

À l'été 1898, Tisserand autorise Hamy à appliquer ses calculs et sa méthode au grand équatorial coudé pour l'observation des satellites galiléens, mais aussi, pour la première fois par la méthode interférentielle, à la mesure de la petite planète Vesta. Son mode d'observation est des plus élémentaires, le premier astronome amateur venu pourrait en faire usage. Des fentes sont découpées dans des écrans en carton de manière à provoquer l'évanouissement des franges pour des sources de lumière de diamètres qui décroissent de dixième et dixième de seconde de degré, et sont successivement placées

devant l'objectif. La largeur des fentes et leur séparation sont toujours dans un rapport fixe $l/d = 1/3$ pour chaque écran. Les diamètres de la source sont calculés au préalable à l'aide de la formule [6] et inscrits sur chacun des écrans. Lorsque survient la disparition des franges, il suffit alors de relever sur le dernier écran employé la valeur du diamètre de la source correspondante.

Le grand équatorial coudé est alors le plus grand des instruments dont dispose l'Observatoire de Paris. Son grand diamètre permet d'avoir des écartements de fentes importants qui autorisent la mesure de diamètres apparents aussi petits que $0,20''-0,25''$, potentiellement le diamètre de certaines petites planètes. L'idée de faire croître progressivement la largeur des fentes avec leur écartement selon une proportion fixe est particulièrement pertinente dans le cas des petits corps qui sont par essence des corps faiblement lumineux. Il est donc fondamental de capter le maximum de lumière possible à travers les deux fentes du dispositif lorsqu'elles sont proches de leur écartement maximal, de façon à rendre le système de franges suffisamment lumineux. Enfin, la très longue focale de 18 m permet d'obtenir des grossissements très importants afin de favoriser également l'observation à l'œil nu des franges au foyer.

Les résultats obtenus par Hamy à partir d'observations menées tout au long du mois de juin 1898 sont en très bon accord avec ceux de Michelson et ceux obtenus par Barnard en 1895 sur le grand équatorial de 36 pouces (0,91 m) de l'observatoire Lick, à l'aide de mesures micrométriques classiques (voir table 1). Hamy note avec satisfaction, au sujet de la mesure du diamètre apparent de Vesta, l'étonnant accord entre son résultat et celui de Barnard, mais demeure sceptique devant une telle coïncidence de valeurs obtenues. Pour tenter de mieux l'apprécier, il est possible de nos jours de comparer directement la mesure de Hamy avec la valeur exacte qui aurait dû être observée grâce à la connaissance précise des

dimensions et de la forme de Vesta. Celle-ci s'écarte notablement d'une belle et parfaite sphère, elle ressemble plutôt à une sorte de patate aplatie. Ainsi, en juin 1898, Vesta se présente à notre ami dans le plan du ciel, sous la forme projetée d'une ellipse dont la taille apparente du demi-grand axe est de 0,63" et celle du demi-petit axe de 0,51". Vesta se trouve alors à une distance de 1,229 au. Si l'on rapporte ces dimensions à la distance moyenne de 1,0 au, cela donne une ellipse de 0,77" par 0,62". Les franges d'interférence s'évanouissent donc complètement entre les masques découpés pour 0,5" et pour 0,6", ce qui explique la valeur moyenne donnée par Hamy.

Pour Hamy, le plus important après cette première tentative reste que « la méthode de l'évanouissement des franges a fourni un résultat qu'il eût été impossible d'obtenir par des mesures micrométriques, dans les conditions de l'expérience » qui étaient très mauvaises avec une forte agitation des images et une impossibilité de simplement soupçonner le disque de Vesta après avoir démasqué l'objectif. Il envisage de renouveler les mesures, dans des circonstances atmosphériques plus favorables et avec des écrans

intermédiaires à ceux qu'il a utilisés, mais aucune nouvelle observation ne sera plus jamais faite.

Bien que Michelson élabore la théorie de l'astrométrie interférentielle et invente l'interféromètre stellaire dans son article de 1890, et qu'il sera également le premier à réaliser une mesure de diamètre stellaire en 1921 – celui de Bételgeuse –, demeure toutefois la question de savoir dans quelle mesure il a été influencé par les travaux antérieurs de Fizeau et Stephan. Jamais, dans aucun de ses articles, il n'y fait référence. Fort vraisemblablement, Michelson n'a jamais eu connaissance des travaux français, principalement publiés en français dans les comptes rendus de l'Académie des sciences ou dans le Bulletin de l'Observatoire de Paris. Ainsi, en 1920, lorsqu'Anderson décrit son propre interféromètre pour étoiles binaires, il se déclare très surpris de constater que la méthode interférentielle n'a été jusqu'à présent appliquée qu'à la seule mesure des diamètres des satellites de Jupiter par Michelson. Ce n'est qu'à partir de 1928 que les travaux précurseurs français apparaissent dans les articles américains. En 1931, Pease passe ainsi en revue les travaux antérieurs :

Observateur	Date	Méthode	Io	Europe	Ganymède	Callisto	Vesta
F.W. Struve	1829	Micrométrie	1,015	0,911	1,488	1,273	-
G.W. Hough	1880	Micrométrie	1,114	0,980	1,778	1,457	-
A. Michelson	1891	Interférométrie	1,020	0,940	1,370	1,310	-
E. Barnard	1894	Micrométrie	1,048	0,874	1,521	1,430	0,540
M. Hamy	1898	Interférométrie	0,980	0,870	1,280	1,310	0,540
Actuellement			0,968	0,828	1,395	1,278	0,620

Tableau I – Diamètres apparents mesurés des satellites de Jupiter et de la petite planète Vesta.

Les valeurs sont données en secondes de degré et sont rapportées à la distance moyenne de 5 au pour les satellites galiléens et de 1 au pour Vesta. En gras, les meilleurs résultats obtenus. Hormis la mesure de Struve sur Callisto, la méthode interférentielle supplante incontestablement la méthode de mesure micrométrique.

Stephan avait déjà montré que les franges étaient visibles dans la lunette de Marseille de 80 cm, mais ses résultats étaient cachés dans les volumes des Comptes Rendus... Il restait à Michelson, en 1890, alors à l'université Clark, à développer cette idée de manière indépendante et à y ajouter un élément essentiel qui conduisit à la construction de l'interféromètre stellaire moderne.

Splendeur et misère des coudés

DÈS L'ENTRÉE EN FONCTION du petit équatorial coudé en 1884, l'instrument se met à proliférer rapidement parmi les observatoires français, sans doute sous la très forte influence de Mouchez et de l'Observatoire de Paris, têtes de pont de l'astronomie française. Ainsi, entre 1887 et 1892, Alger, Lyon, Besançon et Nice en sont équipés (voir table 2). À l'étranger, seul l'observatoire de Vienne acquiert un coudé en 1890. Vienne est la ville de naissance de Loewy et l'équatorial est offert par un compatriote fortuné féru d'astronomie, le baron Albert de Rothschild.

Hormis le grand coudé de l'Observatoire de Paris, les caractéristiques des coudés sont équivalentes : des objectifs de 32 cm à 40 cm avec une distance focale allant de 6 m à 10 m. Toutes les montures ont été construites par Gautier. Quant à la partie optique, ce sont les frères Henry qui s'en sont chargés. Bien que les mérites du coudé aient été loués par Gill et Lockyer devant la *Royal Astronomical Society*, aucun projet ne verra jamais le jour sous les cieux anglo-saxons. La Seconde Guerre mondiale précipitera l'extinction de l'ère éphémère des coudés.

Quant à Hamy, suite au départ d'Henri Deslandres de l'Observatoire de Paris en 1897 pour l'observatoire de Meudon, le directeur de l'Observatoire de Paris, Maurice Loewy, le charge de réorganiser le service d'astronomie physique. Après le décès de son beau-frère, l'astronome Octave Callandreau (1852-1904), il devient astronome titulaire en 1904. Finalement, en 1908, après le décès de Jules Janssen, il entre à l'Académie des sciences dont il deviendra le président en 1928. En 1924, il présente une nouvelle méthode pour la détermination précise du diamètre solaire au moyen d'une lunette diaphragmée par une fente rectiligne. L'objectif astrophysique est de comprendre l'évolution du Soleil par le suivi de celle de son diamètre, dont il pense qu'il se contracte de façon séculaire. Sa méthode n'atteindra jamais le stade de l'expérimentation.

Observatoire	Diamètre (m)	Longueur focale (m)	Mise en service	Fin de service	État
Paris – petit coudé	0,27	4,22 puis 5,25	1884	1952	Détruit en 1973
Alger	0,32	6,78	1888	1934	Bon
Lyon	0,35	7,80	1888	1949	Bon
Besançon	0,33	6,40	1890	1934	Démantelé en 1966
Vienne	0,38	9,25	1890	1925	Détruit
Paris – grand coudé	0,60	18,00	1891	1939	Démantelé en 1981
Nice	0,40	10,00	1892	1935	Rénové

Tableau 1 – Caractéristiques des sept équatoriaux coudés ayant existé.

D'après J. Lequeux, « The Coudé Equatorials », *Journal of Astronomical History and Heritage*, vol. 14, n° 3, 2011, p. 191.

Dans la plupart des observatoires, les coudés servent principalement à des fins astrométriques, telles que la mesure de position des comètes et des petites planètes (Alger, Besançon, Nice), l'observation d'occultations d'étoiles par la Lune (Alger, Lyon). À l'observatoire de Nice, des tentatives sont faites pour faire du coudé un chercheur de comètes, mais une seule découverte sera à son actif en 1898. À Lyon, ce sont les phénomènes des satellites de Jupiter qui sont observés jusqu'en 1897 pour ensuite céder la place à l'observation d'étoiles variables et, dans les années 1948-49, à la photométrie des galaxies. À Nice, le coudé vivra une courte résurrection en 1969 quand il sera adapté pour la photographie solaire. À Paris, les coudés serviront progressivement à la mesure des vitesses radiales par spectrographie. Le coudé se prête très bien à l'adaptation de spectroscopes souvent en porte-à-faux tant ils sont lourds. Le petit coudé, dans un premier temps, sera affecté au service de photométrie hétérochrone. Quant au grand coudé de l'Observatoire de Paris, le souvenir notable que l'on en garde est celui attaché à l'*Atlas photographique de la Lune* de Lœwy et Puiseux. C'est également ce qui est le plus souvent retenu de l'œuvre scientifique de Maurice Lœwy. La très longue focale de 18 m donne au foyer une image de la Lune à grande échelle (près de 18 cm de diamètre, soit environ une échelle de 100 μm par seconde de degré) et à haute résolution, permettant ensuite des agrandissements importants de 3 fois ou 23 fois. Un agrandissement de 23 fois donne une image de la Lune de 4 m, sur laquelle chaque millimètre représente près de 900 m sur la Lune. Après les premiers tests à l'aide de plaques de verre au gélatino-bromure d'argent, dont les dimensions sont de 18 cm \times 24 cm, propres à recevoir l'image de la Lune, l'entreprise photographique peut commencer en 1894. Au cours des 15 années d'observation menées entre 1894 et 1909, près de 6 000 clichés sont collectés, effectués durant 500 soirées d'observation. Les plus beaux clichés sont agrandis à une taille de 50 cm \times 60 cm pour constituer les planches des 12 fascicules de l'*Atlas* publiés entre 1896 et 1910 (fig. 18). Lœwy et Puiseux tenteront d'utili-

ser ces planches pour comprendre l'origine des caractéristiques lunaires et l'évolution de la Lune : ils pensent ainsi que les cratères ont une origine volcanique par analogie avec la Terre. L'*Atlas* se révélera aussi extrêmement utile aux scientifiques de la NASA dans le choix des sites possibles d'alunissage au sein du projet Apollo. À partir de 1911, le grand coudé est affecté au seul service d'astronomie physique dirigé par Hamy et à la spectroscopie.

Le grand coudé de l'Observatoire de Paris reste un instrument singulier, à part : il est le seul des coudés à avoir des dimensions aussi impressionnantes. Les autres coudés ne dépassent pas les 10 m de focale ou les 40 cm d'ouverture. Sa très longue distance focale est son atout principal, mais sera aussi la cause de sa perte. Il ne fait plus de doutes de nos jours que la monture équatoriale en coudé, avec toute sa complexité mécanique, ne peut supporter des distances focales plus grandes que 10 m. Certes, les avantages du coudé, dont son inventeur Maurice Lœwy a fait la promotion à l'envi, notamment auprès des financiers – gain de place, absence de grande coupole, confort de l'observateur –, s'accompagnent nécessairement d'inconvénients rédhibitoires dès lors que croissent les dimensions de l'instrument. Plus l'instrument est grand, plus il est lourd, plus il est difficile d'assurer la régularité du mouvement d'entraînement et le guidage par de petits et fréquents mouvements de rappel, et plus la perte de lumière lors de la réflexion sur les deux miroirs plans et la possible flexion des miroirs deviennent significatives. En outre, les deux miroirs plans, qui dans la lunette, réfléchissent le faisceau lumineux de l'astre, sont déformés par les variations de température, ce qui entraîne une déformation des images. Ceci explique pourquoi l'entreprise de l'*Atlas photographique de la Lune* s'est poursuivie pendant 15 ans, les déchets sont nombreux. Le principe même du coudé avec un tube mobile au sein d'un tube fixe est source de difficultés. Ainsi, en 1923, on peut lire dans le rapport sur l'état de l'Observatoire, que le grand équatorial coudé « par suite d'un vice de construction n'était pas herméti-

PHOTOGRAPHIE LUNAIRE
PLATON - MER DU FROID - PHILOLAUS

P1.LIII

Grand Equatorial Coudé

Observatoire de Paris



1902 Octobre 23 17^h33 t.m. Paris

Agrandissement 130 fois

Diamètre Lunaire 27^h23

PAR M.M. LEWY ET PUISEUX

Fig. 18 - Image de la Lune prise au grand coudé.

Tiré de l'Atlas photographique de la Lune.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

quement clos et la moindre brise déterminait des courants d'air à l'intérieur du tube de la lunette. Il en résultait une agitation presque continue des images et l'altération rapide de l'argenture des miroirs de l'instrument. On a remédié à cette situation, en installant, sur le cube portant l'objectif et le petit bras de l'équatorial, des couronnes ajustées, formant clapet, grâce à un système de ressorts de pression ». À cela s'ajoute en 1926 « l'état lamentable de la salle d'observation du Grand équatorial Coudé, provoqué par l'humidité amenée par la corniche de la terrasse supérieure. Si rien n'est fait, il faut s'attendre à un effondrement du plafond ! »

La situation est telle qu'en 1927, après la fusion des observatoires de Paris et de Meudon le 1^{er} janvier, son nouveau directeur, Henri Deslandres (1853-1948) – directeur sortant de l'observatoire de Meudon – présente un rapport accablant pour le grand coudé :

En fait, l'instrument ne rend pas les services qu'on attendait de lui ; il convient à mon avis de le supprimer et d'utiliser pour d'autres fins les pièces optiques qui sont bonnes. La question a été soulevée en 1927 au Comité national d'Astronomie, et j'ai suggéré que la lunette longue de 18 mètres, non plus coudée mais droite, pourrait être utilement transportée à Meudon, et maintenue fixe, enfoncée en terre, dans la direction de l'axe du monde, pour l'enregistrement photographique et continu des petits déplacements de l'axe et du pôle terrestre. On pourrait aussi lui adjoindre un sidérostade polaire, monté sur rails, tenu en réserve sur le côté et porté au moment voulu devant l'objectif. On aurait ainsi une image fixe des astres avec un seul miroir animé de mouvements simples, et, si ce miroir était en verre pyrex ou en quartz, les inconvénients signalés plus haut seraient écartés presque absolument.

Le grand coudé n'est pas arrêté et poursuit ses travaux. En 1932, de jeunes astronomes s'en emparent, André Couder (1897-1979), Henri Mineur (1899-1954) et Daniel Chalonge (1895-1977), la grande focale exerçant toujours son pouvoir d'attraction. De nouvelles études sont entreprises, l'instrument est utilisé comme astrographe pour l'analyse des amas trop serrés pour être observés dans un instrument à plus court foyer. La longueur focale de l'instrument est, en effet, plus de cinq fois supérieure à celle des instruments de la Carte du ciel. Le programme d'observation du grand équatorial coudé comprend l'étude des amas galactiques et globulaires en vue de la détermination aussi précise que possible des positions des étoiles de ces amas, l'instrument se prêtant particulièrement à ce travail. Trente-quatre clichés d'amas sont réalisés, comprenant notamment Praesepe, Hercule et Messier 37. Ce programme d'observation se poursuit jusqu'en 1939 lorsque la guerre vient y mettre un terme. Il ne reprendra jamais.

Les coudés finiront pas cesser toute activité vers les années 1950-1960, et le grand coudé sera démonté en 1981, près d'un siècle après sa mise en place (fig. 19 et 20). À l'Observatoire de Paris, lieu de naissance et de développement du coudé, il ne reste que le vieux bâtiment branlant, menaçant ruine, ayant abrité le grand coudé (fig. 21 et 22), l'un des vestiges de la splendeur passée de l'Observatoire.



Fig. 19 - Démontage du grand coudé à l'Observatoire de Paris en 1981.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris



Fig. 20 - Démontage du grand coudé à l'Observatoire de Paris en 1981.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris



Fig. 21 - Le bâtiment du grand coudé aujourd'hui.

Crédits Y. Gominet/IMCCE/Observatoire de Paris



Fig. 22 - Le bâtiment du grand coudé aujourd'hui.

Crédits Y. Gominet/IMCCE/Observatoire de Paris

Références

D. Bonneau, *Mieux voir les étoiles, 1^{er} siècle de l'interférométrie optique*, EDP sciences, 2019.

W. Harkness, *The Solar Parallax and its Related Constants, Including the Figure and Density of the Earth*, Washington, Govt. print. off., 1891.

K. Krisciunas, « Pulkovo Observatory's Status in 19th Century Positional Astronomy », *Inertial Coordinate System on the Sky*, Proceedings of IAU Symposium n° 141, held 17-21 October 1989 in Leningrad, USSR, Edited by J.H. Lieske and V.K. Abalakin. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1990, p. 15.

P.R. Lawson, « Principles of Long Baseline Stellar Interferometry: Course Notes from the 1999 Michelson Summer School August 15 –19 », 1999.

J. Lequeux, « The Coudé Equatorials », *Journal of Astronomical History and Heritage*, vol. 14, n° 3, 2011, p. 191.

M. Lœwy, « Détermination de la constante de l'aberration. Premier procédé d'observation », *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, séance du 21 février 1887, t. CIV, 1887, p. 455.

M. Lœwy, « Détermination de la constante de l'aberration. Premier et second procédé d'observation », *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, séance du 28 février 1887, t. CIV, 1887, p. 538.

M. Lœwy et P. Puiseux, « Détermination de la constante de l'aberration. Valeurs numériques déduites de l'observation de deux groupes de quatre étoiles », *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, séance du 19 mai 1891, t. CXII, 1891, p. 1089.

M. Lœwy et P. Puiseux, *Théorie du système optique composé d'une lunette astronomique et d'un double miroir plan : application à la mesure précise des distances en vue de l'étude de l'aberration et de la réfraction*, Paris : Gauthier-Villars, 1891.

A. Michelson, « On the Application of Interference Methods to Astronomical Measurements », *Philosophical Magazine*, 5th series, vol. 30, n° 182, 1890, p. 1-20.

A. Michelson, « Visibility of Interference-Fringes in the Focus of a Telescope », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 3, n° 16, 1891, p. 217-220.

F.G. Pease, « Interferometer Methods in Astronomy », *Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften*, vol. 10, Springer, 1931, p. 84-96.

P. Puiseux, « Description du grand équatorial coudé de l'Observatoire de Paris », *Annales de l'Observatoire de Paris, Mémoires*, t. 21, Paris : Gauthier-Villars, 1895, p. D.1-D.35.

T. Weimer, « Un instrument en voie de disparition : l'équatorial coudé », *Journal for the History of Astronomy*, 1982, p. 110.