



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

LA TROISIÈME DIMENSION

L'interrogation

À quelle distance se trouvent les étoiles ?

DEPUIS PTOLÉMÉE dans l'Antiquité jusqu'à Tycho Brahe à la fin du XVI^e siècle, les étoiles fixes se trouvaient juste au-delà de la planète la plus éloignée, considérées comme fixement attachées à une sphère, la *voûte céleste* – vestige langagier d'un passé où l'homme se considérait comme le centre de l'Univers – autrefois appelée aussi l'*azurée* à cause de sa couleur bleu profond. Sur cette sphère, chaque corps céleste, chaque étoile voit sa position repérée par deux angles, deux coordonnées angulaires, l'ascension droite et la déclinaison. Toute l'astronomie se résumait à des angles, ce qui avait l'avantage de la rendre mesurable à l'aide d'instruments de mesure d'angle avec des limbes gradués tels que compas, quart-de-cercle, sextant... Mais la troisième dimension spatiale, celle de la distance à la Terre, demeurait mystérieuse, sujette à toutes les spéculations plus invérifiables les unes que les autres. Plus question de sortir de sa poche un secteur angulaire, il s'agit cette fois d'arpenter l'Univers lui-même, mais sans pouvoir s'y déplacer.

En dépit de ces difficultés majeures, plus les connaissances avançaient, plus les étoiles paraissaient s'éloigner. Dans le même temps, silencieusement, les étoiles se détachaient peu à peu de leur sphère. Après les découvertes de Galilée et de Kepler au début du XVII^e siècle, René Descartes avait convaincu le monde savant que les étoiles sont des soleils et que

le Soleil n'est que notre étoile locale, ce qui va suggérer une approche différente du problème des distances stellaires. Il n'était plus décemment possible d'admettre la proposition implicite de la sphère des fixes, à savoir celle qui considère que les étoiles se trouvent toutes à une même distance, puisqu'elles seraient physiquement accrochées à cette même sphère. Si l'espace est parfaitement transparent, la lumière diminue avec le carré de la distance. Par conséquent, si le Soleil est éloigné de mille fois plus qu'il ne l'est actuellement, il semblera briller avec un millionième de sa luminosité actuelle. Supposons maintenant que les étoiles ne soient pas simplement de même nature que le Soleil, comme le dit Descartes, mais qu'elles lui soient physiquement identiques en tout point. Par exemple, Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel, ne serait que le jumeau du Soleil, même taille, même éclat intrinsèque. Il en découle alors que si l'on constate que Sirius a un millionième de l'éclat du Soleil, et à condition que l'espace soit transparent, nous saurons que Sirius est mille fois plus éloignée que le Soleil.

Au début du XVIII^e siècle, cette conception erronée, mais cohérente, a toujours cours. En 1717, dans son mémoire « De la grandeur des Etoiles fixes, & de leur distance à la Terre » exposé devant l'Académie le 13 novembre, Jacques Cassini (1677-1756) affirme qu'on « ne peut guère séparer la considération de la grandeur des étoiles fixes de celle de leur distance, puisque ces deux connaissances sont si étroitement unies ensemble, que l'une étant déterminée, l'autre en résulte nécessairement ». Dit simplement, plus une étoile est lumineuse, plus elle

est proche, comme c'est le cas pour une simple bougie qui émet sa propre lumière. Il propose donc une nouvelle méthode qui s'appuie sur les observations télescopiques. Il suffit de déterminer la grandeur ou la taille apparente des étoiles à mettre en rapport avec leur grandeur véritable qui est connue, puisque c'est celle du Soleil vu depuis une distance connue, ou supposément connue – la distance Terre-Soleil. Ainsi, selon ses propres observations, Sirius aurait un diamètre dix fois plus petit que celui de Jupiter : son diamètre serait par conséquent de 5". Cassini peut alors en déduire la distance de Sirius égale à 840 000 diamètres terrestres, puisque la distance du Soleil à la Terre serait de 10 000 diamètres terrestres et que le diamètre apparent de Sirius est 384 fois plus petit que celui du Soleil.

La véritable interrogation

AU XVII^E SIÈCLE, l'interrogation prend une autre dimension. Il ne s'agit plus simplement de connaître la distance des étoiles, mais de prouver la supériorité d'un système sur un autre. Lequel des systèmes du monde en compétition est le véritable ? Celui de Ptolémée, avec la Terre en son centre – dit géocentrique –, ou celui de Copernic de 1543 avec le Soleil en son centre – dit héliocentrique ?

Si Copernic a raison, alors tous les six mois, nous devrions observer les étoiles depuis les extrémités opposées d'une immense ligne de base dont la longueur est égale à deux fois le rayon de l'orbite de la Terre autour du Soleil (deux « unités astronomiques »). La position apparente des étoiles décrirait ainsi annuellement une petite ellipse autour de sa position vraie, reflet de l'orbite terrestre vue depuis chacune des étoiles. Ce petit déplacement est dénommé déplacement parallactique de l'étoile caractérisé par la connaissance de sa *parallaxe annuelle* qui est le changement de position angulaire d'une

étoile lorsqu'elle est vue depuis la Terre et depuis le Soleil (fig. 1). Déterminer la parallaxe annuelle d'une étoile revient par conséquent à mesurer le petit angle π d'un triangle géant dont le petit côté est le rayon de l'orbite de la Terre.

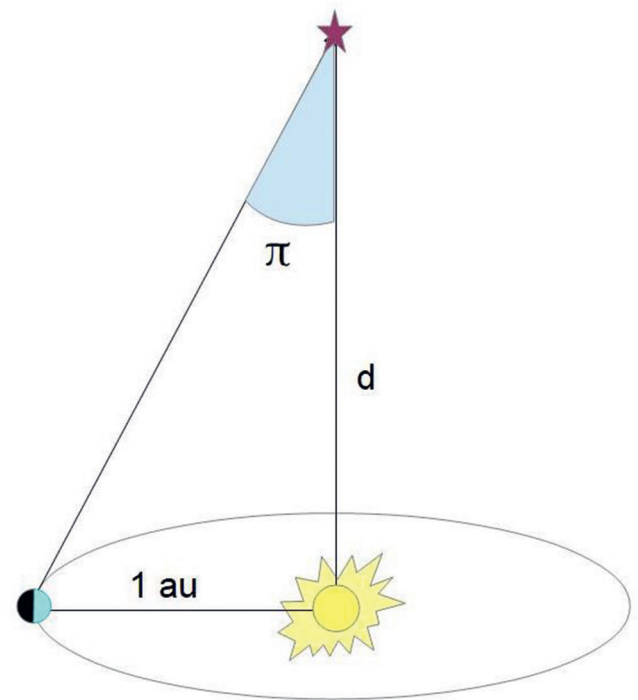


Fig. 1 – Parallaxe d'une étoile.

C'est l'angle sous-tendu par le rayon de l'orbite de la Terre – ou 1 au (unité astronomique) – vu depuis l'étoile. Elle est aussi appelée parallaxe trigonométrique. Au bout d'une année, une étoile semble décrire un cercle si elle est localisée en direction du pôle de l'écliptique (plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil), un segment de droite si elle est dans l'écliptique, une ellipse pour tous les autres cas dont le demi-grand axe est égal à la parallaxe de l'étoile.

Crédits P. Descamps

La problématique de la distance des étoiles se double en conséquence d'une seconde problématique, beaucoup plus intéressante et plus fondamentale : les étoiles ont-elles une parallaxe ? La réponse à cette question est cruciale dans la connaissance du vrai système du monde. Si les étoiles présentent une parallaxe, le système héliocentrique de Copernic s'imposera alors au monde. L'avantage de la preuve du système copernicien réside dans le fait

qu'il suffit d'une seule mesure de parallaxe pour le valider, alors que le système ptolémaïque nécessite qu'aucune étoile ne présente de parallaxe. Le gros inconvénient est qu'il est beaucoup plus facile de se convaincre que les étoiles n'ont pas de parallaxe, parce que celle-ci est un angle si petit à mesurer qu'il est encore inaccessible aux astronomes du XVII^e siècle. Il est dès lors facile et hâtif de conclure à l'absence de parallaxe.

S'il est très difficile de mesurer la parallaxe *absolue* d'une étoile, c'est-à-dire la petite variation annuelle de sa position apparente sur la sphère céleste, en raison des difficultés techniques d'une telle entreprise où les mesures sont affectées des déformations de l'instrument, de tout changement dans la réfraction, etc., il existe en revanche une façon astucieuse de les contourner. L'ingénieux Galilée en a l'idée le premier. Supposons que deux étoiles se trouvent quasiment dans la même direction depuis la Terre, et que l'une d'elles soit beaucoup plus éloignée que l'autre. L'étoile la plus éloignée aura une parallaxe beaucoup plus faible que l'étoile la plus proche ; cela signifie que nous ne nous tromperons pas beaucoup si nous ignorons complètement la parallaxe de l'étoile la plus éloignée et si nous la prenons comme un point de référence quasiment fixe dans le ciel à partir duquel nous mesurons la parallaxe de l'étoile la plus proche. Par cette mesure de parallaxe dite *relative*, toute erreur ou incertitude affectant les deux étoiles simultanément s'effacera d'elle-même dès lors que l'on espère suivre le déplacement d'une étoile – celle supposée la plus proche – par rapport à l'autre considérée comme absolument fixe. L'idée en restera à ce stade avant qu'elle ne finisse par porter ses fruits bien plus tard comme nous le verrons par la suite. À ce propos, l'idée de Galilée montre bien que selon lui, en tant que copernicien convaincu, l'absence de mesures de parallaxes stellaires ne signifie pas l'absence de parallaxe.

La valse-hésitation

RETOURNONS À CETTE JOURNÉE du 13 novembre 1717, durant laquelle Jacques Cassini s'adresse aux académiciens. Il ne manque pas de souligner l'importance de « l'hypothèse de Copernic » et sa conséquence, la parallaxe annuelle des fixes – les fixes ne le seront bientôt plus avec la découverte du mouvement propre des étoiles par Halley en 1718. Il rappelle le voyage d'Uraniborg de l'abbé Jean Picard qui avait rendu compte devant cette même Académie des variations observées dans la hauteur de l'étoile Polaire en différentes saisons de l'année, « mais comme elles ne s'accordaient pas toutes à ce qui devait résulter du mouvement de la Terre, et qu'il y en avait même qui y étaient contraires, on n'en avait pu tirer aucune conséquence qui servit à l'établir ». Ce que l'abbé Picard avait vraisemblablement observé sans en comprendre la cause était l'aberration de la lumière, découverte une dizaine d'années après le discours de Cassini par Bradley en 1728 ([voir l'épisode 7 « Diviser pour mieux mesurer »](#)). Par des observations de Sirius entre 1714 et 1715 au quart-de-cercle de 6 pieds de rayon, Cassini estime avoir conclu à une parallaxe de 6". Le temps que la communication traverse la Manche, Edmund Halley démontre en 1720 que les mesures de Cassini de la hauteur méridienne de Sirius – qui est atteint un angle de 25° à la latitude de Paris – ne prennent pas en compte les petites variations de la réfraction atmosphérique – de l'ordre de 7" à 8" –, consécutives aux variations de la pression barométrique de l'air durant l'année, et qui sont bien supérieures à la valeur de la parallaxe que Cassini a cru observer. La parallaxe de Cassini est donc fictive.

Fin XVII^e-début XVIII^e, avec l'introduction de la lunette comme instrument de mesure de position et l'avènement du micromètre filaire ([voir l'épisode 4 « Des lentilles et des hommes »](#)), on s'imaginerait que la mesure d'une parallaxe stellaire ne sera qu'une simple formalité. Le premier à s'y essayer est sans

doute Robert Hooke (1635-1703) en 1669 qui tente à l'aide d'une lunette zénithale de 36 pieds de suivre la distance zénithale de l'étoile γ Draconis, étoile passant par le zénith de Londres. Si l'annonce de son résultat extravagant – une parallaxe comprise entre 27" et 30" – laisse de marbre les astronomes, son idée d'un instrument zénithal fera cependant école près de 60 ans plus tard et mènera à la découverte de l'aberration de la lumière par Bradley ([voir l'épisode 7 « Diviser pour mieux mesurer »](#)) sur la même étoile cible, γ Draconis. En 1692-1693, Olaus Roemer (1644-1710) au Danemark consigne une série d'irrégularités annuelles dans les déclinaisons de certaines étoiles, et un peu plus tard dans leurs ascensions droites. Il ne les attribue pas à une éventuelle parallaxe, mais plutôt à des variations dans la direction de l'axe de rotation de la Terre qui auraient pour conséquence de faire varier légèrement la position du zénith – phénomène qui existe bel et bien et qui est connu sous le nom de *nutation*, lui aussi découvert par Bradley en 1748. Néanmoins, quelques années plus tard, un jeune astronome danois, Peder Horrebøw (1679-1764), s'enthousiasme de ces résultats et n'hésite pas à affirmer victorieusement dans un ouvrage publié en 1727, le *Copernicus Triumphans*, que les mesures de son compatriote contenaient déjà la parallaxe de certaines étoiles fixes et en conséquence consacraient le système de Copernic. Enfin, John Flamsteed, le dernier en date avant l'épopée des Cassini, dans une lettre adressée à Wallis en 1698, explique avoir mesuré une parallaxe de 48" pour Polaris, l'étoile Polaire.

En vérité, ni Hooke, ni Roemer, ni Picard, ni Flamsteed, ni Cassini n'ont détecté une quelconque parallaxe stellaire. Les valeurs annoncées font très largement penser au plus grand diamètre du petit cercle que chaque étoile semble décrire autour de

sa position vraie en raison de l'aberration de la lumière et donné par Bradley comme étant compris entre 39" et 40,4" ([voir l'épisode 7 « Diviser pour mieux mesurer »](#)). Cela souligne au passage toute la sagacité et la ténacité dont Bradley a su faire preuve lors de sa confrontation avec des observations à première vue jugées aberrantes. D'autres, bien avant lui, se sont retrouvés en présence des effets de cette aberration de la lumière sans véritablement y prêter attention ou trompés qu'ils étaient par leurs intimes convictions quant à la grandeur très largement surestimée des parallaxes stellaires, et donc quant aux dimensions du cosmos.

La frustration

LES PARALLAXES STELLAIRES vont de nouveau faire parler d'elles à l'occasion de la découverte de l'aberration de la lumière par Bradley en 1728 ([voir l'épisode 7 « Diviser pour mieux mesurer »](#)). Cette découverte, annoncée à la Royal Society en 1729, est capitale, pour plusieurs raisons. Elle constitue la première preuve directe du mouvement de la Terre autour du Soleil. Comme toutes les étoiles qui ont été observées par Bradley sont affectées de la même manière, cela démontre que la vitesse de la lumière est une constante de la nature, identique partout dans l'Univers. En outre, malgré toute la précision du secteur zénithal construit par Graham ([voir l'épisode 7 « Diviser pour mieux mesurer »](#)), Bradley n'a pas pu détecter de parallaxe annuelle sur aucune des étoiles suivies. Il l'assure, la parallaxe doit en conséquence être un très petit angle, vraisemblablement inférieur à la seconde de degré⁽¹⁾. Les étoiles doivent donc se trouver à des distances d'au moins 400 000 unités astronomiques ! La seconde de degré était presque considérée en ce milieu du

(1) La seconde de degré sert toujours à déterminer l'unité de mesure des distances stellaires : le **parsec**, qui est la distance que parcourt la lumière en 3,26 années. Ainsi, la parallaxe d'une étoile mesurée en secondes de degré correspond à l'inverse de sa distance exprimée en parsec.

XVIII^e siècle comme l'indépassable horizon de la mesure astronomique de position. C'est un ébranlement des convictions les plus profondes à tout point de vue.

Et après Bradley ? Plus rien ou presque. Certes, la découverte de l'aberration a consacré Copernic triomphant, mais n'a-t-elle pas dans le même temps réduit à néant la prétention à mesurer un jour une parallaxe stellaire ?

Dix ans plus tard, en 1739, un mathématicien ose un discours à l'Académie, humblement intitulé « Sur la manière la plus simple d'examiner si les étoiles fixes ont une parallaxe, et de la déterminer exactement ». Alexis Clairaut (1713-1765) expose avec beaucoup de pertinence que l'« astronomie doit la plus grande partie de ses progrès à la fixité des étoiles ». Puis il ajoute que cette « fixité des étoiles, qui paroît être la chose du monde la plus sûre lorsqu'on observe qu'avec des instruments communs, s'évanouit quand la perfection est poussée à un certain point dans les observations ». Il aborde alors le grand résultat de Bradley :

Les observations de M. Bradley prouvent que la vitesse de la lumière des étoiles qu'il a observées, est la même ; on en doit donc conclure que la lumière de toutes les autres étoiles est également prompte, sans quoi il faudrait imaginer que par le plus grand hazard M. Bradley n'a rencontré dans son secteur que celles qui avaient précisément la même vitesse de la lumière.

Enfin, tout ce qu'on peut conclure de cette découverte est qu'« il y a plus d'étoiles qui n'ont pas de parallaxe, que de celles qui en ont, puisque dans le nombre de celles que l'instrument de M. Bradley lui permettait d'observer, aucune n'en avait ». Clairaut semble exhorter les astronomes à ne pas se décourager. Si Bradley n'a pu détecter de parallaxes me-

surables parmi les étoiles qu'il a observées, il existe bien d'autres étoiles dans le ciel dont certaines à n'en pas douter présenteront une parallaxe accessible aux instruments des astronomes. Pour aider les astronomes dans cette tâche, il se propose de « trouver la courbe que paraît décrire une étoile autour de son vrai lieu, lorsque la distance est comparable au rayon de l'orbite de la Terre ». Il démontre que c'est une ellipse et propose ensuite une méthode permettant d'observer à des dates bien choisies pour lesquelles le déplacement causé par la parallaxe est maximum, tandis que celui dû à l'aberration est minimum. Passé ce morceau de bravoure, la chape de plomb retombera sur la recherche d'une parallaxe aux étoiles.

La traversée du désert

IL FAUT ATTENDRE LES ANNÉES 1760 pour que la parallaxe soit de nouveau un sujet d'investigation. Il y a quelque chose d'humiliant pour les astronomes à se soumettre sans combattre devant la difficulté de la mesure et tout doit être fait pour que succombe la seconde de degré. Maskelyne en Angleterre et Lalande en France entendent laver l'affront. Pour Maskelyne, c'est en se replongeant dans les observations de Sirius faites au Cap en Afrique du Sud par Lacaille dans les années 1750. Il va jusqu'à conclure que Sirius aurait une parallaxe de 8" ! Surprenant. Vue depuis le Cap, Sirius n'est qu'à 17,5° du zénith. Lalande ne brille pas par son originalité et espère également trouver dans les mesures de Lacaille une quelconque manifestation de la parallaxe, nouvel échec.

Le seul fait notable en la matière est la lecture le 14 mai 1767 devant la Royal Society d'un long article théorique consacré en partie au problème de la parallaxe des étoiles. Son auteur, John Michell (1724-1793), est relativement peu connu et ses travaux en astronomie n'ont été redécouverts que dans les années 70 du siècle dernier.

Michell invite les astronomes à abandonner purement et simplement la méthode des parallaxes pour trouver les distances stellaires, car elle nécessite des instruments gigantesques capables d'atteindre des grossissements énormes de l'ordre de 12 000 en raison de la petitesse des parallaxes.

Profondément impressionné par le *Traité d'optique sur la gradation de la lumière* du physicien français Pierre Bouguer (1698-1758) publié en 1760 à titre posthume par Lacaille, auquel il fait référence dès les premières lignes de son article, Michell entend proposer de nouvelles méthodes d'estimation des distances à l'aide de la photométrie. Bouguer, considéré comme le père de cette nouvelle discipline, avait déjà publié en 1729 un ouvrage sur la mesure de la lumière. Quand paraît son second ouvrage en 1760, la même année est publié celui de Johann Heinrich Lambert (1728-1777), *Photométrie ou de la mesure de la gradation de la lumière, des couleurs et de l'ombre*. L'un et l'autre expliquent les avantages de la photométrie pour les études astronomiques. Bouguer avait notamment prouvé expérimentalement ce que Kepler avait présumé un siècle plus tôt, la décroissance de l'intensité lumineuse avec le carré inverse de la distance.

Michell compte s'appuyer sur ce résultat fondamental de la photométrie en y ajoutant l'hypothèse que les étoiles ont *en moyenne* la même luminosité intrinsèque que le Soleil, et donc *in fine* que la distance d'une étoile est proportionnelle à sa magnitude. Par exemple, Sirius, étoile de première magnitude, devait être à une distance six fois moindre qu'une étoile de sixième magnitude. Tout le problème résidait alors dans la mesure précise de la magnitude apparente, ce qui était devenu possible grâce aux travaux de Bouguer. Pour Michell, si le Soleil semble avoir une place à part parmi les étoiles, cela tient uniquement à sa proximité. Dans une sorte d'humilité copernicienne, le Soleil, lui aussi, tout comme la Terre, n'occupe pas une place à part

dans l'Univers. Le Soleil étant une étoile comme une autre, toutes les étoiles sont par conséquent « en moyenne » similaires au Soleil.

Michell raisonne comme un astronome statisticien, il est le premier à procéder ainsi. En justifiant son hypothèse que les étoiles sont en moyenne comme le Soleil, même si les étoiles prises chacune individuellement sont probablement très différentes les unes des autres, Michell en tire comme conclusion sur les distances moyennes des étoiles qu'elles ont « une très grande probabilité » d'être proches de la vérité parce qu'il considère des valeurs moyennes. L'approche photométrique de la distance des étoiles n'aura pas de suite. Cependant, l'un des apports les plus remarquables de son [très] long article se rapporte à un tout autre sujet que celui des distances stellaires, mais qui aura des répercussions comme nous le verrons par la suite. Michell va de nouveau appliquer les statistiques à l'astronomie pour expliquer que les regroupements apparents d'étoiles ne doivent rien au hasard. Sa grande conclusion : dans la grande majorité des cas, la proximité apparente de deux étoiles n'est pas le résultat accidentel d'un alignement d'étoiles distantes, mais une réelle proximité physique.

Cette conclusion va aller totalement à l'encontre d'une nouvelle méthode pour la détermination des parallaxes stellaires proposée en 1782 par William Herschel (1738-1822), auréolé de sa gloire récente après sa découverte de la planète Uranus en 1781.

Herschel brise le silence

L FAUT ATTENDRE WILLIAM HERSCHEL et son article publié en 1782 « On the parallax of the fixed stars » pour réussir à rallumer la flamme et sortir du néant le vieux problème de la parallaxe. À nouveau, il revient sur le résultat

de Bradley en faisant remarquer que l'étoile du Dragon – suivant en cela Clairaut – est de seconde ou troisième magnitude, et qu'elle doit donc vraisemblablement avoir une parallaxe considérablement moindre que celle d'une étoile de première magnitude. C'est l'antienne de la relation entre la distance d'une étoile et son éclat apparent ! Jusque-là, rien de neuf sous le soleil, Cassini en disait autant en 1717, Michell également en 1767.

Mais si Herschel pose ce principe, c'est surtout pour annoncer ce qui va véritablement faire tout l'intérêt de son article, la remise au goût du jour d'une vieille idée suggérée par Galilée et dont nous avons déjà parlé : repérer et suivre les couples stellaires dont Herschel pense que l'alignement sur la ligne de visée n'est qu'apparent ; il suppose donc que l'étoile la plus lumineuse est à une distance plus proche de la Terre que l'étoile la moins lumineuse (par exemple une étoile de 2^e magnitude se trouverait deux fois plus éloignée qu'une étoile de 1^{re} magnitude) et il pense en outre que, contrairement à l'affirmation de Bradley, la parallaxe des étoiles de première grandeur doit être de plusieurs secondes. Il rejette au passage la méthode utilisée par Bradley dans laquelle les effets de réfraction, aberration, nutation affectant les distances zénithales apparentes sont encore mal connus. En définitive, il propose de mesurer des parallaxes relatives plutôt que des parallaxes absolues. Le comité des articles de la Royal Society a critiqué son hypothèse selon laquelle les étoiles ont toutes à peu près la même taille que le Soleil, ainsi que son hypothèse selon laquelle les distances des étoiles fixes sont proportionnelles à leur magnitude. Il est par ailleurs renvoyé à l'article de Michell dont les conclusions sur les couples stellaires apparents auraient dû sonner le glas de la méthode de Herschel.

Cette démarche lui a dicté un programme de recherche visant à inventorier les *étoiles doubles* du ciel, dont il pense que la proximité apparente n'est pas

synonyme de proximité physique sous la forme de véritables couples stellaires. Il va ainsi collecter un grand nombre d'étoiles doubles et publier deux catalogues d'étoiles doubles, le premier en 1782, puis le suivant trois ans plus tard. Mais Herschel n'obtient aucun résultat concret, si ce n'est la découverte que les étoiles doubles sont, dans leur immense majorité, de véritables couples physiques tenus par la gravité newtonienne qui prend alors pleinement son qualificatif d'*universelle*, car elle s'applique bien au-delà du Système solaire. Dès 1783, il concède à regret devant la Royal Society que la parallaxe des étoiles est vraisemblablement plus petite que la seconde de degré.

Herschel finira par reconnaître la validité des prédictions de Michell lorsqu'il réexaminera certains de ses systèmes doubles au tournant du siècle et découvrira des cas où les deux étoiles avaient orbité l'une par rapport à l'autre (environ 50 étoiles doubles physiques mesurées). En outre, Herschel observera que dans le cas de deux des paires en orbite, les étoiles sont d'une luminosité très inégale, bien que situées à la même distance, ce qui devait définitivement mettre à un terme à la vieille conception d'une loi empirique entre la distance et la luminosité des étoiles.

Néanmoins, le ver est dans le fruit. En 1826, son fils John Herschel (1792-1871) tire des catalogues d'étoiles doubles de son père comme enseignement fondamental qu'il est maintenant « extrêmement probable que la parallaxe de la quasi-totalité des étoiles est bien inférieure à 1" ». D'autre part, des essais de son père, il en conserve l'idée maîtresse qui fera école : mesurer la variation relative de la position de deux étoiles proches l'une de l'autre sans pour autant être un couple physique serré. Le nouveau problème dès lors est de sélectionner les meilleures candidates pour lesquelles une parallaxe serait susceptible d'être mesurée compte tenu des possibilités instrumentales du moment.

La sélection

ALORS QUE LES DEUX COORDONNÉES de la position d'une étoile sur la sphère céleste étaient mesurées avec une précision toujours plus grande, on ne savait toujours pas grand-chose de la troisième coordonnée de l'étoile, la distance, si ce n'est que son échelle était gigantesque. Même l'hypothèse confortable et simplificatrice selon laquelle les étoiles les plus proches sont les plus brillantes perdait en force chaque jour un peu plus avec l'augmentation du nombre de mouvements propres connus des étoiles où il s'avérait que les étoiles qui se déplaçaient le plus rapidement n'étaient pas toutes brillantes.

Un exemple extrême a même été trouvé au début du XIX^e siècle, lorsque Piazzi, puis Bessel constatent que l'étoile 61 Cygni, connue sous le nom « d'étoile volante » – elle sera surnommée par la suite « étoile de Bessel » pour des raisons qui seront très vite exposées –, relativement peu lumineuse – magnitude apparente de 5,2 –, se déplace dans le ciel à la vitesse exceptionnelle de plus de 5 secondes d'arc par an. Cela montrait que l'étoile devait être proche en dépit de sa faible luminosité. À l'Observatoire de Paris, Arago et Mathieu l'avaient prise en chasse en 1812 par des mesures absolues de distance au zénith faites avec le cercle répétiteur de Reichenbach donné par Laplace en 1811. Ils ne purent conclure mieux que sa parallaxe devait nécessairement être plus petite que 0,5". Cet échec résonna comme ce qui devait être le *chant du cygne* des recherches de parallaxes stellaires à l'Observatoire de Paris.

La parallaxe annuelle est bien sûr inversement proportionnelle à la distance, et il était crucial que les observateurs qui tentaient de mesurer cette parallaxe concentrent leurs efforts sur les étoiles les plus proches de la Terre. À cet effet, en 1837, après que plusieurs annonces de mesure de parallaxe se sont

révélées infondées, l'Allemand Wilhelm Struve (1793-1864) propose trois critères de proximité : l'étoile est-elle brillante ? Son mouvement propre est-il important ? Et, s'il s'agit d'une étoile binaire, les deux composantes semblent-elles très éloignées l'une de l'autre par rapport au temps qu'elles mettent à orbiter l'une autour de l'autre ?

En outre, pour la première fois, Struve propose dans l'introduction de son article une estimation particulièrement fiable de la parallaxe hypothétique, estimation que Henry Russel (1877-1957) désignera et consacrera en 1928 sous la terminologie de « parallaxe dynamique ». Elle repose toutefois, elle aussi, sur une hypothèse simplificatrice : la masse combinée du système est deux fois supérieure à celle du Soleil. C'est néanmoins une hypothèse raisonnable – mais Struve ne pouvait alors le savoir – puisque la masse combinée de la plupart des binaires visuelles n'est typiquement pas loin de cette valeur. Elle tire profit du fait que si la masse totale d'une étoile binaire est connue, sa parallaxe est pleinement déterminée. En utilisant la généralisation par Newton de la troisième loi de Kepler, qui lie la période de révolution du système à la distance réelle entre les étoiles, cette dernière est comparée aux dimensions angulaires apparentes de l'orbite afin d'obtenir une distance approximative pour la paire d'étoiles. La parallaxe hypothétique p s'exprime alors à l'aide de la formule suivante dans laquelle le demi-grand axe de l'orbite du système binaire est donné en secondes de degré et la masse combinée $M_1 + M_2$ est en unités de masses solaires et la période P en années :

$$\pi = a / [(M_1 + M_2)P^2]^{\frac{1}{3}}$$

Il est à remarquer que la masse combinée totale du système apparaît dans l'équation donnant la parallaxe dynamique par sa racine cubique, ce qui limite l'effet dû à l'erreur résultant de l'hypothèse de départ sur les masses des composantes du système binaire.

Par ce calcul, Struve détermine les parallaxes dynamiques de plusieurs systèmes binaires, obtenant par exemple 0,24" pour 70 Oph et 0,25" pour 61 Cyg (les valeurs modernes sont respectivement 0,195" et 0,285"). Même si la méthode de la parallaxe dynamique souffre du même défaut que la méthode photométrique – fondée l’une et l’autre sur l’identité des étoiles au Soleil – elle donne cependant une très bonne estimation des valeurs de parallaxe qu’il faut s’attendre à mesurer. La méthode est d’ailleurs toujours utilisée car elle donne une excellente estimation de la parallaxe réelle, dite de nos jours *trigonométrique*, à 5 % près, en se servant aussi de la relation masse/luminosité découverte par Arthur Eddington (1882-1944).

En calculant les valeurs des parallaxes dynamiques des systèmes binaires connus, Struve note une corrélation particulièrement importante, les étoiles doubles qui ont la plus grande parallaxe dynamique sont aussi celles qui ont le plus grand mouvement propre. Le principal critère du choix de la bonne étoile candidate n’était donc plus en priorité son éclat, mais le mouvement propre.

La compétition

L’INITIATIVE revient alors sur le continent, plus précisément du côté des constructeurs et astronomes allemands. Joseph Fraunhofer (1787-1826) incarne à lui seul ce renouveau. Opticien, physicien et fabricant de lunettes astronomiques, il va construire à partir de 1824 deux des instruments les plus importants et les plus célèbres de l’histoire de l’astronomie pour deux des astronomes les plus novateurs : le grand réfracteur de 9 pouces (24 cm) de l’observatoire de Dorpat (de nos jours Tartu en Estonie) pour le compte de Friedrich Wilhelm Struve (1793-1864) et le grand *héliomètre* de 6 pouces (16 cm) de l’observatoire de Königsberg

(de nos jours Kaliningrad en Russie) pour celui de Wilhelm Bessel (1784-1846). Ils sont construits de sorte à garantir la détermination de parallaxes dont les ordres de grandeur ont été donnés par Struve avec une précision meilleure que le dixième de seconde de degré.

Ces deux astronomes seront à l’origine des deux premières mesures fiables de parallaxes stellaires par la méthode de la parallaxe relative proposée par William Herschel. Toutefois, un seul réussira une mesure confirmée de parallaxe absolue, Thomas Henderson (1787-1844) à l’observatoire du Cap en Afrique du Sud. Dans cette course à la parallaxe des années 1830, la priorité historique de la première mesure assurée d’une parallaxe reviendra finalement à Bessel.

Friedrich Wilhelm Struve

DANS SON OBSERVATOIRE de Dorpat (aujourd’hui Tartu en Estonie), Struve avait le privilège de posséder un magnifique télescope réfracteur de Joseph Fraunhofer. Le verre de l’objet ne mesurait pas moins de 24 cm de diamètre et était d’une qualité exceptionnelle (fig. 2). L’objectif avait une longueur focale de 14 pieds (4 200 mm). Fraunhofer invente pour l’occasion la monture « équatoriale » – dite aussi allemande –, son axe pointant vers le pôle Nord céleste, de sorte que l’observateur n’avait besoin de tourner que cet axe pour maintenir le télescope aligné sur une étoile.

En 1835, Struve avait choisi l’étoile Vega (α Lyrae) pour ses mesures de parallaxe. L’étoile est à la fois brillante et possède un mouvement propre relativement important (0,3" par an). En outre, proche d’elle se trouve une étoile faible à seulement 43". Celle-ci a un mouvement propre très différent de

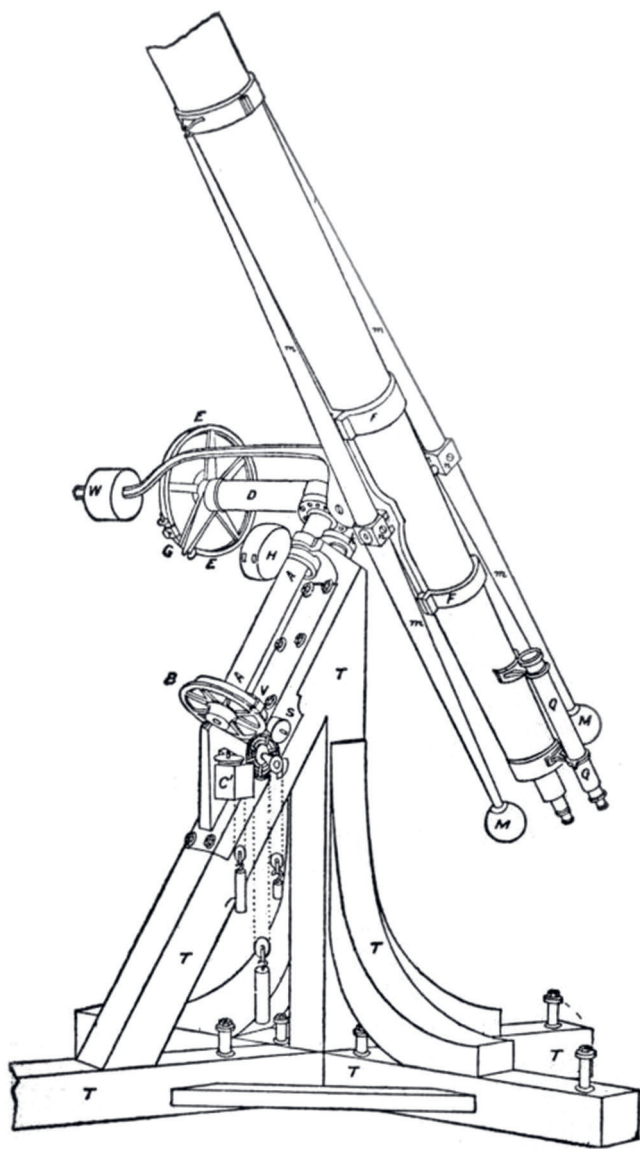


Fig. 2 - Grand réfracteur de 9 pouces de Fraunhofer de l'observatoire de Dorpat.

Tiré de *Encyclopædia Britannica*, vol. 26, 1911, p.566-567.
Domaine public

celui de Vega, Struve est donc assuré que cette paire d'étoiles n'est pas liée physiquement et que la probabilité est grande que le petit compagnon de Vega est à une distance beaucoup plus grande, justifié en cela à la fois par son éclat et son mouvement propre. L'étoile pourra servir de référence pour une mesure de parallaxe relative avec la grande lunette de Fraunhofer dont le champ de vision admet les deux étoiles simultanément. Struve connaissait bien évidemment la 61^e du Cygne, identifiée par Piazzini comme l'étoile ayant le plus fort mouvement propre, mais l'étoile de comparaison la plus proche

se trouvait à 460", bien au-delà du champ de vision de la lunette de Dorpat.

En 1837, Struve publie ses 11 000 mesures d'étoiles doubles dans une monographie monumentale, le *Stellarum duplicium et multiplicium mensurae metricae*. Nous avons déjà évoqué son introduction dans laquelle il dresse l'état des lieux du problème de la parallaxe et introduit la notion de ce qui deviendra un siècle plus tard la parallaxe dynamique. Ce n'est que dans le dernier chapitre qu'il expose une analyse complète pour une seule étoile double, Vega, à partir de 17 observations, à partir desquelles il déduit une parallaxe provisoire de $0,125'' \pm 0,055''$ – elle est en fait de $0,13023'' \pm 0,00036''$. Struve insiste sur la qualification de « provisoire » compte tenu de la longue histoire des affirmations fallacieuses, qui remonte à Hooke, et précise que des observations supplémentaires sont nécessaires. Trois ans plus tard, il fait état de 96 observations s'étalant entre 1835 et 1838 et en déduit cette fois une parallaxe $0,261'' \pm 0,025''$. Cette nouvelle valeur, considérablement différente de la première, n'a servi qu'à reléguer Struve sur la question de la priorité. Le mystère attaché à une telle différence entre les deux mesures de Struve à quelques années d'intervalle n'a été élucidé que tout récemment (voir Reid et Menten, 2020). Comme nous l'avons déjà indiqué, toute mesure consiste en réalité en deux mesures, elle se compose d'une part d'une mesure de la séparation entre l'étoile cible et l'étoile de comparaison – dénommée « distance » par Struve – et d'autre part d'une mesure perpendiculaire à cette ligne – dénommée « direction » provenant de la variation de l'angle de position consécutive au déplacement parallactique de l'étoile. Dans son résultat de 1837, Struve utilise les deux mesures pour en tirer une valeur moyenne. Mais en 1840, il ne conserve que les mesures de « distance » comme il le souligne lui-même :

D'après mes [96] mesures, la parallaxe pouvait être déterminée de deux manières différentes, à partir des séparations observées ou à partir

des directions mesurées de la ligne connectant les deux étoiles par rapport au cercle de déclinaison, communément appelées angles de position. Cependant, étant donné qu'il existe des circonstances qui altèrent la précision de ces dernières [mesures], il n'a pas été permis de les utiliser pour la détermination des angles de position, ces dernières [mesures], il n'a pas été permis de les utiliser pour la détermination de la parallaxe et il a été rendu nécessaire que la parallaxe soit calculée à partir des seules séparations.

L'analyse des mesures de Struve a montré que les données de direction aboutissaient à une parallaxe négative (!) sur les 17 mesures préliminaires de 1837 et à une parallaxe globalement nulle sur les 96 mesures utilisées en 1840. En 1837, Struve conserve les mesures de direction en les pondérant et en les moyennant avec les mesures de distance qui donnaient une parallaxe de 0,252". Mais en 1840, il décide de les « jeter », ce qui explique la valeur très surestimée de la parallaxe issue des seules mesures de distance. En outre, Reid et Meuten ont pu montrer le rôle essentiel joué par les variations de température qui n'ont pas été corrigées par Struve. Plus il fait chaud (observations printemps/été), plus les mesures de distance (ou de séparation) sont fortes, c'est l'inverse quand il fait froid. Vega ayant été observée davantage lors de périodes chaudes, cela explique le résultat final obtenu par Struve.

Friedrich Wilhelm Bessel

EN 1824, EN VISITE À MUNICH, Bessel passe commande à Fraunhofer d'un héliomètre de 6,2 pouces (157,5 mm avec une focale de 2 560 mm) pour l'observatoire de Königsberg. Bessel souhaitait avoir un grand champ et réduire les effets de la turbulence atmosphérique. L'héliomètre s'imposait naturellement à

lui pour la mise en œuvre la plus précise possible de la méthode de la parallaxe relative (fig. 3). L'héliomètre de Bessel construit par Fraunhofer est le perfectionnement d'une idée proposée par Pierre Bouguer en 1748 destinée à la mesure précise du diamètre du Soleil (d'où l'origine de son nom). Le principe repose sur la bissection de l'objectif (coupé en deux parts égales) qui fournit alors au foyer une image dédoublée du champ. Bessel a le premier l'idée de s'en servir pour mesurer des séparations relatives entre étoiles comme l'avait suggéré John Herschel quelques années auparavant, ainsi que l'angle de position par rotation de l'objectif. En faisant glisser chaque demi-lentille le long de leur ligne diamétrale de contact, les images de deux étoiles peuvent être amenées à la superposition de sorte qu'il est possible de mesurer leur espacement angulaire à partir du déplacement linéaire des deux lentilles l'une par rapport à l'autre. Si l'on tourne le télescope vers une étoile double, la paire d'étoiles apparaît dans chaque moitié, et l'observateur peut alors faire glisser les deux moitiés d'objectif jusqu'à ce qu'une étoile dans une image coïncide avec l'autre étoile dans l'autre image. Bessel en fut le maître. Selon lui un instrument devait être « construit deux fois », la première fois par le constructeur et la seconde par l'astronome qui doit en traquer les moindres défauts et erreurs.

À la différence d'une mesure d'étoile au moyen d'un réticule fixe, comme c'est le cas pour le grand réfracteur de Dorpat, il était considérablement plus aisé d'amener les paires d'images à coïncider en dépit de leur agitation engendrée par la turbulence atmosphérique. Ainsi, par construction, les effets néfastes de la turbulence étaient neutralisés. Par chance, Fraunhofer mènera à son terme la construction de l'héliomètre quelques jours à peine avant sa mort prématurée intervenue le 7 juin 1826. L'instrument est livré et installé en 1829 et immédiatement testé sur des étoiles doubles. Il démontre aussitôt ses extraordinaires capacités astrométriques avec une précision sur chaque observation isolée de $\pm 0,15''$ sur la séparation et de $\pm 2'$ sur l'angle de position.

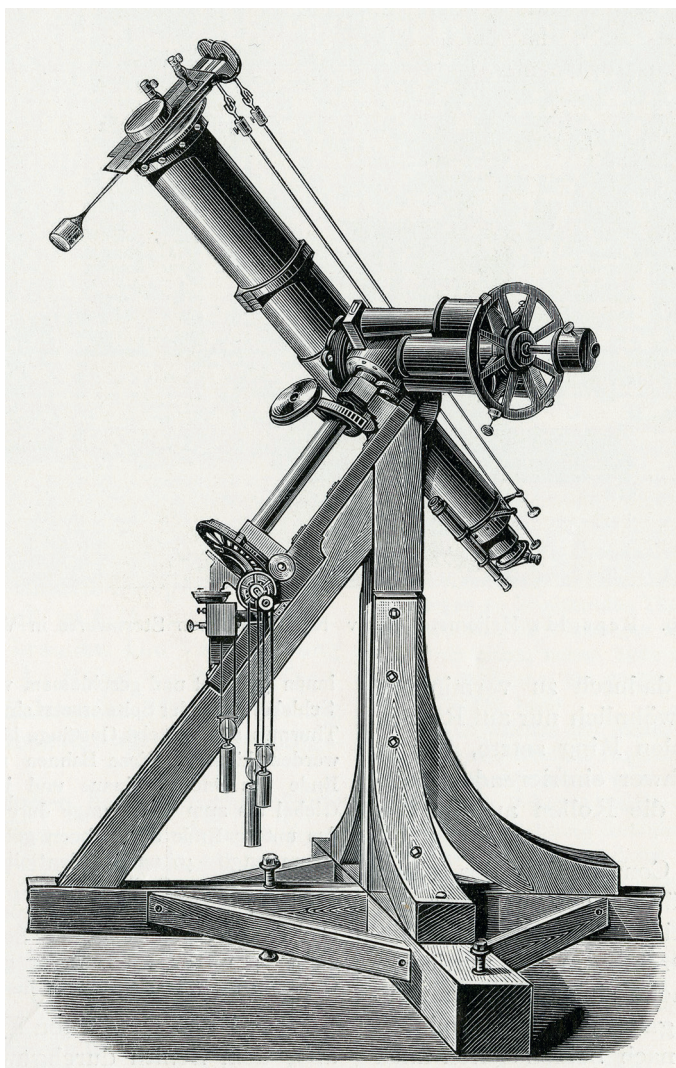


Fig. 3 – Héliomètre de Bessel de 6 pouces (16 cm) construit par Fraunhofer.

Tiré de l'Atlas der Himmelskunde, Schweiger-Lerchenfeld, 1898.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Muni de cet extraordinaire instrument, Bessel, bien avant Struve, reprend en 1834 le problème de la parallaxe qu'il avait délaissé depuis 1818 à l'occasion de ses travaux de réduction et de publication du catalogue de Bradley. Son choix se porte naturellement sur l'étoile 61 Cygni. Outre son mouvement propre remarquable, elle a également l'avantage d'être une étoile double et d'être visible presque toute l'année bien au-dessus de l'horizon de Königsberg. Bien que ce soit une étoile double, grâce au grand champ de son héliomètre, Bessel va prendre comme étoiles de comparaisons deux étoiles faibles situées à plus de 12' en distance angulaire et formant un triangle rectangle avec 61 Cyg. L'arrangement était idéal

pour tirer au maximum avantage du déplacement parallactique grâce à deux séries de mesures indépendantes permettant de moyenner les éventuels biais instrumentaux.

Les observations sont très vite interrompues en raison d'autres obligations professionnelles. La publication du catalogue de Struve en 1837, avec son résultat provisoire sur la parallaxe de Vega et sa suggestion que les meilleures étoiles candidates sont celles ayant un mouvement propre très élevé, relance l'intérêt de Bessel. Bessel et Struve vont avoir une correspondance soutenue à partir d'août 1837, Struve faisant part de ses doutes sur sa première mesure de la parallaxe de Vega. Bessel soumet l'étoile à un examen sans précédent, l'observant pendant plus d'un an jusqu'à 16 fois en une seule nuit. Après six mois d'observation, Bessel indiquait pour la première fois à Struve dans une lettre datée du 25 mars 1838 qu'il pensait avoir une mesure fiable de la parallaxe de 61 Cygni qu'il ne consolidera qu'en octobre 1838. La correspondance entre les deux hommes cessa entre août et novembre 1838, période durant laquelle Struve voyagea en Allemagne et y rencontra Bessel. On ne saura donc jamais comment Struve a réagi au résultat de Bessel...

Le 23 octobre 1838, Bessel est en mesure d'annoncer devant la Royal Society par une lettre lue par John Herschel une parallaxe de 0,313" avec une *erreur probable* de 4 %, soit 0,0136" la valeur moderne est de $0,28615'' \pm 0,00006''$. C'est le résultat d'un grand nombre de mesures relatives de la position de 61 Cygni par rapport à chacune des deux étoiles de comparaison ; chaque observation isolée avait une précision de 0,132". Ce qui a emporté la conviction, c'est la façon dont le graphique de ses observations correspondait à la courbe théorique attendue. Il ne faisait cette fois aucun doute qu'une parallaxe avait pour la première fois été fermement et solidement établie. John Herschel déclara à la Royal Society que c'était « le plus grand et le plus glorieux triomphe

dont l'astronomie pratique ait jamais été témoin ». De plus, Bessel, également mathématicien, est l'un des premiers à se servir de la très féconde *méthode des moindres carrés* élaborée par Legendre puis Gauss en 1809 pour résoudre tous les paramètres du problème et être en mesure de fournir une estimation fiable de l'erreur probable, ce qu'aucun astronome avant lui n'avait fait. C'est par cette rigueur ascétique, où rien n'est laissé au hasard, que Bessel devient le premier arpenteur de l'espace interstellaire.

Thomas Henderson

THOMAS HENDERSON (1798-1844) n'avait pas la stature d'un Struve ou d'un Bessel quand en 1831 on lui propose de postuler sur le poste vacant de directeur de l'observatoire royal du Cap en Afrique du Sud. Il était connu des cercles professionnels, mais en tant qu'astronome amateur et non comme professionnel puisqu'il s'était déjà engagé dans une carrière de juriste. Quand il quitte le Cap, qu'il a toujours détesté, pour rentrer en Écosse le 28 mai 1833 et prendre la fonction d'astronome royal d'Écosse, 13 mois à peine se sont écoulés depuis son arrivée le 8 avril 1832. Il emporte avec lui un nombre prodigieux d'observations qu'il va lui falloir réduire.

Mais surtout, juste avant son départ, son attention a été attirée par le courrier d'un lieutenant en poste sur l'île de Sainte-Hélène pour garder la tombe de Napoléon, mais également pour superviser la construction de l'observatoire de Ladder Hill, Manuel Johnson (1805-1859). Féru d'astronomie, Johnson découvre à cette occasion que la position de l'étoile α Centauri a considérablement changé depuis son observation par Lacaille quelque 80 ans auparavant. Il en fait part à Henderson par courrier, α Centauri possède un mouvement propre très important de 3,6" par an. Henderson aura tout le

temps d'y songer durant la traversée qui le ramène à Édimbourg...

Contrairement à Struve et à Bessel, Henderson n'a jamais manifesté le moindre intérêt pour les parallaxes stellaires. Henderson n'a que des observations absolues, mais par chance, α Centauri a une parallaxe si grande qu'elle est détectable au cercle méridien. Ses mesures de déclinaison indiquent l'existence d'une forte parallaxe. Henderson n'en dit mot, il connaît la méfiance de ses pairs à l'égard des mesures de parallaxe absolue faites au cercle méridien (fig. 4). Il finit par s'en désintéresser occupé par sa nouvelle fonction d'astronome royal en Écosse. De toute évidence, l'annonce de Bessel en 1838 précédée par celle de Struve en 1837 le décide à se remettre très rapidement au travail en analysant complètement les données d'ascension droite dont il dispose et qu'il a ramenées avec lui 5 ans plus tôt. Dès l'année suivante, en 1839, il publie enfin ses résultats. α Centauri étant un système double, ses observations d'ascension droite sur chacune des composantes font apparaître une parallaxe comprise entre 0,48" et 0,92", tandis que celles menées sur les déclinaisons font ressortir une parallaxe comprise entre 1,05" et 1,96". La dispersion des résultats est très forte, mais toutes les mesures vont dans le même sens, celui d'une parallaxe bien marquée, indubitable, dont Henderson donne finalement la valeur moyenne pondérée de 1,16" avec une erreur probable de 0,11".

Afin d'assurer son résultat, il lui faut plus de mesures, il charge donc son successeur au Cap, Thomas Maclear (1794-1879), de mener des observations intensives. Maclear réalise les observations nécessaires entre 1839 et 1840 que Henderson va réduire pour conclure en 1842 à une parallaxe de $0,9128'' \pm 0,0640''$. Bien que la valeur mesurée soit malgré tout assez éloignée de sa valeur moderne de $0,755'' \pm 0,004''$, α Centauri apparaissait comme l'étoile la plus proche du Système solaire jusqu'à la

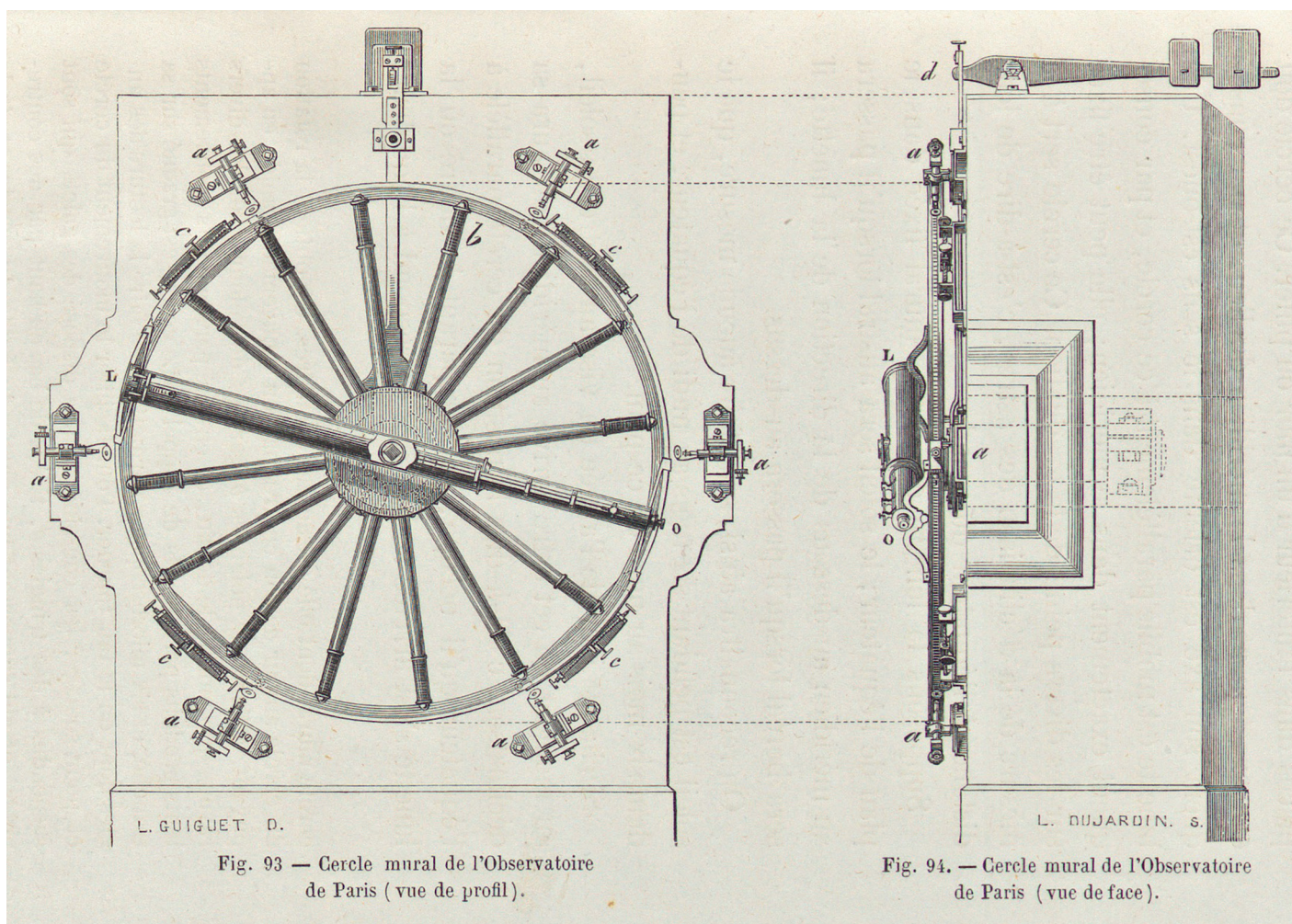


Fig. 4 – Cercle mural de l'Observatoire de Paris équivalent à celui en fonction à l'observatoire du Cap.

Le cercle tourne sur deux coussinets placés dans l'intérieur d'un mur ou pilier. Ce cercle doit être exactement dans le méridien du lieu. Une lunette est mobile parallèlement à ce cercle. Six microscopes espacés de 60° d'intervalle sont utilisés pour la mesure de la position du cercle et déduire la valeur précise de la déclinaison. Gravure tirée de *l'Astronomie populaire* de François Arago, 1854.

Domaine public

découverte de Proxima du Centaure en 1915 qui venait la battre sur le fil. La parallaxe de α_2 Centauri sera remesurée au Cap en 1882 par David Gill (1843-1914) nommé astronome de sa majesté au Cap en 1879. Sous sa direction, l'observatoire du Cap fait l'acquisition d'un héliomètre de Repsold de 4 pouces à partir de fonds privés, bien que Henderson le réclamât vainement en 1842. Gill aboutira à la valeur très précise de $0,75'' \pm 0,01''$. Peu de temps après, un nouvel héliomètre de 7 pouces sera acquis. Fort de ces deux héliomètres, 22 parallaxes d'étoiles de l'hémisphère sud seront mesurées à l'observatoire du Cap avant la fin du XIX^e siècle.

Épilogue

LA SECONDE EST VAINCUE, place au dixième de seconde de degré. Vainqueur de la grande course à la distance, Bessel se détournera du sujet. Sa mission est accomplie, il a montré le chemin. La mesure de la parallaxe ne constituait pas pour lui une fin en elle-même, mais un moyen de prouver la justesse de ses vues sur l'importance de la précision et de la rigueur en astronomie.

Le succès de Bessel fera le succès de l'héliomètre qui se répandra partout en Europe (fig. 5) sauf ... en France, et en particulier à l'Observatoire de Paris. On dénombre ainsi 87 mesures de parallaxes en 1892 (jusqu'à des distances inférieures à 25 al, soit des parallaxes d'au moins 0,13"). Par la suite, les mesures de parallaxes se poursuivront principalement aux États-Unis grâce à l'introduction de la plaque photographique – équivalente en précision à l'héliomètre, mais beaucoup plus rapide et plus sûre dans l'observation et l'analyse – en astronomie dans les années 1870 (jusqu'à des distances maximales de 100 al). Les précurseurs en sont Charles Pritchard en 1889 à l'observatoire d'Oxford et surtout Franck Schlesinger en 1903 à l'observatoire d'Allegheny.

Vers 1950, on dénombre déjà près de 6000 parallaxes photographiques mesurées. L'erreur moyenne varie entre 0,040" et 0,060" pour des observations au cercle méridien ; 0,025" à 0,040" pour les déterminations héliométriques et environ 0,017" pour les premières observations photographiques.

C'est donc véritablement en 1838 que la *sphère des étoiles fixes* chère aux Grecs vole officiellement en éclat et qu'une autre astronomie, plus physique que géométrique, va peu à peu prendre son envol, quitter ses positions. Par la profondeur et la matérialité que confère la parallaxe aux astres, la voûte céleste s'ouvre enfin sur l'Univers.

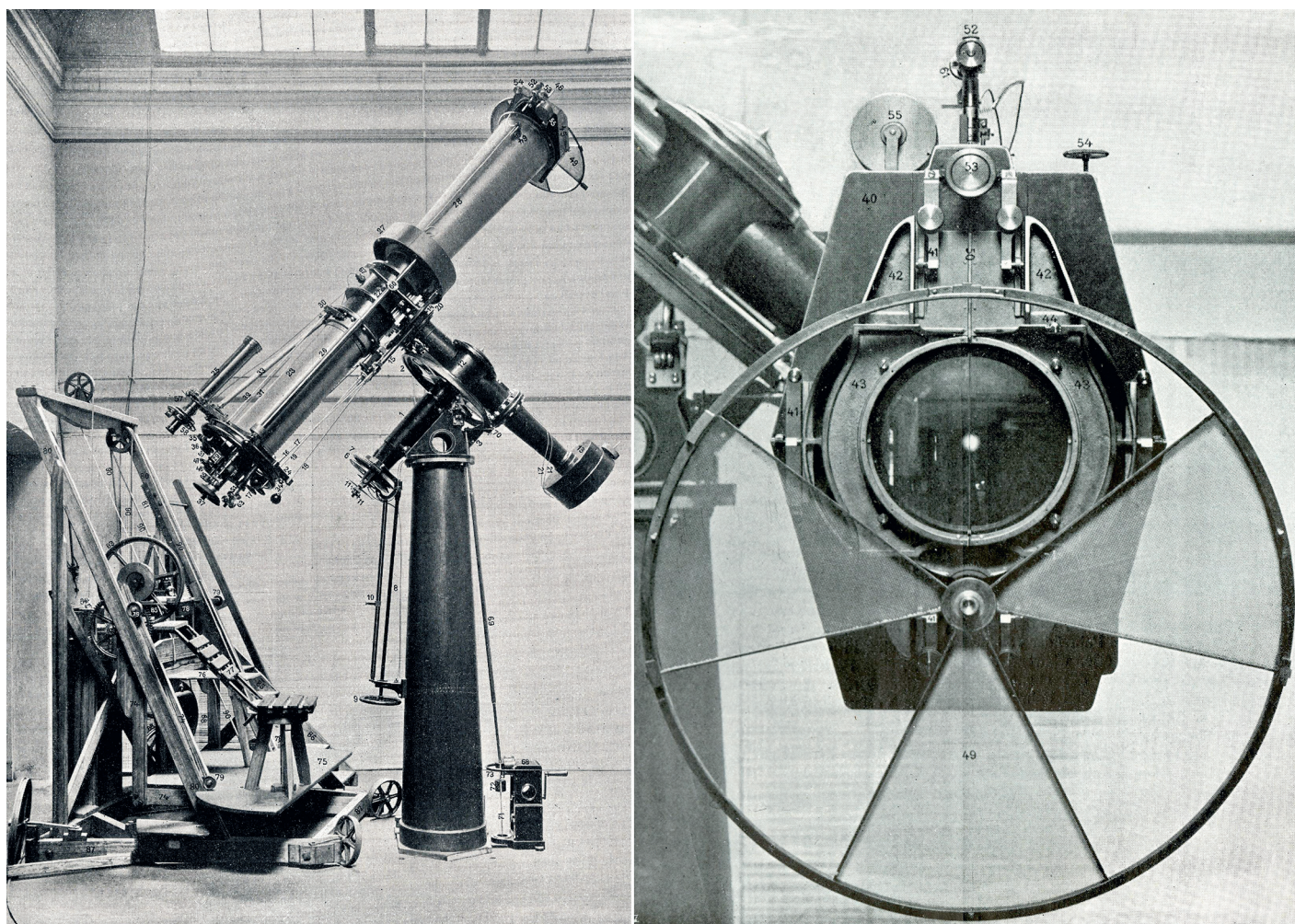


Fig. 5 - Héliomètre de 8 pouces (21,7 cm, le plus grand au monde) de l'Observatoire Keffner à Vienne construit par Repsold en 1894.

Tiré de l'Atlas der Himmelskunde, Schweiger-Lerchenfeld, 1898.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Références

- F.W. Bessel, « On the parallax of 61 Cygni », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 4,, 1838, p.152.
- W.R. Dick et G. Ruben, « The first successful attempts to determine stellar parallaxes in the light of the Bessel/Struve correspondence », *Mapping the Sky: Past Heritage and Future Directions*, Proceedings of the 133rd Symposium of the International Astronomical Union (Paris, France, 1-5 June 1987). Edited by Suzanne Debarbat. International Astronomical Union. Symposium n° 133, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 117.
- J.D. Fernie, « The Historical Search for Stellar Parallax », *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, vol. 69, 1975, p. 222.
- I.S. Glass, *Proxima, the nearest star (other than the Sun!)*, Mons Mensa, 2008
- E. Halley, « Some remarks on a late essay of Cassini, wherein he proposes to find, by observation, the parallax and magnitude of Sirius », *Philosophical Transactions*, vol. 1, 1720, p. 1.
- T. Henderson, « On the Parallax of α Centauri », *Memoirs of the Royal Astronomical Society*, 1840, vol. 11, p. 61.
- W. Herschel, « On the Parallax of the Fixed Stars », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 72, 1782, p. 82.
- A.W. Hirshfeld, *Parallax: The Race to Measure the Cosmos*, New York : W.H. Freeman and Co, 2001.
- D.W. Hughes, S. Cartwright, « John Michell, the Pleiades, and Odds of 496,000 to 1 », *Journal of Astronomical History and Heritage*, vol. 10, n° 2, 2007, p. 93.
- R. McCormmach, *Weighing the world, The Reverend John Michell of Thornhill*, Springer, 2012.
- J. Michell, « An Inquiry into the Probable Parallax, and Magnitude of the Fixed Stars, from the Quantity of Light Which They Afford us, and the Particular Circumstances of Their Situation », *Philosophical Transactions (1683-1775)*, vol. 57, 1767, p. 234.
- M.J. Reid and K.M. Menten, « The first stellar parallaxes revisited », *Astronomische Nachrichten*, vol. 341, iss. 9, 2020, p. 860.
- H.N. Russel, « On the determination of dynamical parallaxes », *Astronomical Journal*, vol. 38, 1928, p. 89.
- F.W. Struve, « Stellarum duplicium et multiplicium mensurae micrometricae per magnum Fraunhoferi tubum annis a 1824 ad 1837 in specula Dorpatensi institutae », *Astronomische Nachrichten*, vol. 14, iss. 16, 1837, p. 249.
- B. Warner, « Thomas Henderson and α Centauri », *Transits of Venus: New Views of the Solar System and Galaxy*, proceedings of IAU Colloquium #196 (Preston, U.K., 7-11 June, 2004). Edited by D.W. Kurtz. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, p. 198.