



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'OBSERVATOIRE-FACTORY

Tout commence en 1704, du côté du Danemark, avec un plan, une ligne, un cercle et un homme passé par l'Observatoire de Paris, qui accessoirement a découvert le mouvement de la lumière...

La rota meridiana de Rømer

C'EST À L'ASTRONOME DANOIS Olaüs Rømer que peut être attribuée l'invention de l'astronomie méridienne. Elle consiste à placer un instrument dans le plan du méridien défini par la direction nord-sud et à y observer le passage des différents corps célestes (étoiles, planètes, Soleil, Lune, petites planètes) en notant soit l'instant – mesure à la lunette méridienne – soit la distance zénithale ou la distance polaire – mesure au cercle mural ou au quadrant mural.

À l'occasion de son voyage au Danemark pour déterminer la latitude de l'observatoire de Tycho Brahe, Picard fait la connaissance de Rømer et lui propose de l'accompagner en 1672 à l'Observatoire de Paris en tant qu'assistant. En 1681, Rømer retourne au Danemark pour être nommé professeur royal de mathématiques à l'université de Copenhague et diriger l'observatoire de Copenhague. C'est chez lui, de façon temporaire, qu'il érige un petit observatoire en 1690, son *Observatorium Domesticum*, où il inventera le premier instrument méridien, l'instrument des passages ou lunette méridienne (*Basis Astronomiae*, Horrebow, 1735).

Rømer est très en avance sur les idées de son temps et, en réponse à une lettre de Leibnitz en date du 5 décembre 1700 qui le sollicite pour recueillir son opinion sur ce que devrait être l'observatoire idéal, il déclare : « Je suis très différent de ceux qui ont jusqu'à présent aménagé les observatoires plus pour le spectacle que pour l'usage, en adaptant les instruments aux bâtiments plutôt que les bâtiments aux instruments. » Rømer fait ici référence à l'observatoire de Paris et à son bâtiment peu adapté pour les besoins de l'astronomie d'observation. En outre, il ajoute : « Je considère que l'utilisation du quadrant et du sextant devrait être complètement abandonnée, car je ferais plus confiance à un cercle de quatre pieds qu'à un quadrant de dix pieds. »

Ses désirs se trouveront pleinement réalisés quelques années plus tard, en 1704, dans son nouvel observatoire rural, l'*Observatorium Tusculaneum*. Il y conçoit un nouvel instrument selon ses principes : privilégier l'observation méridienne et le cercle. Sa « *rota meridiana* » (fig. 1) consiste en un cercle de 5,5 pieds (1,7 m) de diamètre tournant dans le plan du méridien à l'une des extrémités d'un axe horizontal de même longueur. Pour prévenir les flexions du tube, l'axe est constitué de deux cônes creux en fer reliés par leurs bases. Le foyer de la lunette fixée au cercle est traversé par 7 fils verticaux et 3 fils horizontaux. Les divisions du cercle sont lues au moyen de deux microscopes placés sur les faces opposés du cercle à une distance de 180° l'un de l'autre et permettant une répétition de la mesure. L'instrument est vérifié de façon simple. L'erreur de collimation – la déviation de l'axe optique de la lunette par rapport à la

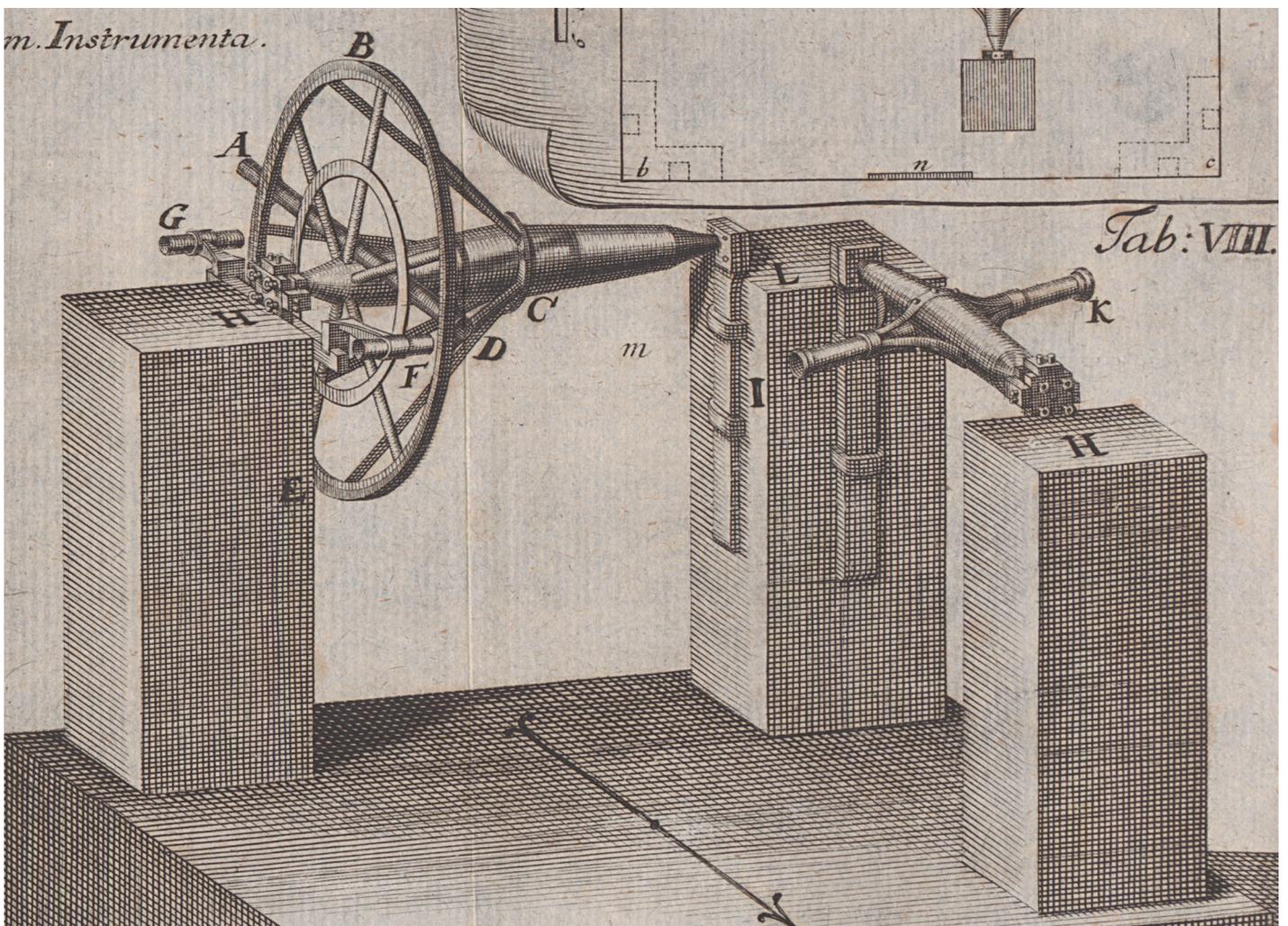


Fig. 1 - Gravure faite par Horrebow dans son *Basis Astronomiae* publié en 1735 à Copenhague.

Domaine public

ligne perpendiculaire à l'axe de rotation – est assurée par le retournement de l'instrument. L'ajustement dans le plan du méridien est réalisé par l'observation du passage de Capella et de Véga au-dessus et au-dessous du pôle (culmination supérieure et inférieure). Par l'usage du cercle, Rømer élimine l'effet des variations de température sur la graduation. Cependant, s'il est bien au courant des effets liés à la température, rien ne permet de dire que l'idée du cercle lui est venue dans le seul but de les contrecarrer.

Du 20 au 23 octobre 1706, le cercle méridien est utilisé de façon ininterrompue, et plus de 250 passages sont observés, dont 90 étoiles, le Soleil, la Lune et toutes les planètes connues de Mercure à Saturne. Elles sont connues comme constituant le

Triduum. Ce ne sont qu'une toute petite partie des observations faites par Rømer. Dans un inventaire réalisé quelques années après la mort de Rømer, trois volumes d'observations réalisées entre décembre 1704 et janvier 1710 sont établis par son assistant Peder Nielsen Horrebow (1679-1764). Malheureusement, à l'exception du *Triduum*, elles brûleront dans le grand incendie de Copenhague de 1728. L'observatoire de Rømer sera détruit en 1711, peu après sa mort en 1710.

S'intéressant alors aux mouvements propres, Piazzi montre en 1803 que la précision des mesures de Rømer du *Triduum* est supérieure à celle de Flamsteed. Il est estimé que l'erreur externe sur une mesure est de 5" en déclinaison, alors que celle de

Flamsteed peut atteindre 1'. La raison est probablement à chercher dans l'utilisation d'un long axe tenu à chacune de ses extrémités, ce qui procure une meilleure définition et une plus grande stabilité dans les mouvements de la lunette.

Par ailleurs, Rømer développera également une théorie des erreurs instrumentales de ses instruments dans son *Adversaria*. Les trois erreurs propres aux instruments méridiens, sur lesquelles nous reviendrons, y sont pleinement discutées : l'erreur d'azimut (*Directio*), d'horizontalité (*Libratio*) et de collimation (*Tubus*). Si Rømer met tant d'énergie dans la caractérisation des erreurs instrumentales, c'est probablement dû au fait que ses mesures, très précises pour l'époque, lui ont révélé des variations annuelles provenant de l'aberration stellaire. Contrairement à Bradley qui interprète avec justesse la cause de ces variations, Rømer y voit plutôt la manifestation d'effets annuels saisonniers provenant de ses instruments.

Les idées de Rømer disparaîtront avec lui pendant près d'un siècle. À ce propos, Le Verrier, dans son rapport sur l'Observatoire de Paris de décembre 1854, fustige encore Cassini de n'avoir su retenir Rømer à l'Observatoire de Paris :

Rømer, à qui l'astronomie doit l'invention de la lunette méridienne, passa plusieurs années à l'Observatoire de Paris. Très malheureusement il lui fut impossible de faire accepter ses idées par Cassini ; la résistance de cet astronome priva notre pays de l'honneur d'inaugurer une grande et longue série d'observations propres à donner de nouveaux fondements à l'astronomie. Une telle faute devait peser sur l'Observatoire de Paris pendant plus d'un siècle.

Vers la fin du XVIII^e siècle, la *rota meridiana* de Rømer, ou plus exactement le *cercle méridien* – *Transit circle* pour les Anglais et *Meridian circle* pour les

Américains – réapparaît dans les ateliers des mécaniciens anglais ou allemands, et en particulier dans celui de Ramsden. Dès 1781, Ramsden donne sa préférence au cercle méridien et le propose même dans son catalogue :

Le cercle n'a pas besoin de mur, il est fixé à un axe vertical solide et tourne avec lui, de sorte que la face du cercle peut être placée à l'est ou à l'ouest. Ainsi, toute erreur d'ajustement dans la ligne de collimation n'aura aucun effet, puisque si la hauteur d'un l'objet peut être prise avec la face de l'instrument vers l'est, et aussi avec la face vers l'ouest, la somme de ces altitudes divisée par deux sera la vraie, même si la ligne de collimation n'est pas ajustée.

L'encadrement d'un cercle est constitué d'éléments concentriques qui, en allant du centre vers la circonférence, maintiendront la forme de l'instrument, quelles que soient les forces agissant sur le métal, ce qui n'est pas le cas d'un quadrant, quelle que soit la qualité de sa charpente.

Le premier cercle méridien moderne est finalement construit par Johann Georg Repsold (1770-1830) en 1802. Cependant, les constructeurs peinent à convaincre les astronomes des bienfaits du cercle. Il est vrai que les premiers cercles méridiens rivalisent difficilement avec les grands secteurs gradués existants dans la mesure de la hauteur des astres. Toutefois, il trouvera paisiblement son public auprès des plus grands astronomes du début du XIX^e siècle : Bessel, qui dote l'observatoire de Königsberg d'un cercle méridien de Reichenbach en 1819, puis d'un cercle méridien de Repsold en 1841 ; Struve, qui installe un cercle méridien de Repsold à l'observatoire de Poulkovo en 1840.

Le cercle méridien prend néanmoins une autre dimension au milieu du XIX^e siècle, lorsque l'astro-

nome royal George Bidell Airy (1801-1892) s'en saisit pour l'ériger en fer de lance de sa politique de transformation radicale de l'observatoire royal de Greenwich dans ses missions et son fonctionnement, dont les effets se feront sentir sur l'ensemble des observatoires institutionnels du monde.

Le deux-en-un du cercle méridien

L E **CERCLE MÉRIDIE**N est donc la réunion en un seul de deux instruments méridiens, le cercle mural d'une part et la lunette méridienne d'autre part (fig. 2). Le cercle mural ne peut être utilisé à la détermina-

tion précise des instants de passage, car sa monture ne se prête pas à un positionnement précis de son orientation dans le plan du méridien, étant donné que l'axe de rotation ne tourne que dans une douille placée d'un seul côté du cercle. Il n'est donc pas supporté de façon symétrique et a toujours été utilisé uniquement dans le but de mesurer la déclinaison des astres.

Pour évaluer le déplacement angulaire de l'axe optique d'une lunette méridienne dans le plan méridien, on adapte à l'instrument un cercle divisé. La lunette astronomique permet d'augmenter la visibilité des astres et de leur mouvement apparent, et améliore ainsi leur pointé. Ce cercle est perpendiculaire à l'axe de rotation avec lequel il fait corps ; son centre

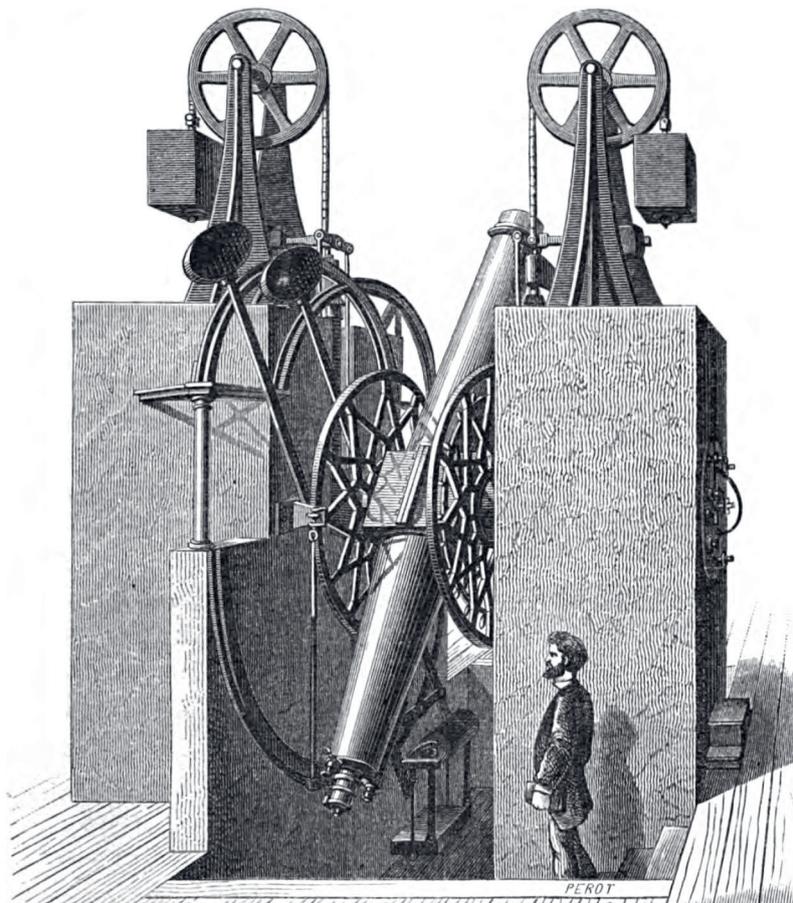


Fig. 2 - Cercle méridien de Greenwich, encore dénommé grand cercle des passages d'Airy, mis en place en 1851.

Gravure tirée de C. André et G. Rayet, *L'Astronomie pratique et les observatoires en Europe et en Amérique*, depuis le milieu du XVII^e siècle jusqu'à nos jours, Paris : Gauthier Villars, 1874.

Domaine public

est sur cet axe. Chacun d'eux a une fonction propre : la détermination de la distance zénithale méridienne pour le cercle mural et l'instant de passage au méridien pour la lunette méridienne. Des contrepoids et des leviers situés aux extrémités de l'axe soulagent la majeure partie du poids du télescope afin d'éviter que le frottement et l'usure ne déforment les pivots. Les contrepoids permettent également de minimiser la flexion de l'axe horizontal. Dans un cercle méridien, l'instrument est donc plus compliqué, plus lourd et les flexions y sont plus fortes.

Il existe deux types de cercles méridiens : les instruments réversibles et les instruments non réversibles. Ces derniers sont construits en vue d'obtenir une puissance optique considérable, ce qui exige de donner à la lunette de grandes dimensions. Ces instruments portant le plus souvent deux cercles placés symétriquement par rapport au méridien, l'instrument est alors dit symétrique, surtout lorsqu'il existe un repère de lecture pour chaque cercle.

Ces instruments lourds et complexes exigent la maîtrise des déviations instrumentales. Rømer les a déjà toutes identifiées. Elles sont essentiellement au nombre de trois : la déviation relative à l'inclinaison de l'axe de rotation de la lunette par rapport au plan horizontal ; la déviation de collimation, produite par le fait que l'axe optique de la lunette n'est jamais rigoureusement perpendiculaire à l'axe de rotation ; la déviation azimutale, parce que le plan azimutal passant par l'axe de rotation n'est pas rigoureusement dans le plan est-ouest (appelé aussi *premier vertical*). La détermination de ces déviations se fait par niveau à bulle ou bain de mercure (inclinaison et azimutale), ou par retournement de la lunette pour la collimation.

L'observation au cercle méridien

L'**OBSERVATION** se déroule de la façon suivante. Pour les passages, la réfraction n'influe pas sur la mesure, puisque le plan du méridien est un plan vertical, de sorte que la position de l'étoile s'y trouvant s'y trouve réellement. L'observateur suit l'entrée de l'étoile à mesurer dans le champ de la lunette. En raison du mouvement diurne de la rotation terrestre, celle-ci va le traverser à une certaine vitesse qui dépend de sa déclinaison. Le chemin parcouru par l'étoile dans le champ est sensiblement rectiligne pour les étoiles équatoriales et se courbe pour les étoiles voisines du pôle. Une étoile est pointée à la lunette de façon à amener son image en coïncidence avec un réticule placé dans le plan focal de l'objectif, au croisement du fil vertical situé dans le plan du méridien et du fil horizontal. La disposition précédente à deux instruments séparés avait l'inconvénient de faire appel à deux observateurs, qui de plus n'étaient pas en mesure de mesurer la même étoile, tant le champ de l'oculaire pouvait contenir un grand nombre d'étoiles faibles. Le réticule se compose généralement d'une série de fils horizontaux fixes et mobiles, puis d'une seconde série de fils verticaux équidistants, aussi appelés *fils horaires*. Le plus souvent, on dénombre 9 à 11 fils fixes, dont un dans le plan du méridien, et un fil mobile porté par un chariot déplacé par une vis micrométrique. Le fil mobile sert à la détermination des distances des fils fixes et à l'observation des astres dont le mouvement apparent est très lent, ce qui est le cas des étoiles circumpolaires. La vitesse est de 15" par seconde de temps sidéral pour une étoile équatoriale, et se réduit à $15'' \cos \delta$ pour une étoile de déclinaison δ . Au lieu de faire un seul pointé, il faut en faire plusieurs avec le fil mobile le plus près du méridien. Le nombre de pointés varie selon la vitesse de l'étoile, la plus ou moins grande rapidité avec laquelle on peut lire le micromètre, la qualité de l'image. Par exemple, pour les étoiles circumpolaires, en raison de la lenteur de leur mouvement apparent, on peut effectuer jusqu'à 20 pointés avant

et après le méridien. Pour les étoiles équatoriales, deux à cinq pointés. Le fil mobile est actionné par une vis micrométrique dans le sens horizontal.

Celle-ci se fait par la détermination de l'instant de passage d'une étoile au méridien. La méthode classique est celle imaginée par Bradley en 1750, dite de *l'œil et de l'oreille* (*eye-and-ear*). L'observateur, après avoir lu la seconde marquée par la pendule sidérale, continue à la compter mentalement au son de l'échappement de l'horloge en même temps qu'il suit le déplacement de l'étoile dans le champ de la lunette. Il repère les positions de l'étoile aux deux battements consécutifs comprenant le passage par le fil vertical du réticule placé au foyer de la lunette ; il interpole alors la position par estimation des distances relativement au fil vertical, ce qui lui permet d'accéder au dixième de seconde de temps sidéral (soit une précision de 1,5"). Dans la pratique, le passage de l'étoile par sept ou neuf fils est noté, puis une valeur moyenne de passage sur le fil central est déduite. L'utilisation de plusieurs fils permet de réduire l'erreur de mesure à proportion de la racine carrée du nombre de fils. Ainsi, si l'on utilise neuf fils, cela donne une précision finale égale à la précision de lecture à un fil divisée par trois (soit 0,5"). Le cercle méridien étant aussi utilisé à la détermination de l'heure par l'observation des étoiles, on comprend que les étoiles équatoriales étaient privilégiées, car plus rapides et permettant donc la meilleure précision de pointage.

De la même manière, la précision dans la détermination de la déclinaison demandera une méthode de répétition de la mesure. Quand la lunette est pointée sur un astre, comment déterminer le dixième de seconde lors de la lecture à l'index ? La lecture seule à l'index, même équipé d'un vernier, permet de toute évidence de ne pas faire mieux que le dixième de minute (les cercles sont gradués toutes les 5' voire toutes des 2' pour les plus grands). Aussi, la lecture à l'index est-elle assistée par un système de micros-

scopes micrométriques qui visent le cercle muni de verniers permettant d'interpoler l'angle entre deux traits consécutifs. Ils sont au nombre de deux, quatre ou six, toujours en nombre pair et ont leurs axes placés perpendiculairement au plan du cercle gradué s'il est divisé sur le limbe, sur le prolongement des rayons si la graduation se trouve sur la couronne (comme les instruments anciens du type Gambey). On les groupe par deux aux extrémités d'un même diamètre. Chaque groupe de microscopes forme un couple. Il est important de lire au moins deux microscopes à 180° pour éliminer les erreurs qui proviennent du léger décentrage du centre du cercle gradué par rapport à l'axe du tourillon. Si la lecture à un microscope a une erreur probable de 0,5", alors la lecture faite à $2n$ microscopes aura une erreur probable divisée par racine de $2n$, soit 0,2". Elle décroît donc lentement avec le nombre de lectures. Dans la pratique, deux microscopes sont utilisés. La lecture au cercle se fait donc par la lecture à l'index sur le limbe gradué des degrés et minutes, auxquels on ajoute la moyenne des lectures faites aux microscopes des fractions de minutes et de secondes de degré. Sur un cercle de 30 pouces (76 cm), il est possible de lire directement au microscope à 2", et à 0,2" par l'estimation de la fraction de graduation. Une suite de corrections doivent ensuite être apportées à la lecture de la déclinaison : erreur d'origine – la direction du zénith ne correspond pas à une déclinaison mesurée de $90^\circ - \varphi$ où φ est la latitude ; flexion de l'instrument ; réfraction.

Le travail produit au cercle méridien par un observateur exige donc un grand nombre de tâches à accomplir. L'observateur doit être attentif à des choses très différentes : le pointé entre deux fils horizontaux et l'appréciation de l'instant de passage par les fils verticaux. Il doit également être plus pressé, puisqu'il ne dispose que de quelques minutes autour du méridien pour mener à bien les deux mesures de façon précise et complète, l'une par la première série de pointés à l'oculaire de la lunette et l'autre par la seconde série de relevés aux microscopes du cercle

gradué. En fonctionnement non dégradé, un cercle méridien demande donc la présence de deux observateurs (fig. 3). C'est la répétition des mesures (pointage des passages aux différents fils verticaux et mesures au cercle à l'aide d'au moins 2 télescopes diamétralement opposés) qui donne toute sa précision à l'instrument.

Le cercle méridien est un instrument d'une grande complexité technologique, et s'il est cependant possible de maîtriser aussi finement que possible les imperfections instrumentales, il en reste une qui s'avère beaucoup moins docile et contrôlable : l'observateur lui-même.

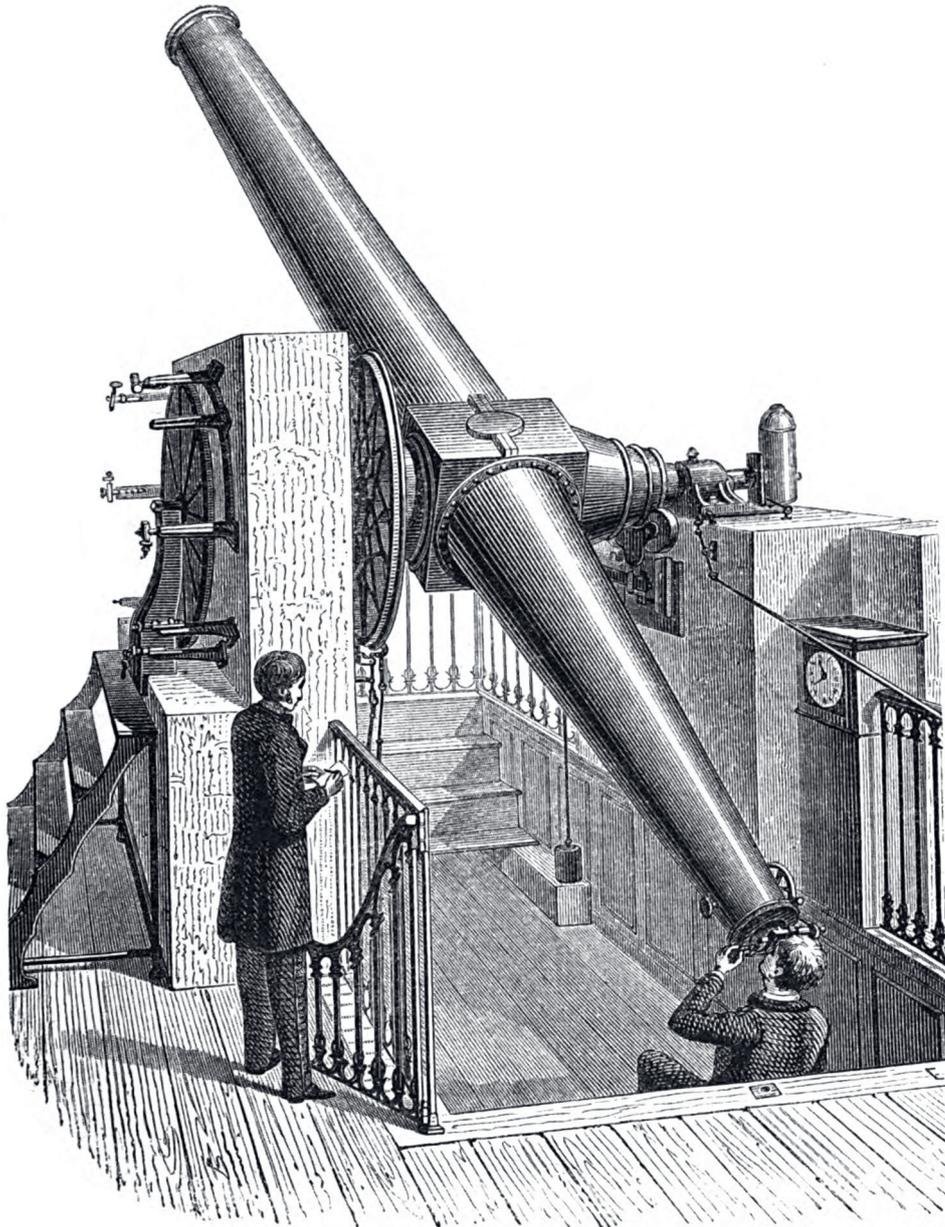


Fig. 3 - Grand instrument méridien de l'Observatoire de Paris mis en place en 1863.

Un observateur assis ou allongé dans la fosse creusée sous l'instrument relève les instants de passage aux fils du micromètre, tandis qu'un observateur procède à la lecture des microscopes qui visent le cercle de déclinaison visible sur le pilier. Le plus souvent, dans la pratique régulière des observatoires, un seul observateur était absorbé par ces deux mesures simultanément. Gravure tirée de C. André et G. Rayet, *L'Astronomie pratique et les observatoires en Europe et en Amérique, depuis le milieu du XVII^e siècle jusqu'à nos jours*, Paris : Gauthier Villars, 1874.

Domaine public

Vaincre l'équation personnelle

L'ÊTRE HUMAIN a lui aussi ses imperfections qui lui sont propres. C'est à lui que revient l'appréciation finale du dixième de seconde lors du passage d'un astre derrière les fils du micromètre, du pointé en déclinaison entre deux fils horizontaux, de la bissection d'un astre présentant un diamètre apparent, etc. Bessel est le premier à s'en rendre compte en 1823. Tout observateur engendre des erreurs systématiques et non accidentelles de mesure dont on ne peut plus faire l'économie. Pour Bessel, « entre l'à-peu-près et l'exactitude il y a un abîme [...] on ne peut plus douter qu'une différence constante involontaire puisse se produire entre deux observateurs, qui dépasse clairement les limites de l'incertitude accidentelle ».

Ces erreurs systématiques, dont Bessel s'efforcera d'en donner les lois, seront désignées par le terme d'*équation personnelle* qui désigne le temps de réaction variable entre les observateurs. Dès lors, tout observateur doit apprendre à connaître son équation personnelle, qui est généralement de quelques dixièmes de secondes, donc équivalente à la précision de la mesure faite à un fil. Elle est de plus variable dans le temps (*marche de l'observateur*) et dépend de l'éclat de l'astre observé (*erreur de grandeur*). L'observateur lui-même devient alors un instrument qui nécessite un étalonnage.

Dans la méthode de l'œil et de l'oreille, l'équation personnelle a des causes multiples : le rythme des battements de l'horloge – équation rythmique ; la persistance rétinienne – équation physiologique ; le défaut de coordination entre deux perceptions différentes – équation psychophysiologique ; la tendance à fractionner un intervalle de façon systématiquement erronée – équation décimale. Contre toute attente, les observateurs les plus chevronnés ont le plus souvent l'équation personnelle la plus grande, en raison de l'habitude acquise par la ré-

pétition du même type de comportement, le plus souvent une anticipation des instants de passage par les fils. Ainsi, William Ellis, retraité de Greenwich, se souvient encore en 1897 que « dans tous les cas, [il avait] l'habitude de retirer la seconde de l'horloge lorsque l'objet s'approchait du premier fil, de compter jusqu'au bout sans regarder l'horloge et de vérifier invariablement le comptage après le passage au dernier fil ».

Dès le milieu du XIX^e siècle, des procédés sont imaginés pour tenter de réduire, sinon de supprimer, l'équation personnelle. Avec les premières applications de l'électricité, des dispositifs enregistreurs sont proposés. À l'observatoire de Greenwich, George Bidell Airy (1801-1892) introduit dès 1853 le chronographe enregistreur à cylindre sur lequel l'observateur grave les instants de passage aux fils au moyen d'un petit manipulateur. Les premiers essais montrent une légère réduction de l'équation personnelle, mais il subsiste toujours un retard résiduel qui provient de la transmission de la volonté de l'œil à la main qui presse le manipulateur (équation psychophysiologique) et le défaut de coïncidence apparente entre l'axe du fil et le centre de l'étoile à l'instant auquel l'observateur donne le contact (équation de bissection). Au moins, l'observation chronographique permet-elle d'alléger la tâche monotone et ingrate de l'astronome. En France, à l'Observatoire de Paris, Le Verrier ne veut rien entendre du chronographe, car « cela fait de mauvais astronomes ».

Une autre solution, proposée très tôt, consiste à maintenir au moyen d'une vis micrométrique un fil mobile vertical sur l'étoile qui traverse le champ, les signaux marqués sur le chronographe donnent l'instant auquel l'astre se trouve en des points correspondants à des positions parfaitement déterminées de la vis micrométrique. La rotation de la vis entraîne également l'oculaire, de telle sorte que le fil mobile occupe toujours le milieu de la partie visible du champ. Ce procédé entraîne la quasi-disparition

de l'équation personnelle, qui se réduit à quelques centièmes de secondes de temps à peine.

Les exigences de l'observation méridienne en ce début de XIX^e siècle à l'égard des observateurs, qui devront être calibrés tout autant que les instruments, et les nécessités astronomiques imposées par l'inventaire précis et exhaustif des corps célestes, stimulé par la découverte des petits corps du Système solaire (astéroïdes), trouveront un terrain favorable à leur réalisation dans la révolution industrielle qui naît en Angleterre à partir du milieu du XVIII^e siècle. Celle-ci transforme en profondeur les modes de production et les rapports sociaux avec la constitution de nouvelles classes sociales, non plus liées à la terre, mais au capital. La classe ouvrière fait irruption avec le « *factory system* » lié à l'essor des usines et de la mécanisation. Les ouvriers vendent leur force de travail dans une usine en contrepartie d'un salaire. Marqueurs déterminants de cette révolution, la spécialisation et la division du travail, et l'organisation du temps de travail de l'ouvrier qui en est donc dépossédé. Cette révolution viendra bouleverser la fonction et le fonctionnement des observatoires qui seront les « *factory* » de l'astronomie, ses ouvriers, les astronomes, et ses biens de production, les données d'observation de position. Un nouveau système de gouvernance et d'organisation se met ainsi en place. Bien évidemment, ce système ne pouvait émerger qu'en Angleterre, inaugurant ainsi l'ère industrielle de l'astrométrie de précision, dont le cercle méridien en sera l'instrument emblématique. L'impulsion décisive viendra de l'astronome royal d'Angleterre, George Bidell Airy (fig. 4), nommé à cette fonction en 1835 par les lords commissaires de l'Amirauté.

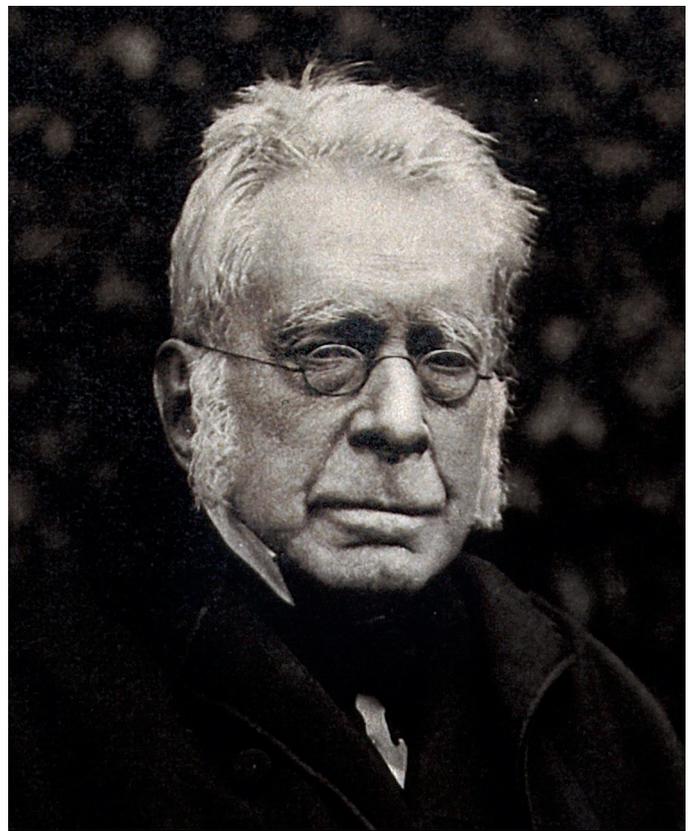


Fig. 4 - George Bidell Airy.

Photo Morgan & Kidd, 1891. Wellcome Collection.
Domaine public

Airy et l'observatoire-factory

AIRY PREND LA SUITE de John Pond (1767-1836) à l'observatoire royal de Greenwich. Tout comme Urbain Le Verrier qui succédera à François Arago à l'Observatoire de Paris en 1854, Airy entend réformer une administration qu'il juge laxiste, en introduisant une nouvelle rigueur et une responsabilité publique dans les opérations, ce qui n'avait pas été le cas chez tous les astronomes royaux précédents. Contrairement à ses prédécesseurs, Airy se considère avant tout comme un fonctionnaire, avec ce que cela implique comme devoirs à l'égard du public et de l'État. Airy est impressionné par le pouvoir des industriels et des ingénieurs contemporains de transformer à la fois la société et les arts de la fabrication en imposant une discipline efficace et rationnelle basée sur l'utilisation d'appareils mécaniques.

Pourquoi ne pas appliquer ces mêmes méthodes qui ont fait leurs preuves aux observatoires, faire que ceux-ci deviennent des *factory* de la science ? Après tout, les similitudes sont nombreuses, un observatoire a une mission à remplir, produire des données scientifiques de très haute précision, et dispose pour cela de personnels dont les tâches doivent être rationalisées à l'extrême. En définitive, tout ce qui sépare un observatoire d'une *factory* se mesure au profit réalisé en termes d'utilité publique et de prestige scientifique, plutôt qu'en livres sterling.

Le premier acte d'Airy est de définir clairement la mission principale dévolue à un observatoire comme celui de Greenwich. Dès sa prise de fonction, Airy met les choses au point, « ce n'est pas l'observation des planètes ou des nébuleuses », déclare-t-il en 1838, bien au contraire :

Il s'agit de l'observation régulière du soleil, de la lune, des planètes et des étoiles, lorsqu'ils passent au méridien, à quelque heure du jour ou de la nuit que ce soit, et dans aucune autre position ; observations qui exigent le soin le plus vigilant en ce qui concerne l'état des instruments, et qui impliquent ensuite une telle masse de calculs, que l'observation elle-même n'est, en comparaison, qu'une bagatelle. On en déduit les positions des divers objets, avec une précision qu'on ne peut obtenir d'aucune autre manière, et l'on peut s'en servir comme d'une base à laquelle on peut rapporter les observations des astronomes amateurs, avec des instruments différents.

Airy va donc s'inspirer des modes de production du *factory system*. En tout premier lieu, mettre en place une division du travail stricte pour faciliter la production à grande échelle de données astronomiques. Pour ce faire, il crée des « formulaires squelettiques » (*skeleton form*), une trentaine pour la réduction des observations essentiellement. Ce sont des formulaires standard qu'il suffit de remplir

avec les valeurs pertinentes. Pour les calculateurs ne sont requises que des connaissances élémentaires de l'arithmétique pour effectuer ensuite des calculs complexes et laborieux. Les assistants ne sont donc pas en charge de ces calculs, seulement des observations. Cette division des tâches a pour corollaire la déqualification du travail, rendu parcellaire pour chacun. Seul Airy a un pouvoir de contrôle et d'appréciation sur toute la chaîne de production. Pour l'exécution des calculs, de jeunes hommes sont embauchés et formés pour cela dès l'âge de 15 et 16 ans, puis licenciés au pied levé vers 20 ans.

L'astronome Edward Maunder (1851-1928) – qui a notamment travaillé sur les taches solaires –, embauché à l'observatoire royal en 1873 vers la fin du règne d'Airy, relate en 1900 que les assistants ne survivaient pas, sous « coups de boutoir » d'Airy, au-delà de l'âge de quarante-six ans, tant le régime disciplinaire était strict et sévère, avec un emploi du temps d'une extrême rigidité :

La régulation de ses subordonnés, surtout dans les premiers temps, était despotique à un point qui serait difficilement toléré de nos jours et qui a été à l'origine de sérieuses souffrances au sein du personnel qu'il considérait à l'époque, dans le même esprit que Pond, comme de simples corvées mécaniques. Pendant les trente-cinq années de son administration, les salaires de ses assistants sont restés discrètement bas et le traitement qu'il réservait aux surnuméraires serait sans doute qualifié aujourd'hui de « transpiration impitoyable ». Les malheureux garçons qui effectuaient les calculs des grandes réductions lunaires restaient à leur bureau de huit heures du matin à huit heures du soir, sans la moindre interruption, à l'exception d'une heure à midi.

À la clé cependant, les appointements peuvent aider à avoir le goût amer du sacrifice. Pour l'astronome

royal, 800 £ par an (25 000 francs) ; les assistants touchent entre 400 £ et 800 £ ; quant aux calculateurs, leur salaire est laissé au bon vouloir d'Airy, environ 180 £ (rapport de 1847 au *Board of Visitors*). Selon Simon Newcomb (1835-1909), Airy a « introduit la production à grande échelle dans l'astronomie, [...] [dans laquelle] l'astronome est devenu un simple opérateur ». Il s'agit également d'établir une hégémonie rigide du personnel et de réinstrumenter l'Observatoire avec un nouvel ensemble d'instruments fabriqués dans le but de produire des données astronomiques à grande échelle. Enfin, il y a aussi la publication « rapide » et régulière des observations.

Vers 1847, Airy se résout à abandonner le système d'observations méridiennes introduit par Bradley qui consiste à déterminer chacune des deux coordonnées par un instrument séparé. Pour lui, le cercle méridien est l'instrument idéal capable d'incarner ces nouvelles méthodes de production de données astronomiques à grande échelle. Il permet d'augmenter le nombre d'observations, de produire des résultats séparés pour les erreurs instrumentales à insérer dans les formulaires de squelette, et qu'il peut être conçu pour être placé sous surveillance constante.

Le grand cercle des transits d'Airy

QUAND AIRY ARRIVE À GREENWICH, le plus grand instrument méridien à disposition est un cercle mural de 6 pieds équipé d'une lunette de 4 pouces d'ouverture et de 10 pieds de long avec un grossissement de 150 fois qui a été mis en fonction le 23 mai 1812. Mais on comprend très vite qu'il n'est plus adapté à l'état des sciences, et en particulier à l'observation des petits corps, les astéroïdes.

Il devient donc indispensable de le remplacer par une lunette de plus grande ouverture. Comme le cercle mural n'est pas conçu pour porter une lunette plus grande, plus lourde, il faut concevoir un autre type d'instrument. Ce nouvel instrument rassemblerait à la fois le cercle mural et l'instrument des passages en un seul instrument. Dans son rapport annuel du 5 juin 1847 adressé au *Board of Visitors* de l'observatoire royal de Greenwich, Airy prépare les esprits en pointant les faiblesses de l'instrumentation actuelle en regard des développements de l'astronomie, notamment suite à la découverte des premiers astéroïdes (il évoque le cas de l'astéroïde *Astraea* ou *Astrée*, récemment découvert en 1845 par un astronome amateur allemand, Karl Hencke) :

Nos instruments actuels étaient, à l'époque de leur construction, les meilleurs du monde, mais ils ne le sont plus aujourd'hui, et nous le ressentons dans nos observations. C'est avec la plus grande difficulté que nous avons observé Astraea quelques fois, alors qu'elle a été observée à plusieurs reprises sur le continent. Nous sommes souvent incapables d'observer, sur le méridien, des étoiles qui ont été comparées à des comètes dans les observations équatoriales.

Le 20 décembre 1847, il adresse cette fois un courrier à chaque membre du *Board of Visitors* : il y a urgence et seul un nouvel instrument pourrait permettre à l'observatoire royal de Greenwich de revenir dans le giron des grands observatoires :

L'ouverture claire du verre-objet de notre instrument de transit est de près de cinq pouces – celle de notre cercle mural est de près de quatre pouces. Je pense qu'il est inutile de proposer de remplacer ces instruments par d'autres, munis de verres-objets d'une ouverture de six pouces – l'avantage d'une lumière accrue ne compensant pas la peine et les frais occasionnés par ce changement. J'ai donc, dans toutes mes réflexions sur ce sujet,

envisagé la construction d'instruments méridiens avec des verres-objets de huit pouces d'ouverture ; et m'étant assuré qu'il n'y a aucune difficulté mécanique qui puisse, dans la moindre mesure, nuire à l'exactitude des résultats obtenus par des instruments de cette dimension, j'ai fait quelques recherches sur la possibilité de me procurer ces verres-objets.

Pour les visiteurs qui connaissent la construction de notre cercle mural, il est presque inutile de faire remarquer qu'un objet-verre de cette taille et de ce poids ne peut pas être transporté par un instrument construit de la même manière que le cercle mural ; mais je ne vois aucune difficulté à le monter avec la forme et la disposition générale d'un instrument de transit.

Airy a déjà conçu lui-même les plans du futur instrument qu'il expose de manière précise à la façon d'un constructeur :

Ma proposition est donc la suivante : construire un cercle de transit avec un télescope d'une longueur focale de 12 pieds et d'une ouverture de huit pouces. Ce cercle de transit consisterait en un instrument de transit portant un cercle gradué de cinq ou six pieds de diamètre sur l'un des bras coniques de son axe. Sur l'autre bras, on peut porter un cercle de serrage fixe de mêmes dimensions (construction que je préfère de beaucoup à celle de la pince par un petit anneau, généralement adoptée par les artistes allemands). Les pivots d'orientation doivent être munis de microscopes pour l'examen de leurs mouvements ; l'intérieur du télescope doit être muni de butées pour la solidité, et aussi de butées pour protéger la plaque métallique des rayons du soleil ; et tous les autres détails de construction à adopter qui se sont révélés favorables à la fermeté et à la précision des meilleurs instruments modernes. Les graduations du cercle seront lues par cinq microscopes, divergeant de façon

conique à travers un pilier de pierre, et d'autres microscopes seront installés en permanence pour l'examen des graduations.

En fin communicant, afin de convaincre définitivement le *Board of visitors*, Airy souligne l'efficacité économique d'un tel instrument, qui permettrait de n'employer qu'un seul assistant là où auparavant il en fallait deux.

Pour autant que je sache, un seul observateur n'aurait aucune difficulté à observer l'ascension droite et la distance polaire, avec la plus grande précision, lors d'un même passage. Cette remarque s'applique à tous les objets, à l'exception du Soleil et de la Lune, lorsqu'il s'agit d'observer à la fois le membre supérieur et le membre inférieur ; dans ces cas, l'aide d'une autre personne pour lire les microscopes serait nécessaire.

La double observation d'un grand nombre d'objets serait sans doute laborieuse. Mais, compte tenu des circonstances locales de l'observatoire, on gagnerait beaucoup à réduire le nombre de personnes nécessaires à l'observation, car il serait alors possible d'imposer une régularité de présence qui ne dépendrait pas de l'état du temps, ce qu'il est difficile de faire à l'heure actuelle.

Le *Board of Visitors* approuve la demande dans sa résolution du 15 janvier 1848, qui est communiquée aux lords commissaires de l'Amirauté. La construction de la monture est confiée à Ransome et May d'Ipswich, et à Simms de Londres pour l'optique et la division des cercles. Le cercle a un diamètre de 6 pieds, porte une lunette de 8,1 pouces (20,5 cm) et est doté d'une focale de 11,5 pieds (3,66 m). Il est installé en 1850 à côté de celui de Bradley après que les cercles jumeaux de Pond ont été démontés. La première lumière est reçue le 1^{er} janvier 1851, date symbolique, impérativement voulue par Airy pour marquer en ce début de seconde moitié du

XIX^e siècle l'entrée dans une nouvelle ère de précision, laquelle serait portée par l'observatoire royal de Greenwich (fig. 2).

La caractéristique la plus frappante du cercle de transit d'Airy par rapport à d'autres instruments similaires est sa taille. Les cercles de transit construits par des fabricants d'instruments comme Johann Georg Repsold et Georg Friedrich Reichenbach, et même ceux habituellement fabriqués par Troughton & Simms, sont de taille relativement petite. Cette petite taille permet de rendre l'instrument réversible, ce qui constitue un autre moyen d'identifier l'erreur de collimation. Pour l'instrument d'Airy, elle est traitée au moyen de deux télescopes collimateurs fixés à des piliers de pierre, l'un du côté nord, l'autre du côté sud. La plus grande taille de l'objectif doit permettre d'observer le passage d'objets célestes moins lumineux (étoiles faibles ou astéroïdes). La mise au point d'une nouvelle technique de fabrication de tubes de télescope à partir de fer réfrigéré permet d'augmenter la taille de l'instrument. Cette méthode réduit également le poids de l'instrument, ce qui dans le cas contraire aurait entraîné des problèmes majeurs liés à la flexion du tube. Enfin, si la plus grande taille rend la manipulation de l'instrument plus exigeante, elle permet aussi de mesurer plus facilement ses erreurs instrumentales.

Le déroulement des observations et la succession des observateurs sont organisés chaque lundi par l'Astronome royal. En général, l'assistant qui fait les observations avec le cercle de transit est chargé de toutes les observations qui peuvent avoir lieu de 15 heures du temps moyen (3 heures du matin) à 15 heures suivantes ; et il est établi comme règle, à respecter aussi étroitement que les circonstances le permettent, qu'aucun assistant ne soit occupé deux jours successifs par des observations astronomiques.

La mesure des erreurs instrumentales doit être effectuée régulièrement les lundis, car l'instrument n'est pas réversible en raison de sa grande taille. Pour l'alignement de la visée des deux télescopes collimateurs, le tube du télescope doit être temporairement soulevé avec la machinerie placée sur les piliers. En raison de cette pratique, l'instrument est régulièrement réexaminé pour corriger ses erreurs. Les problèmes pratiques soulevés par ce levage sont apparus assez rapidement après l'installation de l'instrument. Lorsque des instruments similaires basés sur la conception d'Airy sont construits par la suite, plusieurs trous sont percés dans le cube central du corps du tube télescopique. Cela permet de créer une ligne de visée entre les collimateurs sans avoir à soulever le tube du télescope. L'intervention est couronnée de succès et les examens ultérieurs des erreurs de collimation sont effectués en utilisant les trous.

Cette révolution de l'office astronomique dépassera très largement les frontières de l'Angleterre et transformera les modes opératoires des observatoires, à tel point qu'en 1884, lors de la conférence internationale de Washington, le choix du premier méridien comme origine des longitudes terrestres se portera naturellement sur celui tracé par le cercle méridien de l'observatoire royal de Greenwich et non sur celui de l'Observatoire de Paris, dont la gloire passée, acquise au XVIII^e siècle à l'occasion des grandes opérations géodésiques de mesure du degré d'arc de méridien qui mèneront également à la définition du mètre comme nouvelle unité de mesure des longueurs, n'était plus qu'un lointain souvenir.

Le premier observatoire à s'inspirer des nouvelles méthodes d'Airy sera l'Observatoire impérial de Paris, qui trouvera à partir de 1854 en son nouveau [et premier] directeur, Urbain Le Verrier, l'alter ego d'Airy, mais avec le parfum de l'empire autoritaire issu du coup d'État du 2 décembre 1851 de Napoléon III.

Le Verrier : la mise en place de l'office à l'Observatoire de Paris

QUAND LE VERRIER est nommé à la tête de l'Observatoire impérial de Paris le 30 janvier 1854, il entend faire table rase de l'organisation laissée par son prédécesseur, François Arago (1786-1853), républicain convaincu qui toujours se refusa à prêter allégeance à l'empereur, obéissance exigée de tous les fonctionnaires.

Dès le mois de décembre 1854, il adresse un rapport au ministre de l'Instruction publique et à l'empereur sur l'état de l'Observatoire impérial de Paris. Il fixe les obligations d'un établissement comme l'est l'Observatoire. Si l'astronomie physique naissante demeure essentiellement pour Le Verrier une astronomie contemplative, c'est « la mesure des mouvements des astres [qui] nous a révélé les lois qui régissent l'harmonie des cieux : elle a été le point de départ du puissant essor qu'a pris dans les deux derniers siècles le génie scientifique de l'homme ». Il souligne le retard pris par la France par rapport à ce qu'a fait Airy depuis près de 20 ans, depuis 1836 ! L'Observatoire doit par conséquent revenir à sa mission première, réaliser des observations de position de très haute précision des étoiles, des planètes et des petites planètes. En outre, il est impératif que ces observations soient ensuite réduites (c'est-à-dire corrigées de tous les effets de précession, de réfraction, d'aberration, de nutation, d'instrumentaux, d'équation personnelle) et publiées, c'est là la fonction essentielle d'un observatoire. La mise en place d'un tel système de production, depuis la mesure jusqu'au catalogue en passant par la donnée réduite, nécessite en conséquence une rationalisation des tâches et des procédures, et une codification des fonctions de chacun. Il justifie ainsi la mise en place récente du Bureau des calculs, exigeant « d'user d'autant de calculateurs que l'exigeraient les besoins de son service, le direc-

teur de Greenwich en a employé jusqu'à vingt et un, lorsqu'il réduisait les observations anciennes ! Notre ambition n'est pas si grande ».

Déjà, dès le 30 janvier 1854, le rapport sur la réorganisation de l'Observatoire de Paris et du Bureau des longitudes du ministre de l'Instruction publique et des Cultes, Hippolyte Fortoul, adressé à l'empereur et établi par une commission *ad hoc* dont Le Verrier faisait partie, rappelle que « le personnel d'un établissement destiné au perfectionnement de l'astronomie doit être un personnel d'élite ». L'Observatoire souffre d'un manque d'attractivité auprès des « jeunes gens distingués », car « il ne faut pas s'y tromper [...] c'est à multiplier le nombre des observateurs qu'il faut tendre ; car sans cela comment alimenter le personnel de l'Observatoire impérial, comment assurer son rang à la France [...] Des milliers d'observations, effectuées sans plan et sans méthode, sont, pour la science, un encombrement stérile ». La commission conclut son rapport par la recommandation de nommer à la tête de l'Observatoire impérial, un directeur permanent – Arago, son prédécesseur n'avait que le titre de directeur des observations qu'il tenait d'une décision du Bureau des longitudes de 1834 –, une « pensée dirigeante », à qui il incombera de publier chaque année le recueil des observations effectuées pendant le cours de l'année précédente, ainsi que leur réduction et leur comparaison avec la théorie. L'Observatoire se déleste ainsi de la tutelle du Bureau des longitudes datant de la Révolution.

Le Verrier le dit : « être pourvu des instruments les meilleurs et les plus exacts ne servirait à rien si l'on ne s'appliquait en même temps à réunir et à former un personnel d'élite, capable de mettre convenablement en œuvre les nouvelles ressources. » Le Verrier rappelle que les astronomes adjoints reçoivent au plus 3 000 francs, les astronomes titulaires avancés dans la carrière recevant quant à eux 5 000 francs au maximum. Le Verrier juge alors la situation

« par trop mesquine ». Il n'hésite pas à évoquer les conditions de travail pénibles, travail de nuit, dans le froid avec les fenêtres ouvertes pour permettre une égalisation des températures extérieur/intérieur, sans lumière. Pour Le Verrier, « véritable soldat au bivouac, l'observateur, placé à sa lunette, est presque condamné à l'immobilité », et après semblable expérience, « on ne parvient pas à obtenir dans le jour un sommeil calme et réparateur, comme l'est celui de la nuit. [...] et il faut trouver le temps de réduire les observations précédentes et de préparer celles de la nuit suivante ». On ne peut permettre aux astronomes de se charger de fonctions extérieures « sans soustraire à l'Observatoire le temps nécessaire pour les remplir ». Ce vibrant discours aux accents révolutionnaires de Le Verrier sur la condition de l'observateur – l'astronome adjoint – ne vise en réalité qu'à persuader le ministère de mieux rémunérer ce « personnel d'élite » de façon à rendre la profession attractive. En 1878, le contre-amiral Ernest Mouchez (1821-1892), successeur de Le Verrier en 1878 à la tête de l'Observatoire, dresse un état des appointements à l'Observatoire : 5 000 francs pour le directeur ; entre 7 000 et 10 000 francs pour les astronomes titulaires ; entre 3 500 et 7 000 francs, soit un minimum de 10 francs par jour, pour les astronomes adjoints. Le salaire des ouvriers parisiens à la même époque était de moins de 5 francs par jour, plus communément moins de 3 francs par jour. Le Verrier avait été entendu par son ministre et par l'empereur, et même si le travail de l'astronome-observateur était alors extrêmement difficile, il était néanmoins enviable en termes de rémunération dans le contexte socio-économique de l'époque. Pour autant, Le Verrier n'entend rien changer aux conditions de travail, qui bien au contraire se durciront, comme nous le verrons par la suite.

À la différence de Greenwich, l'organisation mise en place par Le Verrier se compose de personnels rangés selon une hiérarchie bien codifiée et très rigide. À Paris, point d'*assistants*, mais des *astronomes*. On trouve au haut de la pyramide les astronomes titu-

lares, qui ont la charge d'un service (service méridien, services des équatoriaux, etc.), les astronomes adjoints, ceux qui sont assujettis aux nuits froides passées derrière l'un des instruments méridiens, et les aides-astronomes, principalement affectés aux calculs liés à la réduction des observations. Le recrutement de ces « personnels d'élite » se fait par le passage de tests, seuls les meilleurs entrent à l'observatoire. Les astronomes adjoints officient aux instruments méridiens pendant plusieurs années, l'accès au grand équatorial, vécu comme une promotion, leur est le plus souvent refusé.

Le grand instrument méridien de l'Observatoire de Paris

E N CE QUI CONCERNE le service méridien, à son arrivée, l'Observatoire dispose d'un parc instrumental vieillissant, peu performant et obsolète au regard de ce qui se fait dans d'autres grands observatoires, comme celui de Greenwich et de Poulkovo. Dans un pavillon aménagé entre 1828 et 1836 sur décision d'Arago, à l'est du grand bâtiment historique construit par Perrault, on trouve, rangés côte à côte, un vieux cercle mural de Nicolas Fortin de 1,85 m de diamètre avec un objectif de 4 pouces (11 cm) datant de 1822, une lunette méridienne de Gambey installée en 1834 (bien que commandée en 1823 !) et équipée d'un objectif de 15 cm de diamètre – le plus grand à l'époque de son installation – et un cercle mural de Gambey de 2 m de diamètre placé en 1843, mais pourvu d'un objectif de seulement 12,5 cm de diamètre. Dans son rapport à l'empereur de décembre 1854, Le Verrier dresse un constat sans appel sur le parc instrumental de l'Observatoire impérial, tout en soulignant les graves inconvénients de procéder à des mesures méridiennes à l'aide de deux instruments différents. Dans son élan réformateur et quelque part fondateur également, il fait bien comprendre en quoi l'intérêt scientifique

de son projet de nouvel instrument vient se marier fort opportunément avec l'intérêt économique à n'utiliser qu'un seul observateur au lieu de deux :

Si l'on eut recours à deux instruments distincts, la lunette méridienne et le cercle [mural], pour déterminer les deux coordonnées de l'étoile, ce fut uniquement à cause de l'imperfection des arts mécaniques, qui n'eût pas permis d'atteindre la même exactitude au moyen d'un seul instrument [...] Ajoutons que la détermination simultanée des deux coordonnées d'un astre nécessite la présence de deux observateurs. Le service devient ainsi plus pénible [double vérification des instruments], tout en occasionnant une double dépense annuelle [...] La lunette méridienne et le mural ont été d'ailleurs si peu organisés pour marcher l'un avec l'autre, que le temps nécessaire pour une observation est double au cercle de ce qu'il est à la lunette méridienne : ce qui fait que la moitié de nos observations est incomplète par l'absence d'une détermination de déclinaison.

Son ardent plaidoyer aboutit à l'installation d'un cercle méridien de 9 pouces d'ouverture le 19 avril 1863 – mieux que les 8 pouces de Greenwich, bien que Le Verrier souhaitait 10 pouces afin de mettre la concurrence à distance pour un certain temps –, équipé d'un cercle de lecture de 2 m de diamètre, d'un objectif de 23,6 cm de diamètre et de 3,85 m de distance focale (fig. 5). L'instrument, pompeusement désigné *grand instrument méridien*, est construit dans les ateliers de la maison Secrétan dirigés par Wilhelm Eichens (1818-1894). Le Verrier a souhaité qu'un abri en forme de simple hangar soit construit pour l'occasion à l'ouest de l'édifice, en lieu et place du grand amphithéâtre érigé par Arago pour son cours d'astronomie populaire, amphithéâtre qui devenait « sans objet » selon Le Verrier. En définitive, l'amphithéâtre sera bien rasé pour céder la place aux nouveaux appartements du directeur de l'observatoire. Quant au nouvel instrument, il

rejoindra ceux du cabinet d'observation, à la place du cercle mural de Fortin, en dépit des problèmes d'instabilité et de transmission des vibrations par les piliers reposant sur les fondations de l'Observatoire. En outre, d'importants travaux de maçonnerie seront réalisés pour le creusement d'une fosse d'accès à l'instrument (fig. 6). Les deux microscopes horizontaux sont réglés le 3 juin et les observations de distance polaire au grand instrument méridien peuvent commencer.

Le Verrier choisit une configuration instrumentale différente de celle de Greenwich. Le grand instrument méridien est asymétrique, non retournable, et n'est doté que d'un seul cercle de lecture des hauteurs. Le relevé des coordonnées des étoiles se fait donc toujours, nécessairement, dans une seule et même configuration instrumentale. Ce choix à la conception suppose la perfection de la construction mécanique, des qualités optiques et de l'installation du cercle méridien à l'Observatoire. Avec deux cercles de lecture, et par le retournement de l'instrument, il devient en effet possible de connaître les défauts de positionnement de l'instrument, en répétant les mesures avant et après retournement, sur un premier cercle, puis sur l'autre. Le Verrier, adepte d'une astronomie efficace, choisit donc un instrument sans retournement et ne possédant qu'un seul cercle gradué, propre à rationaliser le temps d'observation du personnel, et l'affecter à des tâches assurément plus utiles à ses yeux.

L'activité du service méridien s'articule autour de grands programmes d'observation au long cours. Le plus ancien, et l'un des plus longs également, est celui de la révision des positions des 47 390 étoiles du catalogue de Lalande, *l'Histoire céleste*, observées entre 1791 et 1801. Cette réobservation est décidée par Le Verrier en 1854. Les deux instruments méridiens de Gambey sont mis à contribution (lunette de 15 cm et de 2,40 m de focale, et cercle de 12 cm de diamètre et de 2 m de focale). Ce ne sera qu'en

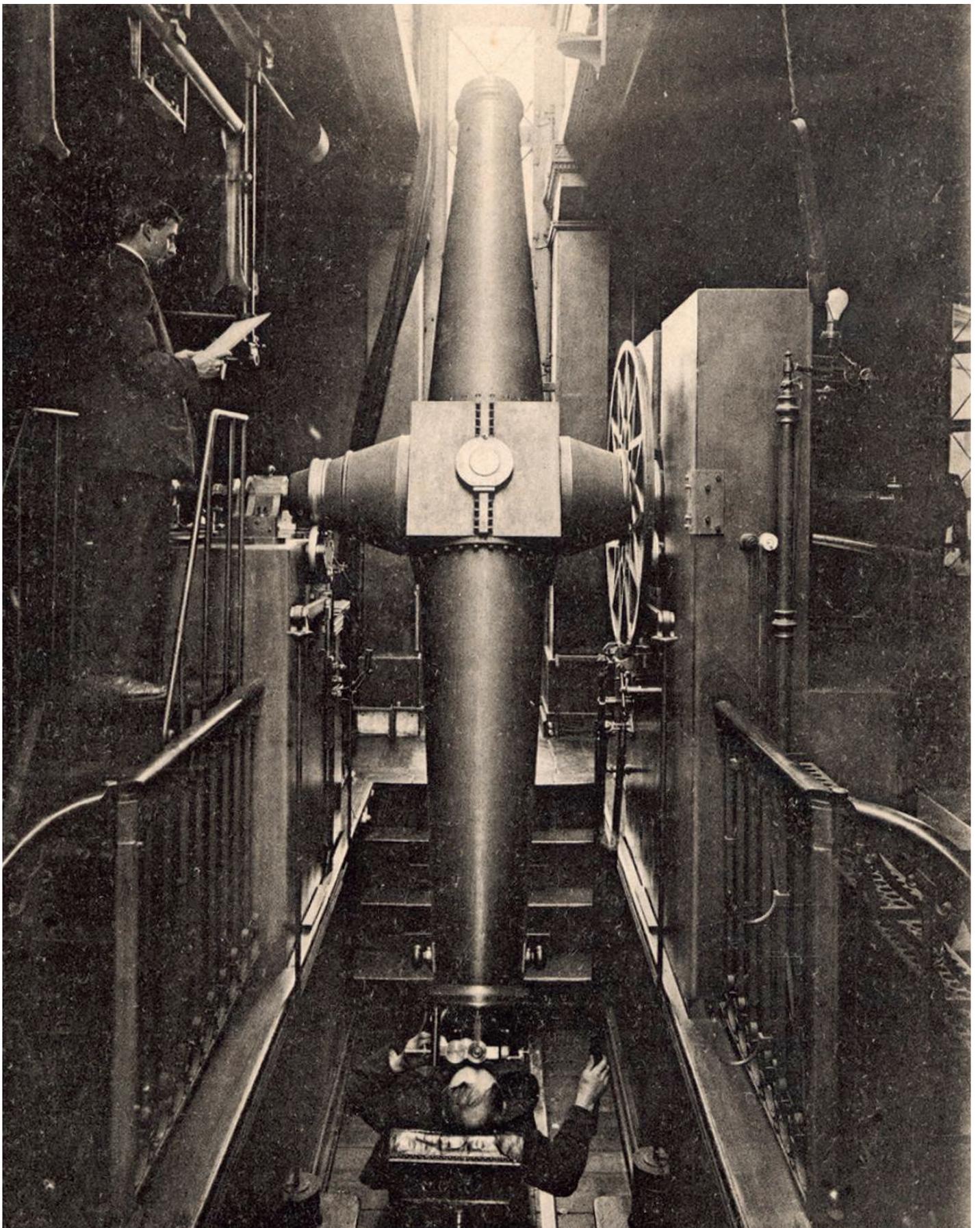


Fig. 5 - Grand instrument méridien de l'Observatoire de Paris installé en 1863 dans la salle du service méridien (de nos jours disparue).

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

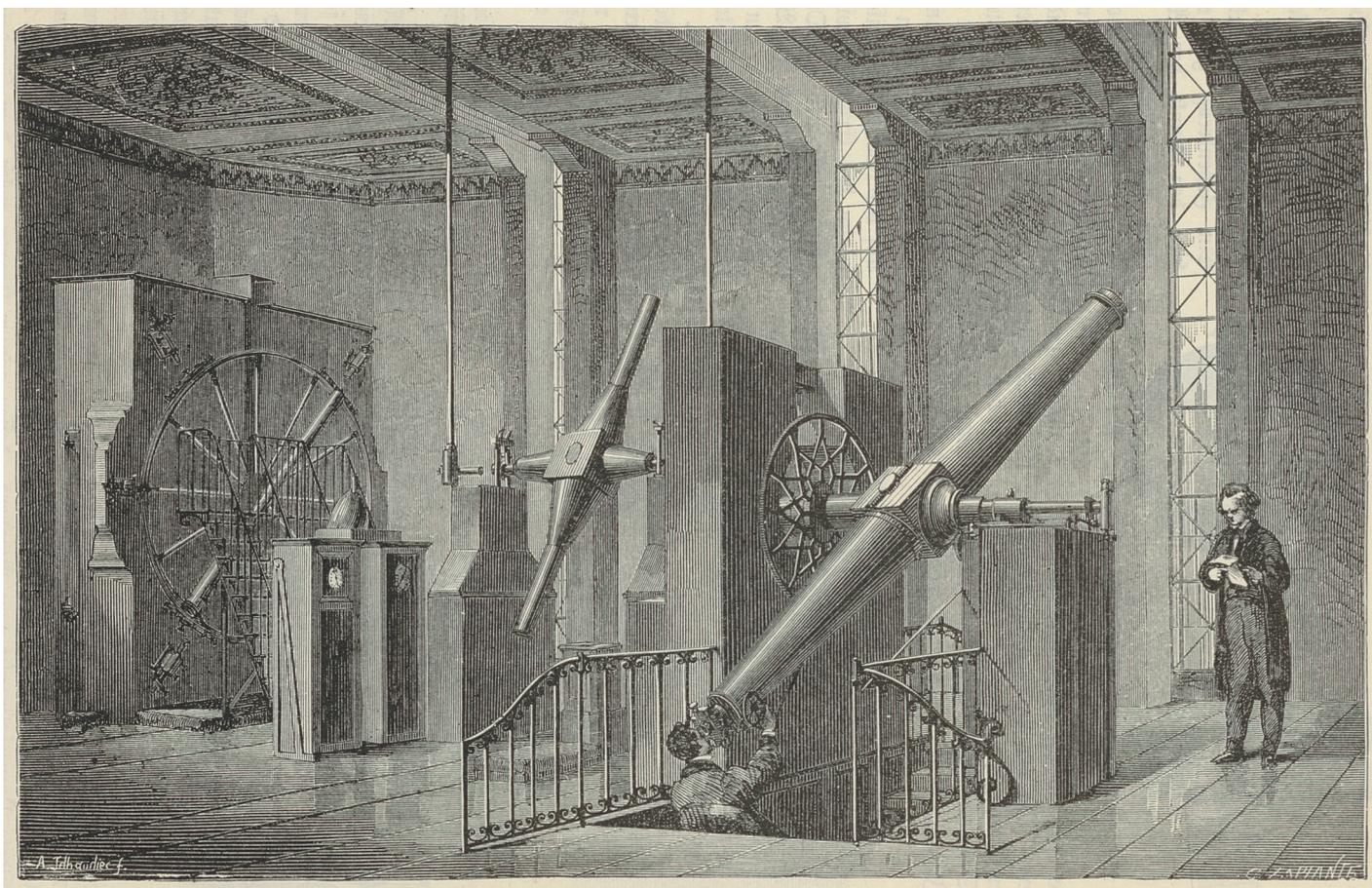


Fig. 6 - Salle méridienne (de nos jours disparue).

De gauche à droite, le cercle mural de Gambey de 1843, la lunette méridienne de Gambey de 1834 et le grand instrument méridien de Secrétan de 1863.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

1878 que Mouchez décidera de la construction et de la publication d'un grand catalogue reposant sur l'ensemble des données collectées entre 1837 et 1881. Il faudra plus de vingt années de travail du service des calculs pour réduire ces observations. Le premier volume du *Catalogue de l'Observatoire de Paris* paraîtra en 1887, quant au huitième et dernier volume, il ne sera publié qu'en 1903. Il comprend les résultats de 387 474 observations méridiennes portant sur 34 733 étoiles de Lalande. Cependant, les observations se poursuivront jusqu'en 1899 sur le grand instrument méridien et le cercle du jardin qui sera présenté par la suite. Elles donneront naissance au *Catalogue complémentaire des étoiles de Lalande*, dont le dernier volume sera imprimé en... 1933. Il englobe 26 257 étoiles, dont certaines figurent déjà dans le premier catalogue. Au final, le service

méridien aura consacré 62 années à rassembler 600 000 observations qui demanderont 50 années au service des calculs pour les réduire, les vérifier et les publier.

La longue nuit des astronomes adjoints

LE **VERRIER A RAISON** quand, en 1854, il décrit avec force détails la pénibilité du travail des astronomes adjoints, c'est-à-dire des observateurs proprement dits. Cette pénibilité s'est accrue après 1863 avec la mise en service du grand instrument méridien. Le tableau

sombre esquissé par Le Verrier n'a cependant pas pour dessein d'améliorer leurs conditions de travail, mais uniquement d'améliorer leurs appointements, ainsi que les logements, car ces personnels sont alors logés à l'Observatoire dans des appartements insalubres. Il fallait rendre attractif le métier. Le Verrier a également raison quand il souligne le fait qu'un seul observateur allait pouvoir faire le travail de deux observateurs auparavant. Les comptes rendus annuels des observations méridiennes montrent bien que, la plupart du temps, le travail mené sur le grand instrument méridien est le fait d'un seul homme. L'observateur doit agir promptement : d'une part, il doit surveiller le passage de l'étoile à mesurer par chacun des fils du micromètre tout en comptant mentalement le battement de chaque seconde de l'horloge sidérale et réaliser l'interpolation nécessaire (méthode de l'œil et de l'oreille), et d'autre part, s'extirper de son inconfortable position allongée au fond de la fosse pour monter lire la position affichée par l'index du cercle et relever les lectures aux différents microscopes. Tout cela doit être réalisé parfaitement en un temps très court, pas plus de 30 secondes-1 minute, temps pendant lequel l'étoile, qui avance sidéralement de façon imperturbable dans le champ de l'oculaire, conserve autour de son passage au méridien une trajectoire quasiment horizontale. Cela exige de la concentration et une excellente condition physique. Selon les étoiles observées, mais également en fonction de l'observateur, la cadence d'observation est de l'ordre d'une mesure toutes les 3 à 10 minutes. Un observateur aguerri et rompu à l'exercice réussit à faire en moyenne entre 25 et 30 étoiles par séance de 3 heures consécutives avant d'être relevé de son service par un autre observateur.

Pour juger du caractère ingrat et épuisant de ce type d'observation, nous pouvons nous rapporter au témoignage de l'un des astronomes adjoints de l'époque, Louis-Jules Gruey (1837-1902), futur directeur de l'observatoire de Besançon. Suite à de multiples demandes de congés auprès de Le Verrier,

toutes refusées, le vase déborde lors de l'été 1867. Le Verrier lui répond le 21 août 1867 :

Vous n'avez rien fait cette année, la moitié de l'éventuel (on dirait aujourd'hui une prime) des six premiers mois vous a été mal acquis. Je ne peux pas vous accorder de vacances.

Gruey tente de se défendre :

Monsieur le directeur, j'ai eu plusieurs fois l'honneur de vous demander des vacances annuelles dont j'ai un besoin si sérieux ; vous avez bien voulu me les refuser constamment. La fatigue du service pénible que j'ai régulièrement fait toute l'année m'oblige à les prendre ; j'obéis, mais à regret, à la nécessité.

Le Verrier en profite pour diminuer son traitement. À la suite de quoi, Gruey écrit au ministre le 23 août 1867 :

Je ne me suis jamais plaint de mes appointements qui s'élèvent à 295 frs par mois. Cette somme qui m'interdisait le superflu m'assurait au moins généreusement le nécessaire. J'ai eu l'honneur d'informer Votre Excellence que, par ordre personnel de M. Le Directeur de l'observatoire, elle avait été réduite le mois d'août à 175 frs, c'est-à-dire presque de moitié.

Gruey décrit le travail harassant d'une nuit d'observation lui demandant ensuite un temps triple pour la réduction de l'ensemble des observations. Il précise que cela avait autrefois suggéré une prime de 15 centimes par étoile. Il lui est demandé d'améliorer sa productivité en la doublant, faisant passer le nombre d'observations journalières à 60. Il n'y a aucune récompense, pas même scientifique, car dans les publications, il est désigné par la lettre E. Un soir de mai, il rapporte même que Le Verrier lui-même a

voulu l'entraîner par l'exemple, mais ne réussit à observer que 27 étoiles. Au total, sur cette année 1867, on dénombre 81 nuits d'observation pour Gruey, dont plusieurs ont été enchaînées sans aucun repos intermédiaire. Finalement, Gruey doit démissionner et accepter un emploi dans un lycée à la rentrée 1869. Il sera nommé à la tête du tout nouvel observatoire de Besançon le 16 janvier 1879 (qui sera bâti entre 1883 et 1885). Une chaire d'astronomie est créée spécialement pour lui à la faculté des sciences de Besançon le 15 octobre 1883.

Durant la direction de Le Verrier, on compte un nombre impressionnant de révocations ou de démissions, et même un suicide. Soixante-trois astronomes et calculateurs quittent l'Observatoire entre 1854 et 1867 !

Émile Plantamour (1815-1882), ancien assistant d'Arago et directeur de l'observatoire de Genève, écrit dans un courrier adressé le 4 mars 1854 à Ernest Laugier (1812-1872), beau-fils d'Arago sommé par Le Verrier de quitter l'Observatoire en 1854 :

*Le bouleversement me paraît complet ;
non seulement l'organisation est changée,
mais on nomme à la place de directeur un
homme [...] dont le caractère n'est pas de nature
à permettre autour de lui des collaborateurs,
mais seulement des subordonnés, des machines.*

Après la mort de Le Verrier, un historien, Victor Advielle d'Arras (1833-1903), chargé de la vente de sa bibliothèque, recueille des témoignages auprès de Charles-Aimé Daverdoing, peintre familier de Le Verrier :

Les astronomes de l'Observatoire ont un traitement fixe ; et touchent en outre des gratifications. Or, ces gratifications, Leverrier ne les accordait qu'à ceux qui travaillaient en raison exacte

de la masse de travail accompli. Il était sur ce point impitoyable, et n'acceptait aucune excuse [...] il était d'une exigence excessive pour les calculateurs de l'Observatoire ; et ne tenant compte ni de l'âge, ni de la valeur des auxiliaires, il exigeait d'eux une somme de travail souvent exagérée, d'où les plaintes vives sans cesse renaissantes.

Treize hommes en colère

LE 1^{ER} FÉVRIER 1870, dans un mémoire de 16 pages sur l'état actuel de l'Observatoire impérial présenté par les treize astronomes, titulaires et adjoints, de l'Observatoire à l'adresse du ministre de l'Instruction publique, la tyrannie administrative et scientifique est dénoncée au grand jour (fig. 7).

Parmi les signataires, les chefs de service et astronomes titulaires du service de géodésie, du service d'astronomie physique, du service des équatoriaux, du service méridien. Y figurent également deux futurs directeurs de l'Observatoire de Paris, Maurice Loewy et Félix Tisserand.

Les astronomes dressent la liste des dissensions et dysfonctionnements, et décrivent avec force exemples « l'arbitraire le plus implacable » exercé par Le Verrier. Les mots sont durs, « régime odieux », « oppression », « persécutions » ...

Toute initiative était interdite à l'Observatoire, ou devait aboutir au chef qui se réservait, à son moment, de reprendre l'idée pour son propre compte [...] Le travail personnel, s'il ne pouvait être absolument empêché, devenait ordinairement la cause de persécutions spéciales.

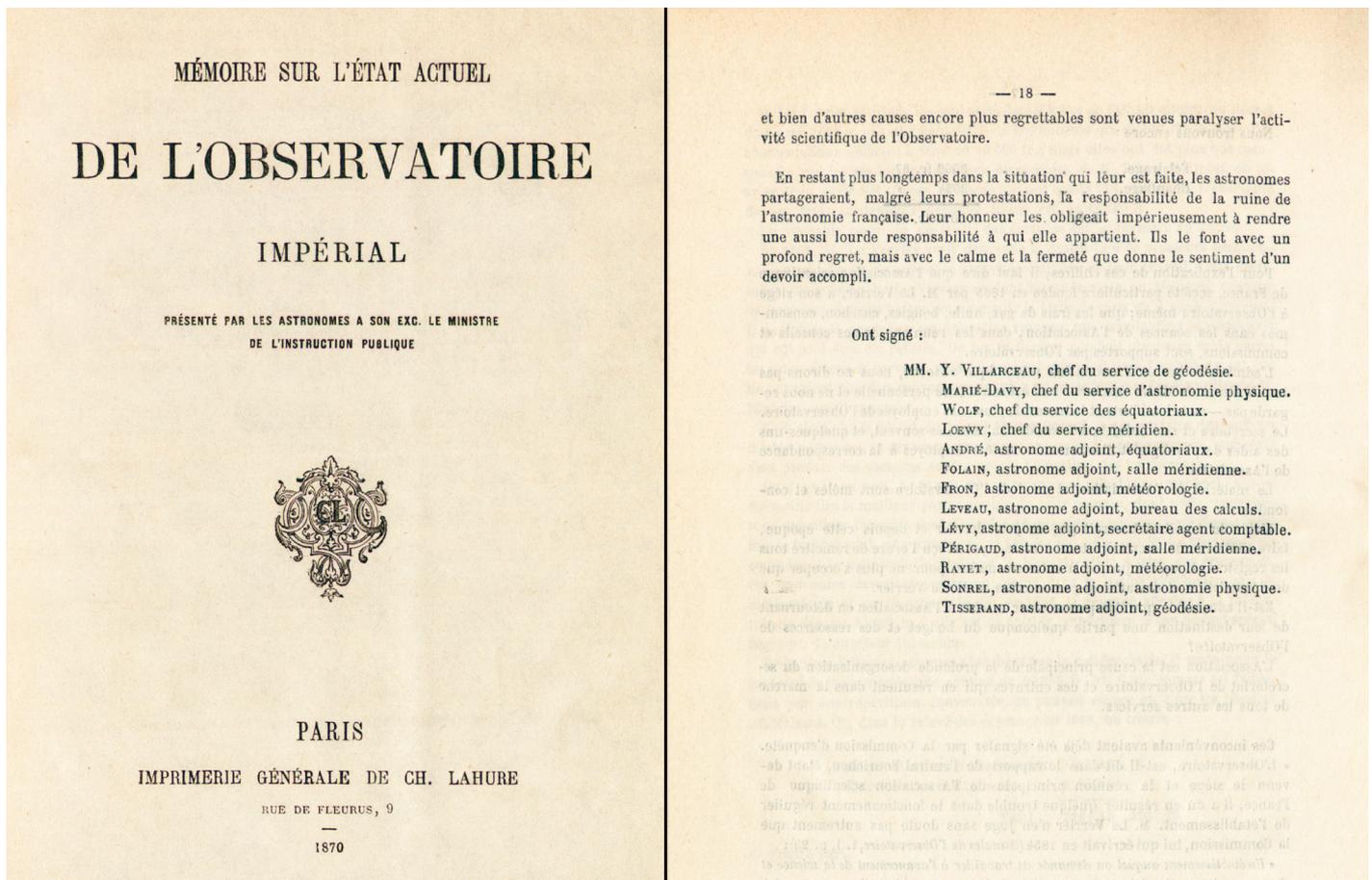


Fig. 7 - Mémoire du 1er février 1870 signé par 13 astronomes de l'Observatoire impérial de Paris adressé au ministre de l'Instruction publique, exposant les motifs de leur démission collective.

Domaine public

Ils dénoncent ce qu'on appellerait de nos jours un fort turn-over. Ainsi, « dans l'intervalle de dix-huit mois, trente-cinq traitements [ont] été rayés sur les feuilles d'émargement [...] et les astronomes ne connaissaient la mesure qui les frappait qu'au moment de toucher leurs traitements ».

Face à une forte insatisfaction montante, la commission constituée le 30 janvier 1870 et qui doit se réunir tous les deux ans réussit à se réunir de nouveau en octobre 1867 pour examiner la situation de l'Observatoire. Elle propose une réorganisation de l'établissement qui a principalement pour objet de mettre fin au pouvoir absolu, jugé « excessif », de son directeur. Cette proposition mènera au décret du 3 avril 1868 avec la création d'un conseil, composé du directeur et des astronomes titulaires avec pour mission de délibérer sur toutes les ques-

tions intéressant l'Observatoire, et devant se réunir une fois par semaine à jour fixe. Finalement, quatre membres étrangers y seront adjoints par le Conseil d'État et les séances seront mensuelles. Le nouveau décret institue également les chefs de service avec pour objet de « diminuer le pouvoir discrétionnaire de M. Le Verrier ».

Concernant le service de la salle méridienne, il est intéressant de noter dans les délibérations du conseil du 14 janvier et du 11 février 1869 que le service doit réunir sept observateurs, excluant de fait les aides-astronomes. Ce nombre finira par passer à cinq, puis tombera à trois.

Le mémoire se conclut par la démission collective des astronomes, car « en restant plus longtemps

dans la situation qui leur est faite, les astronomes partageraient, malgré leurs protestations, la responsabilité de la ruine de l'astronomie française ». Le Verrier est alors relevé de ses fonctions de directeur le 5 février 1870. Avant son départ de l'Observatoire, le conseil propose au gouvernement du Pérou de prêter à l'Observatoire un cercle méridien réversible construit à Paris par Wilhelm Eichens en 1868 pour l'observatoire de Lima, dans l'attente de la construction et de la livraison d'un nouveau cercle demandé par le conseil. Le gouvernement du Pérou donne son accord, mais Le Verrier le refuse au motif qu'il n'en a pas besoin, même si le ministre de tutelle a proposé de porter au budget 1871 la somme nécessaire à sa construction.

Charles Delaunay (1816-1872) remplace alors Le Verrier à la direction de l'Observatoire de Paris, mais se noie accidentellement en 1872 en rade de Cherbourg. Le Verrier est alors rappelé en 1873 pour diriger de nouveau l'Observatoire impérial. Il ne se fait pas prier.

Le cercle du jardin

D **RETOUR** à l'Observatoire, Le Verrier met en pratique sa première idée, déjà énoncée dans son rapport de 1854 : installer un cercle méridien sous un abri construit dans le jardin sud à l'écart de l'édifice central, dont les fondations transmettent les vibrations qui proviennent des « trépidations » des quartiers environnants. Par ailleurs, le grand instrument méridien, bien que de dimensions supérieures à celles de celui de Greenwich, ne parvient pas à rivaliser avec son concurrent anglais en termes de performances.

Il reprend donc son bâton de pèlerin à la recherche des fonds nécessaires pour un nouvel instrument

construit différemment, les crédits proposés par le ministère à cette fin en 1871 n'étant plus d'actualité. Un riche amateur d'astronomie, Raphaël Bischoffsheim (1823-1906), répond à l'appel de Le Verrier. Un nouveau cercle méridien est construit en 1878 par Eichens, identique en tous points à celui du Pérou dont Le Verrier avait refusé le prêt demandé par le conseil sept ans auparavant... Il est installé à l'intérieur d'un abri dans le jardin de l'Observatoire (fig. 8). C'est le fameux « cercle du jardin » qui deviendra l'instrument de référence pour tous les observatoires français (fig. 9).



Fig. 8 - Abri du cercle du jardin.

Credits J.-C. Counil/Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Ce cercle est constitué d'une lunette de sept pouces (18,9 cm) d'ouverture et de 2,32 m de focale placée dans le plan du méridien, dont l'axe est porté par deux solides piliers en maçonnerie aux fondations profondes, sur lesquels sont implantés deux cercles d'un mètre de diamètre, équipés de six microscopes micrométriques pour la lecture des déclinaisons.

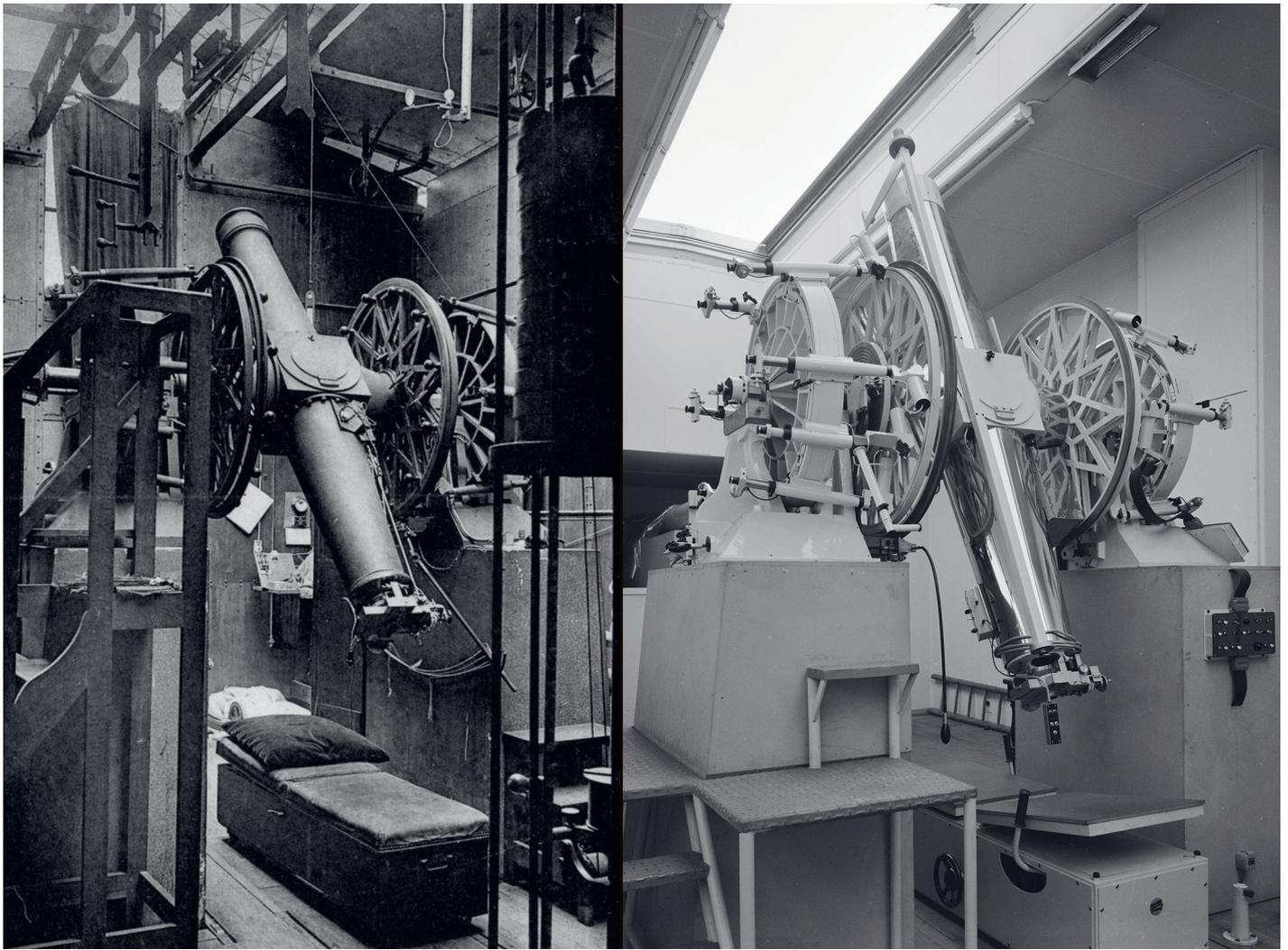


Fig. 9 - Cercle du jardin de l'Observatoire de Paris.

À gauche, photo de la fin du XIX^e siècle (auteur inconnu) ; à droite, le cercle modernisé dans les années 1960.

Crédits J.-C. Counil/Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

sons. Il est muni d'un système de retournement, ce qui permet la correction des mesures dues à la flexion du tube de la lunette, et donc améliore *in fine* la qualité des observations. Il sera utilisé par les astronomes parisiens jusque dans les années 1960. Il intégrera le projet de révision du catalogue de Lalande et sera également utilisé pour l'observation des 306 étoiles fondamentales servant à la détermination astronomique de l'heure par l'observation de leur passage méridien.

Épilogue

L **LE CERCLE MÉRIDIDIEN** est l'instrument de référence de la seconde moitié du XIX^e siècle pour tous les observatoires d'État depuis l'impulsion décisive donnée par l'astronome royal George Bidell Airy le 1^{er} janvier 1851. Ainsi, entre 1838 et 1899, au moins 49 cercles méridiens sont installés dans les observatoires des États-Unis, bien qu'il n'y ait pas eu d'année au cours de laquelle tous étaient opérationnels simultanément. En France, on en dénombre 11 entre 1863 et 1890 (tableau I), dont la très grande majorité est mise en service après la création des observatoires de province dans le cadre de la réorganisa-

tion de l'astronomie, enclenchée dans les premières années de la Troisième République et qui trouve sa traduction administrative dans des décrets publiés en 1878. À lui seul, le cercle méridien a généré une somme considérable de travaux, de recherches et d'articles pour en caractériser les sources d'erreur et par là même en réduire l'influence. Comme le dit en 1840 Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846), directeur de l'observatoire de Königsberg : « Chaque instrument est fabriqué deux fois, une fois dans l'atelier de l'artisan, en laiton et en acier, et une autre fois par l'astronome sur papier, au moyen de la liste des corrections nécessaires, qu'il détermine dans ses recherches. » Ces efforts ont tendu vers tant de raffinements que le capitaine Julius F. Hellweg, surintendant de l'USNO (US Naval Observatory de Washington), note que « le cercle de transit est sans aucun doute le plus développé de tous les instruments astronomiques ». L'astronome Heinrich Eichhorn résume en 1974 les enjeux métrologiques

posés par le cercle méridien : « si l'on considère que, fondamentalement, il s'agit de mesurer de grands angles avec une précision meilleure qu'une dixième de seconde d'arc. Sur un cercle d'un diamètre de l'ordre d'un demi-mètre, cela correspond à quelques dixièmes de micron à la périphérie ».

Ainsi, en 1889, Repsold propose un nouveau dispositif de micromètre enregistreur impersonnel. Le micromètre impersonnel se répand rapidement parmi les observatoires, à l'exception notable de l'Observatoire de Paris. Cependant, après l'exposition universelle de Paris, le nouveau directeur de l'Observatoire, Maurice Loewy (1833-1907), sera sensible aux dernières innovations. Il demandera à Paul Gautier (1842-1909) la fourniture d'un chronographe en 1903, puis d'un micromètre automatique enregistreur impersonnel en 1906 (fig. 10). Dans ce modèle d'automatisation, l'observateur se

Observatoire	Date installation	Constructeur	Cercle (m)	Ouverture (cm)	Distance focale (m)	Abri	État en 2023
Paris	1863	Secrétan	1,00	23,6	3,85	Salle méridienne	Démonté
Paris	1877	Eichens	1,00	19,0	2,32	Abri isolé	En place
Marseille	1878	Eichens	1,00	18,8	2,30	Abri isolé	Démonté
Lyon	1879	Eichens	0,80	15,0	2,00	Abri isolé	Démonté
Hendaye (Abadia)	1880	Eichens	0,70	15,0	2,00	Abri isolé	En place
Strasbourg	1880	Repsold	0,69	16,0	1,88	Salle méridienne	En place
Bordeaux	1881	Eichens	1,00	18,9	2,32	Abri isolé	En fonctionnement
Besançon	1885	Gautier	1,00	18,9	2,37	Abri isolé	En place
Nice	1887	Brunner	0,80	20,0	3,20	Abri isolé	Détruit
Alger	1888	Gautier	1,00	18,9	2,40	Abri isolé	En place
Toulouse	1890	Gautier	1,00	18,9	2,30	Abri isolé	En place

Tableau I – Cercles méridiens installés dans les observatoires français à partir des années 1860.

D'après F. Le Guet-Tully et J. Davoigneau, 2005.

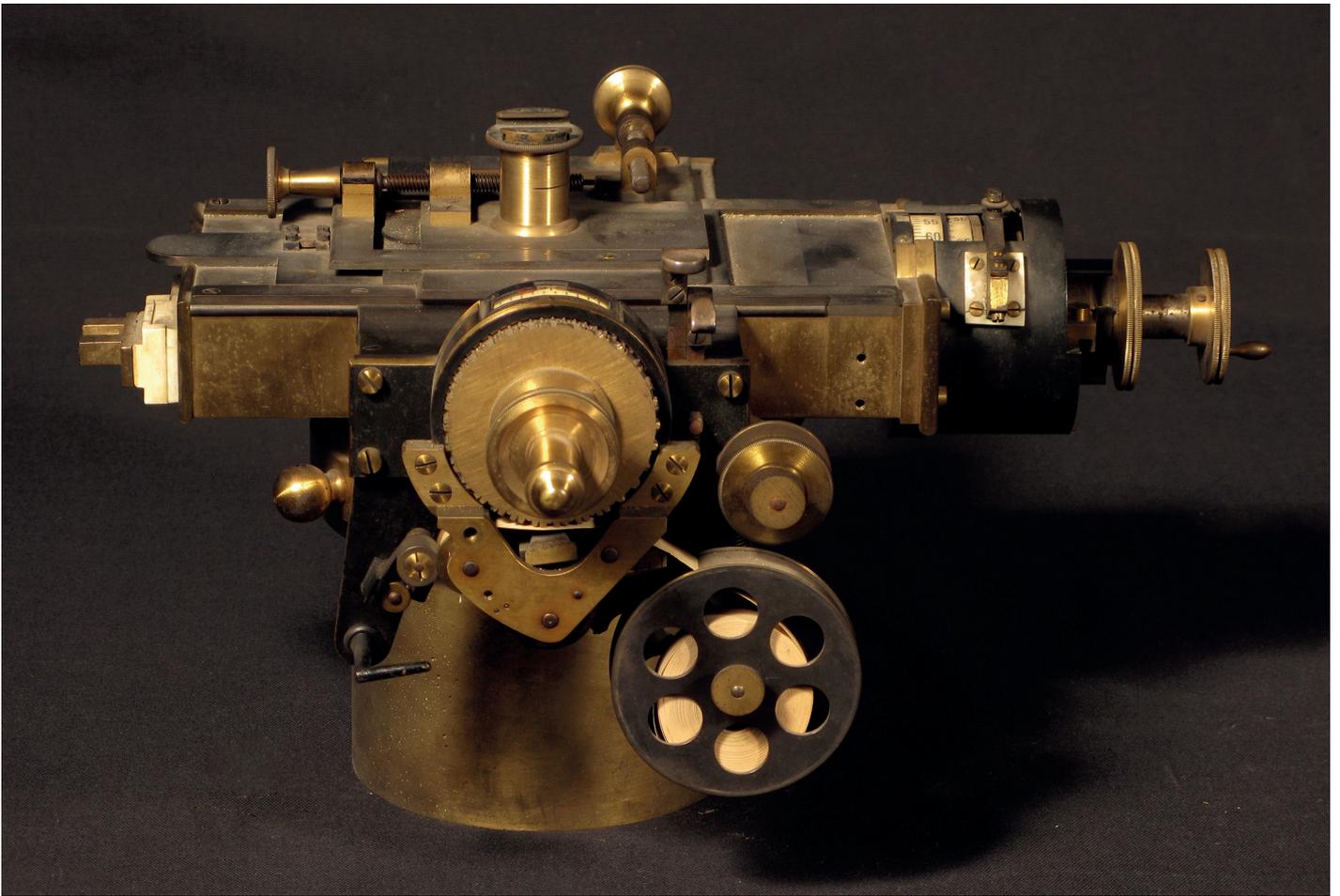


Fig. 10 - Micromètre auto-enregistreur du cercle méridien du jardin de l'Observatoire de Paris.

Construit par Édouard Bouty, il a remplacé celui de Paul Gautier en juillet 1913.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

contente d'embrayer le moteur actionnant le fil mobile et d'ajuster la coïncidence à l'aide d'un différentiel pour corriger les petites dérives constatées. Le moteur d'entraînement du fil mobile est muni d'un réducteur de vitesse, variable suivant la déclinaison. Ces dispositifs viendront équiper le cercle méridien du jardin à partir de 1908. La précision de lecture atteinte est alors de 0,015-0,02 s (soit 0,2-0,3"). Les cercles méridiens poursuivront leurs mesures jusque dans les années 1970, sans jamais dépasser cette limite en précision.

Après la publication du catalogue Hipparcos en 1997 – issu du télescope éponyme qui fera l'objet d'un chapitre consacré à l'astrométrie spatiale – la plupart des cercles méridiens sont arrêtés. Il reste néanmoins en-

core quelques cercles méridiens en activité, dont le fonctionnement a été automatisé (programmation de la succession des étoiles à observer, commande des moteurs qui dirigent le tube dans la direction de l'étoile et mise en route du micromètre au moment auquel l'étoile entre dans le champ). C'est le cas du cercle méridien de Carlsberg opéré conjointement par l'observatoire de l'université de Copenhague, par l'observatoire de Greenwich et l'observatoire de Roque de los Muchachos (Institut d'astrophysique des Canaries) à La Palma. Transféré en 1984 sur l'île de La Palma, il est équipé d'une lunette de 17,8 cm et de focale de 2,66 m. Un détecteur CCD 2k x 2k a été installé en mars 1999, permettant de mesurer des étoiles jusqu'à la magnitude 17, ce qui permet l'observation de 100 000 à 200 000 étoiles par nuit avec une précision en position comprise entre 0,035" et

0,1". Grâce à cet instrument, de nos jours renommé *Carlsberg meridian telescope*, est publié le *Carlsberg Meridian Catalog*. Le dernier volume qui remplace les précédents – le volume 15 – a été publié en 2013 ; il contient plus de 134 millions d'étoiles entre -40° et $+50^\circ$ de déclinaison.

En France, seul le cercle méridien de Bordeaux est toujours en activité. C'est un cercle en acier avec 7200 traits de 3 minutes de degré gravés sur une bande de nickel. La plupart du temps, l'instrument méridien est utilisé en mode relatif, par rapport à des étoiles dont on suppose les positions parfaitement connues, par exemple des étoiles dites *de référence*.

Les cercles les plus performants au monde sont les instruments de La Palma et de Bordeaux avec une erreur de 0,10" en $\alpha \cos \delta$ et 0,15" en δ jusqu'à une magnitude de 12,5. Ceci permet d'atteindre des précisions de l'ordre de 0,04" à 0,05" au bout d'une dizaine d'observations. Celui de Bordeaux sert notamment à l'observation des corps du Système solaire.

Quant à l'observatoire-*factory*, il s'installa durablement en France. La démission du 1^{er} février 1870 a également laissé des traces. Le 12 octobre 1920, lors d'une séance du conseil de l'observatoire de Meudon, il est souligné que les observatoires ont mauvaise réputation depuis 50 ans. Le fonctionnaire d'observatoire était né avec Le Verrier, comme une seconde fondation, ou une refondation de l'Observatoire de Paris. La crise des vocations s'est installée par la même occasion. En 1901, le conseil de l'Observatoire de Paris, sous la direction de M. Loewy – ancien signataire du mémoire du 1^{er} février 1870 –, fait état d'une « situation fâcheuse », par manque de productivité de l'établissement, en particulier du personnel du service méridien.

*L'esprit scientifique manque entièrement,
les instruments ne sont pas suffisamment étudiés,*

la durée des séances est insuffisante, les observations les plus importantes ne sont pas effectuées dans la seconde moitié de la nuit, les absences pour cause de maladie ou d'indisposition se reproduisent fréquemment [...] Le Conseil est d'avis qu'il faut réagir contre une situation fâcheuse qui peut s'aggraver encore et qui est de nature à compromettre le prestige scientifique de l'établissement.

Comme dans un jour sans fin...

Références

- C. André et G. Rayet, *L'Astronomie pratique et les observatoires en Europe et en Amérique, depuis le milieu du XVII^e siècle jusqu'à nos jours*, Paris : Gauthier Villars, 1874.
- F.W. Argelander, *De observationibus astronomicis a Flamsteedio institutis*, Königsberg, 1822.
- J.E. Arlot, G. Dourneau, J.F. Le Campion, « An Analysis of Bordeaux Meridian Transit Circle Observations of Planets and Satellites (1997-2007) », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 484, 2008, p. 869.
- D. Belteki, « The Crimes of Astronomical Instruments and Their Panopticon at the Royal Observatory, Greenwich during the Middle of the Nineteenth Century », *Une culture de la précision : les cercles méridiens aux XIX^e et XX^e siècles*, Cahiers François Viète, Nantes Université, 2023.
- F. Boquet, *Les observations méridiennes, théorie et pratique*, t. I : Instruments et méthodes d'observation ; t. II : Corrections instrumentales et équations personnelles, Paris : Octave Doin et Fils éditeurs, 1909.
- A. Chapman, « Sir George Airy (1801-1892) and the Concept of International Standards in Science, Timekeeping and Navigation », *Vistas in Astronomy*, vol. 28, 1985, p. 321.
- A. Chapman, « Porters, Watchmen, and the Crime of William Sayers: the Non-Scientific Staff of the Royal Observatory, Greenwich, in Victorian Times », *Journal of Astronomical History and Heritage*, vol. 6, n° 1, 2003, p. 2.
- W. Chauvenet, *A Manual of Spherical and Practical Astronomy*, vol. 1 : Spherical Astronomy ; vol. 2 : Theory and Use of Astronomical instruments (1st edition), Philadelphia : J.B. Lippincott Company, 1889.
- F. Le Guet-Tully et J. Davoigneau, « L'inventaire et le patrimoine de l'astronomie : l'exemple des cercles méridiens et de leurs abris », *In Situ*, vol. 6, 2005.
- E.W. Maunder, *The Royal Observatory, Greenwich; its History and Work*, London : Religious Tract society, 1900.
- A.V. Nielsen, « Ole Rømer and his Meridian Circle », *Vistas in Astronomy*, vol. 10, 1968, p. 111.
- A. Saint-Martin, « L'office et le télescope. Une sociologie historique de l'astronomie française, 1900-1940 », thèse de doctorat, Université Paris IV-Sorbonne, 2008.
- S. Schaffer, « Astronomers Mark Time: Discipline and the Personal Equation », *Science in Context*, vol. 2, 1988, p. 115.
- R.W. Smith, « A National Observatory Transformed – Greenwich in the Nineteenth Century », *Journal for the History of Astronomy*, vol. 22, 1991, p. 5.