



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

LE CIEL À LA CARTE

Une planète manque à l'appel

LE 13 MARS 1781, dans la constellation des Gémeaux, William Herschel (1738-1822) découvre une étoile floue, inconnue, qui se déplace lentement d'une nuit à l'autre. Son aspect lui fait penser à une comète. Aussitôt, une batterie de télescopes et de lunettes astronomiques se braque vers la zone du ciel identifiée. Les astronomes sont à l'assaut de cette nouvelle supposée comète. Finalement, on se rend compte assez rapidement que l'objet en question n'a pas les traditionnelles caractéristiques d'une comète ; surtout, il ne présente pas de queue cométaire. Les premières études de trajectoire montrent en outre que l'orbite de l'objet inconnu autour du Soleil est presque circulaire. Le doute n'est plus permis, il s'agit là d'une nouvelle planète – la septième planète du Système solaire – qui se situerait à une distance du Soleil double de celle de Saturne. Le Système solaire s'agrandit instantanément, la loi de la gravitation de Newton s'étend un peu plus dans la profondeur des cieux. La nouvelle planète sera baptisée *Uranus*.

La découverte d'*Uranus* a une conséquence immédiate inattendue : la remise au goût du jour d'une pseudo-loi des distances planétaires publiée dix ans plus tôt par l'astronome Johann Elert Bode (1747-1826) en 1772. Bode avait alors repris une note de bas de page figurant dans un ouvrage de 1766 de Johann Daniel Titius (1729-1796), professeur de mathématiques à Wittenberg. C'est une loi empirique – connue de nos jours sous le nom de *loi de*

Titius-Bode – qui exprime sous la forme d'une suite arithmétique-géométrique la distance des planètes au Soleil exprimée en unités astronomiques (distance moyenne Terre-Soleil) sous la forme suivante :

$$a_n = 0,4 + 0,3 \times 2^{n-1}$$

Pour chaque valeur entière de l'indice n , la formule donne une valeur du demi-grand axe a_n de la planète selon le tableau 1.

Planètes	n	a (Bode)	a vrai
Mercure	∞	0,4	0,39
Vénus	1	0,7	0,72
Terre	2	1	1
Mars	3	1,6	1,52
?	4	2,8	?
Jupiter	5	5,2	5,2
Saturne	6	10	9,55
Uranus	7	19,6	19,2
?	8	38,8	?

Tableau 1 – Valeur du demi-grand axe de chaque planète du Système solaire obtenue à partir de la loi de Titius-Bode comparée à sa valeur réelle.

Les colonnes portant des points d'interrogation correspondent à des distances auxquelles aucun corps n'avait encore été identifié.

L'approximation est plutôt convaincante. Quand Uranus est découverte, Bode s'acharne à mener ce que l'on appelle aujourd'hui une *fouille d'archives* afin de déterrer des observations de la planète dans les vieux catalogues de John Flamsteed et de Tobias Mayer. Deux observations sont trouvées, la planète ayant alors été prise pour une vulgaire étoile : l'une le 23 décembre 1690 par Flamsteed et l'autre le 25 septembre 1756 par Mayer. Les positions connues d'Uranus couvrent ainsi près de 90 années, soit un peu plus d'une période orbitale complète, ce qui permet de calculer la valeur de son demi-grand axe : 19,18 au. Bode fait immédiatement le rapprochement avec la valeur donnée par sa loi, 19,6 au. L'accord est si saisissant qu'il ne peut s'agir d'une simple coïncidence. Après tout, quand Kepler publie ses lois du mouvement céleste en 1609 et en 1619, personne n'en comprend l'origine avant que Newton la dévoile soixante-dix ans plus tard. Pourquoi n'en irait-il pas de même avec la loi de Titius-Bode ?

En attendant d'en comprendre la secrète signification, si tant est qu'il y en ait une, la loi contient en elle une prédiction forte, une lacune existe pour $n = 4$: il resterait donc au moins une planète à découvrir, laquelle se trouverait entre Mars et Jupiter à 2,8 au.

Les six détectives de Lilienthal

LA QUÊTE D'UNE HUITIÈME PLANÈTE séduit un Hongrois germanophone, le baron Franz Xaver von Zach (1754-1832). Il officie comme astronome à la cour du duc de Gotha depuis l'été 1786. Dès 1887, il entreprend la fouille de la bande zodiacale, considérant à juste titre que si une huitième planète existe, elle doit alors nécessairement errer comme ses sept sœurs dans les environs de l'écliptique. Après l'édification de l'observatoire de Gotha en 1792 sur la colline Seeberg, von Zach organise en 1798 la pre-

mière conférence astronomique de l'histoire. Partir seul à la recherche d'une hypothétique planète revient à chercher une aiguille dans une botte de foin ; à plusieurs, la recherche devrait être moins difficile. Lors de cette conférence, l'astronome français Joseph-Jérôme de Lalande (1732-1807), que von Zach appelle respectueusement « le grand-père des astronomes », suggère qu'il faut mobiliser un grand nombre d'astronomes pour mener une traque coordonnée et systématique de la « planète de Bode », et que pour cela, il est nécessaire de disposer d'un catalogue et d'un atlas céleste sérieux.

Deux années supplémentaires s'écoulent jusqu'à ce que von Zach, persévérant et obstiné, organise de nouveau une réunion d'astronomes, mais cette fois à l'observatoire de Lilienthal du 13 au 20 septembre 1800. L'observatoire a été établi en 1779 à Lilienthal (la vallée des Lys), près de Brême, par un amateur *sérieux*, Johann Hieronymus Schroeter (1745-1816), magistrat de profession. Ils sont six : von Zach, Schroeter, Carl-Ludwig Harding (1765-1834), Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840), Ferdinand Adolph Freiherr von Ende (1760-1816) et Johann Gildemeister (1753-1837). Ils se baptisent eux-mêmes les « détectives de Lilienthal », fondateurs de la première « police céleste » (*Himmelspolizei*), dont l'unique mission est de faire régner la loi dans les cieux, la loi de Bode bien évidemment, et pour cela partir à la recherche de la planète portée disparue, la planète de Bode, censée se trouver entre les orbites de Mars et de Jupiter.

Les six détectives décident de diviser le zodiaque en 24 zones, selon la proposition de Lalande, chacune large de 15° et s'étendant sur une largeur de 75° de part et d'autre de l'écliptique. Ces zones sont assignées à 24 astronomes différents. Outre les six de Lilienthal, 18 autres collègues européens sont sollicités. Le président de cette coterie est Schroeter, et von Zach en est le secrétaire. Parmi les 18 autres détectives, Johann Elert Bode (1747-1826)

et 12 autres astronomes qui ne sont pas germanophones provenant du Danemark, de Suède, de Russie, de France – dont Pierre Méchain (1744-1804) et Charles Messier (1730-1817) –, d'Angleterre – William Herschel et Nevil Maskelyne (1732-1811) – et d'Italie – dont Giuseppe Piazzi (1746-1826) à l'observatoire de Palerme. La première décision est l'envoi d'un courrier aux astronomes-détectives le 1^{er} janvier 1801. Le même jour, avant même que le courrier ne lui parvienne, Piazzi découvre la première petite planète, Cérès. Il travaille alors depuis 11 ans sur un projet de relevé de la position de plusieurs milliers d'étoiles.

Piazzi écrit aussitôt à Lalande et à Bode, mais son courrier met trois mois pour arriver, la nouvelle petite planète n'est déjà plus observable, car trop proche du Soleil. Piazzi n'a observé le petit corps que durant 41 jours à peine sur un petit arc de ciel couvrant à peine 3°. De plus, l'objet était d'un éclat dix fois inférieur à celui d'Uranus, avec une magnitude de 8. Le mystérieux petit corps ne sera retrouvé qu'à la fin de 1801 grâce aux calculs d'un jeune mathématicien brillant de 23 ans, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) – surnommé bien plus tard le « prince des mathématiciens ». Gauss donne sa prédiction à von Zach qui le retrouve à seulement 0,5° de la position prédite le 31 décembre 1801. La boucle est bouclée. L'orbite peut ainsi être calculée et son demi-grand axe est de 2,77 au, de nouveau étonnamment proche de la valeur prédite par la loi de Bode. Mais est-ce bien là la planète tant espérée ? Elle est certes à la bonne distance, située entre Mars et Jupiter, mais doit être considérablement plus petite en taille au vu de son éclat. Le succès est mitigé. Le trouble s'approfondit les années suivantes, après la découverte de Pallas par Olbers le 28 mars 1802 à Brême, puis de Junon le 1^{er} septembre 1804 à Lilienthal par Harding, deux des 24 membres de la police céleste. Trois petits corps, quasiment à la même distance, cela fait désordre. William Herschel les baptisera du nom d'*astéroïdes* en 1802, car aucun d'entre eux n'avait de dimensions planétaires. Par

ailleurs, ils se présentaient dans un télescope sous les apparences trompeuses d'une étoile, d'où leur autre appellation de *planètes télescopiques*. Olbers en découvrira un autre en 1807, Vesta, puis plus rien. Il finira même par se plaindre de l'absence de nouvelles découvertes en 1822 dans une lettre adressée à l'éditeur de la revue *Astronomische Nachrichten* :

Les grandes cartes de Bode, par exemple, contiennent à la fois trop peu et trop d'étoiles. Ce paradoxe apparent devient facilement compréhensible si l'on considère que ces cartes contiennent un grand nombre de petites étoiles, dont l'éclat est souvent mal indiqué, et laissent de côté un nombre beaucoup plus important d'étoiles tout aussi brillantes ou même plus brillantes, de sorte que les constellations indiquées sur les cartes perdent toute ressemblance avec celles que l'on trouve dans le ciel.

La même année, Harding – le découvreur de Junon – achève la publication du septième et dernier volume de son atlas céleste contenant 60 000 étoiles observées à l'observatoire de Lilienthal.

Cependant, en 1806, Olbers prend une initiative heureuse : le recrutement du jeune Friedrich Wilhelm Bessel comme assistant de Schroeter à l'observatoire de Lilienthal. Bessel est alors un jeune comptable féru d'astronomie qui a contacté Olbers pour lui demander de lui confier une tâche astronomique sur laquelle il pourrait travailler pendant son temps libre. Olbers obtient de Schroeter un poste à Lilienthal et charge Bessel de calculer la trajectoire de la comète nouvelle de 1807, ce dont s'acquitte Bessel en l'espace d'un an, ce qui lui vaudra un prix de l'Académie de Paris. Le rigoureux Bessel arrive à point nommé pour relancer le grand dessein de la police céleste.

Les cartes du ciel de Bessel

QUAND EN 1810, le jeune Bessel reçoit une invitation pour installer un nouvel observatoire à Königsberg et enseigner l'astronomie à l'université Albertus, il en profite pour y entreprendre un inventaire systématique du ciel à l'aide d'un nouveau et précis cercle méridien de Reichenbach. Il passe alors trois années à l'observatoire de Lilienthal qu'il quitte juste avant sa destruction par les troupes napoléoniennes lors de leur retraite en 1813.

Les catalogues et atlas existants, tels que ceux de Flamsteed, Bradley, Piazzi, Lalande, Mayer et Bode, souffrent d'insuffisances rédhibitoires qui font obstacle à la découverte de nouveaux objets célestes : ils sont incomplets, comportent des régions sous-peuplées ou surpeuplées d'étoiles, et ne s'étendent tout simplement pas aux étoiles au-delà de la 9^e ou 10^e magnitude, que Bessel juge nécessaire, parce que seulement trois des quatre astéroïdes connus sont plus brillants que la magnitude 8. En se donnant une limite en magnitude de 10, un grand nombre de découvertes tomberait dans l'escarcelle des astronomes, mais il y a un obstacle de taille, la tâche ne pourra être menée à bien par un seul astronome en un seul observatoire. Le travail devra être divisé et mené selon une procédure bien précise, la même pour tous afin d'éviter les problèmes de consistance entre observateurs.

Mis à part la précision des cartes existantes et leur incomplétude, elles sont surtout rendues presque inutilisables à cause de l'absence de consistance en ce qui concerne la brillance des étoiles. Cette inconsistance est dramatique, non seulement d'un catalogue à l'autre, mais également au sein d'un même catalogue. Les observateurs, en dépit de tous leurs talents, n'ont accordé qu'une importance très mineure à cet aspect de la mesure, principalement

attentifs à la mesure précise des positions. Bessel a même repéré des étoiles cataloguées (par exemple chez Maskelyne) qui sont d'un éclat si faible qu'elles n'ont pu être observées avec l'instrument utilisé ! Pour Bessel, le catalogue le plus consistant en termes de brillance est l'*Histoire céleste* de Lalande, qu'il prend comme point de départ pour la détection des étoiles de 10^e magnitude, qui sont aux limites optiques d'un télescope de 10 cm d'ouverture.

L'idée principale de Bessel est essentiellement ce que von Zach et la police céleste étaient censés réaliser : un ensemble de cartes couvrant l'écliptique et divisées en zones d'une heure de large (en ascension droite), cartographiant les positions de toutes les étoiles fixes plus brillantes que la magnitude 10. Il préconise de diviser les cartes en « zones » – comprises entre -15° et $+15^\circ$ de déclinaison, région du ciel supposée contenir le plus grand nombre de petites planètes – qui seraient attribuées à différents observateurs et observatoires. En 1822, Bessel lance un premier appel à rejoindre son projet auprès d'autres observatoires.

Dans une lettre datée du 18 août 1824, Bessel discute de ses plans avec Bode, le directeur de l'observatoire de l'Académie des sciences de Berlin :

Outre le grand intérêt qu'une connaissance complète du ciel présente en soi, il existe d'autres raisons qui devraient rendre sa réalisation très utile pour l'astronomie. Lorsqu'une planète ou une comète doit être observée en dehors du méridien, cela n'est possible que s'il y a toujours plusieurs étoiles proches bien définies ; si l'on veut vraiment entreprendre la découverte de toutes les planètes majeures de notre système solaire, il faut commencer par un catalogue complet d'étoiles qui permettra de n'observer qu'une seule zone du ciel à travers le télescope pour décider immédiatement s'il y a quelque chose de nouveau. Le souhait

de découvrir plusieurs nouvelles planètes en faisant cela et en concevant les cartes doit être considéré comme justifié, car on ne peut pas supposer que la coïncidence qui a conduit à la découverte de trois des nouvelles planètes aurait dû être si chanceuse que le nombre de celles-ci est déjà épuisé ; au contraire, il est très probable qu'il existe encore de très nombreuses planètes inconnues ; la disparition d'étoiles clairement observées va également dans ce sens.

Bode répond avec enthousiasme dès le 21 septembre. Le 15 octobre, Bessel envoie sa proposition à l'Académie de Berlin. L'Académie accepte à son tour la proposition de Bessel lors de sa réunion du 4 novembre 1824. Le projet est officiellement lancé en 1825, et 34 ans s'écouleront avant qu'il ne soit pleinement achevé en 1859. Parmi les astronomes qui se sont portés volontaires au début, il y a déjà des noms célèbres, comme Wilhelm Struve et Alexis Bouvard, mais de nombreuses cartes sont en définitive exécutées par les « amis de la science » de Bessel, tels que Carl Bremiker (1804-1877), Thomas John Hussey (1792-1866), Karl Ludwig Hencke (1793-1866), des observateurs que l'on qualifierait aujourd'hui d'*astronomes amateurs sérieux*. Au final, 36 observateurs ont travaillé sur cette entreprise pour produire 24 cartes – 1 feuillet par heure d'ascension droite – dans des observatoires répartis sur l'ensemble du territoire allemand (royaume de Prusse, y compris certaines parties de la Pologne, royaume de Bavière, royaume de Hanovre), ainsi qu'au Danemark, en Russie impériale (Finlande et Ukraine), dans l'empire des Habsbourg (Bohême), dans le grand-duché de Toscane, le royaume des Deux-Siciles et les îles britanniques.

Bessel, le maître du processus

BESSEL EST UN PERFECTIONNISTE et avec sa proposition de constitution de 24 cartes du ciel, il fournit également un processus complet d'élaboration, notamment sur la manière d'observer en pratique et de reporter les étoiles sur chaque carte.

Une carte du ciel est établie à partir d'une grille de 510 carrés de 4 minutes de temps (1°) de largeur et de 1° de hauteur couvrant une zone d'une heure en ascension droite, augmentée de 4 min de part et d'autre de chaque heure pour des raisons de raccordement, et couvrant une zone en déclinaison comprise entre -15° et $+15^\circ$. La carte est préalablement remplie avec les étoiles observées à Königsberg (par Bessel), Paris (Lalande, 1801) et Palerme (Piazzi, 1814), chaque position étant ramenée à l'époque 1800. Les observations commenceront ensuite : chaque observateur utilisera un chercheur de comètes standard (Bessel suggère une lunette de Fraunhofer de 750 mm de focale ou un télescope de Dollond de 400 mm de focale et de 5 cm d'ouverture) ainsi qu'un micromètre à fils croisés. Un tel télescope offrira un champ de vision comparable (ou plus grand) à l'un des carrés de la grille et permettra de cartographier des étoiles de 9^e ou 10^e magnitude. La tâche de l'observateur consistera à reporter « à l'œil » (« *blosen Augen* ») les étoiles les moins lumineuses (celles qui ne figurent pas dans les catalogues). Pour chaque étoile plus faible que la 7^e magnitude, l'observateur devra indiquer si elle a été observée une ou deux fois.

Bessel a lui-même observé 32 000 étoiles jusqu'à la 9^e magnitude dans la même zone de -15° et $+15^\circ$, mais il se rend compte qu'il faut aller plus loin pour améliorer les cartes stellaires précédentes. Néanmoins, même en descendant jusqu'à la 8^e magnitude, le nombre d'étoiles est encore important, de l'ordre de 2 000 à 3 000 par zone. Il est impératif de trouver

un compromis entre la précision (à la fois en termes de localisation spatiale et de luminosité des étoiles) et le temps nécessaire pour cartographier une zone. Dès 1823, Bessel introduit son idée de « *Zeitersparnis* » – gain de temps – qui vise à minimiser le temps nécessaire à l’observation des étoiles. Ce qui est frappant pour Bessel, leader de l’astronomie de précision et de l’analyse des erreurs, c’est sa décision de sacrifier la précision de la mesure pour réduire le temps nécessaire à l’observation des étoiles.

À l’époque, pour déterminer la position précise d’une étoile, les astronomes utilisent un cercle méridien lors de son passage par le méridien local et notent au même moment l’heure locale avec précision. Les observations méridiennes nécessitent des instruments coûteux (et également de bonnes horloges) ainsi qu’un assistant pour aider à mesurer le temps. Tout ce processus demande beaucoup de temps et un grand nombre d’étoiles restent inobservées lors de leur passage au méridien alors qu’une estimation à l’œil nu de la position ne demande qu’une fraction du temps nécessaire à une observation méridienne. La saisie « à l’œil » des étoiles les moins lumineuses sur une grille d’étoiles préexistantes accélère considérablement le processus, mais nécessite de multiples réobservations.

Bessel compte ainsi mobiliser les astronomes amateurs, jeunes et moins jeunes, au sein d’un large réseau, les « amis de la science » (*Freunde der Wissenschaft*), dans un projet collaboratif avant l’heure, il le dit avec beaucoup de clarté :

Compte tenu du nombre de jeunes astronomes, ou d’astronomes plus âgés qui ne sont pas entièrement équipés, qui sont actuellement disponibles, on doit également souhaiter de ce côté que des moyens sérieux soient pris maintenant pour laisser un monument aussi grand et glorieux pour la prospérité.

Par la suite, en 1826, un étudiant de Bessel, Carl Steinheil (1801-1870), conçoit un appareil pour aider les observateurs à tracer les étoiles à l’œil. Il s’agit d’une planche à dessin en bois munie de deux règles en laiton, placées perpendiculairement l’une à l’autre et s’étendant sur toute la longueur de la planche. La première règle couvre une zone de -16° à $+19^{\circ}$ de degrés de déclinaison avec des intervalles de $15'$, tandis que la seconde couvre une zone de 68 minutes d’ascension droite par intervalles de 15 secondes. Chaque règle est pourvue d’un vernier. Avec un tel système de cartographie, il est possible de positionner les étoiles avec une précision de 1 minute d’arc en déclinaison et de 1 seconde de temps en ascension droite. Cette précision est bien moindre que celle avec laquelle les étoiles de Bessel, Lalande ou Piazzi sont positionnées, mais c’est la précision limite à laquelle un œil humain peut effectivement positionner efficacement l’étoile sur une carte de ce type. En plus de relever la position relative des nouvelles étoiles, l’observateur doit noter leur luminosité. L’idée de Bessel est de les diviser en tranches d’une magnitude jusqu’à la 8^e magnitude, puis de noter les étoiles de 8^e-9^e, 9^e, et 9^e-10^e magnitude, chacune avec un symbole différent (voir le bas de la carte de la fig. 1). Même s’il est possible pour un observateur expérimenté d’effectuer un classement plus fin de la luminosité stellaire, en fractions de magnitudes, ce n’est pas l’objectif de ces cartes. Le plus important est de montrer combien de fois une étoile plus faible (qui a été localisée « à l’œil ») a été observée.

Encke, le maître d’œuvre infatigable

S I BESSEL EST L’INITIATEUR et le concepteur de la procédure complète d’observation et de remplissage des cartes, la coordination du projet est assurée de bout en bout par Johann Franz Encke (1791-1865), un vétéran des guerres napoléoniennes, qui prendra la direction de l’Observatoire de Berlin après la retraite

de Bode. L'influence d'Encke est déjà considérable. Il a été récompensé de la première médaille d'or de la *Royal Astronomical Society* en 1824 pour avoir reconnu que la comète observée en 1786 par Méchain, en 1795 par Caroline Herschel, puis en 1805 par Jean-Louis Pons, est un seul et même objet. Cerise sur le gâteau, c'est la comète périodique avec la plus courte période connue (3,3 ans).

En 1826, dans un courrier adressé à John Herschel (1792-1871), Encke reprend l'argumentaire de Bessel et indique que l'on ne peut plus se contenter des catalogues d'étoiles existants et qu'il est maintenant nécessaire de disposer de cartes célestes sur lesquelles doivent être indiquées toutes les étoiles jusqu'à la 9^e magnitude. Dans son éloge funèbre de Bessel, Encke rappelle que c'était là le plan de Bessel :

*Il fallait rendre ces cartes assez complètes
pour qu'en comparant plus tard avec le ciel,
il fût possible de reconnaître immédiatement
les planètes les plus faibles, et de les distinguer
au milieu des étoiles fixes, sans avoir besoin
d'attendre un changement de position,
toujours long et difficile à constater.*

Ce projet stimule également la création de nouveaux grands observatoires. Outre celui de Berlin, dont nous avons déjà parlé, le grand observatoire de Poulkovo, petit village situé non loin de Saint-Petersbourg, voit le jour en 1835. Il est doté très rapidement, en 1839, d'une lunette équatoriale de 38 cm de diamètre de Merz et Mahler, les successeurs de Joseph von Fraunhofer (1787-1826) à la fabrique de Munich. Son directeur, Friedrich Georg Wilhelm von Struve (1793-1864), a déjà pu mesurer la parallaxe stellaire de l'étoile Véga de la Lyre, dans les années 1835 à 1838 sur une autre lunette de Fraunhofer de 24 cm d'ouverture, installée en 1824 à l'observatoire de Dorpat (voir l'[épisode 8 : « La troisième dimension »](#), paru dans la Lettre d'information d'octobre 2023).

La consécration des cartes de Bessel : découverte d'Astraea en 1845 et de Neptune en 1846

LA PREMIÈRE CONFIRMATION de la pertinence des choix opérés par Bessel et Encke survient le 8 décembre 1845. La cinquième petite planète, Astrée, est découverte par Karl Ludwig Hencke, maître de poste à la retraite et astronome amateur à Driesen, à l'aide de l'une des cartes stellaires publiées par l'Académie des sciences de Berlin.

Il l'a fait exactement de la manière dont Bessel pense que la découverte des planètes doit se faire : en suivant les observations à l'aide d'une bonne carte stellaire. La carte utilisée par Hencke, Hora IV, est réalisée par Karl Friedrich Knorre (1801-1883) à Nikolayev (Mykolaiv, Ukraine). Hora IV est achevée en 1834, mais n'est envoyée qu'en 1837. Les causes de ce retard ne sont pas claires, bien qu'il ait probablement été induit par les corrections et les épreuves. La carte est restée pendant huit ans dans les tiroirs des sociétés savantes et des observatoires d'Europe, jusqu'à ce que Hencke l'utilise pour découvrir la première planète mineure depuis 1807. L'élan des découvertes interrompu quarante ans durant pouvait reprendre son cours.

Toutefois, c'est la découverte de Neptune, moins d'un an après, qui sacre de façon éclatante la nouvelle astrométrie impulsée par les astronomes allemands. Un jeune mathématicien français doué de 34 ans, Urbain Le Verrier (1811-1877), tout juste nommé répétiteur à l'École polytechnique, se voit confier par François Arago (1786-1853), directeur de l'Observatoire de Paris, la tâche d'expliquer les irrégularités du mouvement d'Uranus par l'existence d'une hypothétique « planète troublante ». Ses calculs le mènent à une solution capable de représenter les observations faites entre 1781-1845 à

mieux de 3,4". Le 1^{er} juin 1846, il annonce la longitude de la planète troublante et le 31 août sa masse, ses éléments, la taille de son disque apparent ainsi que sa magnitude. Ainsi, avec une magnitude de 9 et une taille apparente de 3,3", l'objet serait détectable, et son déplacement apparent également, dans une petite lunette d'une dizaine de centimètres d'ouverture. Il lance depuis l'Académie des sciences un appel aux astronomes à observer ladite planète dont il donne les coordonnées qui la positionnent dans la constellation du Capricorne à l'est de l'étoile δ de cette constellation. La planète serait passée à l'opposition le 19 août, il est donc encore possible de la découvrir dans les semaines à venir. Le Verrier adresse le 18 septembre 1846 un courrier à Johann Galle (1812-1910), jeune assistant de 34 ans à l'observatoire de Berlin. Galle, enthousiasmé par cette lettre reçue le 23 septembre, demande immédiatement au directeur de l'observatoire de Berlin, Johann Encke, la permission de chercher la planète le soir même. Le soir venu, Galle est accompagné d'un jeune étudiant en astronomie de 24 ans, Heinrich d'Arrest (1822-1875). Bien lui en a pris, car sans lui, point de découverte. Dans un premier temps, Galle tente de découvrir un corps céleste ayant un disque apparent directement à l'oculaire de la lunette. Vaine tentative. D'Arrest a alors l'idée de recourir à une carte du ciel de la zone de recherche, la Hora XXI. Lorsque Galle, passant en revue les objets présents dans le champ de son oculaire, annonce une étoile de 8^e magnitude dont l'ascension droite est de 22 h 53 min 25,84 s, d'Arrest lui répond : « cette étoile n'est pas sur la carte ! » Victoire, c'est la 8^e planète ! Elle n'est qu'à 52' de la position assignée par Le Verrier. Au soir du 25 septembre, Galle s'empresse d'écrire – en français – à Le Verrier pour lui faire part de la découverte :

*Monsieur,
La planète, dont vous avez signalé la position, réellement existe. Le même jour, où j'ai reçu votre lettre, je trouvais une étoile de 8^{me} grandeur, qui n'était pas inscrite dans l'excellente carte Hora XXI (dessinée par M. le Dr Bremiker)*

de la collection de cartes célestes publiée par l'Académie roy. de Berlin. L'observation du jour suivant décida que c'était la planète cherchée. Nous l'avons comparée, Mr. Encke et moi, par la grande lunette de Fraunhofer avec une étoile de 9^{me} grandeur [...].

Encke, à son tour, écrit fièrement à Le Verrier le 28 septembre 1846:

Il y a eu beaucoup de bonheur dans notre recherche ; La carte académique de Mr Bremiker, qui, peut-être, n'est pas encore arrivée à Paris, mais que je ferai expédier tout à l'heure, comprend précisément près de sa limite inférieure le lieu que vous avez désigné. Sans cette circonstance infiniment favorable, sans une carte où l'on pût être sûr de trouver toutes les étoiles fixes jusqu'à la dixième grandeur, je ne crois pas qu'on eût découvert la planète. Vous verrez vous-même, en observant cet astre, que le diamètre est beaucoup trop faible pour attirer l'attention, même quand on l'examine avec un grossissement assez fort. Je vous suis donc personnellement obligé d'avoir démontré le prix qu'une telle carte peut avoir dans des recherches scientifiques.

La carte en question est la Hora XXI (heure 21 en ascension droite) des *Akademischen Sternkarten* réalisées par Carl Bremiker (1804-1877) pour l'Académie royale des sciences de Berlin. La figure 1 montre la carte conservée à la bibliothèque du *Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam*, qui a succédé à l'observatoire de Berlin. Avant l'annonce officielle du lancement du projet publié dans les *Astronomische Nachrichten* n° 88 distribué en décembre 1825, un étudiant de Bessel, Otto August Rosenberger, avait déjà choisi cette zone en 1826, mais en 1839 toujours aucune donnée n'était remontée vers Johann Franz Encke (1791-1865). Il donne alors la charge à Carl Bremiker, l'un de ses anciens étudiants qui travaille comme inspecteur pour le ministère prussien

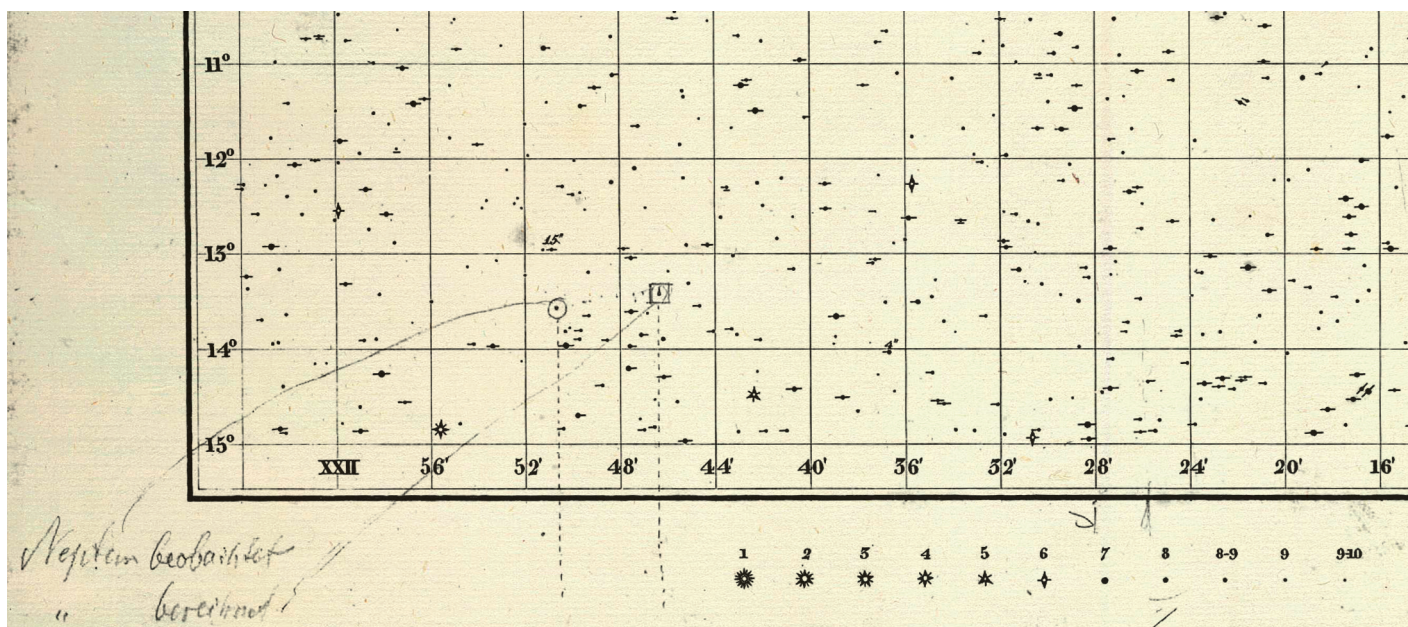


Fig. 1 – Extrait de la carte du ciel Hora XXI de l'Académie des sciences de Berlin, réalisée par Carl Bremiker.

Le travail sur la carte a commencé en 1826, mais n'a été achevé qu'en 1844 et imprimé en 1845. Elle est restée intacte jusqu'au 23 septembre 1846, date à laquelle Johann Gottfried Galle et Heinrich Louis d'Arrest l'ont utilisée pour découvrir Neptune, sur la base de la prédiction théorique d'Urbain Le Verrier. L'emplacement prédit (carré) et l'emplacement observé (cercle) ont été notés au crayon, prétendument par Galle, mais quelque temps après la découverte. Dans le coin inférieur gauche, un carré et un cercle indiquent les positions calculée (« *Neptun berechnet* ») et observée (« *Neptun beobachtet* ») de Neptune.

Domaine public (source : Leibniz Institute for Astrophysics Potsdam – AIP)

du Commerce. Rosenberg fournit toutes ses données à Bremiker et la carte est complétée en moins d'une année (entre le 1^{er} janvier et le 4 décembre). Il faudra encore 4 ans pour que la carte soit vérifiée et acceptée par l'Académie et finalement gravée et imprimée le 9 novembre 1845.

Il s'agit là d'une évolution majeure, pour ne pas dire une révolution, dans les méthodes de recherche et d'investigations d'astres nouveaux. Par ailleurs, étrange retour des choses : la loi de Bode, qui est à l'origine de la recherche de petits corps et qui surtout a fourni l'hypothèse initiale adoptée par Le Verrier dans ses calculs sur la distance au Soleil de la planète troublante, se révélera erronée après la découverte de Neptune. L'orbite véritable de Neptune sera précisément déterminée pour la première fois au début de 1847 par Sears Walker (1805-1853) de l'observatoire de Washington. La distance

de Neptune au Soleil calculée par Walker est égale à 30,2 fois la distance Terre-Soleil, tandis que la loi de Bode lui assignait une valeur de 38,8 !

Bien que Bessel ait réussi à étendre ses mesures à Königsberg jusqu'à une déclinaison de +45°, il est décédé en mars 1846 et n'a donc pas vécu assez longtemps pour voir le succès sensationnel de son grand projet. Mais il est mort en sachant qu'il a démontré la faisabilité d'une approche à grande échelle d'un programme précis, complet et cohérent de cartes stellaires par différents observateurs et observatoires.

Une nouvelle technique pour cartographier le ciel : la plaque photographique

L**E 7 JANVIER 1839**, François Arago, directeur de l'Observatoire de Paris, présente l'invention du daguerréotype à l'Académie des sciences (de l'iodure d'argent recouvrant une plaque de cuivre réagit à la lumière et permet ainsi de restituer en noir et blanc l'image d'un objet projeté par une lentille sur la plaque).

Moins d'un an après l'annonce de la découverte de Daguerre (1787-1851), en mars 1840, le Dr John W. Draper (1811-1882) réussit à obtenir des images de la Lune qui, bien que médiocres, préfigurent les possibilités de la photographie lunaire. Cinq ans plus tard, l'observatoire de Harvard, fondé en 1839, commence à incorporer la photographie astronomique dans ses méthodes d'observation. Son premier directeur, William Cranch Bond (1789-1859), avec l'aide de Whipple et Black, réussit en 1850 à obtenir de meilleurs daguerréotypes de la Lune avec le grand réfracteur de 15 pouces (38 cm) de Merz et Mahler (images de 12 cm de diamètre avec un temps de pose de près de 40 s).

Un autre procédé humide fait son apparition en 1851, le collodion humide sur verre. Les succès suivants sont dus à des astronomes anglais, en particulier Warren De La Rue (1815-1889). En 1860, le sujet repart en Amérique, avec Henry Draper (1837-1882), qui, avec un réflecteur de 15 pouces de sa propre fabrication, obtient des photographies de la Lune supérieures à toutes celles qui avaient été faites auparavant. Ces photos de la Lune seront les meilleures prises jusqu'à ce que Lewis M. Rutherfurd (1816-1892) entreprenne en 1865 une fois de plus le sujet lunaire, à l'aide d'un réfracteur de 11 pouces, construit sous sa supervision – le premier télescope spécialement corrigé pour les rayons

photographiques. Les photographies de la Lune de Rutherfurd ne seront surpassées qu'à l'aide d'instruments tels que le réfracteur de 36 pouces de l'observatoire de Lick érigé dans les années 1880 et le grand équatorial coudé de l'Observatoire de Paris (1891).

La première image du Soleil semble avoir été réalisée sur une plaque de daguerréotype par Fizeau et Foucault, en 1845. Lors de l'éclipse totale de Soleil du 21 juillet 1851, un daguerréotype est obtenu avec l'héliomètre de Königsberg qui semble avoir été la première représentation photographique de la couronne. Des photographies plus ou moins intéressantes sont obtenues lors des éclipses suivantes, mais la première à représenter la couronne avec un réel succès est obtenue lors de l'éclipse du 22 décembre 1870. Lors de l'éclipse de 1868, Jansen et Lockyer constatent que la visibilité des protubérances solaires ne dépend pas nécessairement d'une éclipse totale du Soleil : elles sont visibles à tout moment à l'aide du spectroscopie. Cela suggère au professeur Young l'idée qu'elles pourraient également être photographiées à tout moment. En 1870, il réussit partiellement une telle tentative. Cependant, pour photographier ces objets avec succès, il faudra inventer un nouvel instrument dont les caractéristiques essentielles sont deux fentes (très étroites, comparées à la hauteur des protubérances), se déplaçant à l'unisson – l'une placée en travers du Soleil devant le réseau ou le prisme, l'autre devant la plaque photographique – et parfaitement ajustées à la ligne spectrale de la protubérance, de manière à exclure toute lumière autre que celle émise par la protubérance elle-même.

Toutes ces images sont réalisées avec le procédé humide. Cependant, ce n'est qu'après l'invention au début des années 1870 des plaques photographiques au gélatino-bromure d'argent – dites *plaques sèches* – que l'astronomie intègre la photographie dans ses méthodes d'observation.

En 1878, d'importants préparatifs sont menés pour observer l'éclipse du 29 juillet. La photographie y joue un rôle important, bien que chaque astronome ait également fait les dessins habituels de la couronne. La comparaison des dessins entre eux avec les photographies a montré l'incapacité totale de l'astronome moyen à esquisser ou à dessiner, dans les conditions d'une éclipse totale, ce qu'il a réelle-

ment vu (fig. 2). Depuis la première photographie d'une étoile (Véga à Harvard), prise par Bond en 1850, la photographie stellaire a progressivement acquis une importance rédhibitoire. Le procédé humide, ou collodion, est mal adapté à la photographie des étoiles et n'est d'aucune utilité pour les comètes et les nébuleuses. Cependant, tout changera avec la plaque sèche.

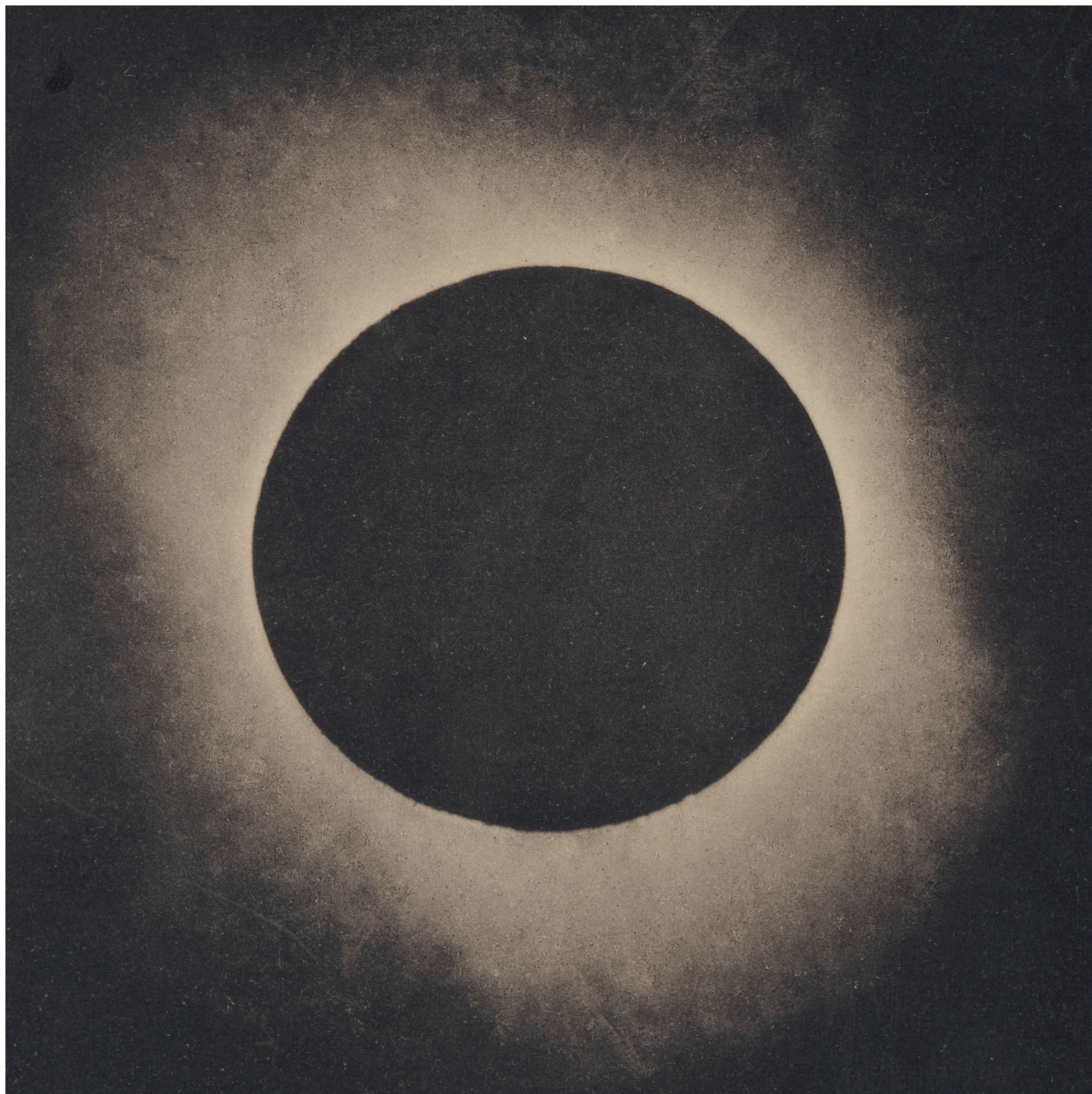


Fig. 2 – Photographie de le couronne solaire par Henry Drapper lors de l'éclipse totale du 29 juillet 1878.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Des plaques étoilées

ATTIRÉ PAR LA FORTE LUMINOSITÉ de la grande comète de 1882, David Gill (1843-1914), au cap de Bonne-Espérance, avec l'aide d'un photographe local, obtient une belle série de photographies avec des plaques sèches (fig. 3). Lorsque ces photographies atteignent l'hémisphère nord, elles attirent beaucoup d'attention, non seulement à cause de la comète elle-même, mais aussi à cause du nombre d'étoiles imprimées sur les plaques, détail qui n'échappe pas aux frères Henry, Prosper Mathieu Henry (1849-1903) et Paul Pierre Henry (1848-1905). Ces deux frères inséparables ont été nommés comme aides-astro-
nomes à l'Observatoire de Paris en 1868 par Le Ver-

rier pour compléter et achever la carte de l'écliptique initiée par Jean Chacornac (1823-1873) en 1854, lequel vient d'être « mis en congé de disponibilité de l'Observatoire de Paris » – autrement dit *chassé* – par Le Verrier le 1^{er} novembre 1863. L'objectif est toujours celui énoncé par la police céleste quelque soixante-dix ans plus tôt : découvrir de nouveaux astéroïdes. Les frères Henry sont astronomes – ils ont découvert 14 petites planètes –, mais aussi opticiens : en 1882, le nouveau directeur de l'Observatoire de Paris, le contre-amiral Ernest Mouchez (1821-1892), leur confie la responsabilité d'un atelier photographique créé en 1879. Très vite, ils ont l'idée d'utiliser le procédé photographique dans leur travail, projet qui se concrétise en 1884.



Fig. 3 – Comète Finlay photographiée le 7 novembre 1882 à 14 h 42 avec un temps d'exposition de 110 minutes par David Gill au cap de Bonne Espérance.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

L'équatorial photographique des frères Henry

ILS COMMENCENT IMMÉDIATEMENT la construction, de leurs propres mains, d'un télescope photographique muni d'un objectif de 16 cm et de 210 cm de distance focale, ouvert à $F/D = 13$, monté sur un équatorial construit par Paul Gautier (1842-1909). Dès 1884, les premières photographies de champs stellaires couvrant une zone de $2^\circ \times 3^\circ$ et comptant jusqu'à 1 500 étoiles jusqu'à la 12^e magnitude sont obtenues.

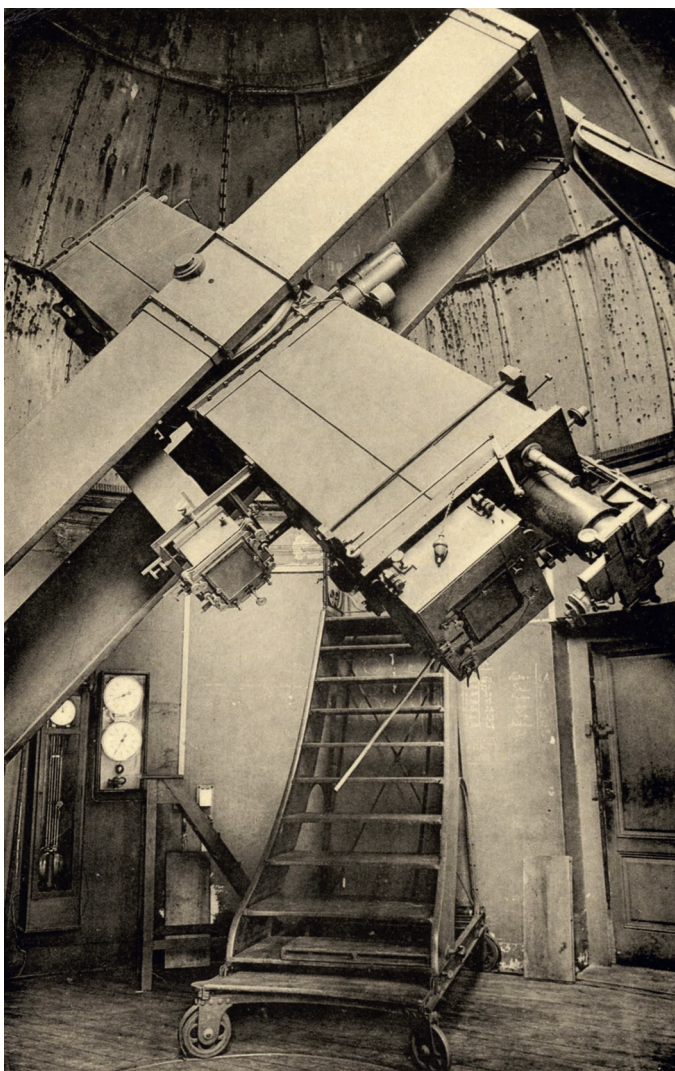


Fig. 4 - Équatorial photographique des frères Henry.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Mouchez est séduit par cette nouvelle méthode d'observation. Dès 1885, il apporte son soutien en-

tier aux frères Henry en finançant la construction par Gautier d'un équatorial photographique – encore appelé *astrographe* – de 34 cm d'ouverture et de 343 cm de distance focale (fig. 4). Il est constitué de deux lunettes de même longueur, dont l'objectif principal est photographique, la seconde lunette servant au contrôle visuel de l'entraînement. La première photographie est prise le 17 avril 1885. Par la suite, d'excellents clichés seront pris jusqu'en 1887, dont les principaux sont ceux de l'amas globulaire d'Hercule en 1885, Jupiter le 21 avril 1886 (fig. 5, 8 photos montrant la rotation de la tache rouge), Saturne le 22 avril 1886, et aussi les amas d'Hercule, de Persée, Ophiuchus, Sobieski et Neptune. Ils réalisent également des plaques montrant les traînées laissées par le mouvement de Pallas.

Chose singulière, la plaque photographique a non seulement supprimé la nécessité de faire des cartes à l'œil et à la main pour faciliter la découverte des astéroïdes, mais elle a aussi supprimé la nécessité des cartes elles-mêmes à cette fin : la petite planète enregistre maintenant sa propre découverte en laissant une courte trace sur la plaque photographique. La première de ces découvertes photographiques d'astéroïdes est faite en 1892 par Max Wolf (1863-1932).

Si en 1885, Mouchez appuie pleinement les projets des frères Henry, c'est aussi en raison d'une lettre du 18 janvier 1885 écrite par David Gill (1843-1914), directeur de l'observatoire du cap de Bonne-Espérance avec lequel Mouchez entretient une correspondance épistolaire soutenue, dans laquelle l'idée d'un atlas photographique du ciel, limité à sa partie australe pour l'heure, est pour la première fois avancée :

Je propose de réaliser une série complète et uniforme de cartes photographiques du ciel austral, ainsi qu'un catalogue des positions et des magnitudes approchées à partir de ces cartes.



Fig. 5 - Trois des huit photographies de Jupiter prises par Henry, Prosper Mathieu (1849-1903) et Henry, Paul Pierre (1848-1905), "Photographie de Jupiter [21 avril 1886] par MM. Henry : 10h16 à 10h24. Agrandissement direct = 18 fois".

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Dans une lettre du 26 juin 1885, Mouchez écrit à Edward Pickering (1846-1919), directeur de l'observatoire du Harvard College, à William Huggins (1824-1910) en Angleterre, à Luís Cruls (1848-1908), directeur de l'observatoire de Rio de Janeiro, et à Otto W. Struve (1819-1905), directeur de l'observatoire de Poulkovo :

Je vous envoie une épreuve photographique obtenue dans la Voie Lactée avec notre nouvel appareil construit par Gautier et muni d'un objectif de 0,34 m achromatique pour les rayons chimiques construit

par MM. Henry. En une heure de pose, nous obtenons toutes les étoiles jusqu'à la 15^e grandeur sur le cliché et jusqu'à la 14^e pour la reproduction sur papier. Les images sont d'une netteté parfaite et proportionnelles à la grandeur des étoiles. L'épreuve représentant une superficie de 7 degrés carrés, il en faudrait 6 000 semblables pour toute la voûte céleste [...]. La carte photographique du ciel est donc devenue aujourd'hui facilement exécutable si 5 ou 6 observatoires bien choisis dans les deux hémisphères peuvent s'entendre pour entreprendre ce vaste et si important travail. Elle pourrait être exécutée en 6 ou 8 ans et nous léguerions aux astronomes de l'avenir un état exact de notre ciel à la fin du XIX^e siècle où figureraient 20 ou 25 millions d'étoiles.

L'idée est dans l'air du temps, comme un écho lointain aux détectives de Lilienthal, Mouchez va la matérialiser en concevant un projet pharaonique, celui de la *Carte du ciel*, et en fédérant pour ce faire le plus grand nombre possible d'observatoires autour du monde, condition indispensable de sa réalisation.

Démessure des mesures de la Carte du ciel

MOUCHEZ invite alors à l'Observatoire de Paris cinquante-huit savants du monde entier (dont 22 de France, 8 de Grande-Bretagne et du cap de Bonne-Espérance, 6 d'Allemagne et seulement 3 des États-Unis et 3 de Russie) au Congrès astrographique international du 16 au 27 avril 1887 (fig. 6). La grande entreprise de la Carte du Ciel est lancée. Les congressistes adoptent l'astrographe des frères Henry comme modèle pour les instruments à utiliser. Un *Comité international permanent* est institué, composé de 11 membres et des directeurs des autres observatoires participants (18 en tout). Il se



Fig. 6 – Congrès astrophotographique international, tenu en avril 1887 à l’Observatoire de Paris pour le levé de la Carte du Ciel.

Détail amusant, il s’agit d’un photomontage, de nombreux participants ont été rajoutés a posteriori.

Crédits Bibliothèque de l’Observatoire de Paris

réunit régulièrement (1889, 1891, 1896, 1900 et 1909). C’est à la réunion de 1889 que la forme et la dimension des plaques photographiques sont fixées : ce seront des plaques carrées de 16 cm de côté.

C’est le plus vaste travail collaboratif international jamais tenté : 18 observatoires œuvreront de concert pour photographier la totalité du ciel en utilisant les mêmes méthodes et les mêmes instruments. L’instrument de la Carte du ciel – l’astrographe – est celui construit par les frères Henry en 1885. Le ciel est découpé en bandes de déclinaisons de cinq ou sept degrés de largeur (tableau 2). Chaque observatoire se voit assigner une zone du ciel à photographier. Deux séries de clichés sont réalisées sur des plaques de 160 mm de côté couvrant un champ carré sur le ciel de deux degrés de côté : une série « Catalogue » avec au moins deux poses pour différencier étoiles et faux points, dont l’une a une durée double de l’autre (6 min et 3 min), et suffisantes pour atteindre la magnitude 11 ; l’autre est une série « Carte » qui doit révéler les étoiles jusqu’à la magnitude 14, ce qui nécessite des temps de pose de 40 min. Sur chaque plaque, un réseau de

Tranche de déclinaison	Observatoire
+ 90° à + 65°	Greenwich
+ 64° à + 55°	Vatican
+ 54° à + 47°	Catane
+ 46° à + 40°	Helsinki
+ 39° à + 32°	Potsdam (remplacé par Uccle)
+ 31° à + 25°	Oxford
+ 24° à + 18°	Paris
+ 17° à + 11°	Bordeaux
+ 10° à + 05°	Toulouse
+ 04° à - 02°	Alger
- 03° à - 09°	San Fernando
- 10° à - 16°	Mexico
- 17° à - 23°	Santiago (remplacé par Hyderabad)
- 24° à - 32°	La Plata (remplacé par Cordoba)
- 33° à - 40°	Rio de Janeiro (remplacé par Perth)
- 41° à - 51°	Cap de Bonne-Espérance
- 52° à - 64°	Sydney
- 65° à - 90°	Melbourne (remplacé par Sydney)

Tableau 2 – Répartition des zones en déclinaison entre observatoires participants.

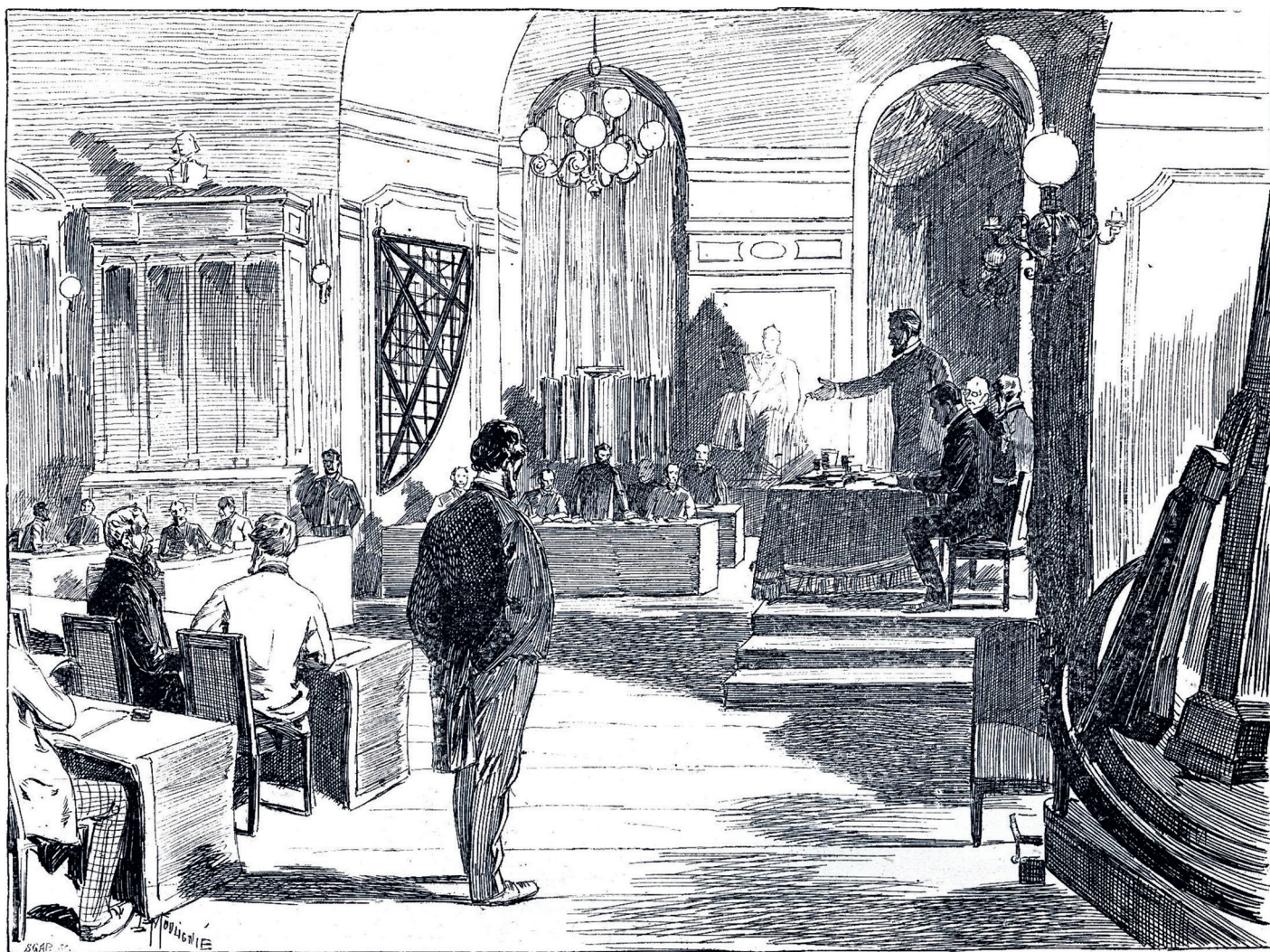
130 × 130 mm, à mailles carrées de 5 mm de côté, est imprimé. Gautier et ses successeurs resteront jusqu'en 1947 les constructeurs et fournisseurs officiels exclusifs de ces plaques. Grâce à ce réseau, la mesure des positions des étoiles atteint une précision d'un micron ($1\ \mu\text{m} = 1/1000^{\text{e}}$ de millimètre), ce qui représente une précision angulaire de 0,06" (l'échelle sur la plaque est de 1' par millimètre).

À la réunion de 1891, la répartition du travail entre les observatoires est définitivement fixée (fig. 7). Le *Catalogue* va devenir de plus en plus prioritaire. Il est également indispensable d'inventer une machine à

mesurer les clichés. Les frères Henry s'en chargent et la font construire par Gautier. Elle comporte un microscope équipé d'un micromètre et d'un cercle divisé, un chariot mobile sur des rails et portant un plateau circulaire tournant sur lequel on fixe le cliché. L'éclairage se fait par-dessous (fig. 8).

En 1887, Mouchez exprime, en visionnaire, les perspectives offertes par la Carte du ciel :

L'énorme avantage que présentent aujourd'hui les procédés photographiques sur l'observation directe, pour l'étude des variations des étoiles



LA SALLE DU CONGRÈS DES ASTRONOMES A L'OBSERVATOIRE DE PARIS. — (Dessin de M. MOULIGNIÉ.)

Fig. 7 – La salle du congrès des astronomes à l'Observatoire de Paris (actuellement grande galerie) lors du Congrès international pour l'exécution de la Carte photographique du ciel en 1891.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

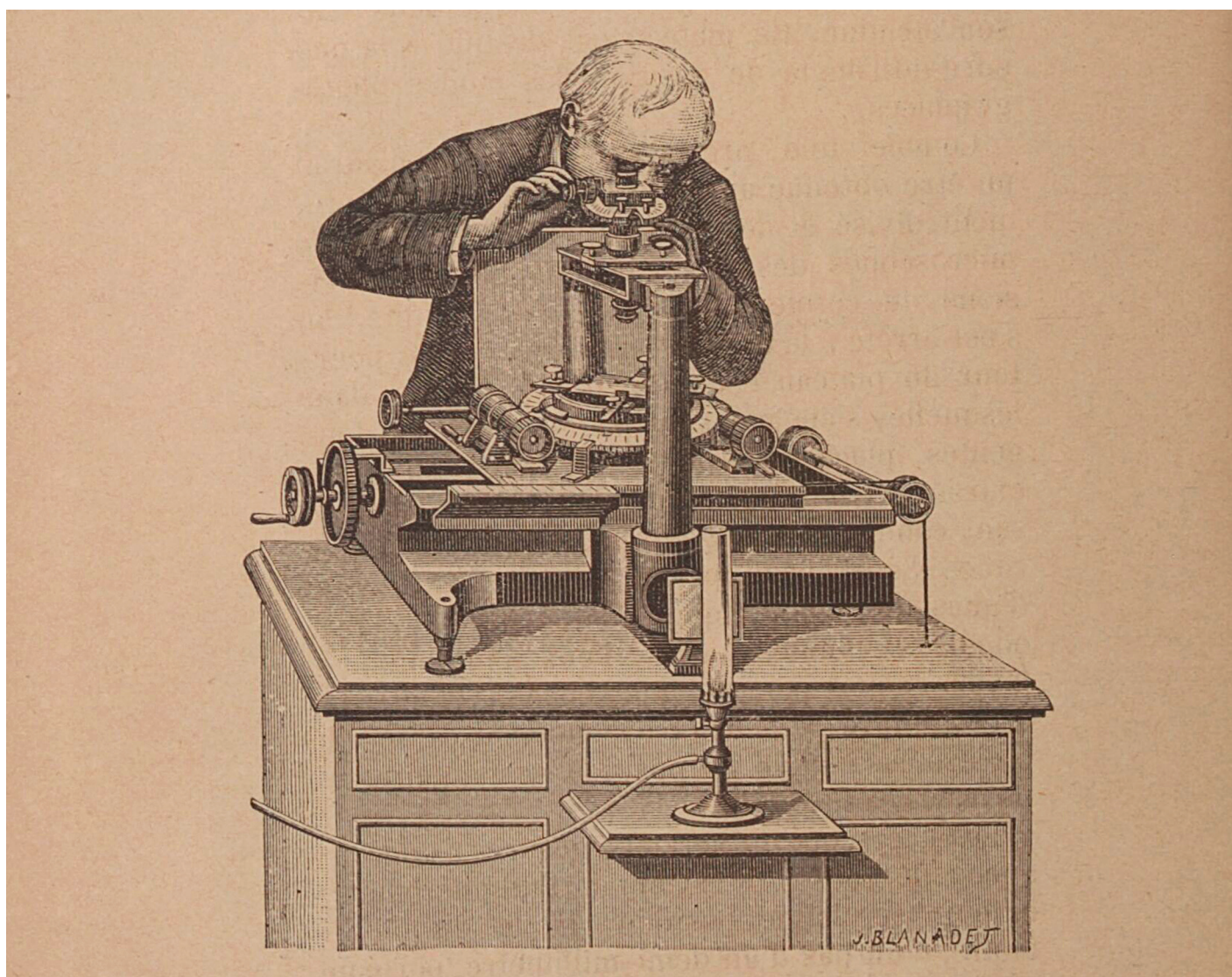


Fig. 7 - Machine à mesurer les clichés de Gautier selon les recommandations des frères Henry.

Tiré de E. Mouchez, *La Photographie astronomique à l'Observatoire de Paris et la Carte du ciel*, Paris : Gauthier-Villars, 1887.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

en grandeur et en position, consiste non seulement dans l'extrême rapidité d'exécution, qui va permettre de faire en quelques années la Carte du Ciel, que bien des siècles d'un travail assidu et de progrès constants eussent été impuissants à donner, mais encore dans la certitude que nous avons de pouvoir transmettre aux âges futurs un document d'une authenticité et d'une précision absolues, sur lequel on pourra solidement établir toutes les lois de variation du Ciel.

Mouchez voit également dans son ambitieux projet une libération et une transformation du métier de l'astronome :

L'une des conséquences un peu inattendues de cette application de la Photographie à l'Astronomie va être la transformation complète du mode de travail des astronomes et la vulgarisation de l'étude du Ciel.

L'entreprise sera décriée au siècle suivant, mais la vision de Mouchez finira par trouver une éclatante confirmation – nous aurons l'occasion d'y revenir.

Le ciel sera couché sur une collection complète de plaques, de sorte qu'il ne sera plus utile de passer de longues nuits froides à manœuvrer de grands instru-

ments coûteux et à attendre que les nuages veuillent bien se conformer aux désirs des astronomes. Il ne sera plus nécessaire de se transporter dans un autre hémisphère, car il suffira d'analyser la zone du ciel souhaitée à travers l'œil du microscope. Ainsi, en ira-t-il par exemple de l'étude des amas globulaires qui pourra se faire en dénombrant les étoiles agglomérées, ce qui jusqu'alors était impossible par l'observation visuelle directe, l'œil étant alors ébloui par les innombrables « grains de poussière brillants ». Mouchez imagine donc un nouveau personnel d'astronomes qui, « sans observatoire ni instruments, n'aura d'autre occupation que l'étude et la comparaison des cartes de diverses époques ». Ainsi, « la photographie donnera aux astronomes toute liberté de s'appliquer à d'autres genres de recherches ». Mouchez a vu juste : de nos jours, la réalité de l'astronome n'est plus l'observatoire, l'observation à l'instrument. Si le support de fixation des images du ciel a considérablement évolué, l'astronome a vu son travail se libérer également des contraintes de l'observation pour se consacrer à « d'autres genres de recherches » en développant outils et méthodes adaptés à l'analyse des images et à la « fouille d'archives ». L'astronome d'observatoire est devenu un astronome de bureau.

En revanche, Mouchez s'est quelque peu laissé emporter par son enthousiasme en croyant en la perspective de mener à bien cette entreprise en l'espace de quelques années, bien avant la clôture du XIX^e siècle. Il n'en verra pas le terme et bien des difficultés viendront l'entraver.

Une entreprise au long cours parsemée d'embûches

LA PREMIÈRE PLAQUE photographique est prise en août 1891 à l'observatoire du Vatican. La toute dernière plaque est exposée en décembre 1950 à l'observatoire d'Uccle à Bruxelles.

Les États-Unis sont les grands absents de la Carte du ciel. Ses observatoires et ses astronomes sont déjà tournés vers une « astronomie nouvelle », l'astronomie physique, future astrophysique. Edward Pickering, le directeur de l'observatoire du Harvard College, bien que sollicité par Mouchez et convaincu de la pertinence de son ambition, se désiste très vite pour développer son propre projet, perçu alors comme concurrent de celui de la Carte du ciel. Il ne fait d'ailleurs pas le déplacement à Paris pour l'ouverture du Congrès international de la Carte du ciel.

Dès 1887, Pickering suggère un autre instrument que celui des frères Henry, d'un diamètre de 60 cm (24 pouces) avec une focale de 335 cm (11 pieds) à double lentille, capable de donner des images avec une échelle de 1 mm par minute de degré (résolution équivalente à celle des clichés de la Carte du ciel) et des temps d'exposition réduits. Le ciel entier pourrait même être cartographié avec un seul instrument en deux ou trois ans à peine ! Son grand avantage, le très large champ couvert par une seule photographie, puisque 5 degrés carrés sont couverts par une plaque de 30 cm de côté. Ce télescope verra le jour, ce sera le *Bruce Telescope*, construit en 1893 et installé en 1895 au Pérou près de l'équateur. C'est bien à Pickering que l'on doit la première carte photographique du ciel achevée en 1903 avec 55 clichés couvrant chacun une zone de ciel de plus de 30° avec les étoiles jusqu'à la magnitude 12. C'est notamment grâce au *Bruce Telescope* que Henrietta Leavitt (1868-1921) découvrira en 1908 que les pics de brillance des étoiles variables connues sous le nom de *céphéides* sont reliés à la période de variation de leur luminosité (relation période-luminosité), ce qui permettra de percer le mystère des distances interstellaires en comparant la brillance des céphéides observées depuis la Terre à ce qu'elle serait à partir de la mesure de leur période. Grâce à ces « chandelles standards », en 1920, Edwin Hubble (1889-1953) établira que la Voie lactée n'est qu'une galaxie parmi d'autres dans l'Univers.

Les premières défections surviennent en 1900 : Santiago, La Plata et Rio de Janeiro sont remplacés par Montevideo, Cordoba et Perth. Le premier volume du *Catalogue* de la Carte du ciel est publié en 1902. La Première Guerre mondiale surgit et constitue une rupture en sonnant le glas du Comité permanent de la Carte du ciel. Ce n'est qu'après la création de l'Union astronomique internationale (UAI) en 1919, qu'une commission spécifique – la commission 23 (l'UAI en compte alors 32) – est créée pour relancer l'entreprise. Son premier président, Herbert H. Turner (1861-1930) de l'observatoire d'Oxford, dresse aussitôt un sombre état des lieux. Les retards sont considérables, l'ampleur du travail a été sous-estimée. En outre, dès 1909, les observations et les mesures d'Éros (voir l'[épisode 6 : « Des oppositions constructives »](#), paru dans la Lettre d'information de juillet-août 2023) requièrent les équipes de la Carte du ciel. Après la Première Guerre, beaucoup d'astronomes ont disparu, et la Seconde Guerre ruine à nouveau les ambitions. Les présidents successifs de cette commission 23 s'attèleront néanmoins à mener le projet à son terme : Ernest Esclançon (Paris) jusqu'en 1935, Jules Baillaud (Paris) jusqu'en 1955, Paul Couderc (Paris) jusqu'en 1961, Pierre Semiot (Bordeaux) jusqu'en 1967, Wilhem Dieckvoss (Hambourg) jusqu'en 1970. La publication des vingt derniers volumes du *Catalogue* sera accomplie sous le patronage de l'UAI. C'est en 1964, à l'assemblée générale de Hambourg, que l'achèvement du *Catalogue* est annoncé. Mais la Carte photographique restera inachevée. Les planches se sont avérées très coûteuses à photographier et à reproduire, de sorte que de nombreuses institutions n'ont pas achevé cette partie du travail. Il y sera officiellement mis fin lors de l'assemblée générale de l'UAI de 1970 à Brighton.

Méthode photographique

LA MÉTHODE PHOTOGRAPHIQUE est une méthode d'astrométrie à petit champ par laquelle on détermine les positions relatives des astres simultanément visibles

dans un instrument sans le déplacer et dont l'un des avantages majeurs sur les méthodes anciennes est l'élimination de l'erreur personnelle.

La plaque photographique placée au foyer d'un télescope réfracteur ou réfléchissant enregistre l'image d'une petite partie du ciel avec une échelle inversement proportionnelle à la longueur focale. Pour les astrographes réfractifs de la Carte du ciel, leur distance focale est de 3,43 m, l'ouverture de 34 cm et les plaques de 13 cm × 13 cm donnent un champ carré utile de 2°10' (soit 48,75" par millimètre ou 20 μm par seconde de degré). Les incertitudes de mesure vont de 1 à 2 μm (ordre de grandeur du grain de la plaque photographique), donc 0,1" en position. Le premier télescope astrométrique (et non plus un réfracteur) est construit en 1964 à Flagstaff (Arizona). Il a un diamètre de 155 cm et une focale de 15,2 m fournissant une échelle au foyer de 13,5" par millimètre (ou 74 μm par seconde de degré, soit une précision de 0,013"). Cela permet des mesures astrométriques jusqu'à la magnitude 20 et notamment la mesure de parallaxes stellaires avec une précision des positions de 0,002" à partir d'une centaine de plaques.

Les positions des images stellaires sur la plaque sont déterminées à l'aide d'une machine à mesurer qui fournit pour chacune d'elles des coordonnées rectangulaires x et y . À partir de celles-ci, il faut déterminer les coordonnées célestes équatoriales α et δ de la source. Cette transformation de la plaque vers le ciel doit prendre en compte les effets dus à la réfraction atmosphérique, aux défauts instrumentaux (défocalisation, aberration de sphéricité, coma, astigmatisme et courbure de champ, distorsion) – dont les conséquences sont un déplacement radial de l'image d'un point sur son étalement (outre celui provenant de la diffraction de la lumière) – et à la projection gnomonique de la sphère céleste sur un plan tangent (plan de la plaque photographique).

Au Bureau des dames

C'EST PICKERING, le premier, en 1885, à Harvard qui recrute du personnel féminin dans le cadre du *Henry Draper Memorial Catalogue*. Les recrues sont chargées d'examiner les spectres photographiques d'étoiles. C'est bien évidemment une main-d'œuvre à moindre coût employée pour traiter une grande masse de données. Mouchez s'en inspire en 1886 en proposant « la création d'un atelier de femmes pour mesurer les clichés ». La conférence de 1889 soutiendra cette idée.

La première structure de ce type en France est donc créée en 1892 à l'Observatoire de Paris avec 4 femmes sous la direction de Dorothea Klumpke (1861-1942), seule femme parmi 50 candidats masculins, choisie par Ernest Mouchez (fig. 9). Klumpke, née à San Francisco, est arrivée en France en 1877. En 1886, elle obtient une licence en mathématiques à la Sorbonne et, en 1893, devient la première femme à obtenir un doctorat en astronomie (« Contribution à l'étude des anneaux de Saturne » sous la direction de Tisserand et d'Andoyer). Lorsque Mouchez la choisit, la jeune femme effectue déjà des traductions en français de nombre de documents scientifiques. Elle consacrera tout son temps et toute son énergie à la Carte du ciel jusqu'en 1901, date à laquelle elle épouse l'astronome britannique Isaac Roberts (1829-1904), qu'elle rejoint en Angleterre où elle l'assistera dans ses travaux photographiques en menant à bien son grand atlas photographique des 52 régions nébuleuses de Herschel. Klumpke retournera à San Francisco après avoir reçu la Légion d'honneur, le 22 février 1934. Jamais elle n'oubliera son passage à l'Observatoire de Paris, à qui elle a attribué pendant de nombreuses années à partir de 1921 une dotation de plus de 13 000 francs, dont 2 000 francs étaient destinés à encourager sous la forme d'un prix un calculateur méritant de la Carte du ciel. Le 17 juillet 1921, à l'occasion du centenaire de la naissance d'Ernest Mouchez, Klumpke dira de lui qu'« il était

doué de la vision du sage qui sait que, dans toute œuvre grande et durable, l'élément féminin a sa part, quelque modeste, quelque effacé en soit le rôle ».



Fig. 9 - Dorothea Klumpke (1861-1942).

Elle assurera la direction du Bureau des dames de la Carte du ciel à l'Observatoire de Paris entre 1887 et 1901.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Sur un total de 22 employées dans les observatoires français (le décompte exact est difficile à faire, certaines ne sont restées qu'un mois), entrées à titre régulier dans les observatoires avant 1918, seule Klumpke est titulaire de diplômes de l'enseignement supérieur (fig. 10).

Un Bureau des dames de la Carte du ciel est donc constitué au sein d'un grand nombre d'observatoires (Paris, Melbourne, Perth, cap de Bonne-Espérance, Toulouse...). Par exemple, pour la collection de plaques du Vatican, des photos d'archives montrent des religieuses de la Congrégation de l'Enfant Marie en train de mesurer les plaques. À l'observatoire de Bordeaux, ce sont des institutrices



Fig. 10 – Le Bureau des dames à l’Observatoire de Paris au grand complet (debout se tient Dorothea Klumpke).

Crédits Bibliothèque de l’Observatoire de Paris

d’école primaire justifiant d’un certificat de l’enseignement primaire qui sont choisies.

Leur tâche est ingrate et laborieuse, elle consiste en la mesure des positions d’étoiles des clichés de la Carte du ciel. Toutes les mesures des images d’étoiles sont effectuées à l’œil et enregistrées à la main. Si ce travail est exclusivement confié à des femmes, c’est parce qu’elles sont supposées être mieux adaptées que les hommes à ce type de travail qui demande minutie et patience, discipline et docilité – elles sont appelées *calculatrices*. Elles sont payées à l’heure, sans perspectives professionnelles dans les observatoires, et révo-

cables à tout instant par mesure d’économie. Elles constituent une main-d’œuvre taillable et corvéable à merci. Il n’est bien évidemment pas question de les autoriser à faire autre chose, observer par exemple. Ainsi, à l’observatoire de Bordeaux, son directeur, Georges Rayet, s’oppose à la titularisation des calculatrices « quoiqu’elles forment une sorte de personnel permanent [...], elles sont payées sur facture répondant à des heures de travail, il ne me paraît pas utile ni même bon, de traiter comme des fonctionnaires des calculatrices essentiellement variables ». (Lettre au ministre de l’Enseignement supérieur du 25 août 1899). Les dames de la Carte du ciel officieront jusqu’à l’achèvement du programme (fig. 11).



Fig. 11 – L'une des toutes dernières « dames de la Carte du ciel » de l'Observatoire de Paris avant la clôture du Catalogue de la Carte du ciel en 1964.

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

Épilogue

AU TOTAL, 22 652 PLAQUES sont mesurées manuellement par les dames de la Carte du ciel d'où seront extraites les positions de près de 5 millions d'étoiles jusqu'à la magnitude 12 avec une précision d'environ 0,5". Elles sont regroupées dans le *Catalogue astrographique* publié entre 1902 et 1964 en une masse de 254 volumes imprimés. Quant au second projet, la carte du ciel proprement dite, il ne sera jamais mené à son terme ; la reproduction des cartes à partir de plaques de cuivre s'est avérée excessivement coûteuse et beaucoup de zones ne seront jamais photographiées.

Certains astronomes et historiens ont critiqué cette entreprise qui aurait mobilisé trop d'énergies, de fonds et de personnels pendant beaucoup trop d'années – elle a duré près de trois quarts de siècle (1887-1970) – au détriment d'autres domaines en plein développement comme l'astrophysique par exemple (souvenons-nous que les États-Unis ne se sont pas impliqués dans le projet de la Carte du ciel).

Pourtant, un peu plus d'un siècle après son lancement, l'entreprise retrouve tout son crédit scientifique et sa place dans l'histoire de l'astronomie. Au début des années 70, on commence à prendre conscience de tout le bénéfice qu'il y aurait à tirer

des données du *Catalogue astrographique* dans la détermination des mouvements propres des étoiles. Comparer une même zone du ciel à plusieurs décennies d'intervalle permettrait d'observer le déplacement lent des étoiles du champ dans un plan perpendiculaire à la ligne de visée, le plan tangent à la sphère céleste. Toutefois, on réalise également que pour ce faire, cela nécessiterait de nouvelles réductions des mesures des plaques, car les constantes provisoires des plaques (celles publiées dans les volumes à l'aide desquelles une mesure de position sur la plaque est transformée en une position sur le ciel) ne permettent pas de maintenir la précision inhérente aux mesures de plaque et introduisent des erreurs systématiques non négligeables. Il est alors impossible de mener à bien une telle tâche tant que les données des catalogues imprimés ne peuvent être transférées sur ordinateur.

Ce n'est que vers le milieu des années 90 que l'*US Naval Observatory* (USNO) de Washington et l'Institut astronomique Steinberg de l'université de Moscou viennent à bout de la tâche herculéenne de mettre sous forme électronique les 254 tomes du *Catalogue astrographique*. En outre, une autre difficulté résidait dans le fait qu'il n'existait pas de catalogues de référence suffisamment précis pour être en mesure de réduire de façon adéquate les erreurs systématiques. Or, au début des années 90, un nouveau système de référence céleste est disponible, celui issu du satellite astrométrique Hipparcos – dont nous reparlerons dans un prochain épisode. Toutes les conditions sont alors réunies pour procéder à la reréduction des mesures de position (x,y) effectuées sur les plaques de la Carte du ciel. Cela donnera naissance en 1998 au catalogue AC2000 (*Astrographic Catalogue 2000*) contenant 4 621 836 étoiles avec les mouvements propres de 2,5 millions d'étoiles obtenus avec une précision de 2,5 millièmes de seconde de degré par an. La précision en position peut différer d'une zone à l'autre selon la méthode de mesure des plaques utilisée, elle varie entre 0,19" et 0,44".

Comme l'ancien catalogue d'Hipparque, dépoussiéré et utilisé par Halley en 1718 pour révéler les mouvements des étoiles – leur *mouvement propre* –, le catalogue astrographique est un exemple remarquable d'un projet presque abandonné, qui a mobilisé tant de personnes, d'efforts et d'énergie pendant si longtemps, attendant patiemment, mais résolument destiné à révéler sa valeur inestimable des générations plus tard, donnant ainsi raison aux perspectives visionnaires de son promoteur, Ernest Mouchez. En définitive, en astronomie, la valeur des documents augmente toujours à mesure que l'on s'éloigne de l'époque à laquelle ils ont été produits. L'astronome le sait, son travail est universel et s'inscrit dans le temps, en un mot, à *la mesure du ciel*.

Références

H.M. Lai, C.C. Lam et K. Young, « Perturbation of Uranus by Neptune: A modern perspective », *American Journal of Physics*, vol. 58, Iss. 10, 1990, p. 946-953.

J. Lamy, *La Carte du ciel*, EDP Sciences, 2008.

« Letter from M. Encke to J.F.W. Herschel, Berlin, May 19, 1826 », *The Philosophical Magazine and Journal*, vol. 68, 1826, p. 50-55.

E. Mouchez, *La photographie astronomique à l'Observatoire de Paris et la Carte du ciel*, Paris : Gauthier-Villars, 1887.

E. Pickering, « The Bruce Photographic Telescope », *Harvard College Observatory Circular*, vol. 15, 1896, p.1-2.

J. Kovalevsky, *Astrométrie moderne*, Springer-Verlag, 1990.

F. Arago, *Astronomie populaire*, t. 4, 1857, p. 522-523.

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.

K. Staubermann, « Exercising Patience: On the Reconstruction of F.W. Bessel's Early Star Chart Observations », *Journal for the History of Astronomy*, vol. 37, part 1, n° 126, 2006, p. 19-36.

S.E. Urban, T.E. Corbin *et al.*, « The AC 2000: The Astrographic Catalogue on the System Defined by the HIPPARCOS Catalogue », *The Astronomical Journal*, vol. 115, iss. 3, 1998, p. 1212-1223.