

> un galvanomètre enregistreur spécialement aménagé, on aurait une courbe continue. Nous n'avons pu réaliser ce dispositif trop coûteux pour nos ressources.»

Millochau nota aussi que l'aiguille du galvanomètre relié au pyrhéliomètre pour mesurer le courant induit par le rayonnement solaire ne redescendait pas à zéro quand on visait une zone proche du Soleil. Il attribua ce phénomène à «une émission calorifique extérieure à l'image solaire»: il détectait vraisemblablement les

effets des rayonnements infrarouges qu'émet la chromosphère solaire. Enfin, cette succession de mesures en différents points du disque permit d'estimer l'absorption par l'atmosphère solaire, en appliquant la même méthode que pour l'atmosphère terrestre.

Millochau réalisa ces deux expériences en quatre lieux: le sommet du mont Blanc (4810 mètres), Chamonix (1000 mètres), le refuge des Grands Mulets (3050 mètres) et, une fois de retour, à l'observatoire de Meudon (150 mètres). Comparant la qualité des différents sites, il fit valoir l'intérêt de l'observatoire Janssen, au sommet du mont Blanc, où les conditions atmosphériques étaient très stables au cours de la journée, particulièrement en termes de convection et d'hygrométrie. Millochau envisagea même une façon encore plus audacieuse d'obtenir de meilleurs résultats: «Un sondage vertical de l'atmosphère, en ballon, où je crois possible d'utiliser le télescope pyrhéliométrique, donnerait certainement de précieuses indications sur les effets de l'absorption de l'atmosphère terrestre.»

UNE MESURE DIRECTE DE LA CONSTANTE SOLAIRE

Puis Millochau confia le pyrhéliomètre à Féry, à l'ESPCI, afin de procéder à l'étalonnage de l'appareil et de corréliser les déviations du galvanomètre aux températures apparentes. Un four électrique à résistance de platine chauffé à une température connue servit d'étalon pour interpréter les résultats finaux des observations: la température apparente de la surface solaire ainsi mesurée était de 5663 kelvins, soit environ 5400°C. La déviation étant mesurée sur un galvanomètre précis à 1%, correspondant à une précision de 0,25% sur la température, les deux savants conclurent que l'incertitude sur leur mesure était $\pm 15^\circ\text{C}$. L'ensemble des résultats fut alors annoncé dans une série de trois communications à l'Académie des sciences, présentées par Janssen.

Mais l'aventure du pyrhéliomètre ne s'arrêta pas là, car il remonta au sommet du mont Blanc l'été suivant pour une seconde campagne d'observations. En effet, Féry et Millochau n'avaient pas encore déterminé la constante solaire. Toutefois, le pyrhéliomètre seul ne pouvait fournir ce résultat: l'expression de la constante solaire, calculée en sommant les contributions des différents points mesurés sur le disque solaire, fait apparaître un coefficient indéterminé. Néanmoins, la faible inertie thermique de l'instrument le rendait capable de fournir des mesures beaucoup plus rapidement que la plupart des actinomètres, appareils alors utilisés pour la mesure de la constante solaire. Les deux savants imaginèrent donc une méthode pour convertir le pyrhéliomètre en un «actinomètre instantané».

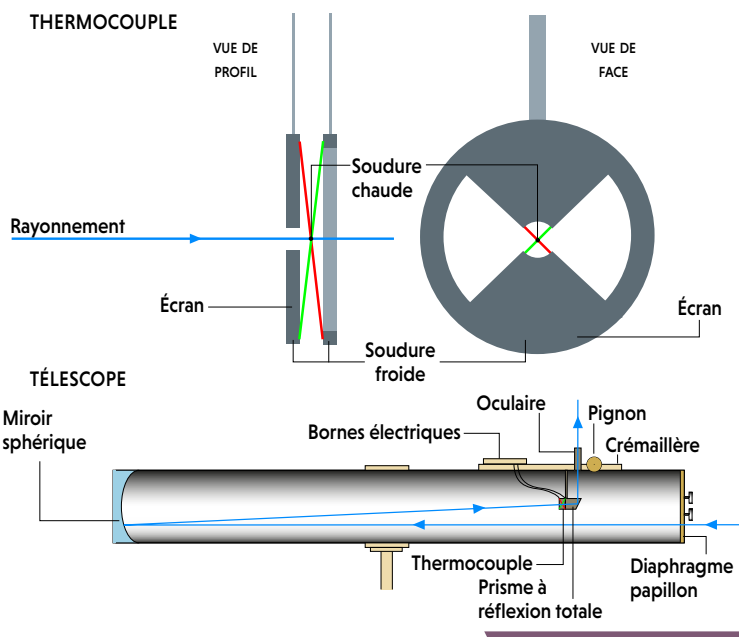
LE TÉLESCOPE DE FÉRY



Le pyrhéliomètre de Charles Féry (ci-contre après restauration) est un télescope Newton de 103 mm de diamètre et de 800 mm de focale. Au foyer du miroir se trouve un thermocouple constitué de deux fils très fins de deux métaux ayant un fort pouvoir thermoélectrique, le fer et le constantan, un alliage de nickel et de cuivre. La jonction entre les deux fils constitue la soudure chaude du thermocouple. Le corps du télescope forme la soudure froide. Un prisme à réflexion totale placé derrière le thermocouple renvoie le faisceau dans un oculaire latéral fixé sur une glissière à molette. Une fois le pointage et la mise au point effectués, on y observe la superposition de la soudure chaude du thermocouple (de diamètre 0,5 mm), et de l'image du Soleil (8 mm). Là où les précédents actinomètres recueillaient passivement les rayons du Soleil, mesurant des valeurs moyennées sur l'ensemble de la surface solaire, le pyrhéliomètre Féry focalise donc ces rayons, permettant ainsi jusqu'à 16 points de mesure de la température le long d'un diamètre solaire. Enfin, le courant produit par le thermocouple est mesuré avec un galvanomètre de grande précision. Pour éviter un échauffement et donc un courant trop élevés, le télescope est muni d'un diaphragme en forme de papillon qui limite la fraction du rayonnement solaire atteignant le thermocouple.

BRIGITTE LERIDON

chercheuse CNRS en physique du solide à l'ESPCI Paris



UNE MINUTIEUSE RESTAURATION DU TÉLESCOPE



Poussiéreux, mais complet et en très bon état, le télescope pyrhéliométrique de Féry a nécessité quelques travaux, financés par l'association ESPCI Alumni. Son miroir, notamment, avait besoin d'une nouvelle surface réfléchissante (*en haut*). La Société astronomique de France a pris en main cette opération. Après avoir mesuré sa sphéricité, elle a décidé de procéder à l'aluminisation de la surface, l'argenture d'époque n'étant plus pratiquée aujourd'hui (*en bas*). De son côté, mon atelier-laboratoire a analysé le thermocouple : était-il encore fonctionnel ? Nous avons décidé de rendre interchangeable ce capteur : l'appareil serait présenté avec le capteur d'origine, mais mis en fonctionnement avec un thermocouple reconstruit et invisible. Durant l'été 2017, j'ai donc mis au point et monté un nouveau capteur thermoélectrique qui, associé au miroir restauré, a donné toute satisfaction en observation solaire. Ces travaux nous ont aussi permis de reconstituer le cheminement de Féry et Millochau pour concevoir et réaliser l'instrument avec les savoirs de l'époque. La seule présentation de l'appareil sans remise en fonctionnement n'aurait pu le permettre...

BERNARD PIGELET
restaurateur d'instruments scientifiques

cuivre et de nickel), constitua la soudure chaude du thermocouple. Le fonctionnement de l'appareil est simple : « Pour se servir de l'actinomètre, on le pointe dans la direction du Soleil, et on le maintient en direction aussi exactement que possible, puis l'observateur lit la déviation marquée [sur le galvanomètre couplé] et note le temps au moment où la lecture est faite. »

Comme pour le pyrhéliomètre, il suffit de l'étalonner avant ou après la mesure.

Au cours de la mission de l'été 1907, Millochau constata, comme attendu, que l'inertie de l'actinomètre était beaucoup plus grande que celle du pyrhéliomètre : le petit cylindre atteignait l'équilibre thermique en 23 minutes. L'instrument joua néanmoins son rôle et donna une première valeur de la constante solaire égale à 0,166 watt par centimètre carré, corrigée des 11 % d'absorption de l'atmosphère terrestre. Cela permit de déterminer le coefficient inconnu et ainsi de calibrer le pyrhéliomètre en mode actinomètre.

Les deux savants s'arrêtèrent à cette preuve de principe et présentèrent leurs nouveaux résultats à l'Académie des sciences début 1908. Ils ne proposèrent pas d'étude de la variation de la constante solaire au cours du temps, malgré une remarque de Millochau : « Il est presque certain que cette constante varie, et c'est même l'étude de cette variation probable qui serait la plus intéressante. » On sait aujourd'hui que cette « constante » est en réalité la moyenne d'une valeur fluctuante, le Soleil présentant une activité cyclique. Dans les années suivantes, Féry poursuivit ses travaux en précisant les conditions d'application de la loi de Stefan-Boltzmann à l'astronomie.

RETOUR À L'ESPCI

En dehors de ces deux expéditions, on ne connaît pas d'autres contributions du télescope pyrhéliométrique à la recherche. Il fut en revanche très vite utilisé à des fins d'enseignement. Dès novembre 1907, des élèves de la 24^e promotion de l'ESPCI procédaient à l'étalonnage du télescope lors d'une séance de travaux pratiques. Le dernier emploi connu de l'instrument remonte à 1933, date à laquelle il a été exposé à la bibliothèque de l'école à l'occasion des célébrations du 50^e anniversaire de l'institution. S'agissant d'un appareil destiné à un usage très précis en recherche fondamentale, on peut comprendre qu'il n'ait pas été réutilisé par la suite ; c'est probablement pourquoi il nous est parvenu en bon état, 111 ans après sa fabrication. Aujourd'hui, l'instrument est entièrement restauré (*voir l'encadré ci-dessus*). Il est donc à nouveau possible de l'utiliser pour mesurer la température de la surface solaire. Mais il n'est pas envisagé – pour l'instant – de le porter au sommet du mont Blanc ! ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Beaudouin et al., **Un instrument retrouvé : le pyrhéliomètre**, *L'Astronomie*, mars 2018.

G. Durey et al., **Le télescope pyrhéliométrique de Charles Féry et la mesure de la température du Soleil**, *Nuncius*, à paraître.

D. Beaudouin, **Charles Beaudouin : une histoire d'instruments scientifiques**, EDP Sciences, 2005.

C. Féry et G. Millochau, **Contribution à l'étude de l'émission calorifique du Soleil**, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, vol. 143, pp. 505-507, 570-572, 731-734, 1906.

Leur solution consistait à accompagner le pyrhéliomètre d'un... actinomètre. Les deux instruments sont très différents, comme l'explique Millochau : « Le télescope pyrhéliométrique donne directement la température apparente d'un élément de surface du radiateur visé, alors que l'actinomètre donne l'effet global du faisceau solaire et mesure directement la constante solaire. »

Ainsi, le rôle de l'actinomètre serait de fournir une première valeur de la constante solaire. Cette valeur permettrait de lever l'indétermination sur l'expression calculée à partir des grandeurs mesurées par le pyrhéliomètre, et ce dernier fournirait ainsi par la suite, avec plus de rapidité, de nouvelles valeurs de la constante solaire.

Féry conçut donc un actinomètre (aussi conservé à l'ESPCI) qui, contrairement à celui d'Ångström, le plus répandu à l'époque, ne nécessitait pas de courant compensateur. Sur une sphère métallique de 10 centimètres de diamètre, creuse et noircie à l'intérieur, il fixa un petit cylindre métallique qui, relié à deux tiges, l'une en laiton, l'autre en constantan (alliage de