

produites lors de la seconde campagne du LHC. Notre connaissance des valeurs de R_K et R_{K^*} pourrait très vite s'améliorer. Soit l'importance des désaccords augmentera, et ces anomalies passeront sur le devant de la scène de la physique actuelle. Soit ces anomalies se révéleront dues aux fluctuations statistiques, et il nous restera à rechercher la nouvelle physique dans d'autres processus.

ATTENDRE PRUDEMMENT LA SUITE

Les résultats dont nous avons fait état ici ne sont que les exemples les plus saillants d'une multitude de mesures intéressantes ayant émergé récemment dans le domaine des hadrons beaux. Ils suscitent à juste titre beaucoup d'enthousiasme parmi les physiciens des particules, mais les plus vieux et sages d'entre nous ont déjà vu dans le passé de tels engouements surgir puis s'évanouir. Attendons donc prudemment la suite.

Quelles seraient les implications si une ou plusieurs de ces anomalies passaient de la catégorie « indice très intéressant » à « contradiction claire du modèle standard » ? Sans aucun doute, ce serait l'un des développements les plus importants en physique des particules depuis plusieurs décennies. Une fenêtre

s'ouvrirait sur le paysage qui se cache au-delà des limites du modèle standard et de ce que nous comprenons des lois régissant l'Univers. Dans un premier temps, il faudrait alors découvrir ce qui est responsable des désaccords avec le modèle standard. S'il s'agit de l'influence virtuelle de particules de la nouvelle physique (qu'il s'agisse d'un boson de Higgs exotique, d'un leptoquark, d'un Z' ou d'autre chose encore), leurs effets devraient apparaître dans d'autres désintégrations de hadrons beaux et nous livrer des indices supplémentaires. En outre, à moins d'être très lourdes, ces nouvelles particules pourraient également apparaître directement dans des collisions d'*Atlas* ou *CMS*, ou dans un futur accélérateur de plus haute énergie encore.

Sans savoir ce que l'avenir nous réserve, l'extrême sensibilité du LHC et les perspectives de progrès considérables dans les années à venir sont encourageantes. Nous ignorons si le chemin vers la nouvelle physique par des recherches indirectes sera court ou long, mais la plupart d'entre nous sont persuadés d'aller dans la bonne direction. C'est, dit-on, Galilée qui aurait préconisé de « mesurer ce qui est mesurable, et rendre mesurable ce qui ne l'est pas ». Il n'y a pas meilleure devise pour l'expérience *LHCb*. ■



{ Partagez les savoirs }

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

CONFÉRENCES-DÉBATS

Les roches terrestres et les météorites : jeux de miroir

Lundi 5 mars - 18h : À la recherche des plus anciennes traces du vivant sur Terre et ailleurs
Avec *S. Bernard*, géochimiste et minéralogiste (IMPMC), CNRS et Muséum

UNE EXPO, DES DÉBATS

Animé par *M.-O. Monchicourt*, journaliste scientifique à France Info

Lundi 12 mars - 18h : Exploration spatiale
Avec *J.-P. Bibring*, astrophysicien, coordinateur des Programmes d'Exploration de la planète Mars, Institut d'astrophysique spatiale ; *F. Rocard*, responsable des programmes d'exploitation du système solaire, CNES et *V. Sautter*, géologue, spécialiste des roches martiennes, CNRS

UN CHERCHEUR, UN LIVRE

Lundi 19 mars - 18h : Les météorites et leurs secrets, Ed. Ellipses
De et présenté par *E. Jacquet*, cosmochimiste

Lundi 26 mars - 18h : Impacts, des météores aux cratères, Ed. Belin
Collectif sous la direction de *S. Bouley*, présenté par *S. Bouley*, planétologue, Geosciences Paris Sud et *B. Zanda*, météoritologue, Muséum, co-directrice de l'ouvrage

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 25 mars - 15h : Minéralogiste naturaliste
avec *P.-J. Chiappero*

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE



L'ESSENTIEL

> En 2017, un vieux télescope est redécouvert lors de l'inventaire des collections patrimoniales de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la Ville de Paris (ESPCI).

> Il s'agit d'un télescope dit pyrhéliométrique, conçu

en 1906 par un professeur de l'école, Charles Féry.

> Cet instrument très particulier permet à l'astronome Gaston Millochau de fournir une très bonne estimation de la température à la surface du Soleil... depuis le sommet du mont Blanc.

LES AUTEURS



GUILLAUME DUREY
doctorant en physique
de la matière molle
à l'ESPCI Paris



**ANDRÉ PIERRE
LEGRAND**
professeur émérite
à l'ESPCI Paris



DENIS BEAUDOUIN
auteur,
petit-neveu de
Charles Beaudouin

Le télescope oublié de Charles Féry

Un télescope récemment retrouvé dans les greniers de l'ESPCI, une école d'ingénieurs de Paris, s'est révélé un acteur clé, au début du ^{xx}e siècle, d'une aventure qui occupait les savants depuis plusieurs siècles : la mesure de la température du Soleil.

Paris, mars 2017. À la veille d'importants travaux de rénovation de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI), nous poursuivons l'inventaire de son patrimoine scientifique, d'étagères poussiéreuses en placards oubliés. Fondée en 1882 sur la montagne Sainte-Geneviève, l'école a amassé au fil des années des instruments de toutes tailles, de toutes formes. Nous identifions au mieux leurs fonctions, leurs principes, leurs dates de fabrication, leurs constructeurs, mais quelques-uns restent réfractaires aux investigations. L'un d'eux frappe particulièrement notre curiosité : c'est un long tube équipé de plusieurs accessoires, en particulier de deux bornes électriques. Il ressemble à un télescope d'environ 1 mètre de long et 12 centimètres de diamètre et, sur la collerette d'entrée de la lumière, on déchiffre sous la poussière du ^{xx}e siècle :

«Télescope pyrhéliométrique Ch. Féry
Ch. Beaudouin Constructeur Paris»

Découverte notable, car c'est avec cet instrument, reposant sur un procédé mis au point par le physicien Charles Féry, que l'astronome Gaston Millochau mesura en 1906 avec une précision remarquable la température de la surface solaire depuis l'observatoire Janssen, au sommet du mont Blanc : «5663° absolus, soit environ 5400° vulgaires», selon l'expression de Millochau. Une erreur qui ne diffère que de 2% de la valeur moderne, 5778 kelvins.

MESURER LA TEMPÉRATURE DU SOLEIL

Ce n'était pas la première fois qu'une telle mesure était effectuée. L'histoire de l'actinométrie solaire – l'étude des rayonnements issus du Soleil – était même déjà assez longue, mais les mesures restaient peu précises. Aux



Sur le diaphragme papillon du télescope retrouvé, une inscription apparut sous la poussière : «Télescope pyréliométrique Ch. Féry».



expériences rudimentaires d'Isaac Newton (il avait estimé la chaleur reçue du Soleil à partir d'une température mesurée à l'aide de thermomètres glissés sous une couche de terre sèche exposée au Soleil) avaient succédé les travaux du Genevois Horace-Bénédict de Saussure en 1767, puis ceux de l'Anglais John Herschel en 1824. Ces travaux reposaient sur un principe calorimétrique : un corps très absorbant, de capacité thermique connue, recueillait le rayonnement. En mesurant l'élévation de sa température, on en déduisait l'énergie reçue. Puis un procédé plus performant dit de compensation, fondé sur l'utilisation d'un thermocouple, avait peu à peu remplacé cette méthode.

Un thermocouple (ou couple thermoélectrique) est un circuit conducteur constitué de deux métaux différents reliés par deux soudures. Si l'une des soudures est portée à une température différente de l'autre, il apparaît une différence de potentiel dans le circuit, et donc un courant. Ce phénomène, découvert en 1821 par le physicien allemand Thomas Seebeck, est utilisé pour mesurer des températures. En pratique, on porte une soudure à la température à mesurer, tandis que les deux autres extrémités des métaux sont reliées aux fils d'un voltmètre et portées à une même température de référence.

En 1893, s'appuyant sur ce phénomène, le physicien suédois Knut Ångström avait construit un «pyréliomètre électrique à compensation» pour mesurer la température de la surface solaire : l'une des soudures était exposée au Soleil, ce qui produisait un courant électrique, tandis que la seconde était parcourue par un courant dont on faisait varier l'intensité, ce qui avait pour effet de chauffer la soudure (par effet Joule). Ångström cherchait alors à équilibrer les deux courants pour que les deux soudures reçoivent la même énergie.

Un an plus tard, s'inspirant des travaux d'Ångström, l'astronome irlandais William Wilson et son confrère britannique Peter Gray avaient mis au point une version plus performante encore de l'appareil, où la seconde soudure était exposée au rayonnement d'une source thermique artificielle d'intensité connue. Wilson avait aussi appliqué à leurs mesures une loi découverte ➤

> expérimentalement quelques années plus tôt, en 1879, par le physicien slovène Jožef Stefan et justifiée en 1884 par Ludwig Boltzmann dans le cadre de la thermodynamique – la loi de Stefan-Boltzmann.

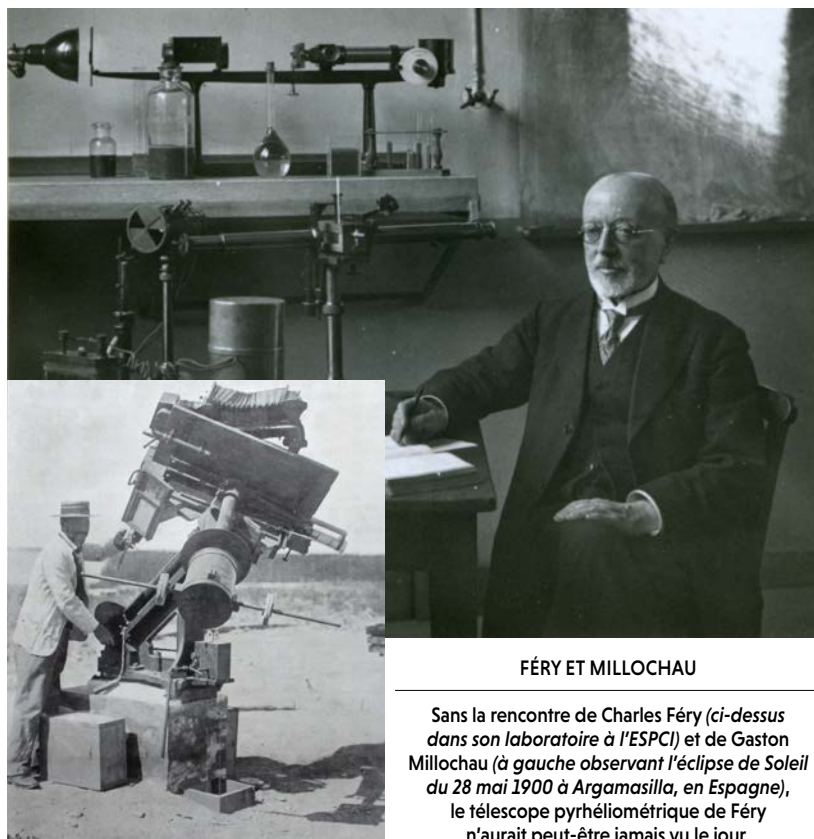
Cette loi établit que la puissance totale rayonnée par un corps noir de température absolue T est proportionnelle à T^4 . Un corps noir est un objet physique idéal qui absorbe tout le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit, sans en réfléchir ni en transmettre. À l'équilibre, il rayonne : sa température ne reste constante et uniforme que si toute l'énergie qu'il absorbe est réémise. Or le Soleil, comme toutes les étoiles, est une bonne approximation d'un corps noir. Grâce à la loi de Stefan-Boltzmann, Wilson était donc capable de déduire la température du Soleil de l'énergie mesurée avec son appareil.

En toute rigueur, cependant, la température obtenue avec cette méthode est dite apparente : c'est celle qu'aurait un corps noir placé à la même distance que le Soleil, de même diamètre apparent et produisant un rayonnement de même intensité. Wilson n'évaluait pas, notamment, l'effet de l'absorption dû aux atmosphères de la Terre et du Soleil. Il avait donc obtenu une série de valeurs assez dispersées, allant de 5773 à 6863 kelvins. L'instrument de Féry et Millochau apporta alors une importante brique à l'édifice. Inspiré tant des rapides progrès instrumentaux que des dernières avancées théoriques, il fournit en 1906 une mesure bien plus précise de la température de la surface solaire.

UN PYROMÈTRE AUX FOURNEAUX

Âgé de 41 ans, Féry était alors professeur d'optique à l'ESPCI, dont il était diplômé de la première promotion. Passionné de physique, d'optique, de photographie, d'astronomie, il savait marier la recherche fondamentale à ses applications. Il avait déjà breveté et construit plusieurs instruments scientifiques pour la recherche et l'industrie, principalement dans quatre domaines : l'étude des propriétés physiques des substances chimiques (réfractométrie, spectrographie), l'étude du rayonnement (actinométrie, calorimétrie, pyrométrie), les piles et accumulateurs pour la TSF, et l'horlogerie électrique.

C'est l'instrument qu'il avait fabriqué durant sa thèse de physique, quelques années plus tôt, qui le conduisit à s'intéresser à l'actinométrie solaire. L'objectif de cette thèse, soutenue en 1902, était de mesurer le rendement lumineux de certains mélanges d'oxydes de terres rares utilisés dans l'éclairage au gaz, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie lumineuse, qui éclaire, et l'énergie calorifique, qui chauffe. Pour ce faire, Féry avait trouvé un moyen d'évaluer l'énergie lumineuse de la source (en la comparant avec



FÉRY ET MILLOCHAU

Sans la rencontre de Charles Féry (ci-dessus dans son laboratoire à l'ESPCI) et de Gaston Millochau (à gauche observant l'éclipse de Soleil du 28 mai 1900 à Argamasilla, en Espagne), le télescope pyrhéliométrique de Féry n'aurait peut-être jamais vu le jour.

celle, connue, émise par une lampe incandescente), mais il lui manquait un appareil qui mesurerait son énergie calorifique. Parmi les diverses techniques disponibles à l'époque, il choisit d'utiliser un thermocouple très particulier, optimisé par ses soins : « La quantité de chaleur transmise par rayonnement est généralement très faible ; on a donc le plus grand intérêt à diminuer le plus possible la masse du corps thermométrique, pour que celui-ci prenne rapidement sa température d'équilibre. »

Concrètement, son thermocouple repose sur deux fils métalliques se croisant en leur centre, ce dernier formant la soudure chaude (voir l'encadré page 78). Et pour éviter les transferts parasites de chaleur, Féry a eu l'idée d'enfermer la soudure chaude au centre d'une cavité qui constitue la soudure froide : « Dans ces conditions, explique-t-il, un rayonnement latéral produit une élévation simultanée de la température des deux soudures. »

Cette lunette fournit au physicien les mesures qui lui permirent d'élaborer une théorie du rayonnement des oxydes. Mais sa thèse n'était pas encore achevée qu'il pensait déjà aux applications qu'un tel prototype aurait dans le monde industriel. C'est ainsi que son pyromètre devint le premier appareil commercial utilisant le rayonnement du corps noir pour mesurer une température. Jusqu'alors, on mesurait la température des fourneaux d'usine à l'aide de

thermomètres, qui s'endommageaient vite, ou de pyromètres optiques, dont la précision dépendait de la sensibilité de l'œil de l'observateur. Or il se trouve que les fours industriels sont parmi les meilleures réalisations expérimentales du concept de corps noir. On ménage une très petite ouverture dans un four par ailleurs fermé et, connaissant la valeur de l'énergie rayonnée par le four au moyen d'une mesure à la lunette pyrométrique, on en déduit sa température en appliquant la loi de Stefan-Boltzmann, corrigée de l'absorption dans l'objectif de la lunette.

Le modèle industriel du pyromètre de Féry permit d'évaluer des températures de 800 °C à 1800 °C, avec une précision de ± 5 °C au-dessus de 1700 °C. En 1904, Féry l'améliora encore en le transformant en un télescope pyrométrique, plus sensible: à l'inverse de la réfraction dans une lentille, la réflexion sur un miroir concave n'introduit quasiment aucune absorption. Un millier d'exemplaires furent produits par plusieurs constructeurs.

C'est dans ce contexte qu'en 1906 se rencontrèrent Féry et Millochau. Ce dernier était un astronome contemporain de la naissance de l'astrophysique et observateur de talent. Collaborateur proche de Jules Janssen, le fondateur de l'observatoire de Meudon, il menait

LES TRÉSORS DE L'ESPCI

Depuis 2017, une commission menée par Brigitte Leridon procède à un inventaire des instruments scientifiques anciens de l'ESPCI Paris, le dernier, partiel, ayant été réalisé il y a dix ans. À ce jour ont été référencés plus de 500 objets d'intérêt, autant de témoins du riche passé d'une école vieille de 136 ans, ayant notamment abrité les travaux de Pierre et Marie Curie, et de Paul Langevin.

aux rayons du Soleil, corrigée de l'effet absorbant de l'atmosphère terrestre. La fabrication du pyréliomètre fut confiée à Charles Beaudouin, constructeur d'instruments scientifiques installé depuis 1903 non loin de l'ESPCI, qui bénéficia très tôt des commandes de Féry, lequel appréciait ses qualités de mécanicien et d'électricien.

Millochau utilisa le télescope pyréliométrique de Féry au cours de deux missions... au sommet du mont Blanc. En effet, Janssen, qui cherchait à déterminer la composition de l'atmosphère du Soleil, avait fait construire quelques années auparavant, en 1893, un observatoire au sommet du mont afin de réduire l'effet de l'atmosphère terrestre sur ses mesures. La première expédition de Millochau eut lieu en 1906:

«Après une série d'observations à Chamonix, je partis le 20 juillet. [...] Une série de mauvais temps s'étant produite, le pyréliomètre ne put être monté par les porteurs que le 29 juillet, et les observations furent immédiatement commencées. Les meilleures conditions atmosphériques furent réalisées le 2 août. [...] Vers sept heures, le ciel commença à s'éclaircir et resta d'une pureté remarquable jusqu'à la nuit. [...] La courbe journalière obtenue ce jour-là, en mesurant d'heure en heure la radiation du centre solaire, est très régulière et extrêmement intéressante.»



AU SOMMET DU MONT BLANC

Durant les treize jours de cette mission, Millochau conduisit deux expériences avec le pyréliomètre. La première consistait à quantifier l'effet de l'absorption par l'atmosphère terrestre. L'astronome supposa qu'elle suivait la loi de Beer-Lambert, qui énonce que l'intensité d'un rayonnement décroît exponentiellement avec la distance parcourue dans un milieu absorbant. En réalisant une série de pointés du centre du Soleil au cours d'une journée, pour différentes hauteurs de l'astre sur l'horizon, et donc différentes épaisseurs d'atmosphère terrestre traversées par son rayonnement, il déduisit que cette dernière absorbait 11% du rayonnement initial au sommet du mont Blanc.

La seconde expérience consistait à obtenir un profil d'intensité du rayonnement le long d'un diamètre solaire. Pour ce faire, le pyréliomètre fut orienté vers un point juste en avant du Soleil de midi et laissé immobile; alors que la Terre tournait autour de son axe, l'image du Soleil traversait le champ de vision de l'instrument. En prenant des points de mesure régulièrement espacés dans le temps, Millochau obtint jusqu'à 16 valeurs le long d'un diamètre du Soleil.

L'astronome salua la symétrie de la courbe ainsi obtenue, qu'il attribua à la qualité de l'instrument de Féry. Son inertie thermique étant très faible, l'appareil était capable de reproduire instantanément les variations temporelles de l'énergie solaire. En revanche, il regretta d'avoir dû tracer la courbe point par point: «En employant >

des recherches sur les spectres des planètes et du Soleil. En 1906, il se consacrait à l'étude du Soleil. La paternité de l'idée n'est pas claire, les deux savants donnant des versions contradictoires. Toujours est-il que Féry fit réaliser un prototype de télescope pyrométrique pour la recherche en actinométrie solaire.

Selon Millochau, leur objectif était double: d'une part, obtenir une mesure précise de la température de la surface solaire et, d'autre part, mesurer ce que l'on appelle la constante solaire – la quantité de chaleur que reçoit par minute une surface noire d'un centimètre carré soumise

L'OBSERVATOIRE JANSSEN

Inauguré en 1893, l'observatoire que fit construire l'astronome Jules Janssen au sommet du mont Blanc était alors le plus haut du monde. Outre Millochau et le télescope Féry, il accueillait environ 25 chercheurs à l'occasion d'une cinquantaine de missions, avant d'être englouti dans une crevasse en 1909.

> 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.»

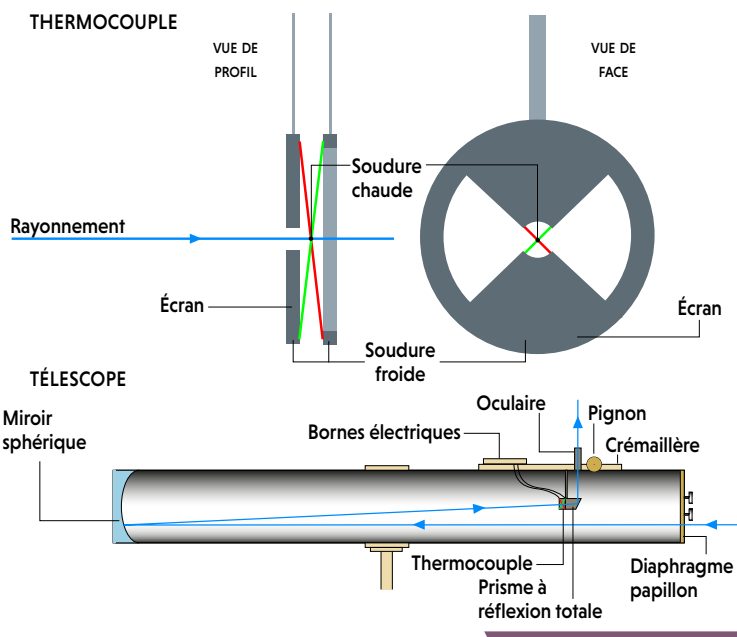
LE TÉLESCOPE DE FÉRY



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 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».

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'argenteure 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

cuiivre 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

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
P.86 Art & science
P.88 Idées de physique
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

L'ALGORITHME DES COQUILLAGES

Pour les mollusques, s'enrouler en spirale afin de construire un abri permanent se fait de multiples façons. Toutes sont des variantes d'un procédé général qu'on s'efforce de reproduire.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite
à l'université de Lille
et chercheur au Centre
de recherche en
informatique, signal
et automatique de Lille
(Cristal)

L'intelligence artificielle prétend imiter l'intelligence humaine; elle avance sûrement, mais lentement. En biologie, des projets pour modéliser informatiquement une cellule en respectant toute sa complexité sont en cours, aussi difficiles qu'ils soient. Heureusement les coquillages, du moins leur partie calcaire, se laissent mieux copier.

Les recherches sur la forme et les dessins à la surface des coquillages permettent aujourd'hui d'écrire des programmes de quelques dizaines de lignes qui, transmis à des imprimantes 3D, les guident pour fabriquer des modèles nombreux et variés. La qualité des objets ainsi produits est telle qu'on a du mal à croire qu'ils ne sont que la projection d'une formule mathématique dont on fait varier quelques paramètres. Francesco De Comitè, du laboratoire Cristal, à Lille, est un expert de cette informatique imitatrice du vivant et que l'on doit considérer comme un art mathématique.

UNE HISTOIRE QUI REMONTE AU XIX^e SIÈCLE

La régularité de la forme des coquillages a depuis longtemps frappé les esprits, et l'idée que des considérations de pure géométrie pouvaient donner la clé de leur beauté a, dès le début du XIX^e siècle, suscité des travaux. C'est ainsi que Henry Moseley, professeur au King's College de Cambridge,

en Angleterre, expliquait dans un article de 1838 les premiers éléments de cette mathématisation du vivant:

«Il y a une uniformité mécanique observable dans la structure des coquilles d'une même espèce; elle suggère que la figure génératrice des nouvelles couches augmente en taille en même temps que la chambre en forme de spirale se développe selon une simple loi géométrique. En considérant l'opercule de certaines classes de coquilles, la détermination de cette éventuelle loi semble possible. Continuellement agrandi par l'animal lors de sa croissance, à mesure que la



Jean-Paul Delahaye a récemment publié: **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).