

LIGNÉE TECHNIQUE OU L'ÉVOLUTION D'UN INSTRUMENT

#2 instruments de mesure des vitesses radiales *de l'Observatoire de Haute Provence (OHP)*

La vitesse radiale d'une étoile est la composante de sa vitesse observée suivant la ligne de visée, elle est positive si l'étoile s'éloigne de nous et négative si elle s'approche. On la mesure à l'aide d'un spectrographe qui décompose la lumière en ses différentes longueurs d'onde, avec un prisme en verre ou, pour les spectrographes modernes, avec un réseau, surface finement gravée comportant des milliers de traits par millimètre, ce qui permet une plus grande dispersion de la lumière et donc une meilleure précision de mesure.

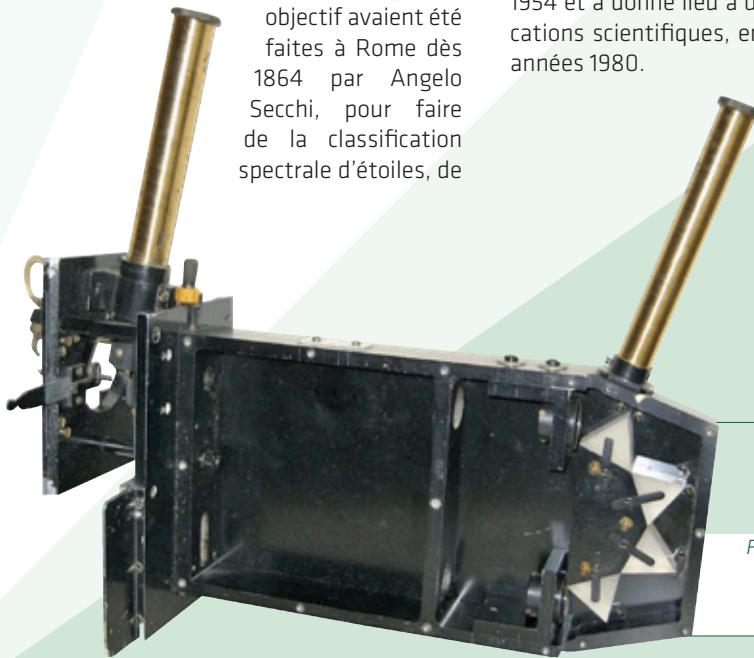
Du spectrographe à fente au prisme objectif

Le spectrographe à fente classique ne permet d'observer qu'une seule étoile à la fois dont l'image est projetée sur une fente placée devant un élément disperser. En 1882, Edward Pickering conçoit un montage simple qui permet de photographier sur une seule plaque les spectres d'un grand nombre d'étoiles, c'est le prisme objectif⁵. Il place un grand prisme en verre (20 cm de diamètre) devant l'objectif d'une lunette astronomique et l'image de chaque étoile dans le plan focal est alors remplacée par un petit spectre. Ainsi, alors que l'élément disperser de lumière (un prisme en l'occurrence) était placé jusque-là dans un spectrographe accroché derrière le collecteur de lumière (lunette ou télescope), il fait maintenant partie intégrante de celui-ci. Il faut toutefois noter que des observations visuelles

avec un prisme objectif avaient été faites à Rome dès 1864 par Angelo Secchi, pour faire de la classification spectrale d'étoiles, de

même que par Lorenzo Respighi à la même époque, suscitant une controverse entre ces deux astronomes sur la paternité du prisme objectif.

Dans les années 1950, la mesure des vitesses radiales d'étoiles devient la principale activité de l'OHP (Observatoire de Haute Provence). Le premier spectrographe de l'OHP ayant permis ce type de mesure a été utilisé dès 1934 par Raymond Tremblot sur le télescope de 80 cm de diamètre qui était alors à Forcalquier, avant d'être installé sur le site de Saint Michel l'Observatoire en 1945. Cet instrument comportait quatre prismes, ce qui assurait une grande dispersion de la lumière. Deux oculaires permettaient de voir le champ projeté sur la fente d'analyse, mais aussi derrière la fente, en visant la face d'entrée du premier prisme. L'instrument a servi jusqu'en 1954 et a donné lieu à de nombreuses publications scientifiques, encore citées dans les années 1980.



H : 12 cm
L : 23 cm
P : 43 cm

Figure 1 : Le spectrographe Tremblot.
Photo © Collection Photothèque OHP/CNRS

⁵John. B. Hearnshaw « *The Analysis of Starlight, Two Centuries of Astronomical Spectroscopy* ». 2014 (N.B. 1^{re} édition 1986). Cambridge University Press.

● - Première rupture technique : Le prisme objectif de Charles Fehrenbach

Le prisme objectif classique permettait seulement une analyse qualitative du spectre des étoiles. En 1947, Charles Fehrenbach invente un prisme objectif spécial qui permet de mesurer la vitesse radiale⁶. Le prisme ordinaire est remplacé par deux prismes tête-bêche dont les verres sont de nature différente, calculés de manière à compenser la déviation de lumière induite par chaque prisme. On photographie un champ stellaire en effectuant deux poses successives et en tournant le prisme de 180° entre les deux poses. On obtient ainsi, pour chaque étoile du champ observé, deux spectres parallèles et de dispersion inversée. La mesure de l'écartement entre les raies spectrales des deux spectres donne

la vitesse radiale de l'étoile par le biais de l'effet Doppler-Fizeau⁷. Les plaques photographiques étaient mesurées à l'Observatoire de Marseille avec un appareil d'optique dédié, le spectrocomparateur⁸.

Vers 1950, l'OHP a mis en service le PPO (Petit Prisme Objectif) de 15 cm de diamètre et le GPO (Grand Prisme Objectif) de 40 cm de diamètre. Chacun comprenait deux lunettes astronomiques parallèles, l'une portant le prisme et l'autre servant pour le guidage. Pendant une trentaine d'années, ces deux instruments ont fourni de nombreux clichés avec des centaines de spectres d'étoiles. La précision de mesure des vitesses radiales, 5 km/s, a permis d'étudier la cinématique et la structure de la Galaxie.

H : 450 cm
L : 130 cm
P : 60 cm
D : 40 cm

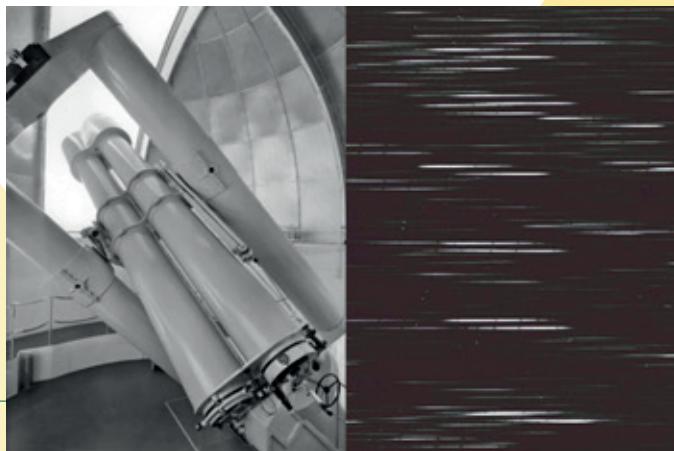


Figure 2 :
Grand Prisme Objectif de l'OHP et spectres d'étoiles tête-bêche.
Photo © Collection Photothèque OHP/CNRS

⁶ Charles Fehrenbach. « La mesure des vitesses radiales au prisme objectif ». 1947. Thèse de doctorat ès sciences mathématiques. Faculté des sciences de l'Université de Paris.

⁷ On a tous expérimenté l'effet Doppler en acoustique, lorsqu'on croise un véhicule qui actionne son avertisseur sonore, on note alors un net changement de la fréquence sonore car le son paraît plus grave après avoir croisé le véhicule, quand celui-ci s'éloigne de nous. Fizeau l'a appliqué ensuite à l'optique.

⁸ Marcelle Duflot & Charles Fehrenbach. « Description d'un spectrocomparateur à projection ». 1955. Journal des Observateurs. Publications de l'Observatoire de Haute-Provence ; v. 3, no. 25.

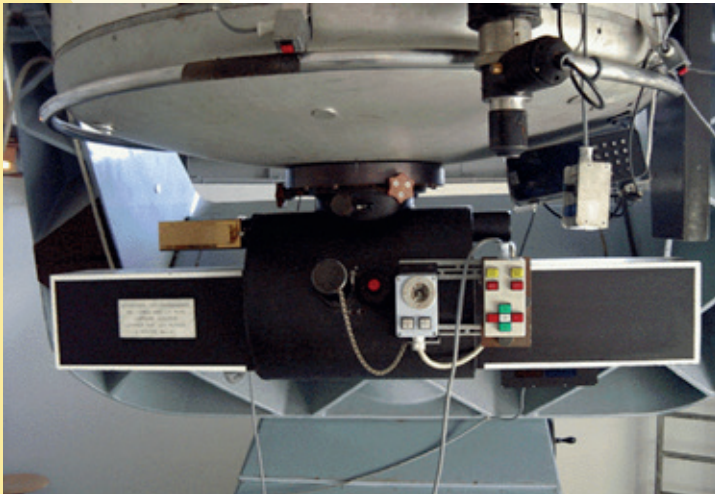
Seconde rupture technique : La méthode par corrélation avec l'instrument Coravel

La deuxième rupture technologique est l'invention, au milieu du XX^e siècle, d'instruments permettant de mesurer la vitesse radiale d'une étoile par la corrélation de son spectre avec celui d'une étoile de référence.

En 1977, une équipe franco-suisse construit l'instrument Coravel (CORrelation Radial VELocity)⁵. Le spectre de comparaison est celui de l'étoile Arcturus, reproduit en négatif sur une plaque où les raies sombres forment donc des trous. Le spectre de l'étoile observée est projeté directement sur ce masque que l'on déplace jusqu'à obtenir coïncidence des deux spectres, on a alors un minimum de luminosité. Le signal lumineux en sortie de l'instrument est converti en courant électrique par un photomètre et visualisé sur un oscillographe cathodique. La vitesse radiale de l'étoile est liée au déplacement en lon-

gueur d'onde par une simple constante de proportionnalité⁶, on a donc sa mesure au moment même de l'observation au télescope.

Dans Coravel, un réseau disperse la lumière perpendiculairement à celle fournie par le prisme, ce qui donne un spectre étalé sur une vingtaine de bandes parallèles. La précision qui en résulte permet d'étudier les mouvements orbitaux des étoiles doubles ainsi que la pulsation des étoiles de type Céphéide. On pense alors à utiliser ce type d'instrument pour détecter la présence de planètes autour d'autres étoiles. Mais il faut gagner un facteur 20 en précision si on veut détecter des planètes aussi grosses que Jupiter autour d'étoiles semblables au Soleil. C'est quasiment le même gain que l'on a obtenu en passant du prisme objectif (5 km/s de précision) à Coravel (0,3 km/s de précision).



H : 143 cm
L : 20 cm
P : 20 cm

Figure 3 :
L'instrument Coravel sur le télescope suisse de 1 m à l'OHP.
Photo © Observatoire de Genève

⁵ André Baranne, Michel Mayor & Jean-Luc Poncet « Coravel— A new tool for radial velocity measurements ». 1979. *Vistas in Astronomy*, vol. 23, Issue 4, pp.279-316

⁶ Suivant l'effet Doppler-Fizeau, une raie dont la longueur d'onde au repos est λ_0 , émise par une étoile de vitesse radiale V , sera décalée de $\Delta\lambda = (V/c)\lambda_0$, où c est la vitesse de la lumière. Le décalage $\Delta\lambda$ varie donc linéairement avec la longueur d'onde.

▲ -- Troisième rupture technique : détection des planètes extrasolaires avec l'instrument Élodie

En 1990, Michel Mayor (Observatoire de Genève) et André Baranne (Observatoire de Marseille) conçoivent le successeur de Coravel. Pour gagner en précision, il est décidé de ne pas attacher le spectrographe au télescope mais de le placer dans un local isolé, à température constante, et d'y amener la lumière au moyen d'une fibre optique. C'est là une rupture technologique majeure, reprise par la suite pour de nombreux instruments. Une autre nouveauté est l'utilisation d'un capteur d'image numérique de type CCD.



L'instrument, baptisé Élodie⁷, est équipé de deux fibres optiques, la première apporte au spectrographe la lumière de l'étoile observée et la deuxième fournit la brillance du ciel voisin que l'on peut ainsi soustraire aux mesures afin d'en améliorer la qualité. Le masque physique utilisé dans Coravel est maintenant un masque numérique, ce qui demande un traitement informatique spécifique.

L'instrument est installé en 1993 sous la coupole du télescope de 1,93 mètre de l'OHP⁸ et mesure les vitesses radiales avec une précision de 15 m/s, 20 fois mieux que Coravel. Après quelques mois à peine de fonctionnement il permet de trouver la première exoplanète, en orbite autour de l'étoile 51 de la constellation de Pégase. Michel Mayor et Didier Queloz ont obtenu le Prix Nobel de physique en 2019 pour cette découverte.

N.B. En 2006, Élodie a été remplacé par Sophie qui offre de meilleures performances mais sans rupture technologique⁹.

H : 120 cm

L : 40 cm

P : 200 cm

Figure 4 : Le spectrographe Élodie. Le réseau disperser est en bas à gauche, les miroirs de renvoi à droite, et le capteur d'image en haut à gauche, avec son cryostat doré.

Photo © Michel Marcelin

⁷ André Baranne, Didier Queloz, Michel Mayor, Georges Adriaenyk, Gérard Knispel, Dominique Kohler, Daniel Lacroix, Jean-Pierre Meunier, G. Rimbaud, Alain Vin « ELODIE: A spectrograph for accurate radial velocity measurements ». 1996. Astronomy and Astrophysics Supplement, v.119, p.373.

⁸ Un instrument jumeau, baptisé Coralie, sera installé quelques années plus tard sur le télescope suisse Euler au Chili.

⁹ François Bouchy. « ELODIE & SOPHIE spectrographs: 20 years of continuous improvements in radial velocities » 2015. Twenty years of giant exoplanets - Proceedings of the Haute Provence Observatory Colloquium, 5-9 October 2015.

LIGNÉE TECHNIQUE* OU L'ÉVOLUTION D'UN INSTRUMENT

*Définition d'une lignée technique :
« [...] les objets évoluent selon des « lignées », c'est à dire des ensembles regroupant les objets de même type, ayant même fonction et même principe de fonctionnement ».

Bruno JACOMY

Cette plaquette s'inscrit dans un projet d'inventaire et de valorisation du patrimoine scientifique, technique et contemporain d'Aix-Marseille Université.

Contact :

Culture et Patrimoine Scientifique
Direction de la Recherche et de la Valorisation
3 place Victor Hugo
13003 Marseille
corine.levy-battesti@univ-amu.fr
+33(0)4 13 94 97 29

Rejoignez le réseau !
Join the network



www.univ-amu.fr

Cette plaquette a été réalisée en partenariat avec le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.



Rédaction : Michel Marcellin, directeur de recherche émérite au CNRS, spécialiste de l'étude de la rotation des galaxies au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.

Sur une idée de Corine Lévy Battesti, ingénieure d'étude, chargée de l'inventaire des instruments scientifiques d'Aix-Marseille Université.

Avec la participation scientifique de Nicolas Claire, enseignant-chercheur au Laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires.