

Les spectrographes à corrélation

Quelques notions fondamentales

- Spectres et spectrographes
- Raies spectrales
- Spectres de différents éléments chimiques
- Comment mesurer la vitesse d'une étoile
- Effet Doppler
- Vitesse radiale
- Mesure des vitesses par corrélation
- La fonction de corrélation
- Les vitesses en Astronomie

Les spectrographes à corrélation sont aujourd'hui utilisés en grande partie pour la recherche de planètes autour d'autres étoiles que le Soleil. ELODIE et SOPHIE ont été construits entièrement à l'OHP, avec la collaboration de l'Observatoire de Genève, et l'OHP a participé à la conception, réalisation ou intégration de CORALIE et HARPS. Cette présentation est basée sur des panneaux préparés pour les journées "Portes Ouvertes" d'Octobre 2003.

Observatoire de Haute-Provence
version révisée : 4 mai 2009
S.Ilovaisky

Spectrographes pour l'OHP

ELODIE

- Télescope OHP de 1m93
- Bonnette Cassegrain
- Schéma optique
- Spectres échelle
- Courbes de vitesse d'étoiles avec exoplanètes
- Base de données ELODIE

SOPHIE

- Télescope de 1m93
- Schéma optique
- Vues du spectrographe

Spectrographes pour l'ESO

CORALIE

- Télescope suisse de 1m20
- Schéma optique

HARPS

- Télescope ESO de 3m60
- Schéma optique
- Autres photos

Spectres et Spectrographes

Pour mesurer la vitesse d'une étoile on analyse la lumière que l'on reçoit d'elle à l'aide d'un instrument d'optique qui disperse la lumière en séparant les différentes couleurs (on dit "longueurs d'onde") qui la composent, à l'aide d'un réseau à diffraction ou d'un prisme.

La lumière ainsi décomposée s'appelle un **spectre**. Et l'instrument qui forme le spectre s'appelle un **spectrographe**. Chaque corps lumineux émet un spectre qui lui est caractéristique et qui dépend de sa température et de sa composition chimique.

*Un petit spectre du Soleil est visible chaque fois que sa lumière éclaire des gouttes de pluie situées en face de vous: c'est le phénomène de l'**arc-en-ciel**.*



Pour étudier les spectres des étoiles on a construit à l'OHP des spectrographes très perfectionnés et très puissants: **ELODIE**, **CORALIE**, **HARPS** et **SOPHIE**.



Raies spectrales

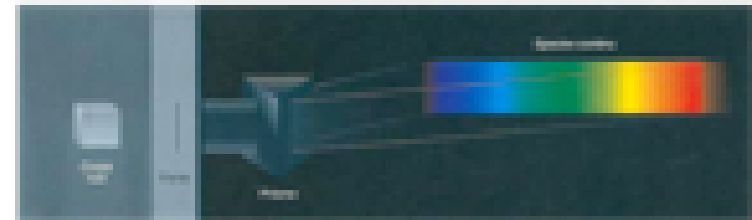
Dès 1699, Newton observa la lumière du Soleil, à l'aide d'un prisme. Il remarqua que sa lumière se décomposait en un spectre continu de couleurs successives reproduisant celles de l'arc-en-ciel.

Analysant la lumière passée par une fente, Wollaston (en 1804) et Fraunhofer (en 1811) notèrent la présence de **raies** étroites et très sombres recoupant le spectre continu. Ces raies sont attribuées à une diminution de la radiation, à ces longueurs d'onde; on les nomme des **raies d'absorption**, par rapport aux raies d'émission qu'on distingue lorsque la radiation est accrue par rapport au continue voisin.

Au fil des ans, il fut découvert qu'à chaque raie correspond une transition des électrons des atomes d'un élément chimique, sous forme gazeuse, généralement connue sur Terre.

Les raies d'absorption dans le spectre d'une étoile se produisent lorsque la lumière produite à leur intérieur traverse les couches ténues et transparentes de son atmosphère.

Spectre continu



Spectre continu avec raies d'absorption



Différents types de spectres

Dans la figure ci-contre on illustre différents types de spectre: continu, en absorption et en émission. L'échelle de longueur d'onde est exprimée en Ångströms ($1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nanomètre} = 10^{-10} \text{ m}$)

(a) spectre **continu**, par exemple celui d'une lampe incandescente

(b) spectre du **Soleil** (continu et raies d'absorption) avec seulement les plus importantes, dues à l'hydrogène (H), au calcium (Ca), au fer (Fe) et au sodium (Na)

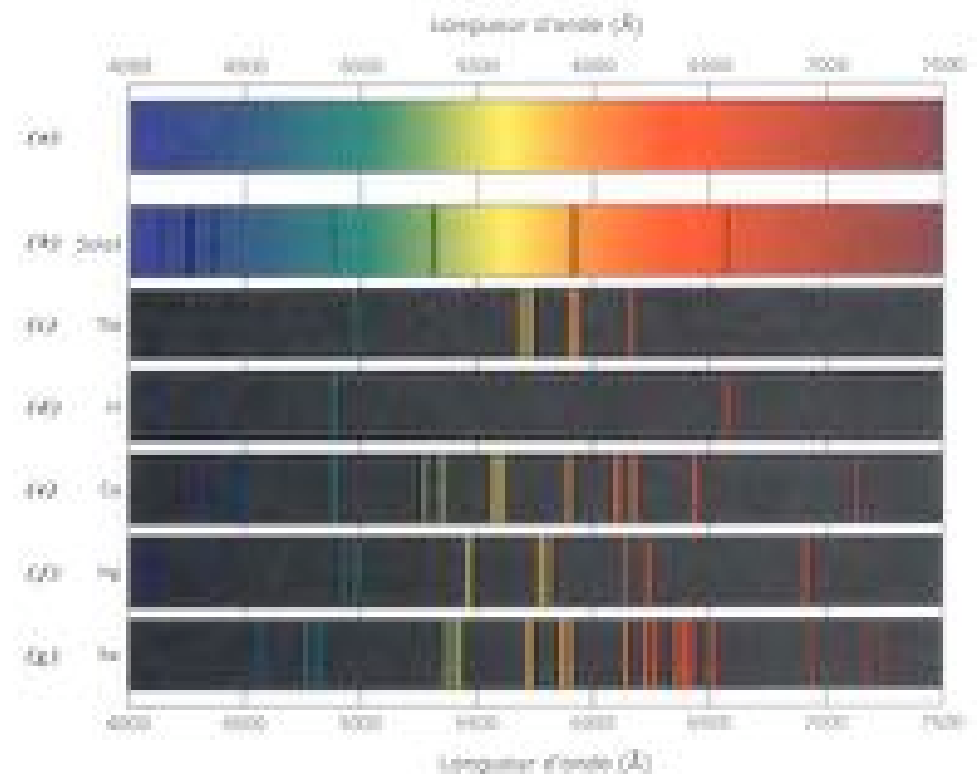
(c) spectre en émission du **sodium**

(d) spectre en émission de l'**hydrogène**

(e) spectre en émission du **calcium**

(f) spectre en émission du **mercure**

(g) spectre en émission du **neon**



Comment mesure-t-on la vitesse d'une étoile ?

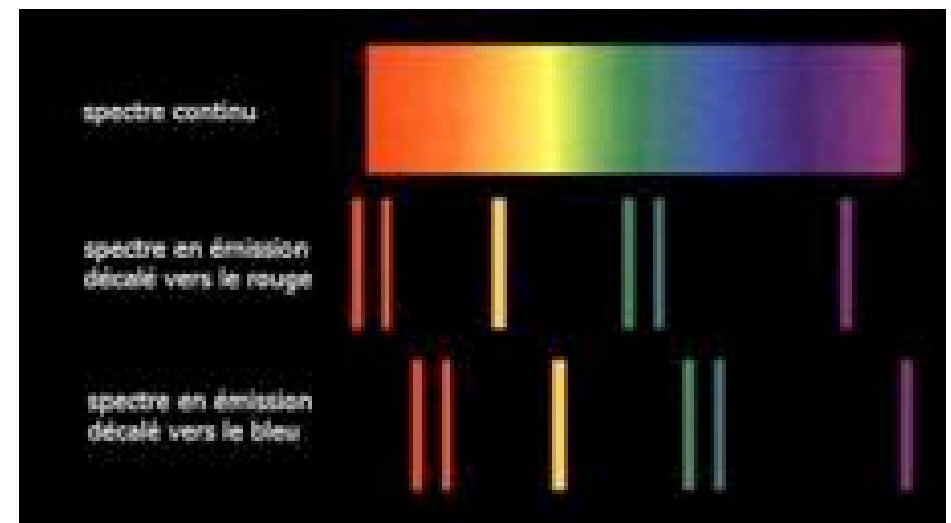
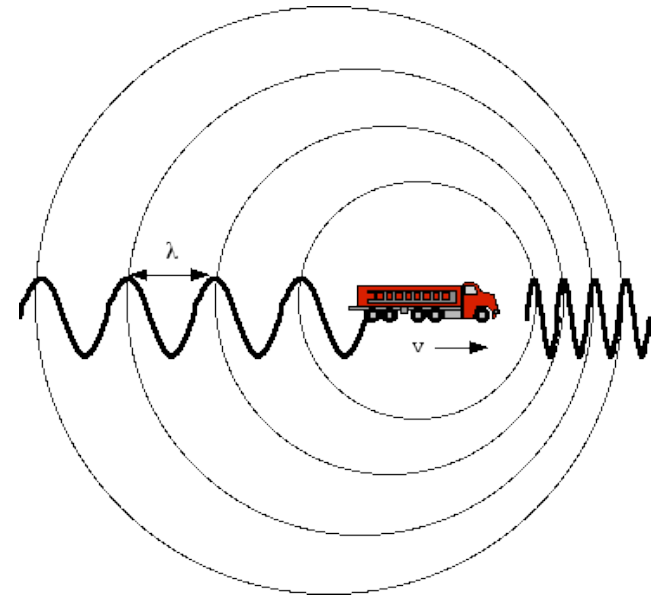
On utilise l'**effet Doppler**, décrit par les physiciens Doppler (en 1842) et Fizeau (en 1848).

Les ondes lumineuses (ou sonores) émises par un corps en déplacement sont affectées par le mouvement de celui-ci par rapport à un observateur au repos.

L'intervalle séparant des ondes successives est plus petit dans la direction du mouvement et plus grand dans la direction opposée.

Vous entendez l'**effet Doppler** chaque fois qu'un véhicule pourvu d'une sirène (pompiers, ambulance) passe rapidement près de vous: en s'approchant, le son émis par le véhicule est plus aigu et en s'éloignant le son est plus grave.

Pour une étoile qui se déplace par rapport à un observateur sur la Terre, le phénomène est analogue, mais il s'agit d'ondes lumineuses. La lumière est plus bleue si l'étoile approche et plus rouge si l'étoile s'éloigne.



Effet Doppler

Sur la figure ci-contre une source lumineuse se déplace à une vitesse constante de la droite vers la gauche.

Au temps t_1 elle est située à S_1 ; au temps t_2 , plus tard, elle est à S_2 ; au temps t_3 à S_3 et au temps t_4 à S_4 .

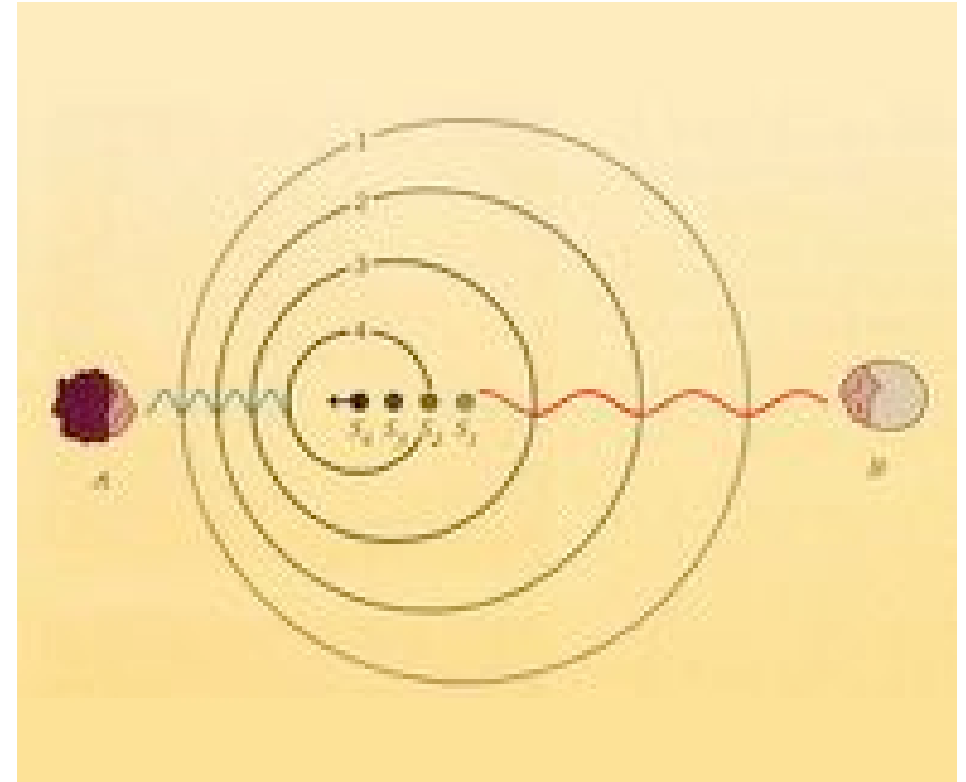
Supposons qu'elle émet un flash de lumière quatre fois (correspondant aux ondes numérotées de 1 à 4), une fois à chaque position (de S_1 à S_4). Les ondes sont reçues par les observateurs A et B.

La personne A voit un **décalage vers le bleu** (les ondes apparaissent "tassées"), la personne B voit un **décalage vers le rouge** (les ondes apparaissent "étalées").

Le changement de longueur d'onde, $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, est relié à la vitesse v par l'équation:

$$\Delta\lambda / \lambda_0 = v / c$$

où c est la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s).

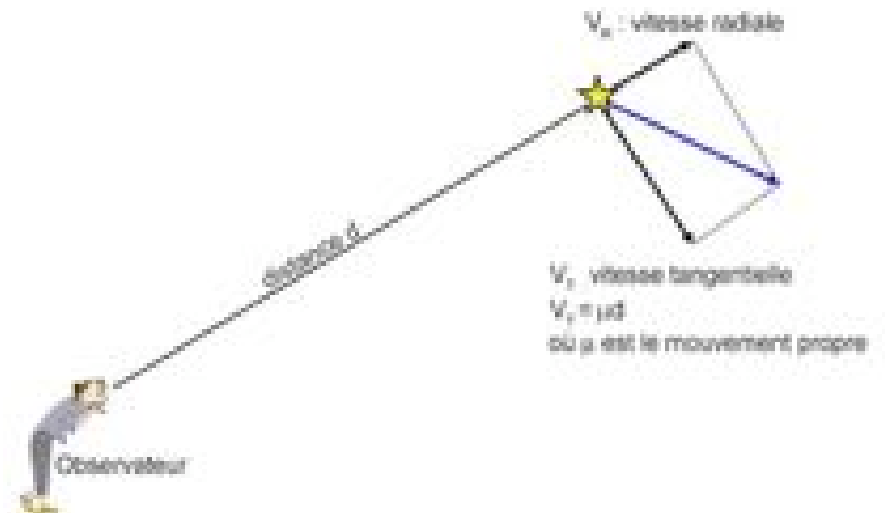


La vitesse radiale

Lorsqu'on mesure la vitesse d'une étoile on ne mesure que la composante de sa vitesse spatiale *projetée sur la ligne de visée*. On appelle cette vitesse la vitesse radiale.

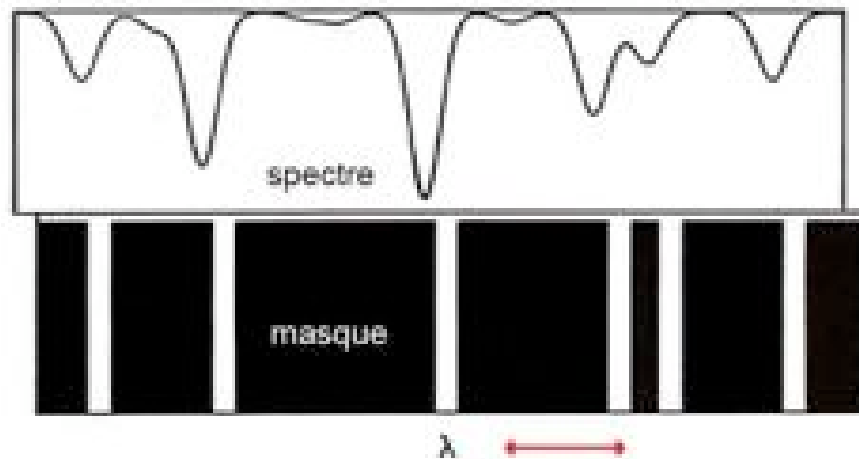
La détermination de la vitesse radiale d'une étoile se fait en deux temps :

- D'abord on prend le spectre d'une source de référence (une lampe au Thorium interne au spectrographe) qui donne la correction instrumentale à apporter pour que la vitesse mesurée de la lampe soit zéro !!
- Ensuite on prend le spectre de l'étoile et on lui applique la correction déduite de la lampe à Thorium puis une correction calculée pour tenir compte du mouvement annuel de la Terre autour du Soleil et aussi de la rotation diurne de la Terre autour d'elle-même.



Mesure de vitesse par corrélation

La mesure précise de la vitesse radiale est obtenue par **corrélation**. Cela consiste à comparer le **spectre** de l'étoile avec un spectre synthétique dont seules les raies d'absorption les plus fines ont été sélectionnées. On appelle **masque** ce spectre synthétique qui comporte plus de 3000 trous très fins.

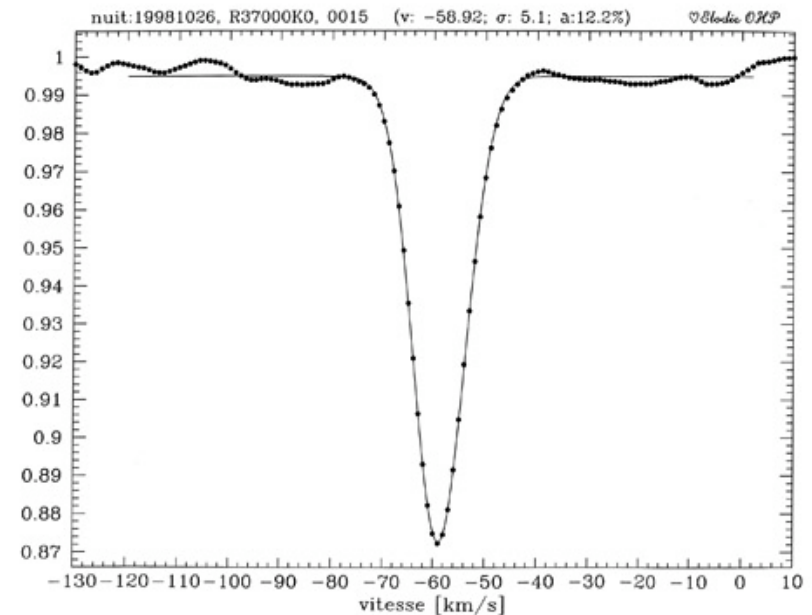


Ci-dessus, seule une toute petite partie du **spectre** d'une étoile est illustrée avec la partie correspondante du **masque** utilisé.

La corrélation consiste à déplacer numériquement en longueur d'onde le **masque** jusqu'à ce que les trous coïncident exactement avec les raies du **spectre**. A chaque nouvelle position en vitesse du masque, l'ordinateur calcule la lumière de l'étoile passant par

tous les trous. Quand ils seront exactement en face des raies de l'étoile, la lumière traversant le masque sera minimale.

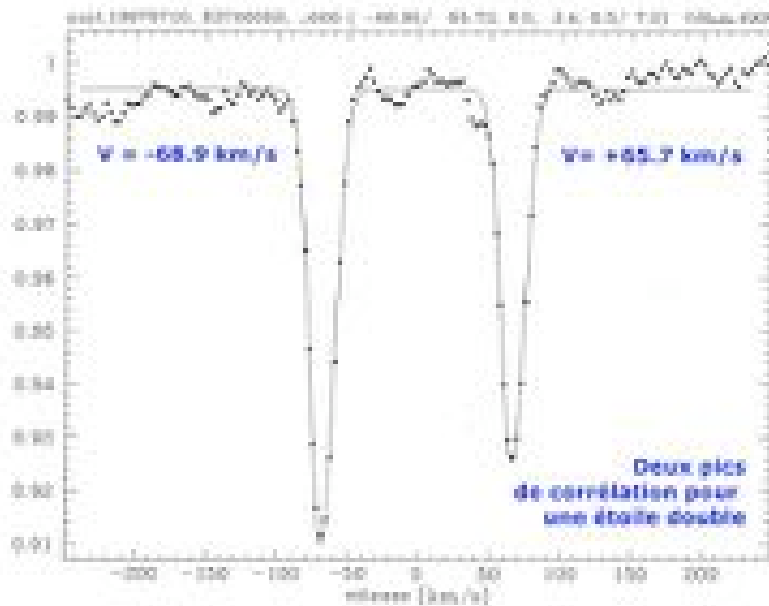
On construit ainsi ce qu'on appelle la **fonction de corrélation**.



Comme le déplacement systématique du masque par rapport au spectre revient à balayer les raies de l'étoile avec un peigne fin, la fonction de corrélation représente donc le **profil typique d'une raie d'absorption** dans le spectre de l'étoile.

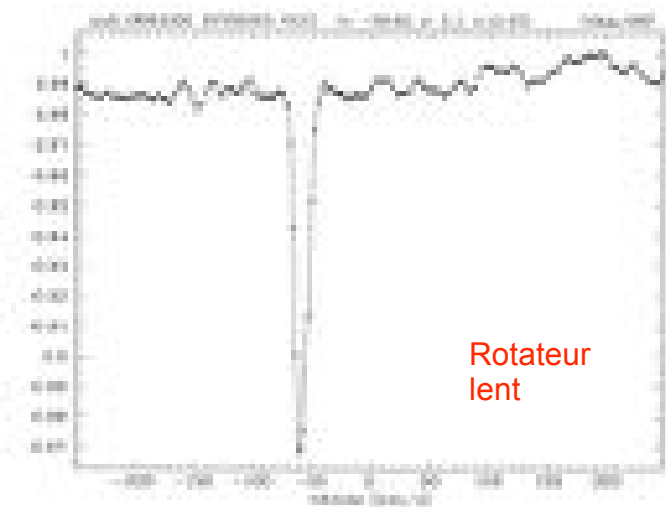
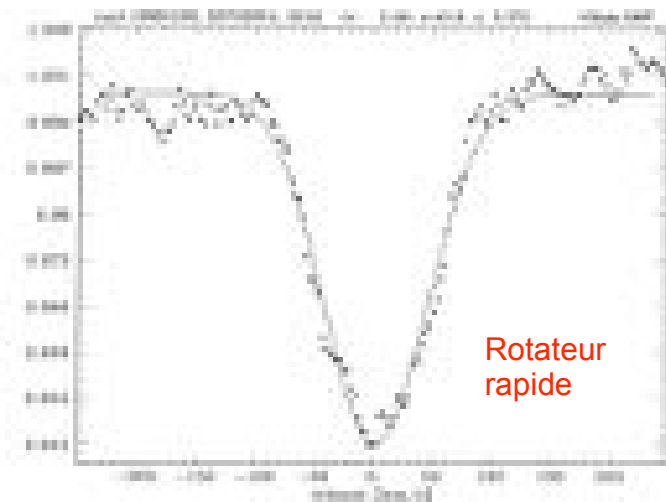
A quoi sert la fonction de corrélation ?

- Elle donne d'abord la vitesse radiale de l'étoile (le **centre** du pic). Si l'étoile est double, un deuxième pic apparaît (comme ci-dessous). Si les deux étoiles sont réellement associées, elles tournent l'une autour de l'autre et les vitesses vont varier périodiquement.



- Elle peut donner aussi des indications sur l'abondance de certains éléments chimiques (la **surface** du pic).
- Elle donne aussi une mesure de la vitesse de rotation de l'étoile autour d'elle-même (la **largeur**

du pic). Voici deux extrêmes : une étoile qui tourne sur elle-même rapidement (en haut) et une qui tourne lentement (en bas).



Les vitesses en Astronomie

On exprime les vitesses des astres couramment en kilomètres par seconde (km/s).

La vitesse de la lumière (limite absolue de vitesse imposée par la théorie de la Relativité) est $c = 299793$ km/s.

1 km/s équivaut à 3600 km/h

Voici quelques vitesses astronomiques typiques :

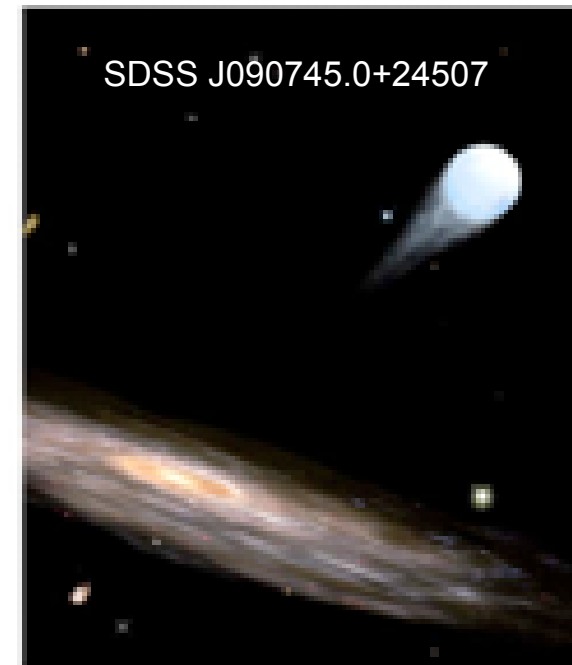
- La Lune sur son orbite = 1 km/s
- La Terre sur son orbite = 29.8 km/s
- Le Soleil par rapport aux étoiles proches = 20 km/s
- Rotation de la Galaxie (près du soleil) = 215 km/s

Dans la recherche de planètes autour d'autres étoiles que le Soleil, la précision des vitesses que l'on mesure avec SOPHIE est de l'ordre de quelques **mètres par seconde**. (1 m/s équivaut à 3.6 km/h soit la vitesse d'un bon marcheur).

L'étoile la plus "véloce" connue

L'étoile SDSS J090745.0+24507, dont la vitesse radiale est de **+853 km/s**, est l'étoile la plus "véloce" connue dans notre Galaxie, et dépasse de loin celle de G233-27 (−583 km/s)

Cette étoile a été découverte en 2005 lors d'une étude systématique du ciel (Sloan Sky Survey) et sa vitesse par rapport au centre de notre Galaxie (+709 km/s) implique qu'elle va la quitter tôt ou tard.



Les Spectrographes

ELODIE

Début d'exploitation : 1994

Télescope associé : 1m93 OHP

Résolution spectrale : 42 000

Taille du CCD : 24.5 x 24.5 mm

Nombre de pixels : 1million

Précision en vitesse radiale : 7 m/s



Télescope OHP de 1m93

Ce télescope, construit par Grubb-Parsons (en Angleterre), fut installé en 1958 à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) sur le site de Saint-Michel l'Observatoire, à 650 m d'altitude.

Le spectrographe ELODIE qui a fonctionné entre 1993 et 2006, était installé dans une pièce climatisée au premier étage du bâtiment et relié au foyer Cassegrain par des fibres optiques (25 mètres de long).

Ce télescope est utilisé activement par des astronomes français et étrangers. Une grande partie du temps d'observation a été utilisée pour des études stellaires avec ELODIE.

Environ 1 semaine par mois a été consacrée au programme franco-suisse de recherche d'exoplanètes autour des étoiles de l'hémisphère Nord. Plus de 300 étoiles ont été suivies régulièrement.



Bonnette Cassegrain

Les spectrographes **ELODIE**, **CORALIE**, **HARPS** et **SOPHIE** sont tous fixes, dans des locaux climatisés et stabilisés. Ils ne sont pas installés directement sur les télescopes.

La lumière de l'étoile est captée au plan focal du télescope (foyer Cassegrain pour le 1m93 OHP et 3m60 ESO, foyer Nasmyth pour le 1m20 ESO-Genève) et transportée jusqu'au spectrographe à l'aide de **fibres optiques** à hautes performances (jusqu'à 95% de transmission dans le jaune). La **bonnette** montée sur le télescope comporte les têtes de fibres et les lampes de calibration.

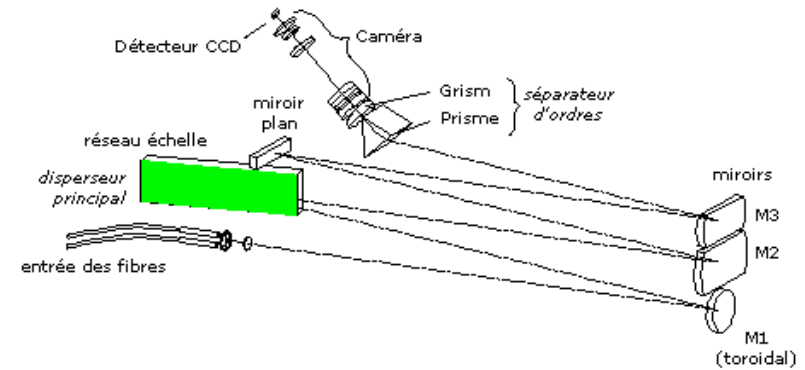
On utilise dans chaque cas **deux fibres**, une pour la lumière de l'étoile et l'autre pour les calibrations (thorium, lampe au tungstène) ou pour le fond du ciel (en cas d'observations en Pleine Lune).

La fibre "ciel" est souvent utilisée pour obtenir une calibration du **Thorium simultané**, ce qui permet une meilleure précision dans la détermination des vitesses radiales.

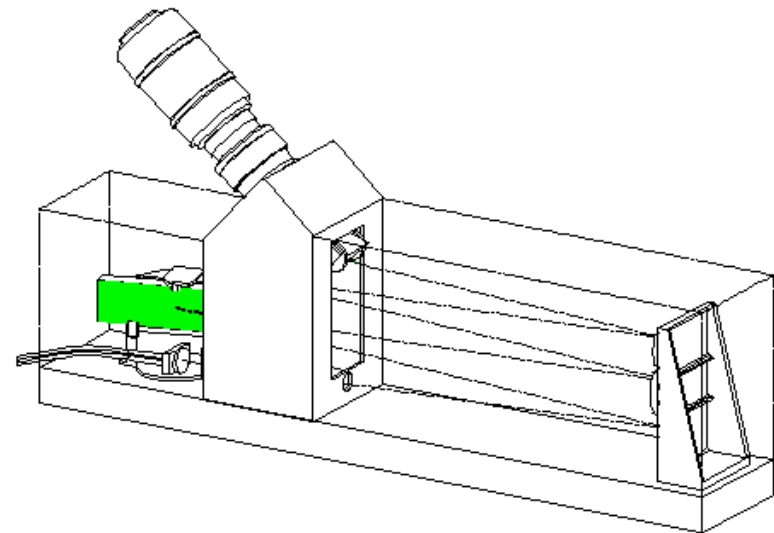
La bonnette comporte également une caméra CCD spéciale permettant le pointage fin sur le ciel et un guidage automatique du télescope. Voici celle du 1m93.



Spectrographe ELODIE



ELODIE : Schema optique



ELODIE : Vue en perspective

Spectres échelle

Pour obtenir une très haute résolution spectrale, essentielle pour des mesures précises de vitesse radiale, il faut augmenter le pouvoir dispersif du spectrographe.

Le concept **échelle** fait appel à un réseau par diffraction travaillant à un angle d'incidence élevé (74°) et optimisé pour être efficace à des ordres élevés (on dit qu'il est blazé).

Les **ordres spectraux** consécutifs sont alors superposés et il faut les séparer à l'aide d'un deuxième élément dispersif, normalement un prisme ou un grism (réseau par transmission).

Dans le cas d'**ELODIE** et **CORALIE**, c'est une combinaison unique et originale de prisme et de grism, due à André Baranne, qui effectue la séparation des ordres, afin de pouvoir les loger sur un récepteur CCD de (petit) format carré. Pour ces deux spectrographes il y a 67 ordres présents sur une même image CCD.



Image CCD du spectre EL CDS de l'étoile Achernar, prise le 22 fév. 2000.

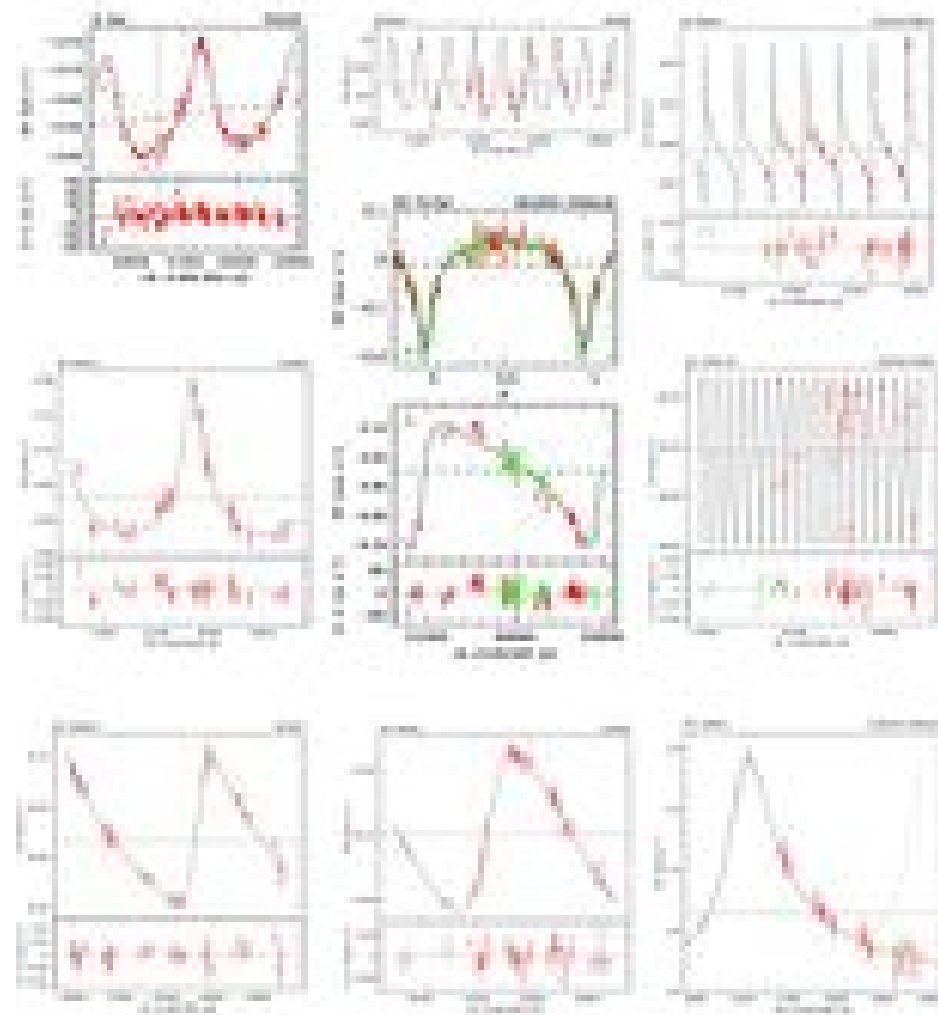
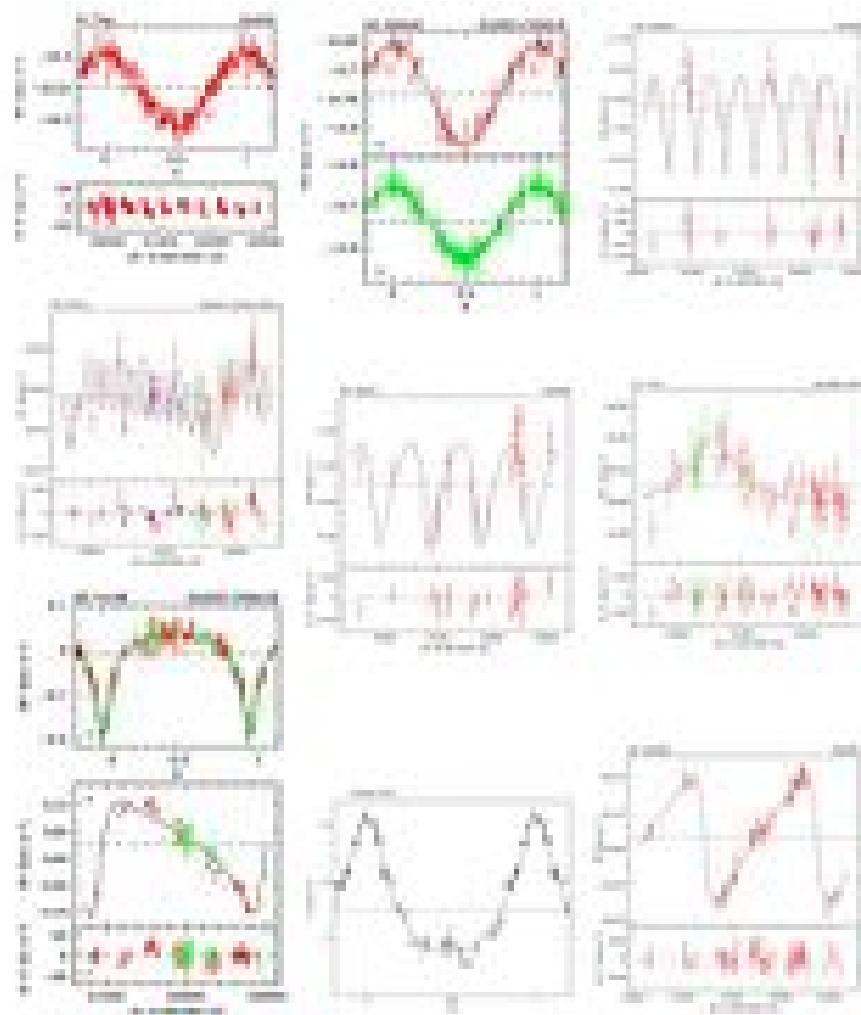
On distingue les 67 ordres. L'image est en fausses couleurs. Le côté rouge du spectre (6915 Å) est en haut et le côté bleu (3835 Å) en bas.



Image CCD du spectre du Thorium. Plus de 3000 raies sont visibles.

Ce type de pose de calibration est indispensable pour atteindre une très bonne précision dans les vitesses radiales.

Courbes de vitesse radiale pour les exoplanètes découvertes à l'OHP avec ELODIE



La base de données ELODIE

Depuis septembre 2003, un serveur informatique existe à l'IAPH contenant l'intégralité des observations obtenues avec ELODIE. Il est accessible par le Web à l'adresse :

<http://www.obspm.fr/iodie/>

On peut interroger ce serveur par le nom de étoile ou par sa position. Actuellement il contient environ 35000 observations dont 90% sont libres d'accès. Les fichiers associés totalisent environ 150 Giga-octets.

Exo-planètes découvertes avec ELODIE

Nom	$M_2 \sin(i)$	P(jours)	e	a (UA)	Type
51 Peg	0.468	4.23077	0.0	0.052	D
HD 187123	0.52	3.0966	0.0	0.042	C
HD 9826	0.68	4.61712	0.02	0.059	C
HD 209458	0.699	3.5246	0.00	0.048	DI
HD 75732	0.91	14.646	0.03	0.115	C
HD 150706	1.00	264.9	0.38	0.82	D
HD 37124	1.01	1942	0.40	3.0	DI
HD 20367	1.12	500	0.23	1.25	D
HD 37124	1.13	154.8	0.31	0.54	C
HD 190360	1.33	3902	0.48	4.8	D
HD 74156	1.86	51.643	0.636	0.294	D
GJ 876	1.89	61.02	0.10	0.21	DI
HD 8574	2.11	227.55	0.288	0.77	D
HD 9826	2.25	238.1	0.185	0.821	C
HD 95128	2.76	1100.8	0.097	2.11	C
HD 75732	2.89	4545	0.24	5.28	C
HD 190228	3.58	1146	0.499	2.02	D
HD 80606	3.90	111.81	0.927	0.469	D
HD 9826	3.95	1319	0.269	2.57	C
HD 145675	4.74	1796.4	0.338	2.80	D
HD 50554	5.16	1293	0.501	2.41	D
HD 74156	6.17	2025	0.583	3.40	D
HD 178911	6.292	71.487	0.1243	0.32	D
HD 117176	6.56	116.689	0.397	0.456	C
HD 106252	7.56	1600	0.471	2.70	D
HD 23596	8.1	1565	0.292	2.88	D
HD 33636	10.58	2828	0.55	4.08	DI
HD 114762	10.96	84.03	0.33	0.3	D

$M_2 \sin(i)$ est une limite inférieure à la masse de la planète

P est la période orbitale en jours

e est l'excentricité de l'orbite (e=0 pour une orbite circulaire)

a est le rayon de l'orbite en unités astronomiques (1 UA = 1.49×10^{11} m)

Type de découverte

D: découverte; DI: découverte indépendante; C: confirmation

SOPHIE

Début d'exploitation : 2006

Télescope associé : 1m93 OHP

Résolution spectrale : 70 000

Taille du CCD : 61.4 x 30.7 mm

Nombre de pixels : 8 millions

Précision en vitesse radiale : 2-3 *m/s*



Télescope OHP de 1m93

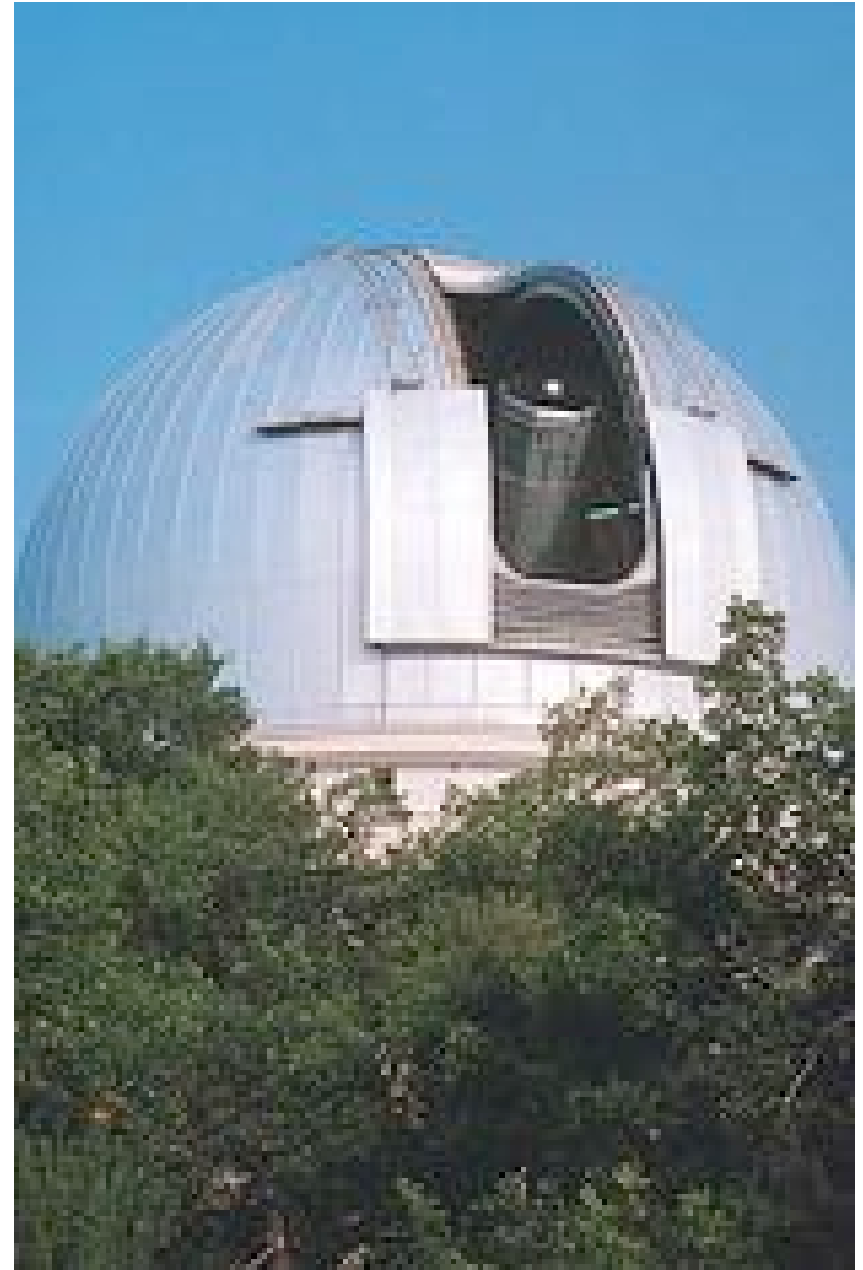
Ce télescope, commandé à Grubb-Parsons (en Angleterre), fut installé en 1958 à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) sur le site de Saint-Michel l'Observatoire, à 650 m d'altitude.

Le spectrographe **SOPHIE** a été installé en Août 2006 dans une enceinte spécialement climatisée au deuxième étage du bâtiment et relié au foyer Cassegrain par des fibres optiques. Son exploitation est prévue pour un minimum de 5 ans.

SOPHIE est nettement plus performant qu'ELODIE. Il a une bien meilleure efficacité ainsi qu'une meilleure précision de détermination des vitesses radiales.

Deux modes sont offerts: haute résolution (70 000) pour les étoiles brillantes et pour les recherches poussées, et moyenne résolution (35 000) pour les étoiles plus faibles (jusqu'à la magnitude 15).

Une grande partie du temps d'observation est utilisée pour des études stellaires avec SOPHIE. Le programme de recherche d'exoplanètes est poursuivi. D'autres programmes (asterosismologie, cinématique, abondances, etc.) sont également en cours.



Spectrographe SOPHIE

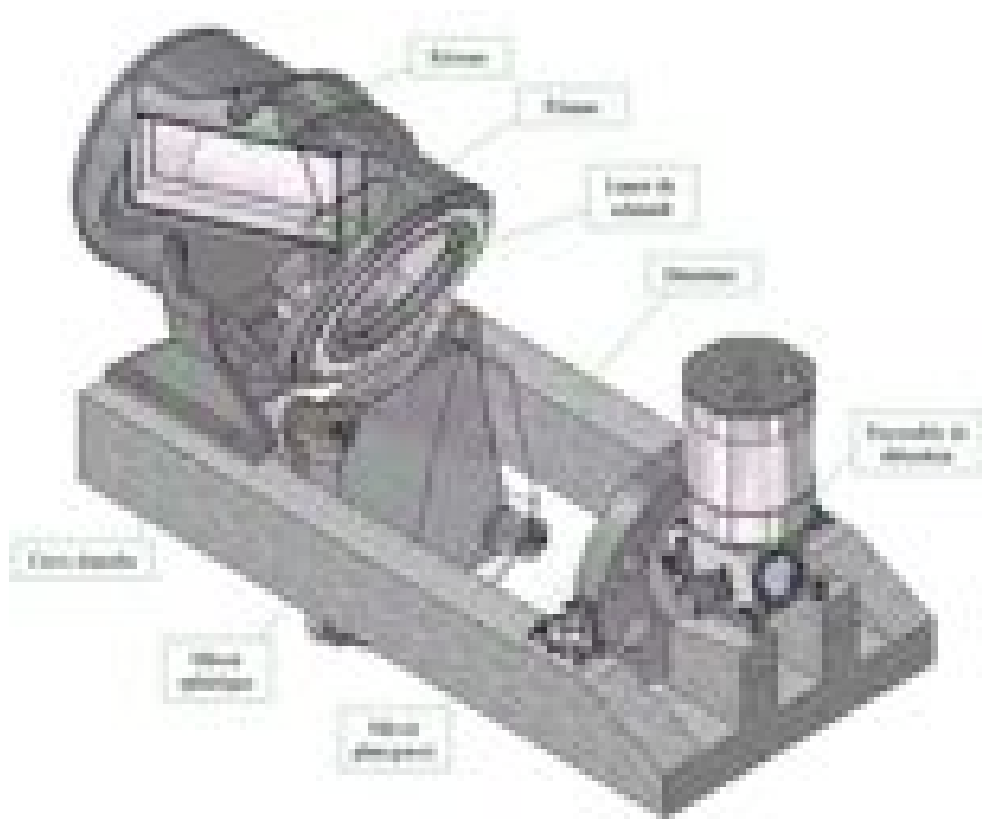
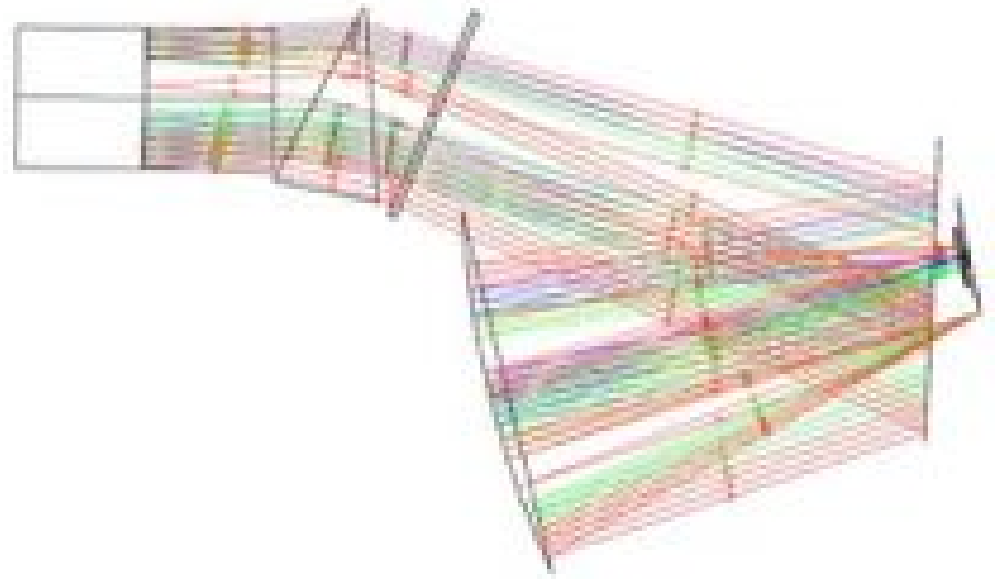


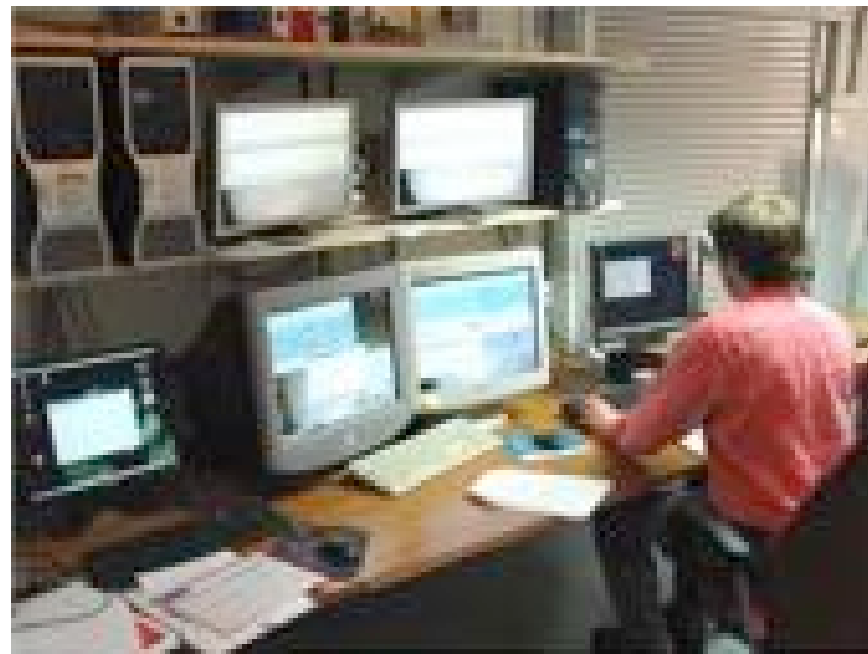
Schéma optique de SOPHIE



SOPHIE dans le caisson



La salle d'observation



CORALIE

Début d'exploitation : 1998

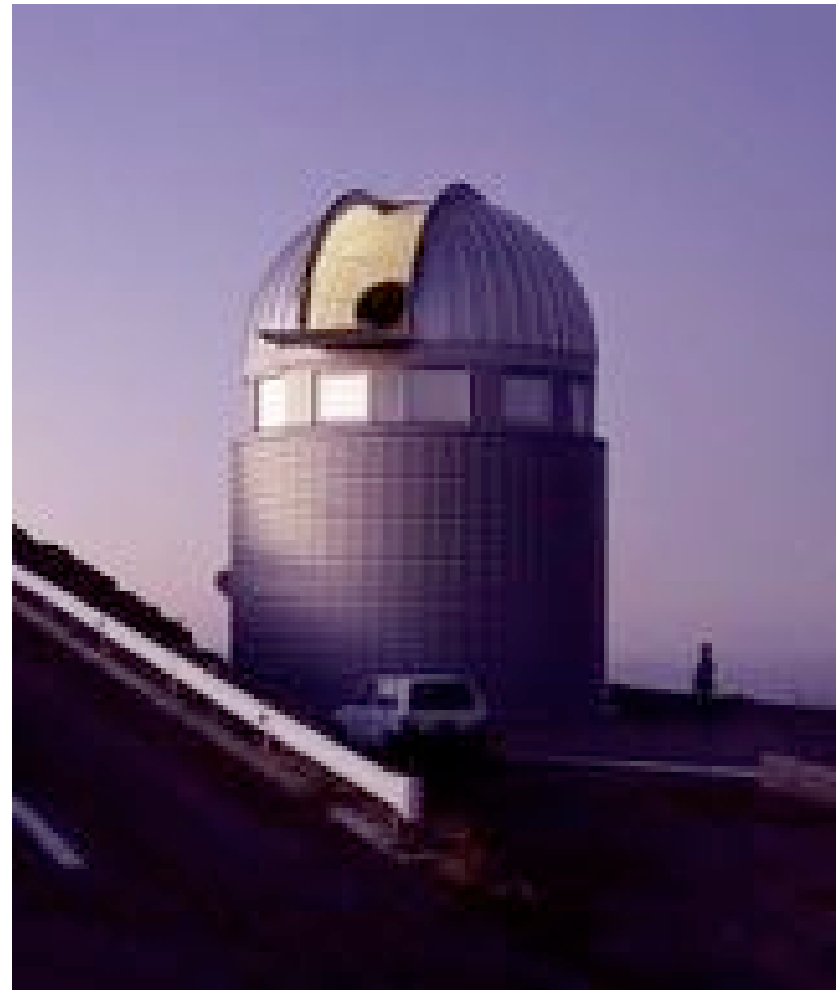
Télescope associé : 1m20 ESO (Chili)

Résolution spectrale : 50 000

Taille du CCD : 30.7x 30.7mm

Nombre de pixels : 4 millions

Précision en vitesse radiale : 2 m/s



Télescope suisse de 1m20

Ce télescope, construit par l'Observatoire de Genève, fut installé en 1998 à l'Observatoire Européen Austral (ESO) au Chili, sur le site de La Silla, à 2400 m d'altitude.

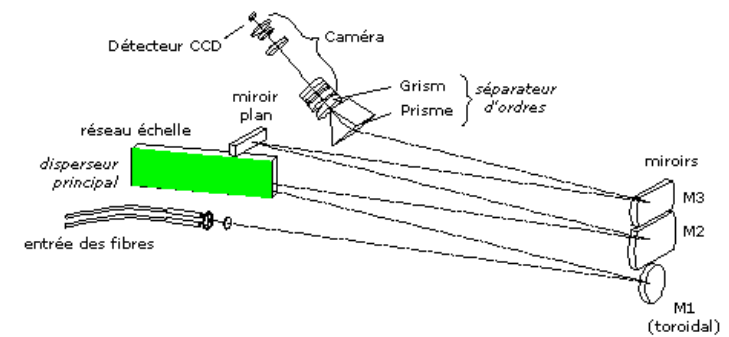
Il est appelé le télescope **Leonard Euler** en l'honneur du célèbre mathématicien suisse (1707-1783).

Le spectrographe CORALIE, qui est une copie améliorée d'ELODIE, est installé dans une pièce climatisée et relié au foyer Nasmyth par des fibres optiques.

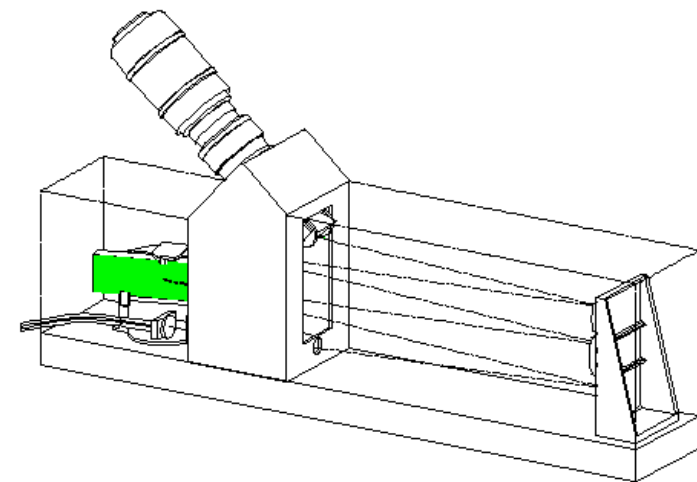
Ce télescope est entièrement dédié aux observations avec CORALIE pour la recherche d'exoplanètes autour des étoiles plus brillantes que la magnitude 10 dans l'hémisphère Sud.



Spectrographe CORALIE



CORALIE : Schema optique



CORALIE : Vue en perspective

HARPS

Début d'exploitation : 2003

Télescope associé : 3m60 ESO (Chili)

Résolution spectrale : 98 000

Taille du CCD : 61.4 x 61.4 mm

Nombre de pixels : 16 millions

Précision en vitesse radiale : < 1 m/s



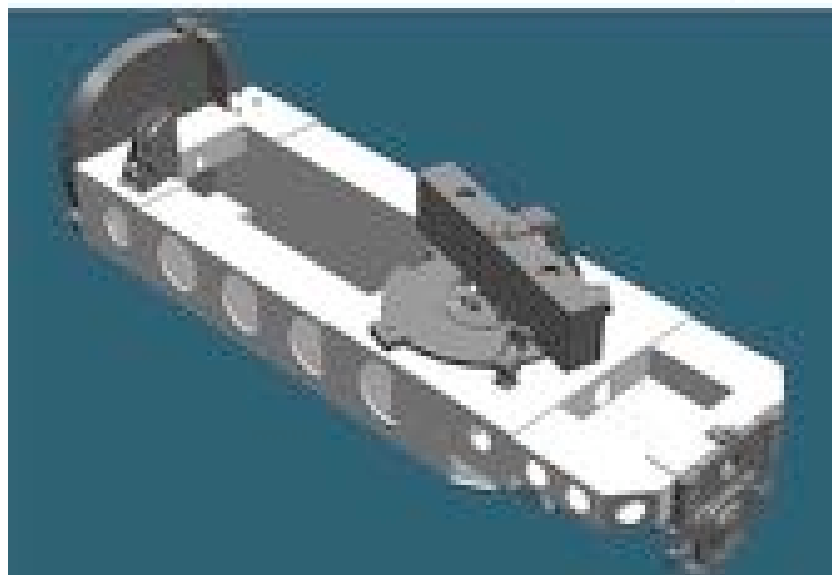
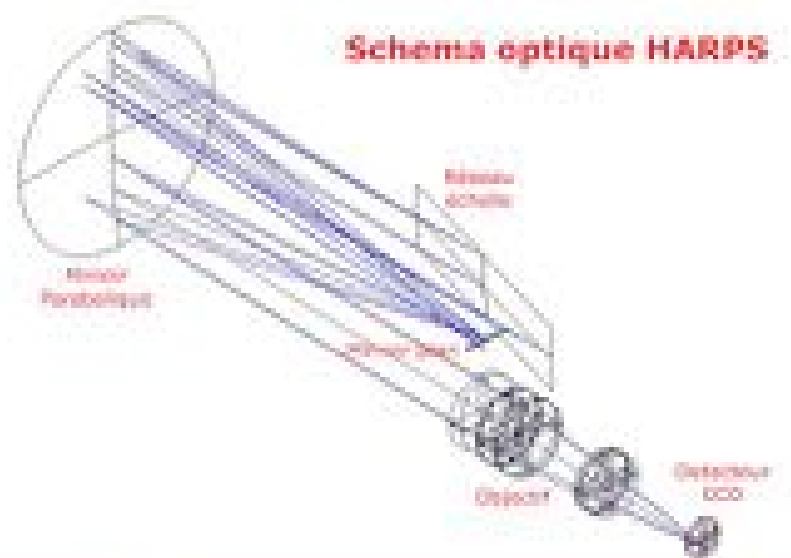
Télescope ESO de 3m60

Ce télescope fut installé en 1976 à l'Observatoire Européen Austral (ESO) au Chili, sur le site de La Silla, à 2400 m d'altitude.

Longtemps le plus grand télescope européen dans l'hémisphère Sud, il est maintenant dépassé en taille par le quartet des VLT de 8.2m installés à partir de 1998 sur le site de Paranal, aussi au Chili, mais plus au Nord de La Silla.

Le spectrographe HARPS, installé dans une pièce climatisée et relié au foyer Coudé par des fibres optiques, est utilisé intensivement sur ce télescope. Le consortium l'ayant construit a reçu 100 nuits/an pendant une période de 5 ans.







Fin du document