

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Détection de planètes extrasolaires par la méthode des vitesses radiales

Alain Sarkissian, OHP

Mes sincères remerciements à François Bouchy qui m'a aidé à finaliser ce TD et à Mayor et Queloz qui ont obtenu ces données et m'ont orienté dans la finalisation de ce TD.

**Résumé :** *51 Peg b est la première exoplanète détectée autour d'une étoile de la séquence principale ou de type solaire. C'est Mayor et Queloz (1995, Nature, 378, 355) qui, à l'aide du spectrographe ELODIE de l'OHP en 1995, ont découvert que 51 Peg montrait des variations périodiques de sa vitesse radiale, indiquant la présence d'un compagnon. À l'aide des propriétés de l'orbite de ce compagnon nous pouvons calculer la masse de la planète (en fait sa masse minimale  $m \sin i$  où  $i$  représente l'angle d'inclinaison de l'orbite sur la ligne de visée) et sa distance à l'étoile centrale.*

*Ce TD consiste à refaire de façon simplifiée l'interprétation des mesures originales qui ont permis la découverte de 51 Peg b.*

### Introduction

Dans un premier temps, on observera le déplacement d'une raie spectrale de 51 Peg à une longueur d'onde connue, sur quelques spectres sélectionnés par nos soins. Ce sont ces mêmes spectres qui ont été utilisés par Mayor et Queloz en 1995. Nous mesurerons le décalage spectral de cette raie. Nous en déterminerons la vitesse radiale de l'étoile à partir de la loi du décalage Doppler-Fizeau. À cette valeur, il faudra soustraire la composante vitesse radiale de la Terre dans son mouvement autour du Soleil (la valeur BERV sur les figures). La composante constante de vitesse radiale propre de l'étoile 51 Peg par rapport à notre Soleil ne sera pas prise en compte dans ce TD pour simplifier les calculs. Le résidu après soustraction du BERV correspond à l'oscillation de 51 Peg due à la présence de la planète 51 Peg b.

### Mesure du décalage Doppler

Décalage Doppler :  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta V}{c}$  où  $\lambda$  est la longueur

d'onde,  $V$  la vitesse radiale et  $c$  la vitesse de la lumière, soit  $299\,792\,458\text{ m/s}$ .

Attention au signe : un objet qui s'éloigne induit un décalage vers le rouge. Lorsqu'on obtient des spectres sur le télescope de  $193\text{ cm}$  de diamètre à l'aide du spectrographe ELODIE, ils sont étalonnés en longueur d'onde : la longueur d'onde donnée avec les spectres est

très précise, mais pas l'intensité car on ne connaît pas la transparence de l'atmosphère terrestre au moment de l'observation. Le décalage Doppler de ces spectres peut donc être obtenu en comparant la longueur d'onde d'une raie spectrale connue avec sa position sur le spectre de l'étoile. Cela nous donne  $\Delta\lambda$  et on en déduit  $\Delta V$ .

### Propriétés pour les spectres de 51 Peg

Vitesse Radiale de l'étoile par rapport au Soleil –  $33,250\text{ km/s}$ . Nous n'en tiendrons pas compte dans ce TD pour simplifier.

La valeur BERV indiquée sur les figures correspond au "Barycentric Earth Radial Velocity" en anglais. C'est la vitesse radiale due à la rotation de la Terre autour de son axe et autour du Soleil, projetée dans la direction de 51 Peg. La date du spectre est également indiquée sur les figures : F199511010018 correspond à AAAA/MM/JJ/PPPP avec année/mois/jour/num\_pose. Le maximum de vitesse radiale est observé à  $T_{\text{max\_VR}} = 22,266$  en Jour Julien 2450000 modifié. Le JD modifié du 01/11/1995 à 0h est le 22. Amplitude de l'oscillation :  $65\text{ m/s}$ ; période de l'orbite de 51 Peg b :  $4,233\text{ jours}$ . Le JD des spectres est indiqué dans le tableau ci-dessous. Longueur d'onde de référence pour la raie spectrale présentée sur les figures ci-dessous :  $6041,42717\text{ \AA}$  ( $1\text{ \AA} = 0,1\text{ nm} = 10^{-10}\text{ m}$ ).

## TD

**Étape 1 :** Faire le schéma d'un système planète+étoile orbitant autour d'un centre de gravité commun.

**Étape 2 :** Reproduire sur un graphique les variations de vitesse de l'étoile que l'on observerait depuis un point éloigné du système, et situé dans le plan de l'orbite en respectant les signes. Noter les différences de phases entre l'oscillation de la planète et celle de l'étoile. Faire correspondre les positions principales du schéma précédent (étoile au plus proche de la Terre, étoile au plus éloigné de la Terre, etc...) sur le graphique.

**Étape 3 :** Observer les figures 3 à 16 ci-dessous. À quel décalage spectral correspond une vitesse radiale de 20 m/s ? Une telle résolution est-elle mesurable sur les figures ?

**Étape 4 :** Rechercher sur les figures la position du milieu des raies spectrales par les méthodes :

1. de la position du maximum d'intensité sur les points de mesure, sans tenir compte de la gaussienne ;
2. de la position du milieu de la mi-hauteur : chercher la mi-hauteur de la raie, chercher les positions des longueurs d'onde aux deux points de ces mi-hauteurs et prendre le milieu ;
3. de l'ajustement de la raie spectrale par une gaussienne (résultats sur la figure).

**Étape 5 :** Utiliser le dernier cas (Étape 4, méthode 3) pour construire une table avec le modèle ci-dessous comprenant pour chacun des graphiques :  $\lambda$  mesuré, BERV, et la vitesse résiduelle. Pourquoi a-t-on besoin de BERV ?

**Étape 6 :** Calculer la vitesse radiale théorique en fonction du temps en utilisant les paramètres donnés plus haut ( $T_{\max\_VR}$ , Période, Amplitude) pour 51 Peg. Notez que Mayor et Queloz utilisent tout le spectre ce qui revient à moyenner plus de 2000 raies spectrales.

### Star : 51 Peg

From the [Extrasolar Planets Encyclopaedia](http://www.obspm.fr/planets) : <http://www.obspm.fr/planets>

---

#### THE STAR

---

- **Basic data :**

<b>Name</b>	51 Peg
<b>Distance</b>	14.7 pc
<b>Spectral Type</b>	G2 IV
<b>Apparent Magnitude</b>	V = 5.49
<b>Right Asc. Coord.</b>	22 57 27
<b>Decl. Coord.</b>	+20 46 07

- **More data :**

- [Basic data](#) (from [Simbad](#))
- [Most recent ref](#) (from [ADS](#))

---

#### PLANET

---

- **Basic data :**

<b>Name</b>	<a href="#">51 Peg b</a>
<b>Mass</b>	0.468 ( $\pm$ 0.007) $M_J$
<b>Semi major axis</b>	0.052 AU
<b>Orbital period</b>	4.23077 ( $\pm$ 5e-05) days
<b>Eccentricity</b>	0
<b>Omega</b>	0 deg.
<b><math>T_{\max VR}</math></b>	2497 ( $\pm$ 0.022) JD 2.450.000

Table 1

Spectre	JDM2450000	BERV (km/s)	$\lambda$ (Å)	$\Delta\lambda$ (Å)	$\Delta V$ (m/s)	Résidu (m/s)
F199511010008	22.7874223	-19.3104				
F199511010017	22.9214733	-19.6085				
F199511010018	22.9339507	-19.6325				
F199511020010	23.8023028	-19.6788				
F199511020019	23.9206618	-19.94				
F199511030006	24.7502482	-19.8928				
F199511030013	24.9437682	-20.3098				
F199511040008	25.7817282	-20.2844				
F199511040019	25.9330946	-20.6119				
F199511050017	26.8920519	-20.8481				
F199511050020	26.9355134	-20.9317				
F199511060007	27.783198	-20.9172				
F199511060011	27.8365655	-21.0384				

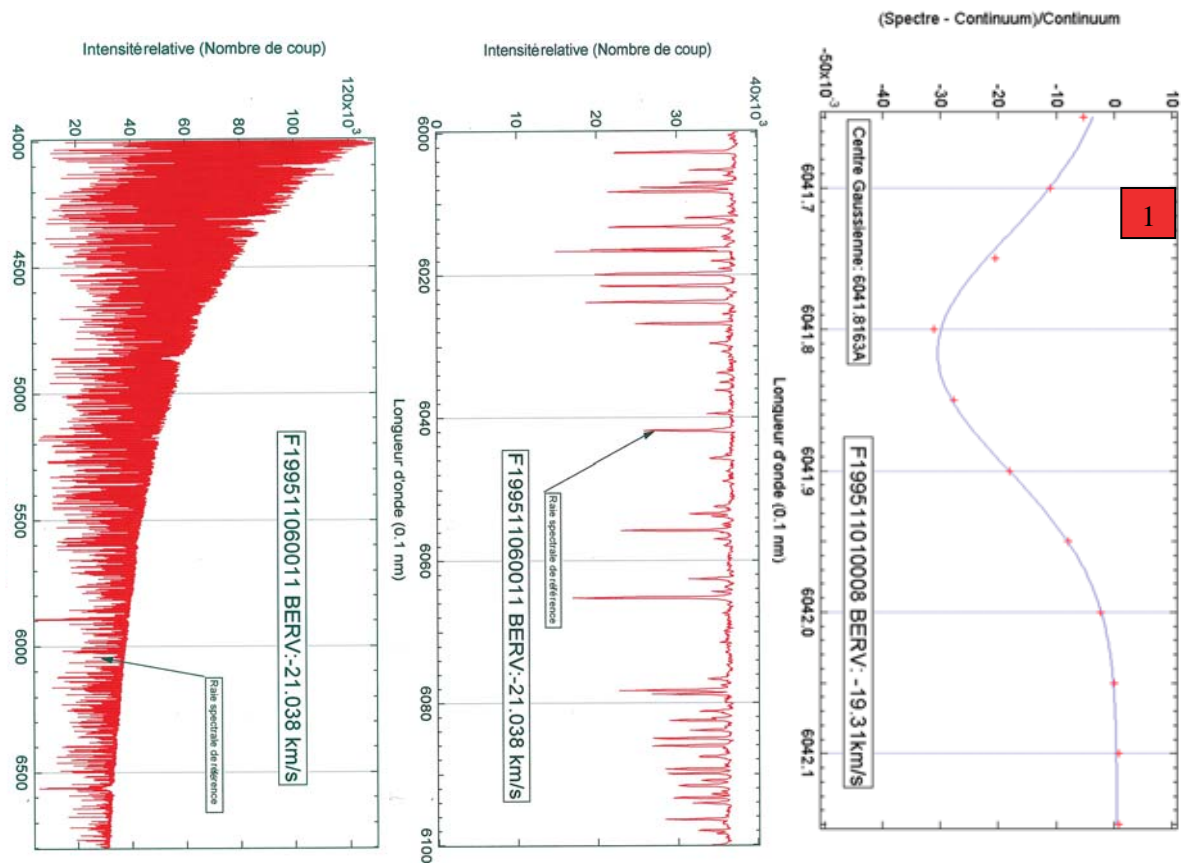


Fig 1 (à gauche) :

Tout le spectre de 51 Peg obtenu par ELODIE le 6 Novembre 1995.

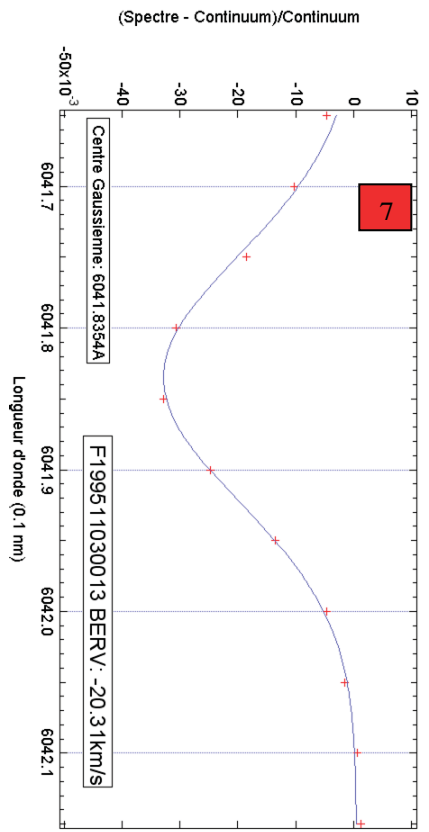
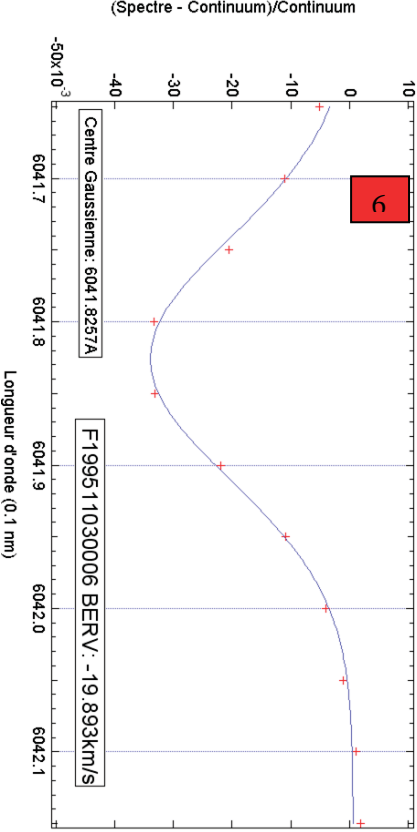
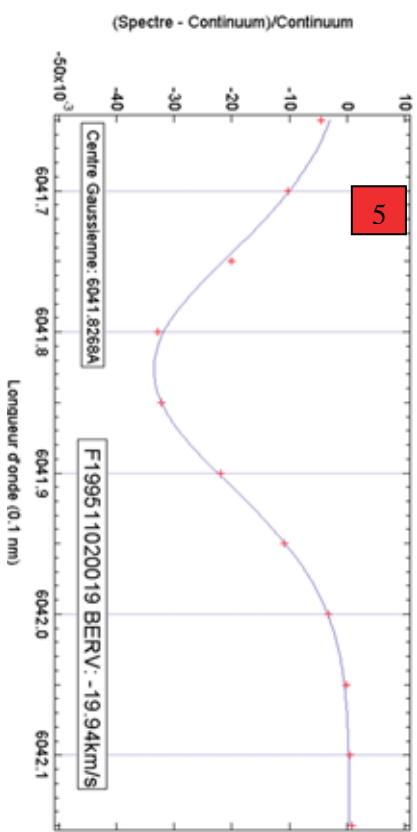
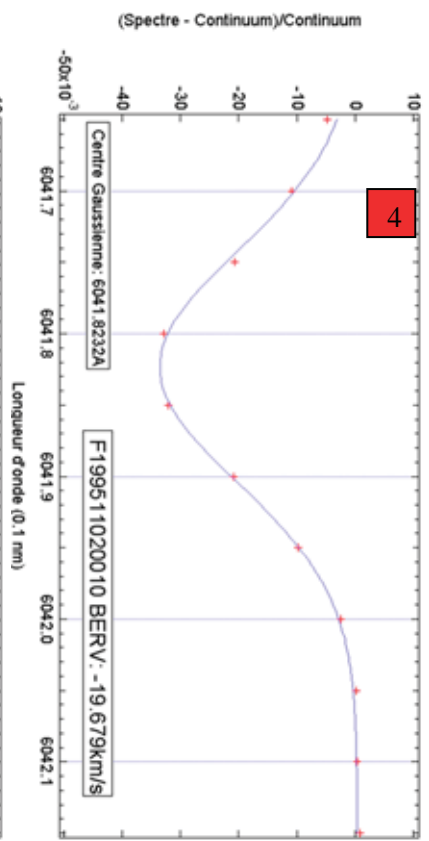
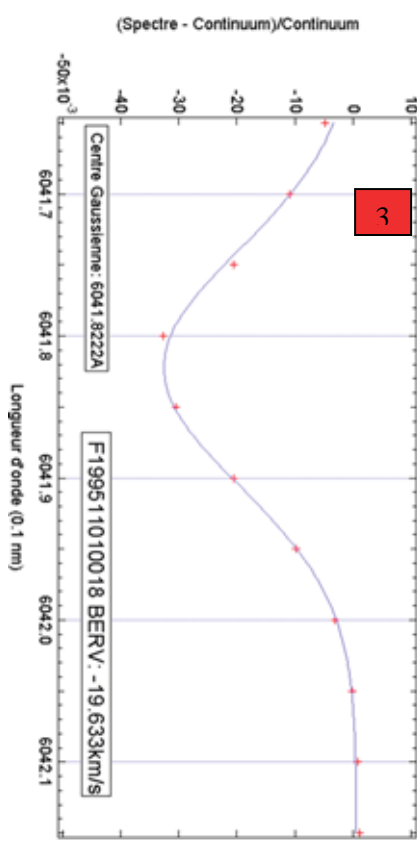
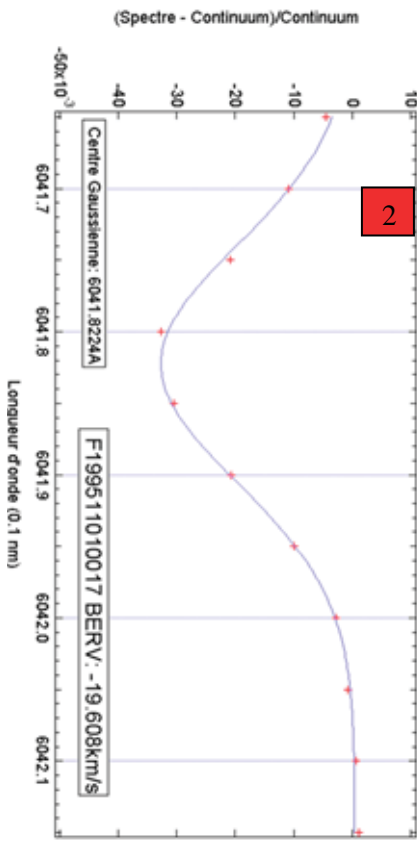
Fig 2 (au milieu) :

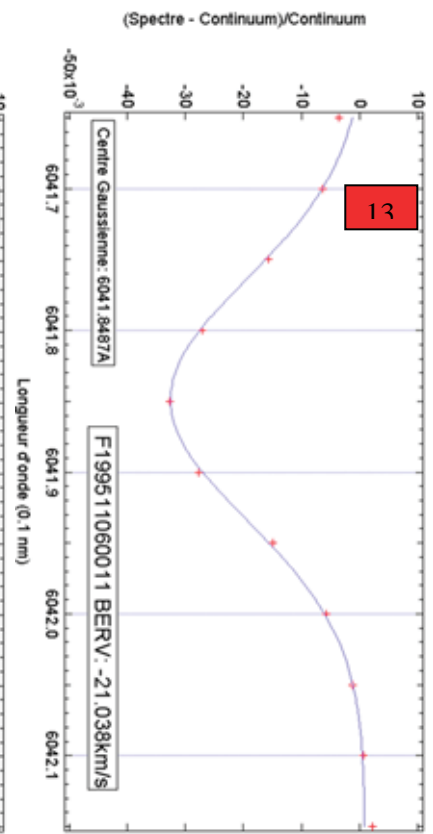
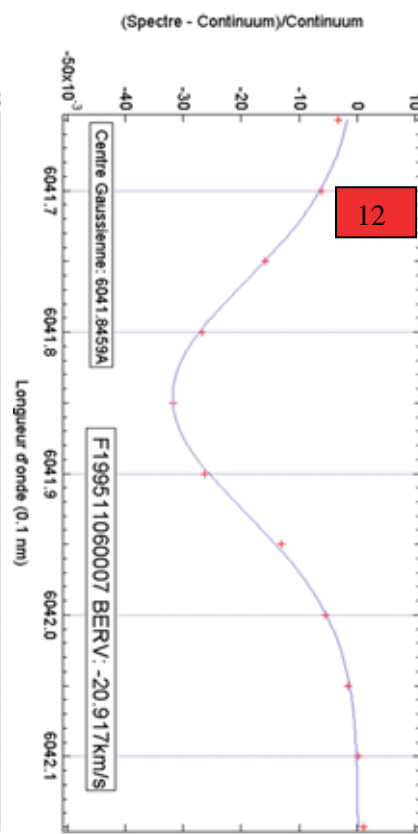
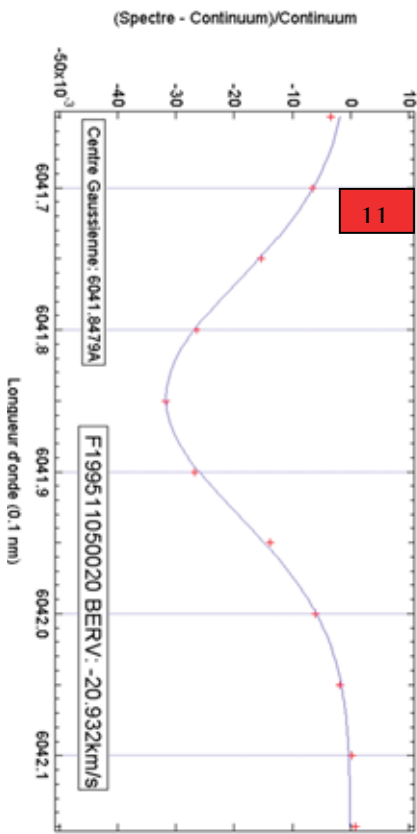
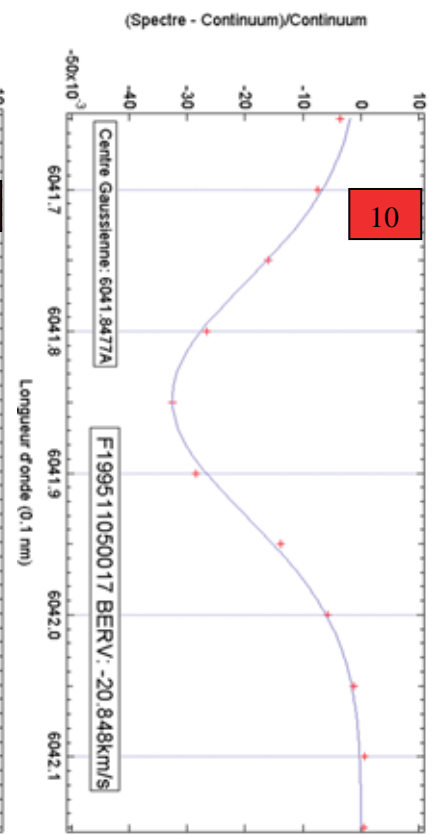
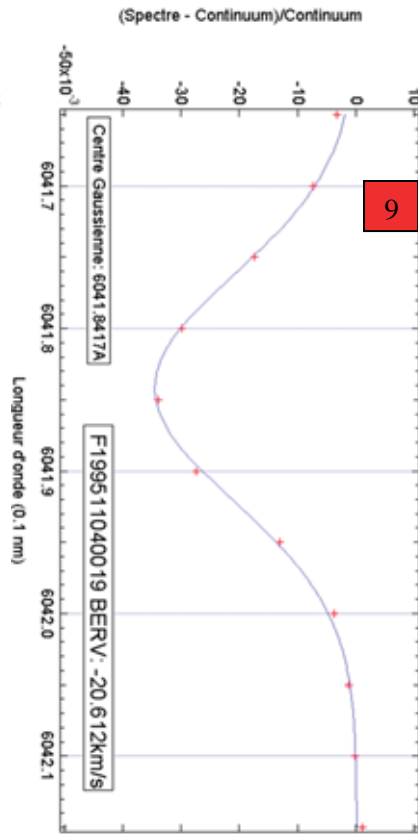
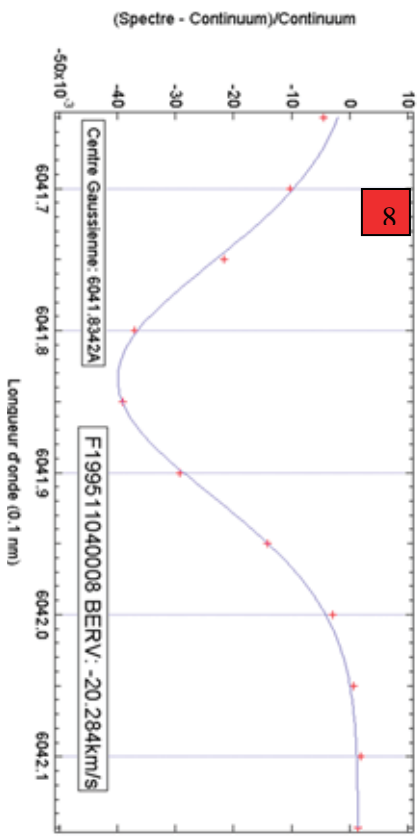
Zoom sur la raie spectrale de référence.

Fig 3 à 16 (à droite et ci-dessous, pour différentes dates - *Respectez bien les numéros d'ordre en rouge.*) :

Zoom à très haute résolution sur la raie spectrale de référence. Les croix rouges correspondent aux points mesurés par ELODIE. L'ajustement est la courbe en bleu.

Le corrigé de cet exercice sera publié dans le prochain Cahier Clairaut (CC118). Que voulez-vous, il faut bien tenir le lecteur en haleine... Non la vraie raison est que nous manquons de place pour publier un corrigé détaillé.





# HISTOIRE

Nous publions ci-dessous un document inédit : la demande, par M. Mayor, D. Queloz et A. Duquennoy, de temps de télescope pour la recherche de "compagnons substellaires". Le temps de télescope a été accordé et la première exoplanète a été découverte autour de l'étoile 51Peg. Notez la mention d'un des rapporteurs anonymes de la demande : "*Excellent et urgent*". Dans la demande les auteurs mentionnent que le temps d'observation accordé en septembre et novembre 1993, sur le même spectrographe ELODIE, a été consacré uniquement à la mise au point de l'appareil. En science il y a beaucoup de travail et "la chance ne sourit qu'aux esprits éclairés". Lisez ce document, désormais historique.

GP



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
OBSERVATOIRE DE HAUTE-PROVENCE  
04870 SAINT MICHEL L'OBSERVATOIRE  
Tel. (33) 92 70 64 00 - Téléc 410 690 F - Télécopie (33) 92 76 62 95



000031

*1.25*  
*Excellent et urgent*

## DEMANDE DE TEMPS DE TELESCOPE

Février à Juillet 1993 / Août 1994 à Janvier 1995

Titre du programme: Recherche de compagnons substellaires en orbite autour des étoiles du voisinage solaire.

Résumé du programme:

Des mesures répétées de vitesses radiales d'un échantillon significatif de naines G et K proches, permettront la détection et la mesure des orbites de compagnons substellaires ( $M_2 < 0.08 M_\odot$ ). Ces mesures devraient fournir une première estimation de la distribution du rapport des masses  $f (M_2/M_1)$  pour  $M_2/M_1 \lesssim 0.1$  et peut-être la découverte de planètes extra solaires.

Temps d'observation demandé

Télescope	Foyer	Nuits	Instruments	Phases de la Lune
193cm	Cass.	15	Elodie	Nouvelle Lune Quartier
Pas de contraintes				

Dates préférentielles : 1: 5 nuits en septembre + 5 nuits en novembre + 5 nuits en janvier  
2: 8 nuits en septembre + 7 nuits en novembre

Périodes acceptables :

Période inacceptable par suite d'autres engagements : Août (IAU et mission à La Silla)

Chercheur principal:

M. MAYOR  
Observatoire de Genève  
Nom : 51, ch. des Maillettes  
Institut, adresse : CH-1290 SAUVERNY

Collaborateurs  
(nom-institut):

D. QUELOZ  
A. DUQUENNOY  
Observatoire de Genève

N° de téléphone: 0041--22--755 26 11  
N° de télex : 0041--22--755 39 83  
Adresse électronique : mayor@scsun.unige.ch

Formulaire à renvoyer avant le 1er Mars ou le 1er Septembre à:

INSU/CFGT  
BP 287-16  
75766 PARIS cedex 16

## PRESENTATION SCIENTIFIQUE DU PROGRAMME

Nom du chercheur principal: M. MAYOR  
Titre du programme: Recherche de compagnons substellaires en orbite  
autour des étoiles du voisinage solaire.  
I.- INTERET SCIENTIFIQUE:

A Il n'existe à ce jour aucune preuve directe de systèmes binaires tels que le compagnon ait une masse substellaire ( $M_2 < 0.08 M_\odot$ ). En annexe 1 la relation actuelle masse-luminosité-âge (T. Henry, D. Mc Carthy, 1993) illustre ce fait. Par contre, l'étude des vitesses radiales a permis de détecter plusieurs systèmes tels que  $M_2 \sin i < 0.08 M_\odot$ . L'exemple le plus extrême est HD 114762 (D. Latham et al., 1989, Nature 339, 38) où  $M_2 \sin i \approx 11 \times$  la masse de Jupiter. Une analyse statistique de ces détections, pour s'affranchir de l'effet d'orientation ( $\sin i$ ) montre que de tels systèmes avec des compagnons substellaires ( $M_2 < 0.08 M_\odot$ ) doivent exister (Mayor et al., 1992).

Le gain attendu en précision d'ELODIE (12 m/s), comparée à celle de CORAVEL (200-300 m/s) est d'un facteur 20. Ce gain important permettra des progrès significatifs dans notre connaissance de la distribution du rapport des masses  $f (M_2/M_1)$  pour  $M_2/M_1 < 0.1$ . Le domaine des masses telles que  $M_2 < 0.1 M_\odot$  est particulièrement intéressant, ce domaine comprend l'éventuelle masse limite inférieure de fragmentation  $M_2 \sim 0.01 M_\odot$  (Boss, 1988, Comments Astrophys. 12, 169), ce domaine comprend aussi celui des naines brunes ( $M_2 < 0.08 M_\odot$ ) et celui de la masse limite supérieure des planètes géantes (quelques Jupiters ??). Le diagramme (excentricité - masse), reflet des mécanismes de formation semble permettre une distinction entre planètes géantes et naines brunes peu massives (voir figure en annexe 2 extraite de Duquennoy & Mayor, 1991, A&A 248, 485).

La détermination de la fonction  $f (M_2/M_1)$  pour  $M_2/M_1 < 0.1$  ne peut se faire que si l'on connaît la forme de la fonction aussi pour les grandes valeurs de  $M_2/M_1$ . Les distributions du rapport de masse des naines G et K pour  $M_2/M_1 > 0.1$  ont été déterminées à l'aide du CORAVEL OHP et sont donc connues.

B Des progrès significatifs dans ce domaine ne pourront se faire que si la taille de l'échantillon stellaire est suffisante pour permettre l'élimination statistique de l'effet d'orientation. Les travaux de pionnier de Campbell, 1988, ApJ 331, 902, sur un échantillon trop limité de 16 naines proches n'ont apporté aucune réponse aux questions évoquées ci-dessus. Un échantillon d'environ 200 étoiles (G V, K V) semble le minimum requis pour apporter une réponse. La base de temps du suivi des observations est aussi importante, 3 ans semblent un minimum (5 ans serait meilleur!).

Pour illustrer le gain attendu en passant de CORAVEL à ELODIE nous donnons en annexe 2 le diagramme de la variation de vitesse de HD 114 762 ( $M_2 \sin i \approx 11$  Jupiters) où l'on voit les observations faites par CORAVEL et CFA et celles faites à haute précision ultérieurement par Cochran.

Cet effort observationnel important s'inscrit dans le cadre de la recherche des planètes extrasolaires, domaine en plein essor (voir pour une vue générale du domaine: "TOPS: towards other Planetary Systems" a report by the Solar System Exploration Division (NASA 1992)).

Par ailleurs, la distribution  $f (M_2/M_1)$  est une contrainte importante sur les mécanismes de formation stellaire (de même que la corrélation  $(e, \log M_2/M_1)$ ).

En ce sens ce travail s'inscrit dans la suite de notre effort pour fournir des distributions orbitales d'échantillons non-biaisés (voir Duquennoy, Mayor, 1991, A&A 248, 485, pour les distributions des naines G; les distributions de naines K sont en cours d'analyse, Duquennoy, Halbwachs, Mayor, 1994, en préparation).

II.- ARGUMENTATION : objectif immédiat du programme. Indiquer ce qui doit être réellement observé et ce qui doit ressortir des observations, afin de démontrer que le programme est réalisable.

La précision attendue en vitesse pour ELODIE est de l'ordre de 12 m/s soit environ 20 fois plus précise que celle de CORAVEL. L'objectif est de détecter les compagnons substellaires (planètes géantes massives ou naines brunes). 9 mesures de vitesse radiale par étoile (3 mesures/an  $\times$  3 ans) offre une probabilité de détection très élevée pour les compagnons de masse supérieure à 3 Jupiters si la période orbitale est inférieure à 10 ans. La très haute précision requiert un soin extrême dans la réduction des données, le fait que Mr. D. Queloz (ayant développé le software d'analyse) fasse partie du groupe de recherche est un élément important pour la réalisation de ce programme. Une liste de 203 objets observés est donnée en annexe 4, elle comprend:

- un échantillon non biaisé de naines G et K proches
- quelques objets (une vingtaine) détectés comme microvariables par CORAVEL (donc ayant potentiellement un compagnon de très petite masse), ont été inclus afin d'éclaircir la nature de leur variabilité.