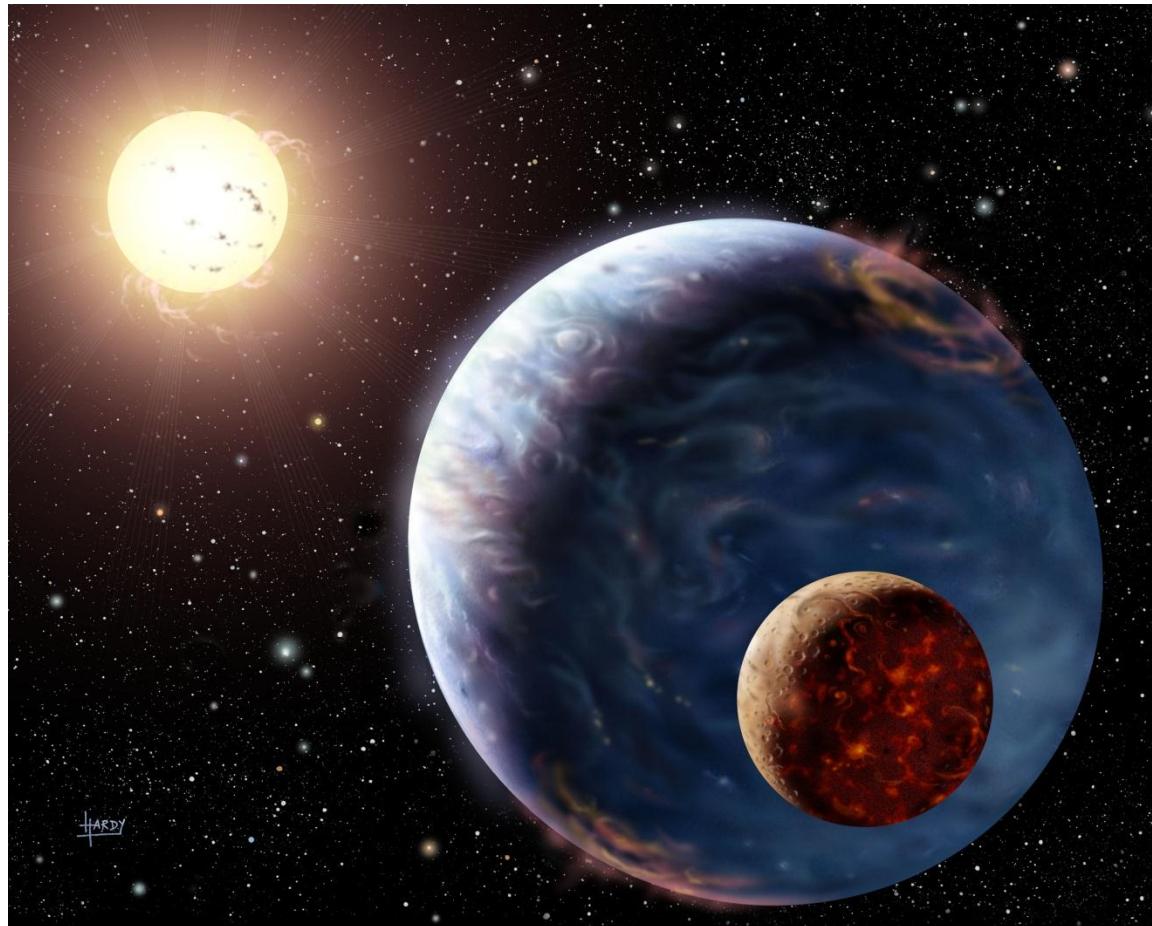
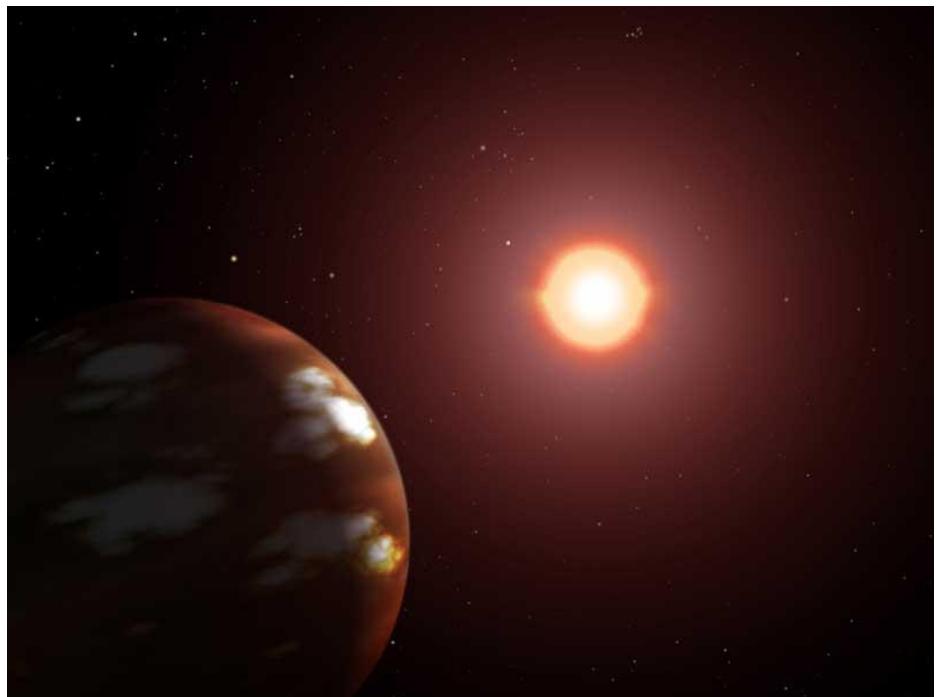


# Détection des exoplanètes avec des télescopes de petites tailles

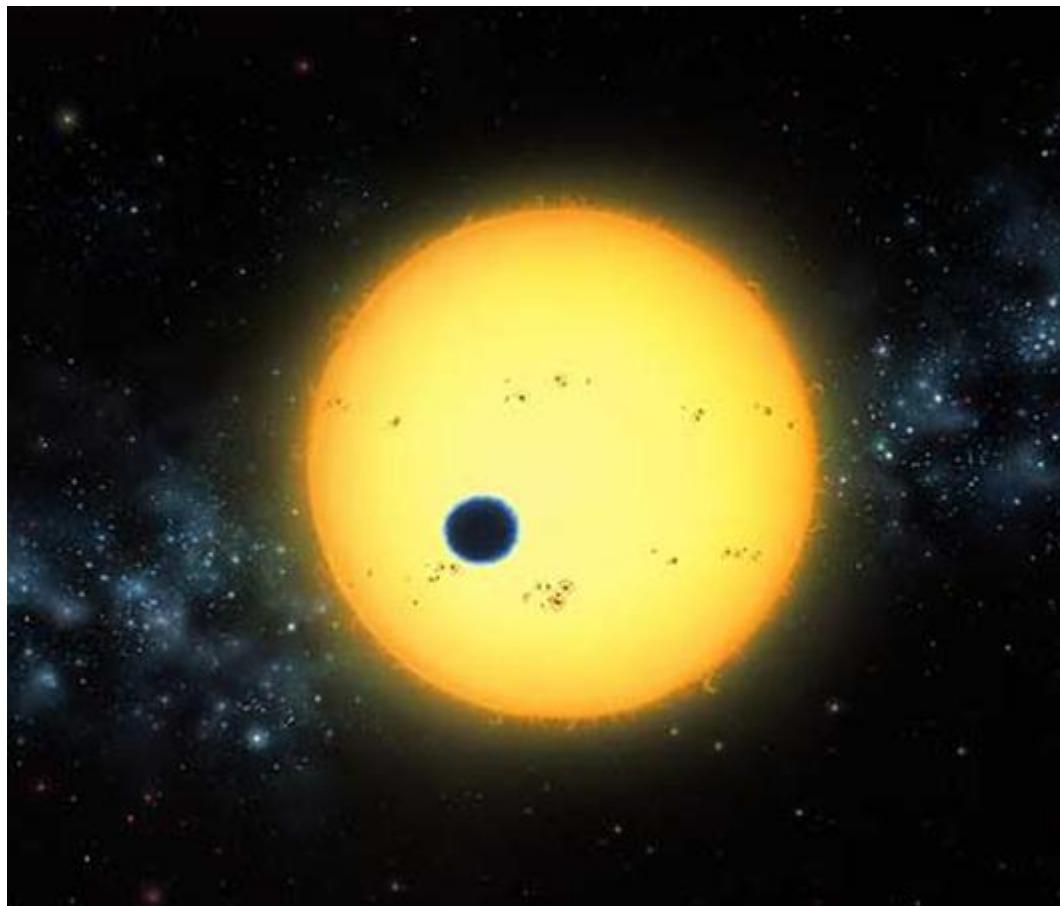


# Deux méthodes de détection accessibles

- Méthode par occultation  
*(détection photométrique)*
- Méthode par vélocimétrie  
*(perturbations dynamiques)*

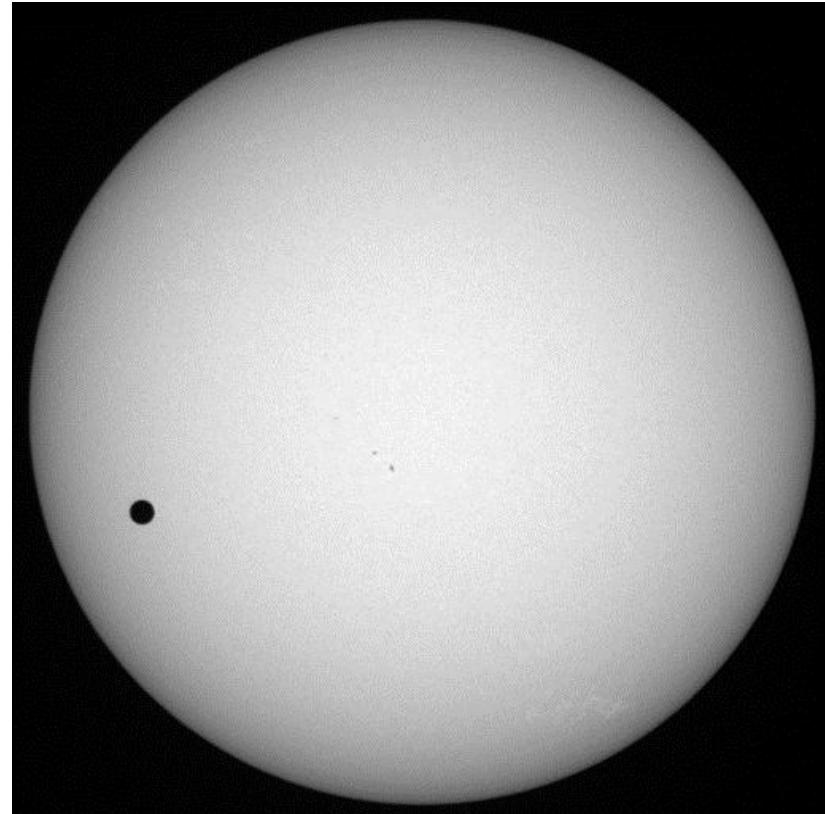
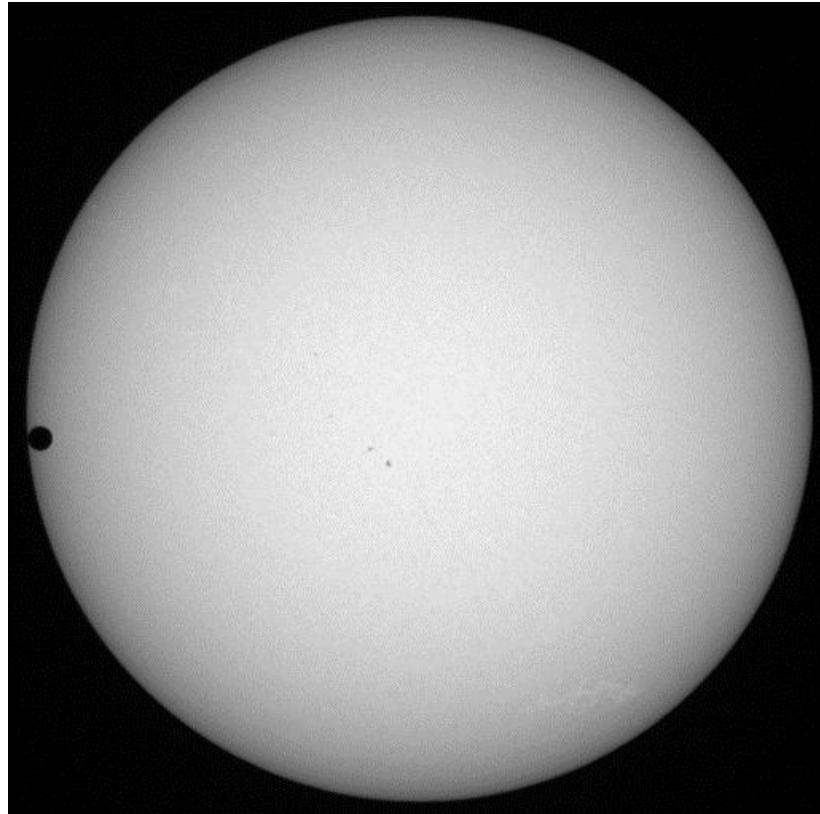


# La détection photométrique



Transit de la planète sur le disque de l'étoile

**Transit de la planète Vénus sur le disque solaire**  
**8 juin 2004 – Tabriz (Iran)**



**Canon 10D + téléobjectif Canon 400 mm f/5.6**

**La détection n'est possible que si la plan de l'orbite est pratiquement confondu avec la direction de visée**



Méthode assez sélective : favorise la découverte de planètes à courte période orbitale  
Elle demande une grande précision photométrique :

- Le passage de Jupiter devant le Soleil provoque une baisse d'éclat de 1%
- Le passage de la Terre devant le Soleil provoque une baisse d'éclat de 0,01%

# Catalogues et éphémérides

**Variable Star and Exoplanet Section**  
of Czech Astronomical Society



B.R.N.O. MEDUZA TRESCA HERO

... complete ... worldwide ... continuously growing ...

## ETD • Exoplanet Transit Database

<http://var.astro.cz/ETD>

**Known transitors:**

- CoRoT-1 b
- CoRoT-10 b
- CoRoT-11 b
- CoRoT-12 b
- CoRoT-13 b
- CoRoT-2 b
- CoRoT-3 b
- CoRoT-4 b
- CoRoT-5 b
- CoRoT-6 b
- CoRoT-7 b
- CoRoT-8 b
- CoRoT-9 b
- GJ1214 b
- GJ436 b
- HAT-P-1 b
- HAT-P-10/WASP-11 b
- HAT-P-11 b
- HAT-P-12 b
- HAT-P-13 b
- HAT-P-14 b
- HAT-P-15 b
- HAT-P-16 b
- HAT-P-17 b
- HAT-P-18 b
- HAT-P-19 b
- HAT-P-2 b
- HAT-P-20 b
- HAT-P-21 b
- HAT-P-22 b
- HAT-P-23 b
- HAT-P-24 b

**ETD - Exoplanet Transit Database**

[Announce us paper with transits](#) | [How to contribute to ETD](#) | [Model-fit your data](#) | [Transit predictions](#) |  
[KEPLER transit predictions](#) | [KEPLER Candidates](#)

ETD is here to supply quickly and easily the **list of all ever observed transits of transiting exoplanets** to observers and researchers.

Our database administrators are periodically checking for new transits - both in literature and in on-line internet sources. Each transit is stored with complete citations, link to the paper / on-line source URL.

For each exoplanet, there is available graphical output of relations:

- transit **TIMINGS vs. EPOCH**
- transit **DURATION vs. EPOCH**
- transit **DEPTH vs. EPOCH** and
- **list of available transits**.

**Data quality is rated** for each observation and the DQ index is taken into account while plotting graphs.

**Tools for observers :**

- Observers can plot their own observations in diagrams.
- Model-fitting of transit observation and finding out parameters HJDmid, Depth, Duration.
- Global transit predictions.

|   | OBJECT                     | CONST | # OF DATA | TIME SPAN FROM - TILL |         | LAST CHANGES (DAYS)<br><small>red if less than week ago</small> |
|---|----------------------------|-------|-----------|-----------------------|---------|---|
| 1 | <a href="#">CoRoT-1 b</a>  | Mon   | 49        | 2007-02               | 2010-02 | 07. May 2010 (186)  |
| 2 | <a href="#">CoRoT-10 b</a> | Aql   | 1         | 2007-06               | 2007-06 | 16. Jun 2010 (146)  |

<http://var2.astro.cz/ETD/>

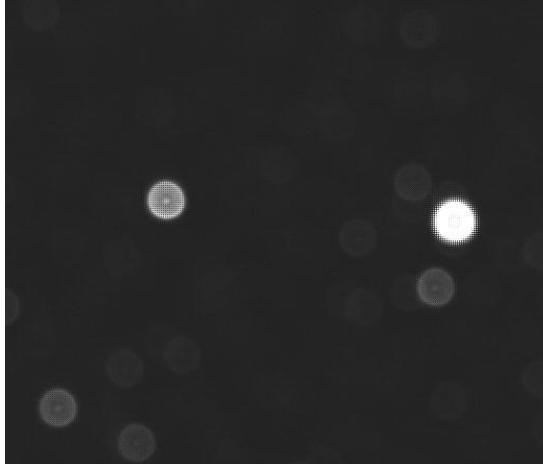
# Outil de prédition des transits

Transits predictions for NEXT 365 days.  
ELONGITUDE: 2° and LATITUDE: 43°

Transit occurs below 20° in the sky. | During the daylight. | Observable.

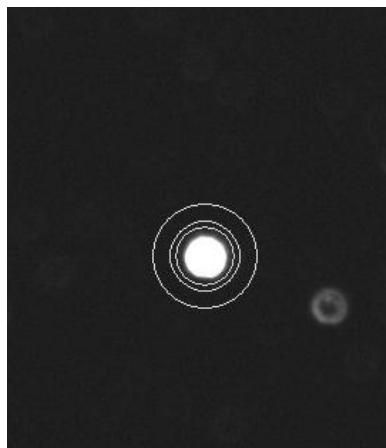
| Tmid (HJD)         | BEGIN (UT/h,A)              | CENTER (DD.MM. UT/h,A)       | END (UT/h,A)                |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| <b>2455510.169</b> | 09.11 14:10 (15°,NE)        | <b>09.11. 16:03 (34°,E)</b>  | 09.11 17:56 (54°,E)         |
| 2455512.689        | 12.11 2:38 (23°,NW)         | <b>12.11. 4:32 (6°,NW)</b>   | 12.11 6:25 (-8°,NW)         |
| <b>2455515.209</b> | <b>14.11 15:07 (27°,E)</b>  | <b>14.11. 17:00 (47°,E)</b>  | <b>14.11 18:53 (68°,E)</b>  |
| 2455517.729        | 17.11 3:36 (11°,NW)         | <b>17.11. 5:29 (-4°,NW)</b>  | 17.11 7:22 (-13°,N)         |
| <b>2455520.249</b> | <b>19.11 16:05 (41°,E)</b>  | <b>19.11. 17:58 (62°,E)</b>  | <b>19.11 19:51 (79°,SE)</b> |
| 2455522.769        | 22.11 4:33 (0°,NW)          | <b>22.11. 6:26 (-11°,N)</b>  | 22.11 8:20 (-14°,N)         |
| <b>2455525.289</b> | <b>24.11 17:02 (55°,E)</b>  | <b>24.11. 18:55 (74°,SE)</b> | <b>24.11 20:48 (75°,SW)</b> |
| 2455527.809        | 27.11 5:31 (-8°,NW)         | <b>27.11. 7:24 (-14°,N)</b>  | 27.11 9:17 (-12°,N)         |
| <b>2455530.329</b> | <b>29.11 18:00 (69°,SE)</b> | <b>29.11. 19:53 (79°,S)</b>  | <b>29.11 21:46 (62°,W)</b>  |
| 2455532.849        | 02.12 6:28 (-13°,N)         | <b>02.12. 8:21 (-14°,N)</b>  | 02.12 10:15 (-5°,NE)        |
| <b>2455535.369</b> | <b>04.12 18:57 (79°,S)</b>  | <b>04.12. 20:50 (69°,W)</b>  | <b>04.12 22:43 (48°,W)</b>  |
| 2455537.889        | 07.12 7:26 (-14°,N)         | <b>07.12. 9:19 (-9°,NE)</b>  | 07.12 11:12 (4°,NE)         |
| <b>2455540.408</b> | <b>09.12 19:54 (74°,SW)</b> | <b>09.12. 21:48 (55°,W)</b>  | <b>09.12 23:41 (34°,W)</b>  |
| 2455542.928        | 12.12 8:23 (-11°,N)         | <b>12.12. 10:16 (-1°,NE)</b> | 12.12 12:10 (16°,NE)        |
| <b>2455545.448</b> | <b>14.12 20:52 (61°,W)</b>  | <b>14.12. 22:45 (41°,W)</b>  | <b>15.12 0:38 (22°,NW)</b>  |
| 2455547.968        | 17.12 9:21 (-5°,NE)         | <b>17.12. 11:14 (10°,NE)</b> | 17.12 13:07 (29°,E)         |
| <b>2455550.488</b> | <b>19.12 21:49 (47°,W)</b>  | <b>19.12. 23:43 (27°,W)</b>  | <b>20.12 1:36 (9°,NW)</b>   |
| <b>2455553.008</b> | <b>22.12 10:18 (5°,NE)</b>  | <b>22.12. 12:11 (23°,NE)</b> | <b>22.12 14:05 (43°,E)</b>  |
| 2455555.528        | 24.12 22:47 (33°,W)         | <b>25.12. 0:40 (15°,NW)</b>  | 25.12 2:33 (-1°,NW)         |
| <b>2455558.048</b> | <b>27.12 11:16 (16°,NE)</b> | <b>27.12. 13:09 (36°,E)</b>  | <b>27.12 15:02 (57°,E)</b>  |
| 2455560.568        | 29.12 23:44 (20°,NW)        | <b>30.12. 1:38 (4°,NW)</b>   | 30.12 3:31 (-9°,NW)         |
| <b>2455563.088</b> | <b>01.01 12:13 (30°,E)</b>  | <b>01.01. 14:06 (50°,E)</b>  | <b>01.01 16:00 (70°,SE)</b> |
| 2455565.608        | 04.01 0:42 (9°,NW)          | <b>04.01. 2:35 (-6°,NW)</b>  | 04.01 4:28 (-14°,N)         |

# Pas obligatoirement besoin de gros moyens... Exemple avec un boitier numérique et un téléobjectif photo !

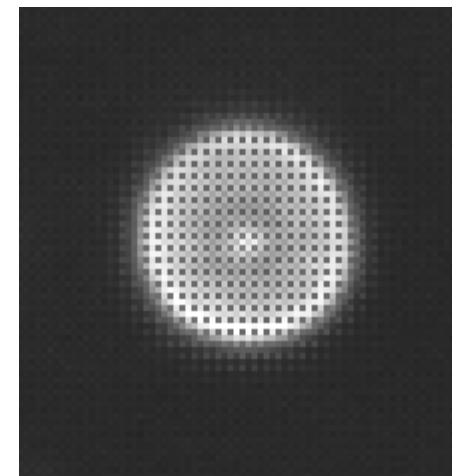


←  
**Image volontairement défocalisée**

But : augmentation de la dynamique, réduction de la scintillation (1 minutes de pose typique) et des effets d'échantillonnage



Photométrie d'ouverture sur composante R ou V ou B (séparation des couches préalable)



Agrandissement de l'image d'une étoile. Noter la structure CFA (entrelacement des pixels rouge, vert et bleu)

## Intérêts de défocaliser l'image

- Accroissement de la dynamique de l'image en éclairant plusieurs pixels que l'on somme à posteriori, plutôt que saturer un seul pixel dans une image focalisée.
- Accroissement du temps de pose sans saturer = réduction de l'erreur photométrique associée à la scintillation atmosphérique (crucial avec de petits télescopes)
- Réduction des biais de mesures induits par les défauts cosmétiques du télescope (matrice CFA dans un détecteur couleur, poussières et défauts de gain ou flat-field mal corrigées, ...)
- Moindre sensibilité aux erreurs de suivi (conséquences d'une non-uniformité de réponse intra-pixel négligeable)

## Exemple de l'observation du transit de HD189733 b

19 juillet 2009 – Pic du Midi

Canon EOS 40D + téléobjectif 400 mm f/5.6



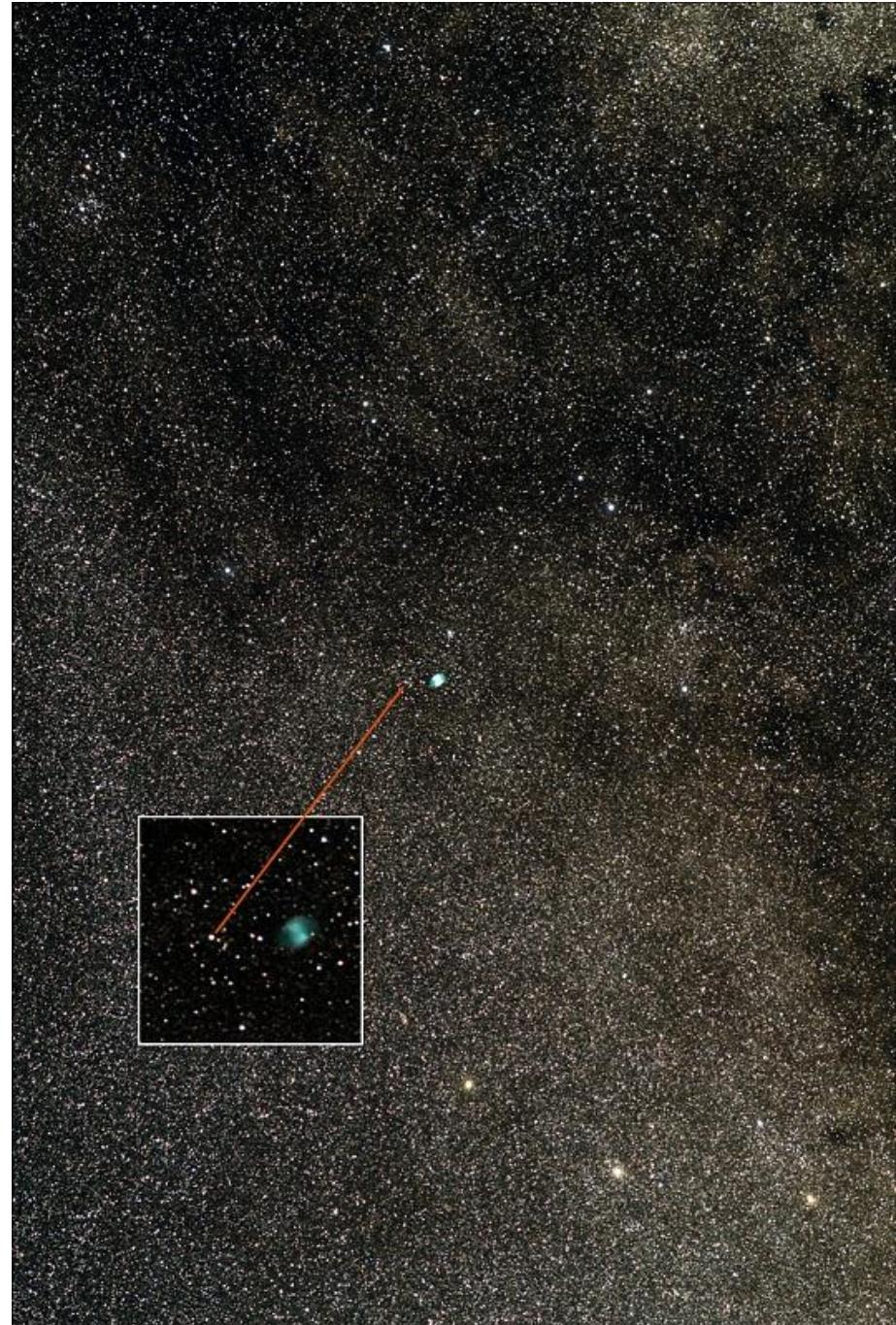
## Localisation de HD189733

A proximité de la nébuleuse Dumbell (M27)

Magnitude : 7,7

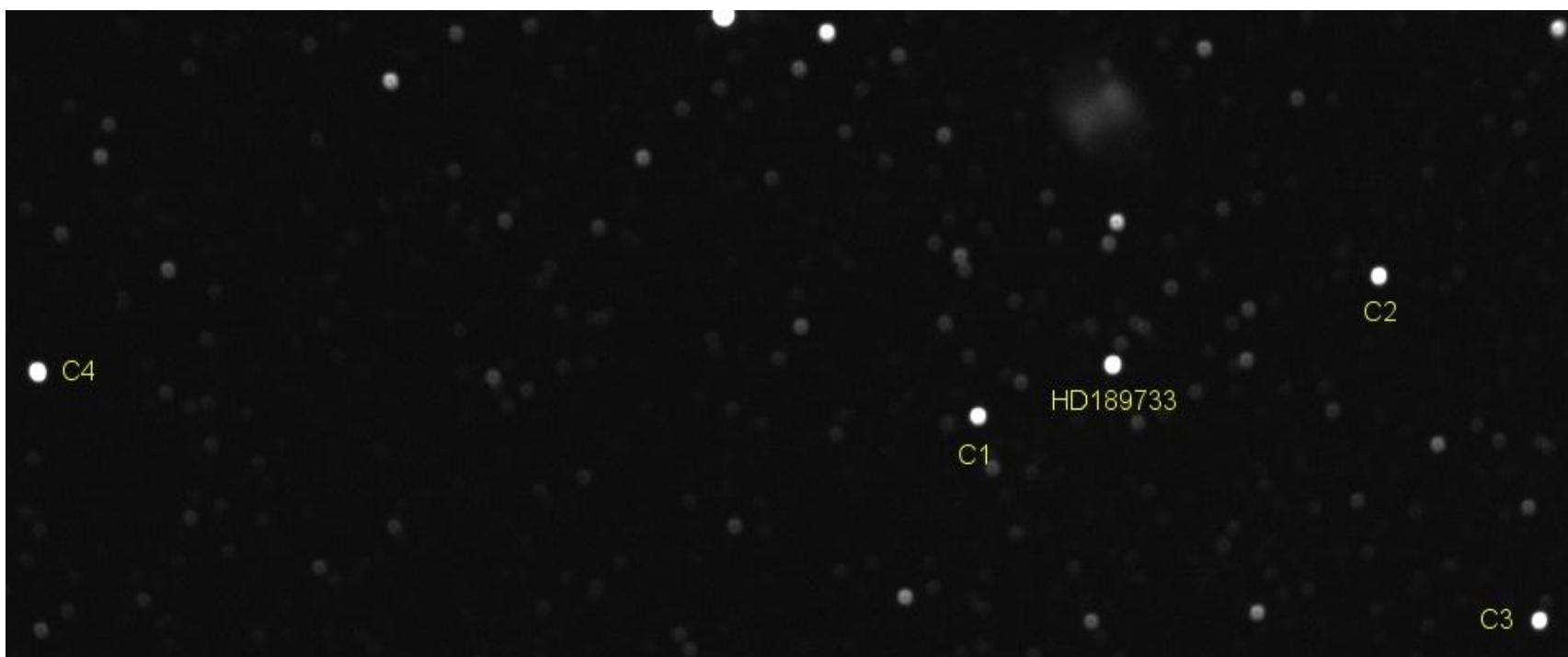
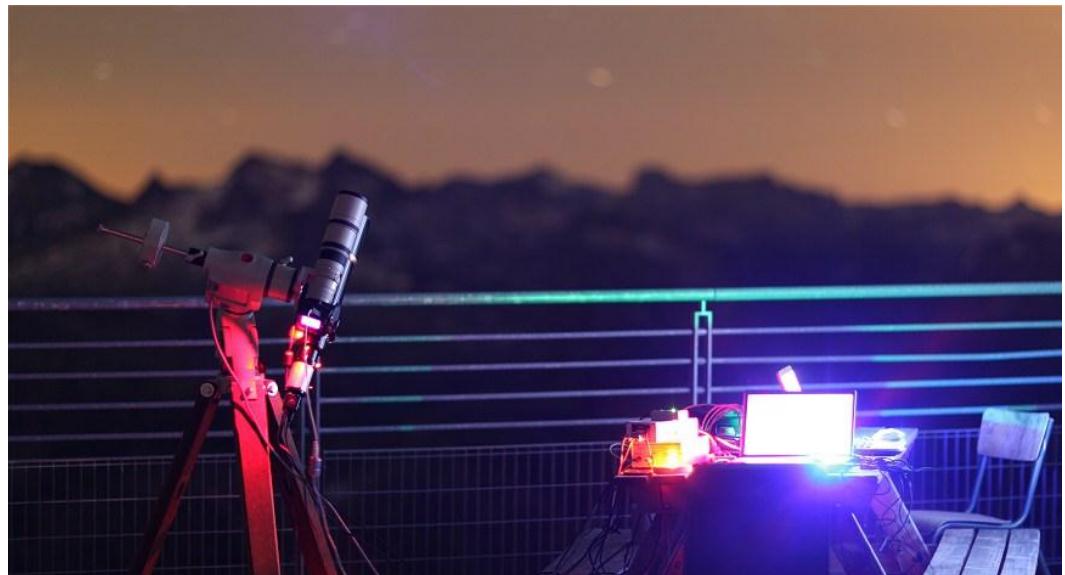
Période orbitale de la planète : 2,218 jours

Variation d'éclat prédictive : 0,028 magnitude

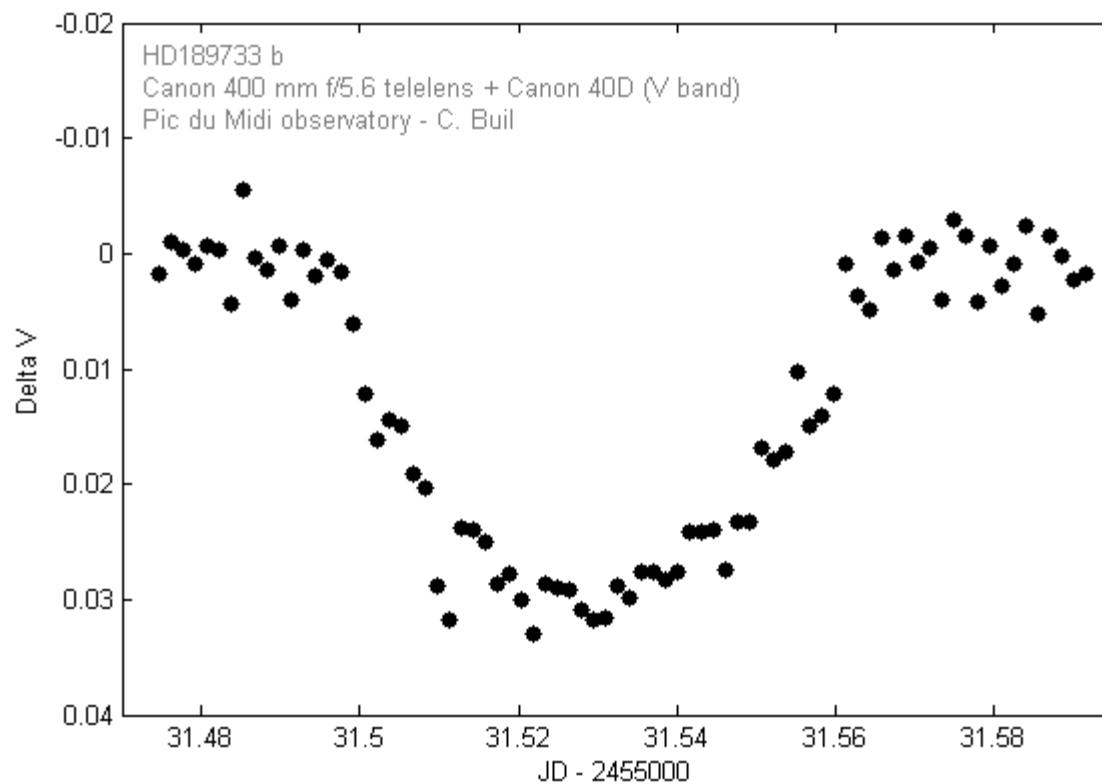


## Observation

- Temps de pose : 2 minutes (réduction du bruit de scintillation à 0,001 magnitude)
- Défocalisation sur 15 pixels (accroissement de la dynamique et du temps de pose)
- Acquisition en mode RAW obligatoire
- Sélection de plusieurs étoiles de comparaison (avantage du grand champ !)
- Possibilité d'exploiter les canaux RVB (photométrie 3 couleurs automatique)
- Réduction avec le logiciel Iris



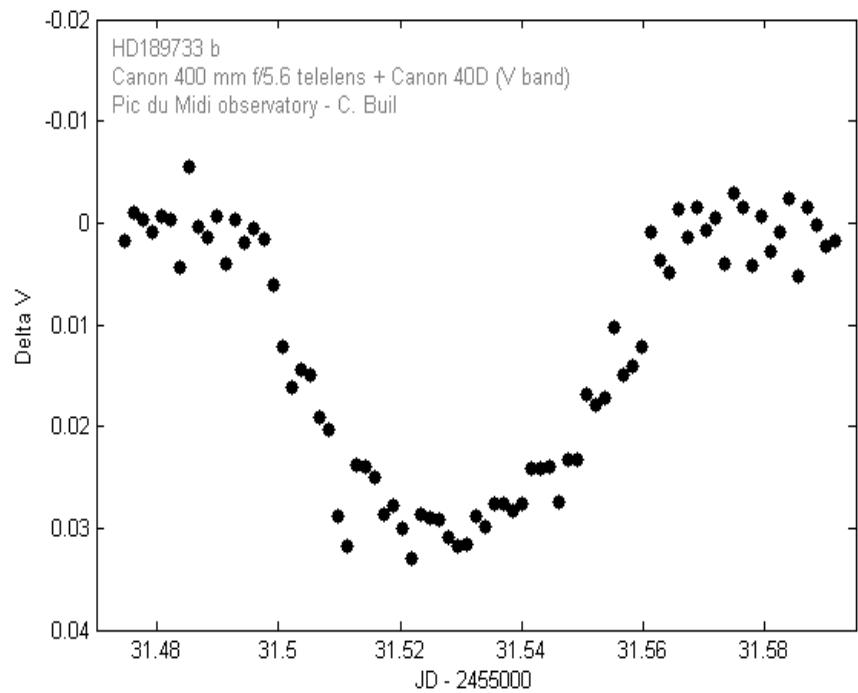
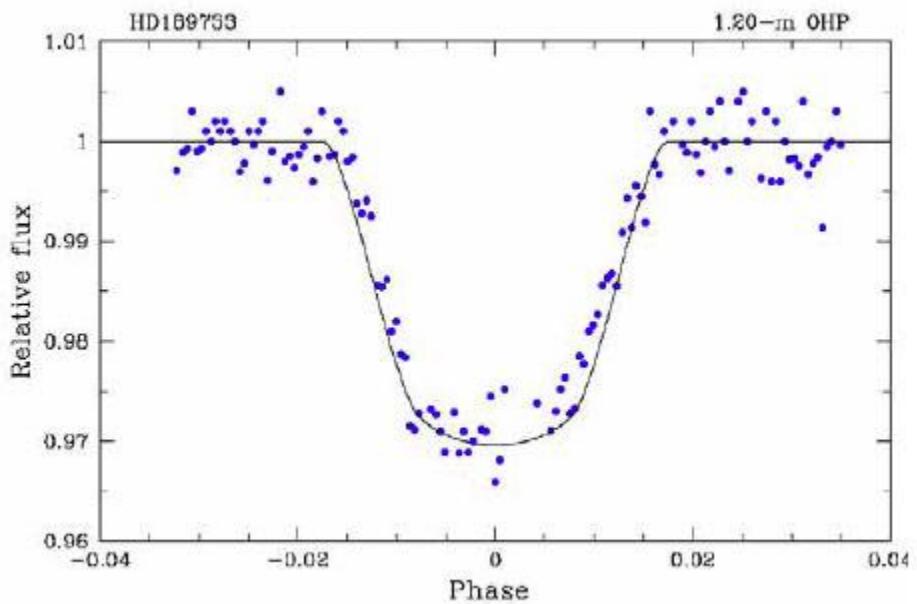
## Résultat



Erreur RMS caractéristique de 0,0015 magnitude

Date du milieu du transit : 19 juillet 2009 à 0h44m38s UT  
(la prédition était 0h47m)

## Résultat



Observatoire de Haute-Provence  
Octobre 2005  
Télescope de 1,2 m

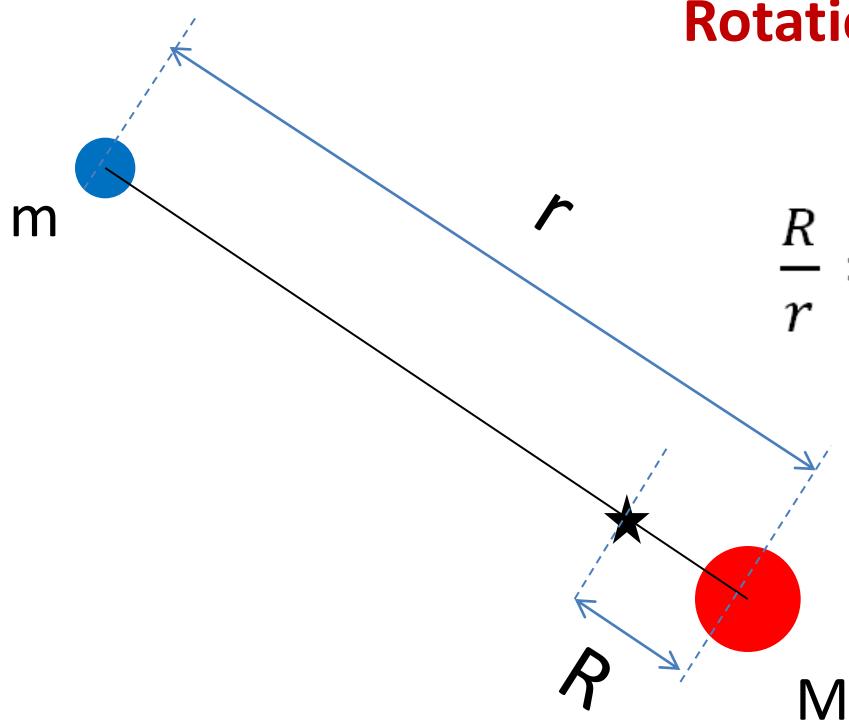
Observatoire du Pic du Midi  
Juillet 2009  
Télescope de 0,07 m

# La méthode velocimétrique

(mesure de vitesse radiales)

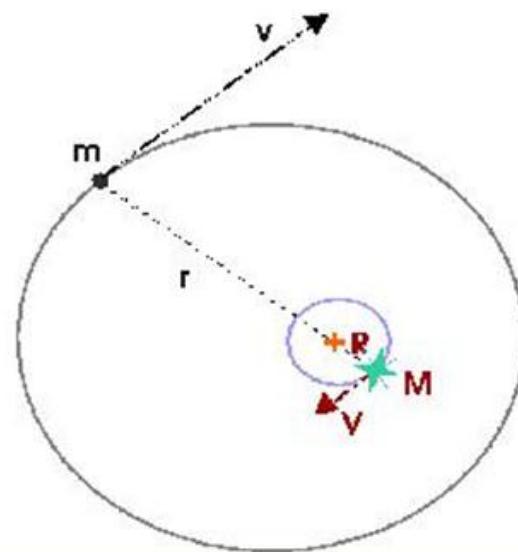


# Rotation de deux corps liés par la gravité

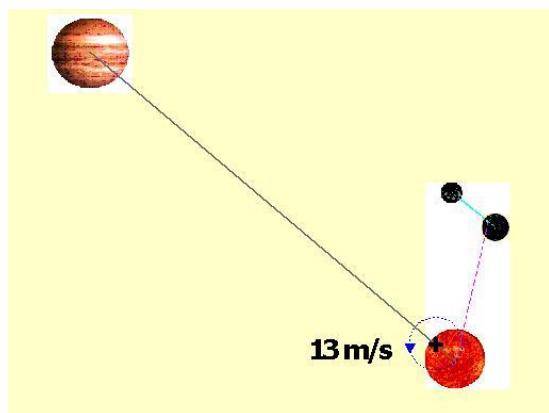


$$\frac{R}{r} = \frac{m}{M+m}$$

Rotation autour du centre de gravité commun



$$\frac{R}{r} = \frac{v}{v} = \frac{m}{M}$$



Vitesse de rotation du Soleil autour de son centre de gravité commun avec Jupiter

# Catalogue des exoplanètes (extrait !)

(liste complète sur [exoplanet.org](http://exoplanet.org))

| Name                          | Msin(i)<br>mjupiter ± | Semi-Major<br>Axis<br>au | Orbital<br>Period<br>days ± | Orbital<br>Eccentricity<br>± | ω<br>deg ± | Time of<br>Periastron<br>jd ± | Velocity<br>Semiamplitude<br>m/s ± | Orbit Reference  |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------|-------------------------------|------------------------------------|--|
| <a href="#">HD 41004 B b</a>  | 18                    | 0.0177                   | 1.3283                      | 0.08                         | 179        | 2452434.88                    | 6110                               | <a href="#">Zucker 2004</a>                                  |
| <a href="#">CoRoT-3 b</a>     | 21.8                  | 0.0574                   | 4.2568                      | 0                            | 90         | 2454283.138                   | 2190                               | <a href="#">Deleuil 2008</a>                                 |
| <a href="#">WASP-18 b</a>     | 10.2                  | 0.0202                   | 0.9414530                   | 0.009                        | 260        | 2454221.00                    | 1818                               | <a href="#">Hellier 2009</a>                                 |
| <a href="#">HD 162020 b</a>   | 15                    | 0.0757                   | 8.42820                     | 0.277                        | 28.4       | 2451990.677                   | 1813                               | <a href="#">Udry 2002</a>                                    |
| <a href="#">XO-3 b</a>        | 13.1                  | 0.0477                   | 3.1915                      | 0.288                        | 346        | 2454024.73                    | 1490                               | <a href="#">Johns-Krull 2008</a> ; <a href="#">Winn 2009</a> |
| <a href="#">WASP-14 b</a>     | 7.3                   | 0.0358                   | 2.24375                     | 0.091                        | 253.4      | 2454462.33                    | 993                                | <a href="#">Joshi 2009</a>                                   |
| <a href="#">HAT-P-2 b</a>     | 8.9                   | 0.0679                   | 5.633473                    | 0.517                        | 185.2      | 2454388.077                   | 980                                | <a href="#">Pal 2009</a>                                     |
| <a href="#">HD 114762 b</a>   | 11.7                  | 0.363                    | 83.888                      | 0.336                        | 202        | 2449805.4                     | 615                                | <a href="#">Butler 2006</a>                                  |
| <a href="#">HD 202206 b</a>   | 17                    | 0.812                    | 255.87                      | 0.435                        | 161.2      | 2452175.3                     | 565                                | <a href="#">Correia 2005</a>                                 |
| <a href="#">CoRoT-2 b</a>     | 3.27                  | 0.0281                   | 1.742996                    | 0                            | 90         | 2454237.536                   | 560                                | <a href="#">Alonso 2008</a>                                  |
| <a href="#">HD 43848 b</a>    | 20                    | 3.38                     | 2400                        | 0.7                          | 229        | 2453230                       | 500                                | <a href="#">Minniti 2009</a>                                 |
| <a href="#">HAT-P-16 b</a>    | 4.2                   | 0.0413                   | 2.77596                     | 0.036                        | 214        | 2455025.75                    | 531                                | <a href="#">Buchhave 2010</a>                                |
| <a href="#">WASP-10 b</a>     | 3.0                   | 0.0370                   | 3.09276                     | 0.06                         | 170        | 2454664.635                   | 520                                | <a href="#">Johnson 2009</a>                                 |
| <a href="#">OGLE2-TR-L9 b</a> | 4.50                  | 0.0413                   | 2.4855335                   | 0                            | 90         | 2454492.798                   | 500                                | <a href="#">Snellen 2009</a>                                 |
| <a href="#">HAT-P-13 c</a>    | 15                    | 1.19                     | 429                         | 0.69                         | 176.7      | 2454890.0                     | 500                                | <a href="#">Bakos 2009</a>                                   |
| <a href="#">HD 168443 b</a>   | 7.8                   | 0.295                    | 58.1121                     | 0.529                        | 172.9      | 2454347.73                    | 475.5                              | <a href="#">Wright 2009</a>                                  |
| <a href="#">HD 80606 b</a>    | 3.9                   | 0.447                    | 111.428                     | 0.934                        | 300.6      | 2454424.86                    | 472                                | <a href="#">Moutou 2009</a>                                  |
| <a href="#">HD 156846 b</a>   | 11.0                  | 1.12                     | 359.51                      | 0.847                        | 52.2       | 2441998.09                    | 464                                | <a href="#">Tamuz 2007</a>                                   |
| <a href="#">Tau Boo b</a>     | 4.1                   | 0.0480                   | 3.31246                     | 0.02                         | 188        | 2446957.8                     | 461                                | <a href="#">Butler 2006</a>                                  |
| <a href="#">HIP 14810 b</a>   | 3.9                   | 0.0692                   | 6.67386                     | 0.1425                       | 150.5      | 2453088                       | 424.3                              | <a href="#">Wright 2009</a>                                  |
| <a href="#">HD 137510 b</a>   | 22                    | 1.87                     | 805                         | 0.36                         | 31         | 2451760                       | 420                                | <a href="#">Butler 2006</a>                                  |
| <a href="#">HD 16760 b</a>    | 14                    | 1.13                     | 465                         | 0.07                         | 230        | 2454720                       | 408                                | <a href="#">Sato 2009</a>                                    |

Classement par vitesses radiales décroissantes

# Catalogue des exoplanètes (extrait !)

(liste complète sur [exoplanet.org](http://exoplanet.org))

| Name                        | Msin(i)<br>mjupiter ± | Semi-Major<br>Axis<br>au | Orbital<br>Period<br>days ± | Orbital<br>Eccentricity<br>± | $\omega$<br>deg ± | Time of<br>Periastron<br>jd ± | Velocity<br>Semiamplitude<br>m/s ± | Orbit Reference             |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| <a href="#">HD 69830 c</a>  | 0.037                 | 0.185                    | 31.56                       | 0.13                         | 220               | 2453470                       | 2.7                                | <a href="#">Lovis 2006</a>  |
| <a href="#">GJ 581 d</a>    | 0.022                 | 0.218                    | 66.8                        | 0.38                         | 330               | 2454603                       | 2.6                                | <a href="#">Mayor 2009</a>  |
| <a href="#">HD 40307 d</a>  | 0.0286                | 0.132                    | 20.46                       | 0                            | 0                 | 2454532.4                     | 2.6                                | <a href="#">Mayor 2009</a>  |
| <a href="#">HD 40307 c</a>  | 0.0211                | 0.0801                   | 9.62                        | 0                            | 0                 | 2454551.5                     | 2.5                                | <a href="#">Mayor 2009</a>  |
| <a href="#">HD 69830 d</a>  | 0.056                 | 0.627                    | 197                         | 0.07                         | 220               | 2453360                       | 2.2                                | <a href="#">Lovis 2006</a>  |
| <a href="#">61 Vir c</a>    | 0.033                 | 0.217                    | 38.02                       | 0.14                         | 340               | 2453350                       | 2.1                                | <a href="#">Vogt 2009</a>   |
| <a href="#">61 Vir b</a>    | 0.016                 | 0.0501                   | 4.215                       | 0.1                          | 110               | 2453367.2                     | 2.1                                | <a href="#">Vogt 2009</a>   |
| <a href="#">HD 40307 b</a>  | 0.0129                | 0.0469                   | 4.3115                      | 0                            | 0                 | 2454562.77                    | 2.0                                | <a href="#">Mayor 2009</a>  |
| <a href="#">HD 156668 b</a> | 0.0131                | 0.0500                   | 4.646                       | 0                            | 90                | 2454718.6                     | 1.9                                | <a href="#">Howard 2010</a> |
| <a href="#">GJ 581 e</a>    | 0.00611               | 0.0285                   | 3.1494                      | 0                            | 0                 | 2454716.8                     | 1.9                                | <a href="#">Mayor 2009</a>  |

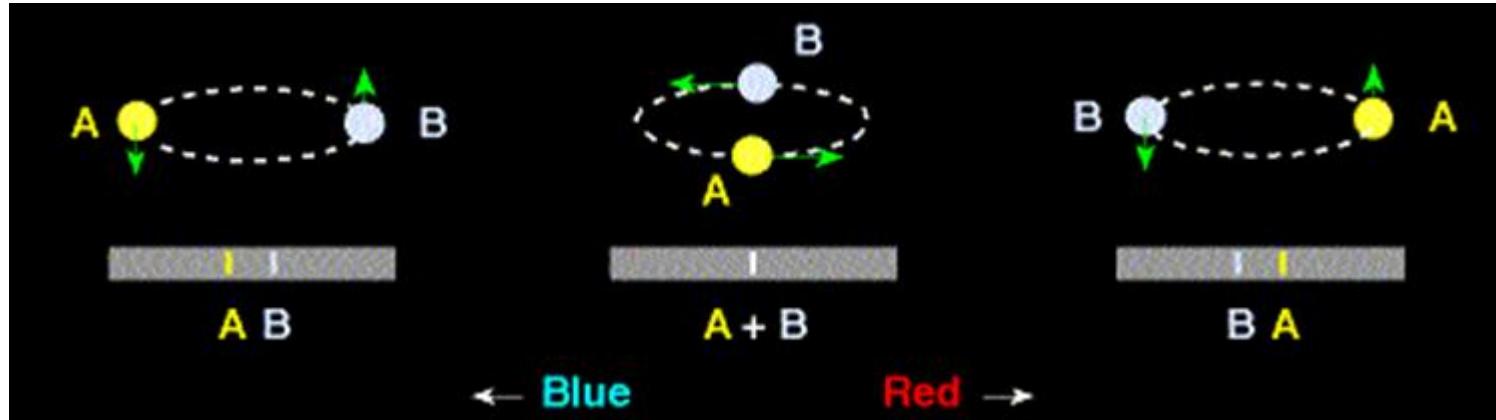
Les vitesses radiales les plus lentes (quelques mètres par secondes)

| Name                          | Msin(i)<br>mjupiter ± | Semi-Major<br>Axis<br>au | Orbital<br>Period<br>days ± | Orbital<br>Eccentricity<br>± | $\omega$<br>deg ± | Time of<br>Periastron<br>jd ± | Velocity<br>Semiamplitude<br>m/s ± | Orbit Reference   |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------------------|------------------------------------|---|
| <a href="#">WASP-19 b</a>     | 1.13                  | 0.0165                   | 0.7888399                   | 0                            | 90                | 2454775.337                   | 256                                | <a href="#">Hebb 2010</a>                                     |
| <a href="#">CoRoT-7 b</a>     | 0.0156                | 0.0172                   | 0.85359                     | 0                            | 90                | 2454446.731                   | 3.5                                | <a href="#">Queloz 2009</a>                                   |
| <a href="#">WASP-18 b</a>     | 10.2                  | 0.0202                   | 0.9414530                   | 0.009                        | 260               | 2454221.00                    | 1818                               | <a href="#">Hellier 2009</a>                                  |
| <a href="#">WASP-12 b</a>     | 1.4                   | 0.0229                   | 1.091423                    | 0.05                         | 286               | 2454508.484                   | 226                                | <a href="#">Hebb 2009</a>                                     |
| <a href="#">OGLE-TR-56 b</a>  | 1.35                  | 0.0238                   | 1.21                        | 0                            | 90                | 2452072.683                   | 230                                | <a href="#">Torres 2008</a>                                   |
| <a href="#">TrES-3 b</a>      | 1.92                  | 0.0227                   | 1.30619                     | 0                            | 90                | 2454185.91                    | 378                                | <a href="#">O'Donovan 2007</a>                                |
| <a href="#">HD 41004 B b</a>  | 18                    | 0.0177                   | 1.3283                      | 0.08                         | 179               | 2452434.88                    | 6110                               | <a href="#">Zucker 2004</a>                                   |
| <a href="#">WASP-4 b</a>      | 1.25                  | 0.0233                   | 1.338228                    | 0                            | 90                | 2454365.915                   | 240                                | <a href="#">Wilson 2008</a> ; <a href="#">Southworth 2009</a> |
| <a href="#">OGLE-TR-113 b</a> | 1.26                  | 0.0229                   | 1.43                        | 0                            | 90                | 2452325.798                   | 270                                | <a href="#">Torres 2008</a>                                   |
| <a href="#">CoRoT-1 b</a>     | 1.03                  | 0.0253                   | 1.508956                    | 0                            | 90                | 2454159.453                   | 190                                | <a href="#">Barge 2008</a>                                    |

Les périodes orbitales les plus courtes

## Détection des exoplanètes grâce à l'effet Doppler

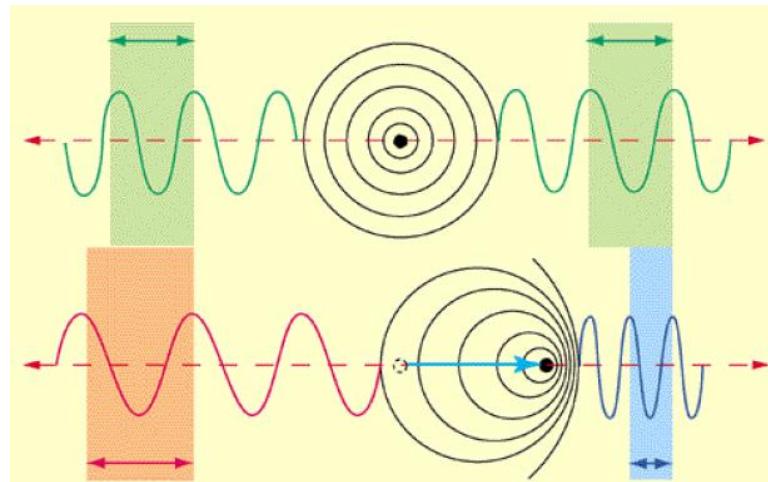
Deux astres tournant autour de leur centre de gravité commun :



*Si l'astre s'approche de l'observateur les raies spectrales sont déplacées vers le bleu  
Si l'astre s'éloigne de l'observateur les raies spectrales sont déplacés vers le rouge*

La position apparente des raies dans le spectre d'un astre en mouvement par rapport à leurs positions pour un objet au repos donne la vitesse radiale de l'astre (technique de la vélocimétrie)

## Variation de la longueur d'onde apparente le long de l'axe de visée



La formule Doppler :

Déplacement des raies en longueur d'onde

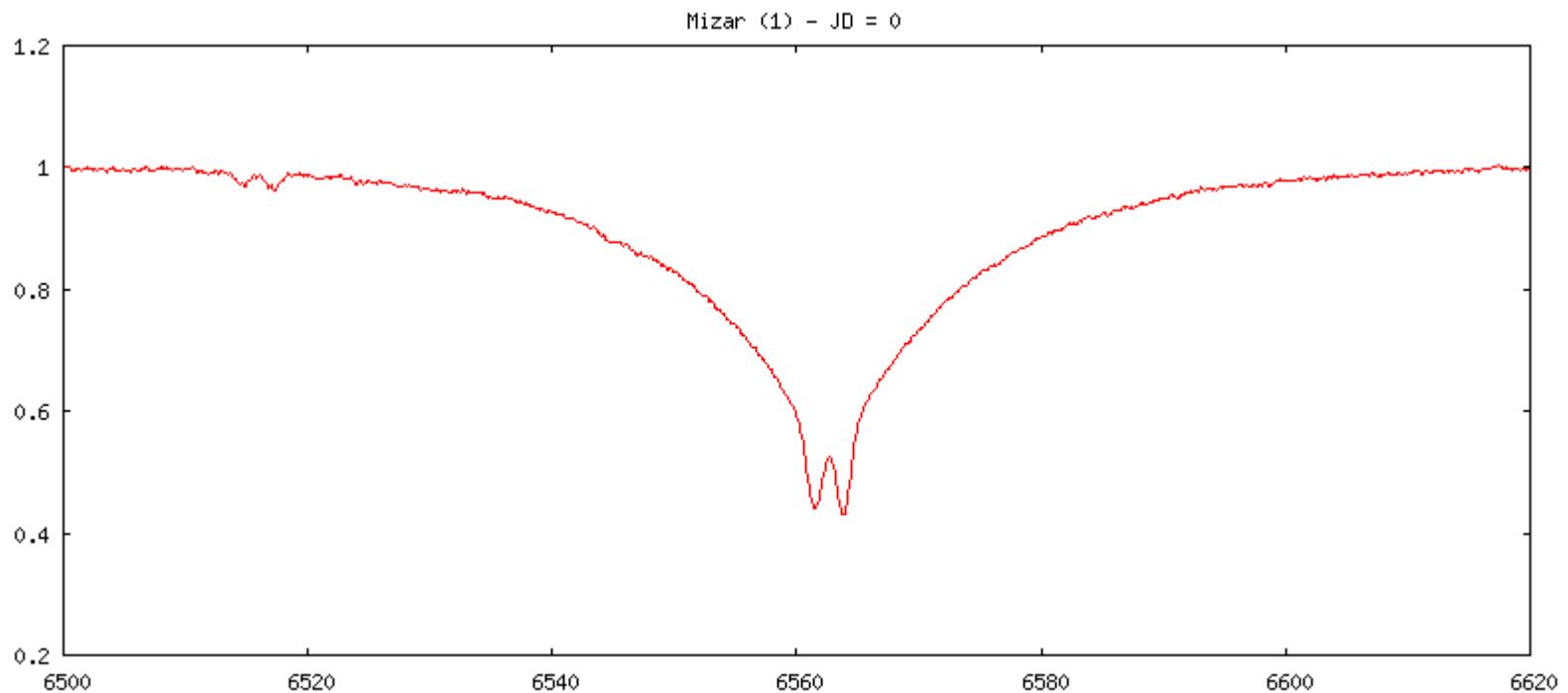
Vitesse radiale

Longueur d'onde théorique

Vitesse de la lumière

$$\frac{(\Delta \lambda)}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

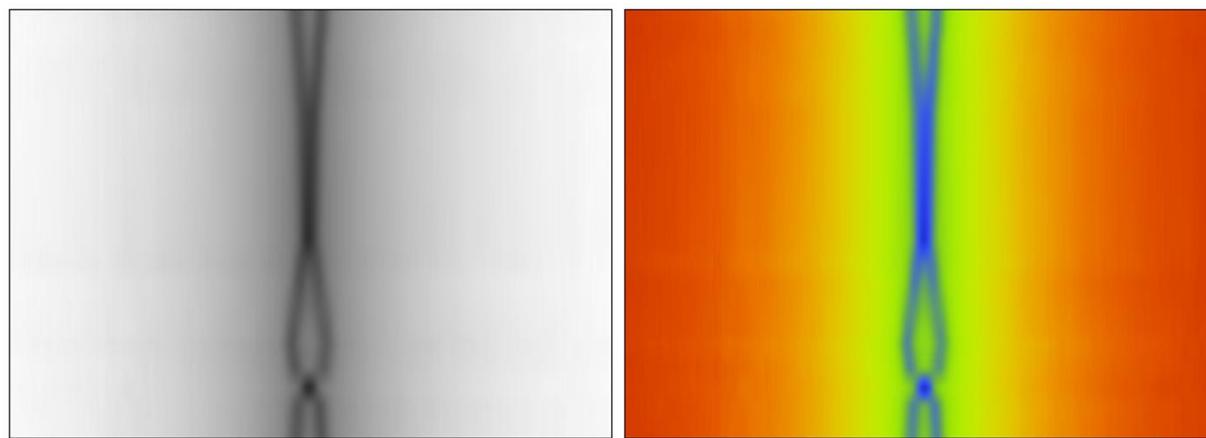
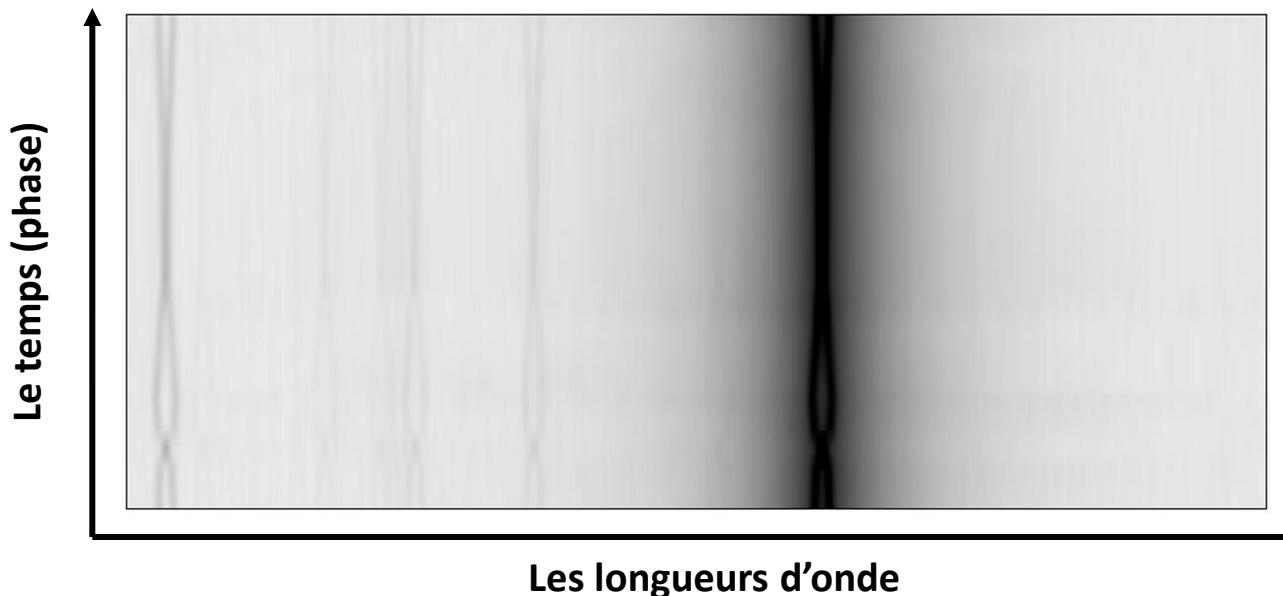
## Exemple de l'étoile double spectroscopique MIZAR



**Mouvement du système de raies de chaque membre du système double :  
traduction du déplacement orbital en fonction du temps**

## Exemple de l'étoile double spectroscopique MIZAR

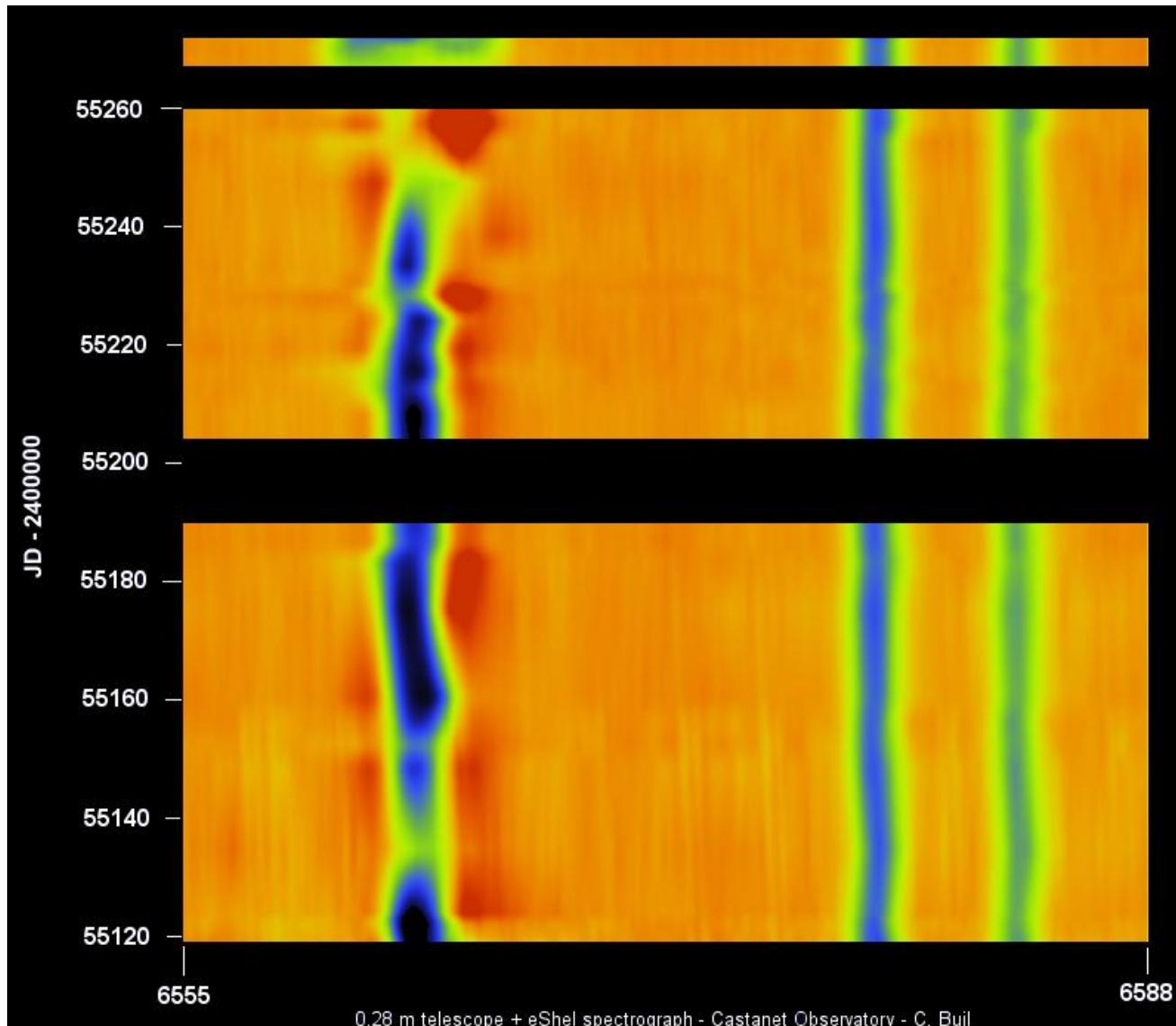
Représentation 2D des variation périodiques du spectre



Détail de la raie Ha

Observation réalisée avec un Celestron 11 et un spectrographe eShel (Castanet-Tolosan)

## L'effet Doppler révèle un ciel en mouvement...

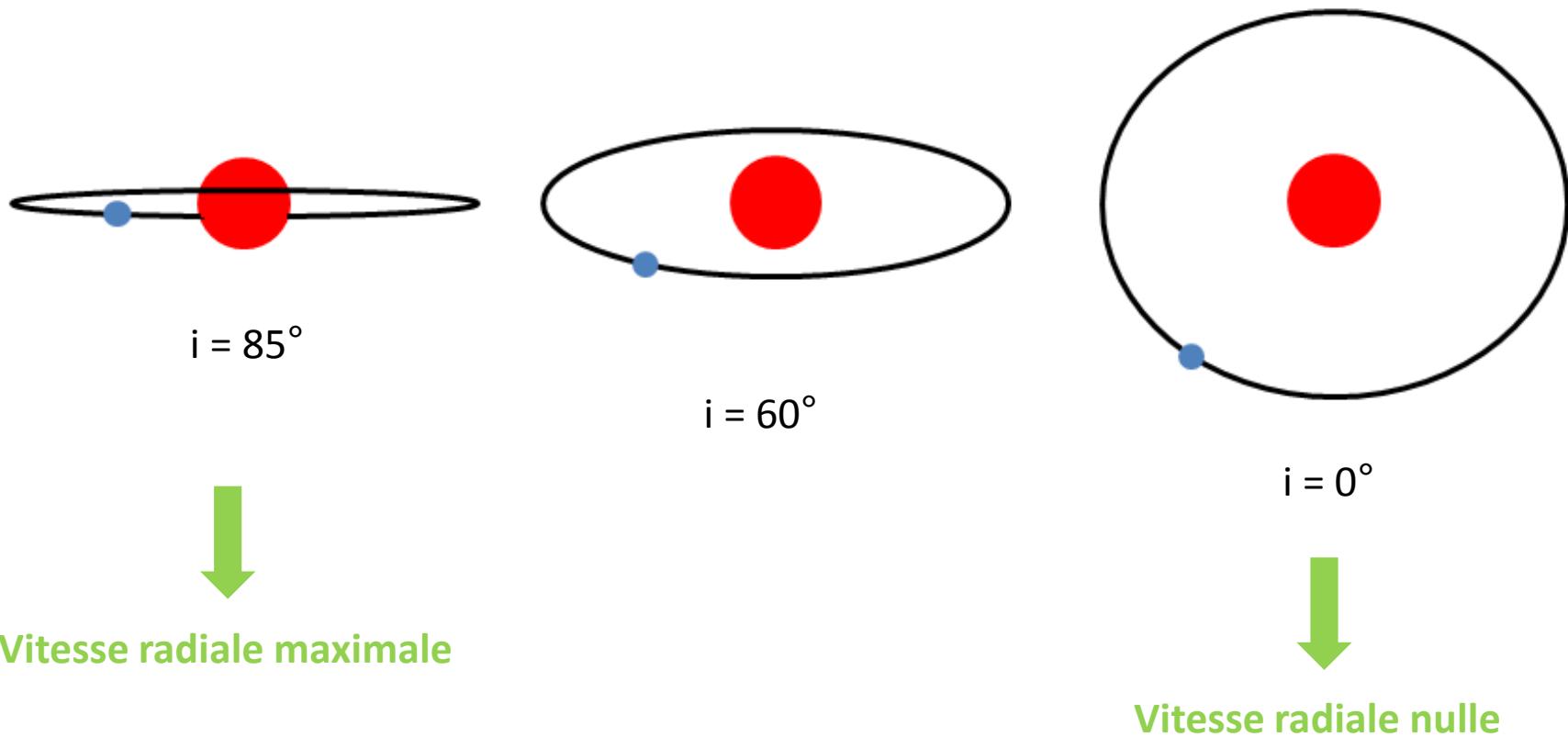


Spectre dynamique de l'étoile Rigel ( $\beta$  Ori) en fausses couleurs. Région de la raie H $\alpha$

**La vitesse apparente observée,  $V_a$ , est la vitesse réelle  $V$  projetée dans le plan du ciel**

$$V_a = V \sin i$$

$i$  = inclinaison de l'axe de l'orbite par rapport à la direction de visée



## Exemple numérique

Soit une vitesse radiale observée ( $v \sin i$ ) de 0,461 km / secondes (= 461 mètres / seconde)

On analyse la raie H $\alpha$  à 6563 angströms.

Quel est le décalage spectral attendu de cette raie ?

La formule Doppler :  $\Delta\lambda = \lambda \frac{v}{c}$

c = vitesse de la lumière (célérité) = 300 000 km/s

Réponse :  $\Delta\lambda = 6563 \times \frac{0,461}{300000} = 0,01 \text{ \AA}$

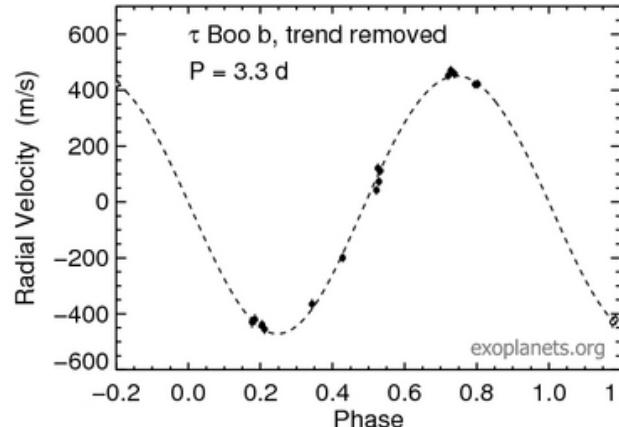
Soit 1/100 d'Angström

## L'exemple du système tau Bootis (1/2)

| Name                          | Msin(i)<br>mjupiter ± | Semi-Major<br>Axis<br>au | Orbital<br>Period<br>days ± | Orbital<br>Eccentricity<br>± | $\omega$<br>deg ± | Time of<br>Periastron<br>jd ± | Velocity<br>Semiamplitude<br>m/s ± | Orbit Reference  |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------------------|------------------------------------|--|
| <a href="#">HD 41004 b</a>    | 18                    | 0.0177                   | 1.3283                      | 0.08                         | 179               | 2452434.88                    | 6110                               | <a href="#">Zucker 2004</a>                                  |
| <a href="#">CoRoT-3 b</a>     | 21.8                  | 0.0574                   | 4.2568                      | 0                            | 90                | 2454283.138                   | 2190                               | <a href="#">Deleuil 2008</a>                                 |
| <a href="#">WASP-18 b</a>     | 10.2                  | 0.0202                   | 0.9414530                   | 0.009                        | 260               | 2454221.00                    | 1818                               | <a href="#">Hellier 2009</a>                                 |
| <a href="#">HD 162020 b</a>   | 15                    | 0.0757                   | 8.42820                     | 0.277                        | 28.4              | 2451990.677                   | 1813                               | <a href="#">Udry 2002</a>                                    |
| <a href="#">XO-3 b</a>        | 13.1                  | 0.0477                   | 3.1915                      | 0.288                        | 346               | 2454024.73                    | 1490                               | <a href="#">Johns-Krull 2008</a> ; <a href="#">Winn 2009</a> |
| <a href="#">WASP-14 b</a>     | 7.3                   | 0.0358                   | 2.24375                     | 0.091                        | 253.4             | 2454462.33                    | 993                                | <a href="#">Joshi 2009</a>                                   |
| <a href="#">HAT-P-2 b</a>     | 8.9                   | 0.0679                   | 5.633473                    | 0.517                        | 185.2             | 2454388.077                   | 980                                | <a href="#">Pal 2009</a>                                     |
| <a href="#">HD 114762 b</a>   | 11.7                  | 0.363                    | 83.888                      | 0.336                        | 202               | 2449805.4                     | 615                                | <a href="#">Butler 2006</a>                                  |
| <a href="#">HD 202206 b</a>   | 17                    | 0.812                    | 255.87                      | 0.435                        | 161.2             | 2452175.3                     | 565                                | <a href="#">Correia 2005</a>                                 |
| <a href="#">CoRoT-2 b</a>     | 3.27                  | 0.0281                   | 1.742996                    | 0                            | 90                | 2454237.536                   | 560                                | <a href="#">Alonso 2008</a>                                  |
| <a href="#">HD 43848 b</a>    | 20                    | 3.38                     | 2400                        | 0.7                          | 229               | 2453230                       | 500                                | <a href="#">Minniti 2009</a>                                 |
| <a href="#">HAT-P-16 b</a>    | 4.2                   | 0.0413                   | 2.77596                     | 0.036                        | 214               | 2455025.75                    | 531                                | <a href="#">Buchhave 2010</a>                                |
| <a href="#">WASP-10 b</a>     | 3.0                   | 0.0370                   | 3.09276                     | 0.06                         | 170               | 2454664.635                   | 520                                | <a href="#">Johnson 2009</a>                                 |
| <a href="#">OGLE2-TR-L9 b</a> | 4.50                  | 0.0413                   | 2.4855335                   | 0                            | 90                | 2454492.798                   | 500                                | <a href="#">Snellen 2009</a>                                 |
| <a href="#">HAT-P-13 c</a>    | 15                    | 1.19                     | 429                         | 0.69                         | 176.7             | 2454890.0                     | 500                                | <a href="#">Bakos 2009</a>                                   |
| <a href="#">HD 168443 b</a>   | 7.8                   | 0.295                    | 58.1121                     | 0.529                        | 172.9             | 2454347.73                    | 475.5                              | <a href="#">Wright 2009</a>                                  |
| <a href="#">HD 80606 b</a>    | 3.9                   | 0.447                    | 111.428                     | 0.934                        | 300.6             | 2454424.86                    | 472                                | <a href="#">Moutou 2009</a>                                  |
| <a href="#">HD 156846 b</a>   | 11.0                  | 1.12                     | 359.51                      | 0.847                        | 52.2              | 2441998.09                    | 464                                | <a href="#">Tamuz 2007</a>                                   |
| <a href="#">tau Boo b</a>     | 4.1                   | 0.0480                   | 3.31246                     | 0.02                         | 188               | 2446957.8                     | 461                                | <a href="#">Butler 2006</a>                                  |
| <a href="#">HIP 14810 b</a>   | 3.9                   | 0.0692                   | 6.67386                     | 0.1425                       | 159.5             | 2453988                       | 424.3                              | <a href="#">Wright 2009</a>                                  |
| <a href="#">HD 137510 b</a>   | 22                    | 1.87                     | 805                         | 0.36                         | 31                | 2451760                       | 420                                | <a href="#">Butler 2006</a>                                  |
| <a href="#">HD 16760 b</a>    | 14                    | 1.13                     | 465                         | 0.07                         | 230               | 2454720                       | 408                                | <a href="#">Sato 2009</a>                                    |

## L'exemple du système tau Bootis (2/2)

### tau Boo b



[NSTED Velocities and Light Curves](#)

### Discovery and References

|                        |                                  |
|------------------------|----------------------------------|
| First Publication Date | 1996                             |
| Method of Discovery    | RV                               |
| Orbit Reference        | <a href="#">Butler 2006</a>      |
| First Reference        | <a href="#">Butler 1997</a>      |
| Star Type Reference    | <a href="#">Valenti 2005</a>     |
| Star Mass Reference    | <a href="#">Takeda 2007</a>      |
| Parallax Reference     | <a href="#">van Leeuwen 2009</a> |
| EPE Link               | <a href="#">tau Boo</a>          |
| NSTED Link             | <a href="#">67275</a>            |
| SIMBAD Link            | <a href="#">tau Boo</a>          |

### Orbital Parameters

|                        |            |                  |
|------------------------|------------|------------------|
| Msin(i)                | [mjupiter] | 4.1±0.305        |
| Semi-Major Axis        | [au]       | 0.0480           |
| Orbital Period         | [days]     | 3.31246±0.000014 |
| Velocity Semiamplitude | [m/s]      | 461±7.6          |
| Orbital Eccentricity   |            | 0.02±0.015       |
| Argument of Periastron | [deg]      | 188              |
| Time of Periastron     | [jd]       | 2446957.8±0.577  |
| Velocity Slope         | [m/s/days] | -0.051±0.00301   |

### Stellar Properties

|                       |                                   |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Star Name             | <a href="#">tau Boo</a>           |
| Spectral Type         | F7V                               |
| Binary Flag           | 1                                 |
| Mass of Star [msun]   | <a href="#">1.34+0.054/-0.039</a> |
| [Fe/H]                | 0.23±0.03                         |
| Teff [k]              | 6390±44                           |
| log <sub>10</sub> (g) | 4.26±0.06                         |
| Vsin(i) [km/s]        | 15.0±0.5                          |
| Components            | 1                                 |

### Orbital Fit Properties

|                       |      |
|-----------------------|------|
| Reduced Chi Squared   | 2.89 |
| # of Observations     | 98   |
| RMS of Velocities     | 62   |
| Flag for linear Trend | 1    |

### Stellar Magnitudes

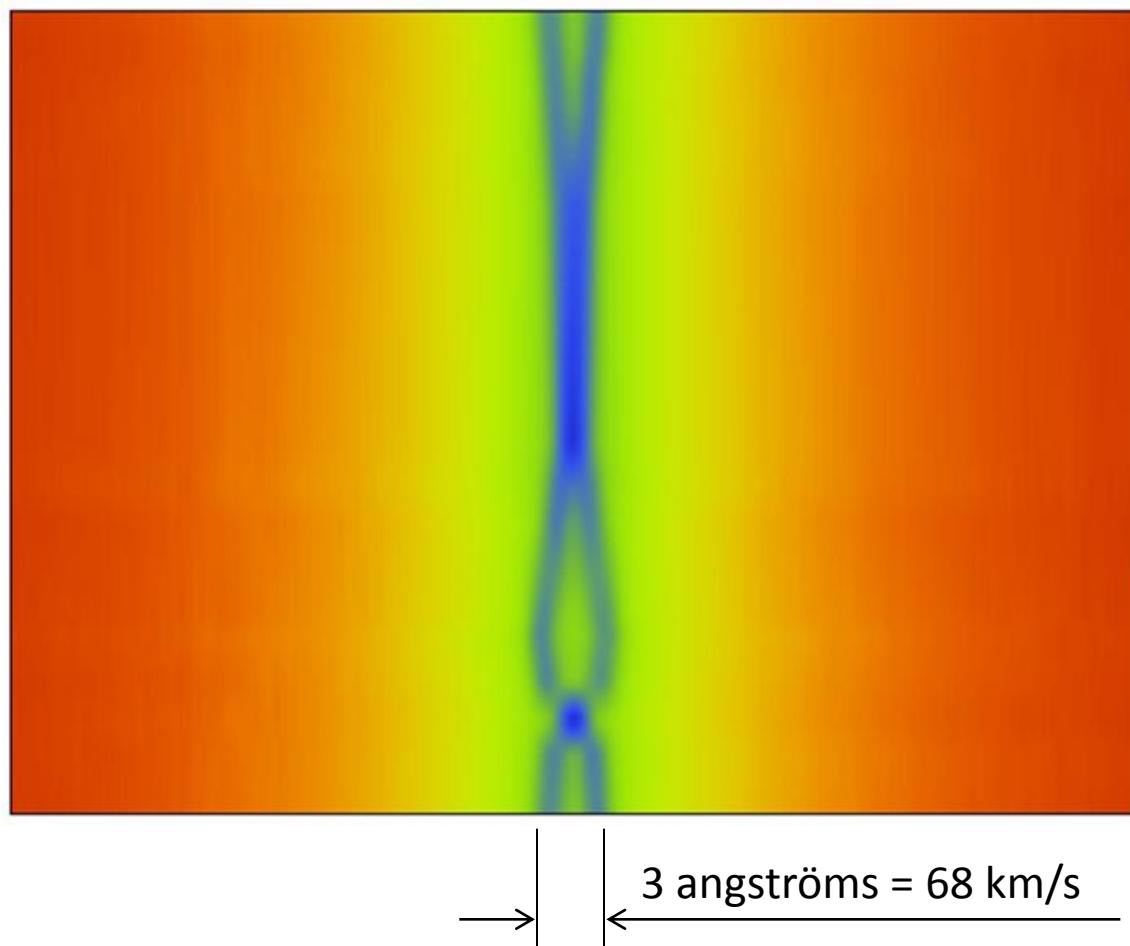
|                      |       |
|----------------------|-------|
| V mag                | 4.5   |
| B-V                  | 0.508 |
| 2MASS J              | 3.616 |
| 2MASS H              | 3.545 |
| 2MASS K <sub>S</sub> | 3.507 |
| S <sub>HK</sub>      | 0.202 |
| log R <sub>HK</sub>  | -4.73 |

### Coordinates and Catalogs

|                    |                              |
|--------------------|------------------------------|
| RA (h:m:s)         | <a href="#">13:47:16.037</a> |
| DEC (d:m:s)        | <a href="#">+17:27:24.39</a> |
| Parallax [marcsec] | <a href="#">64.0±0.19</a>    |

La détection de la planète tau Boo b demande de mesurer la position des raies à mieux que 0,01 Å près. Mais pour confirmer la détection il faut faire 5 fois mieux, soit  $0,01 / 5 = 0,002$  angström !

## Retour sur le spectre de MIZAR...



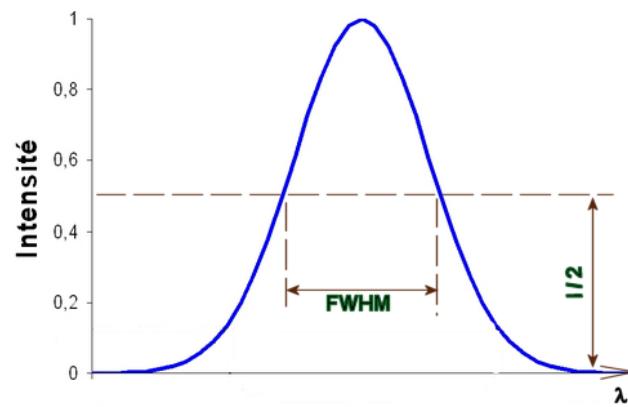
La « signature » spectrale de tau Boo b est 150 fois plus faible !

## Un spectrographe type LHIRES III est-il utilisable ?



Pouvoir de résolution caractéristique  
 $R = 15000$

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda}{FWHM}$$



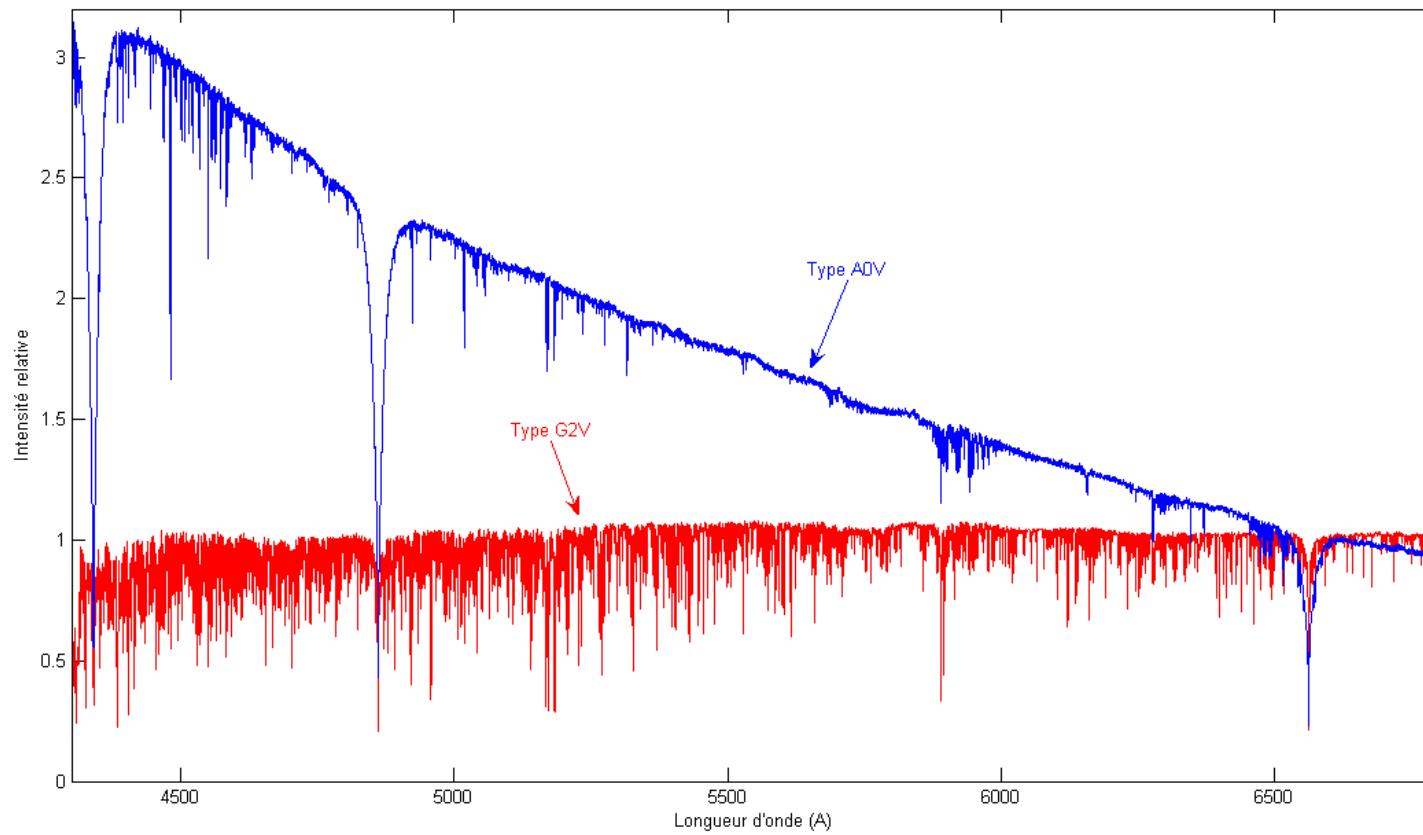
A la longueur d'onde  $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ ,  $FWHM = 0,44 \text{ angström}$

Précision de mesure absolue du centroïde d'une raie bien contrastée :  $FWHM / 20 = 0,02 \text{ \AA}$

Il manque un ordre de grandeur pour réaliser la mesure (un facteur 10 à gagner en précision) !

**Solution :**

- (1) Observer un grand nombre de raies stellaires simultanément**
- (2) Calculer le décalage Doppler de l'ensemble des raies (« moyenne »)**

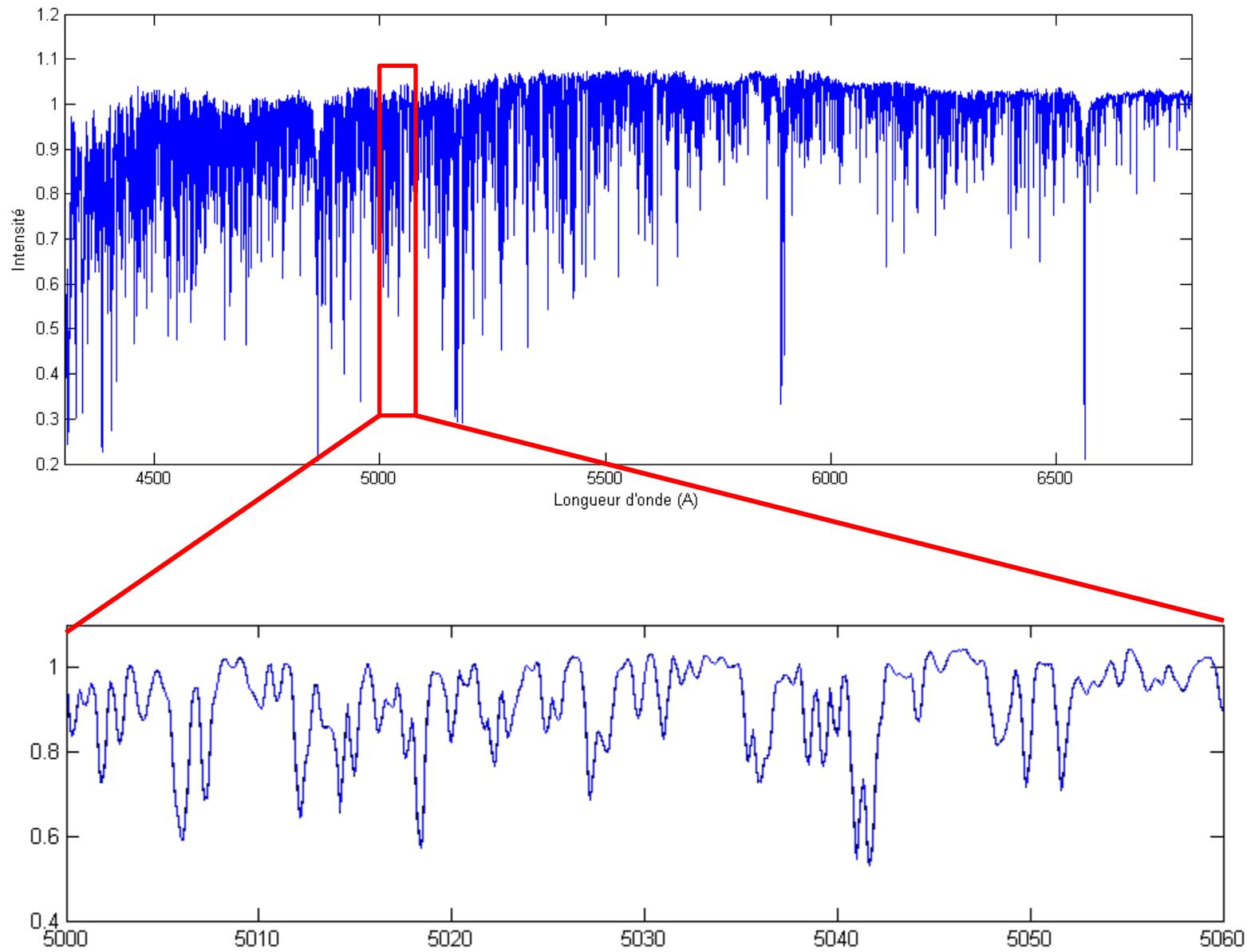


**Ceci implique :**

- (1) De sélectionner des étoiles dont le spectre est riche en raies (types F, G, K)**
- (2) D'observer un large domaine spectral (notamment dans le bleu car raies plus nombreuses)**
- (3) De réaliser un étalonnage spectral de haute qualité sur l'ensemble du spectre**

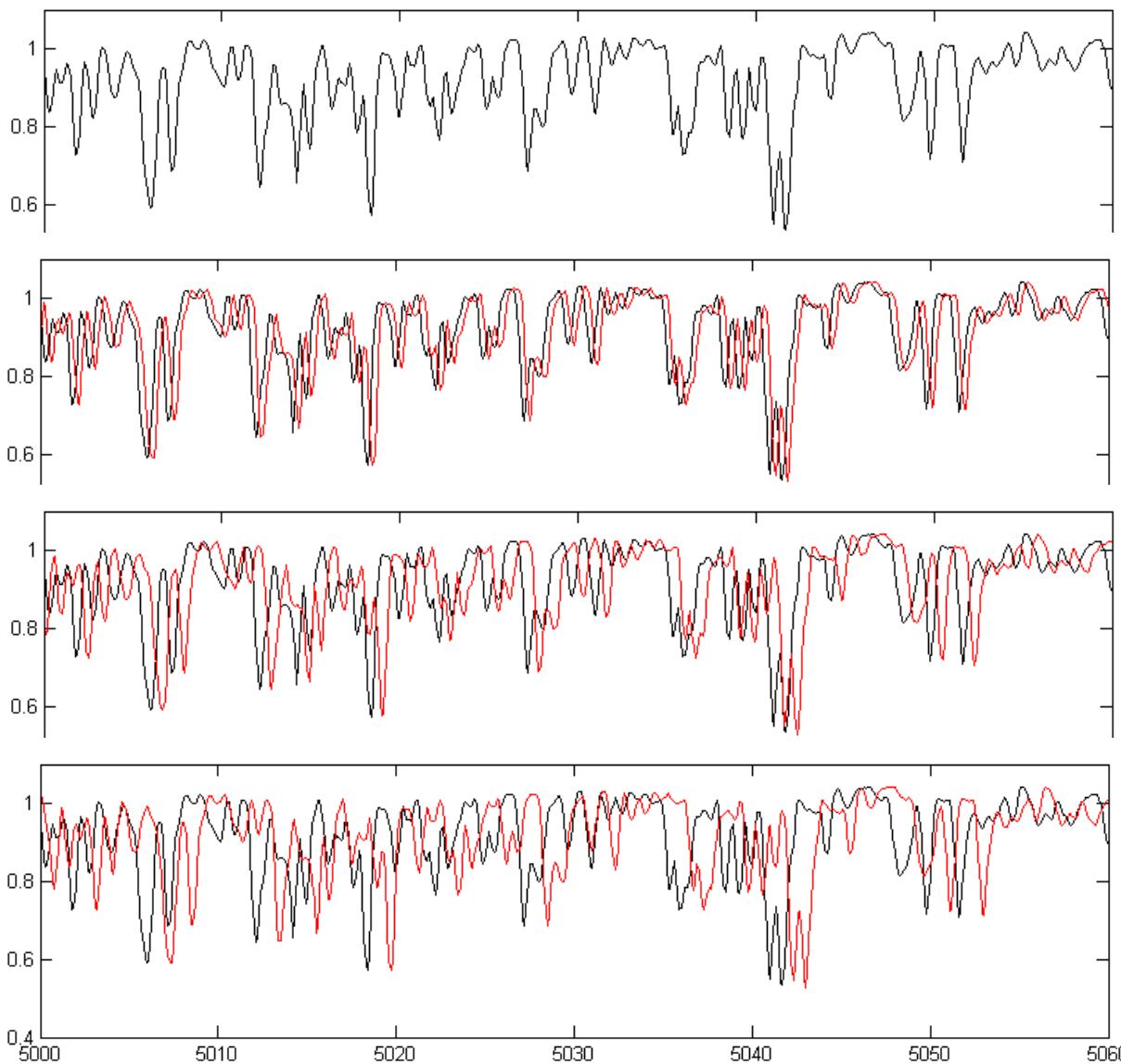
# Des centaines de raies disponibles sur une étoiles de type solaire

(exemple de spectre observé avec le spectrographe eShel à  $R = 10000$ )



## LA CLEF DE LA PRECISION : LA CROSS-CORRELATION

Corrélation croisée (cross-correlation) entre le spectre observé (en noir) et un spectre de référence (en rouge)



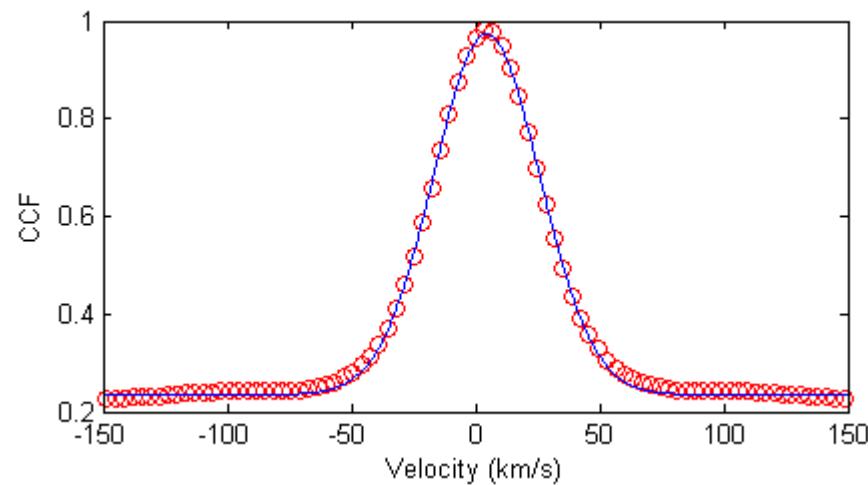
Corrélation : 100%

Corrélation : 90%

Corrélation : 60%

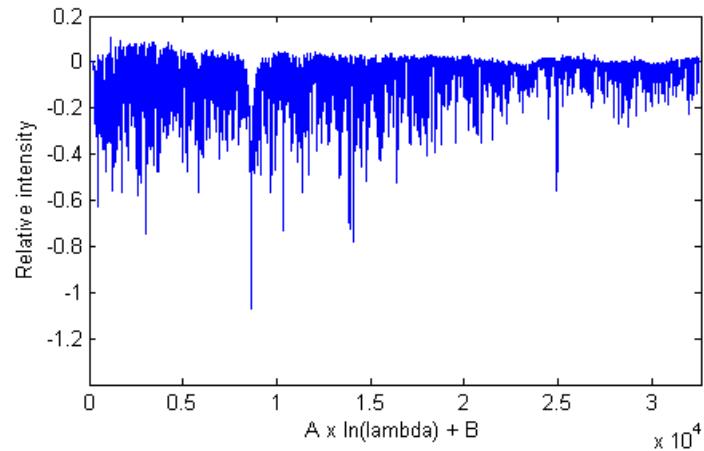
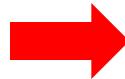
Corrélation : 30%

## Tracé de la fonction de corrélation croisée Cross Correlated Function = CCF

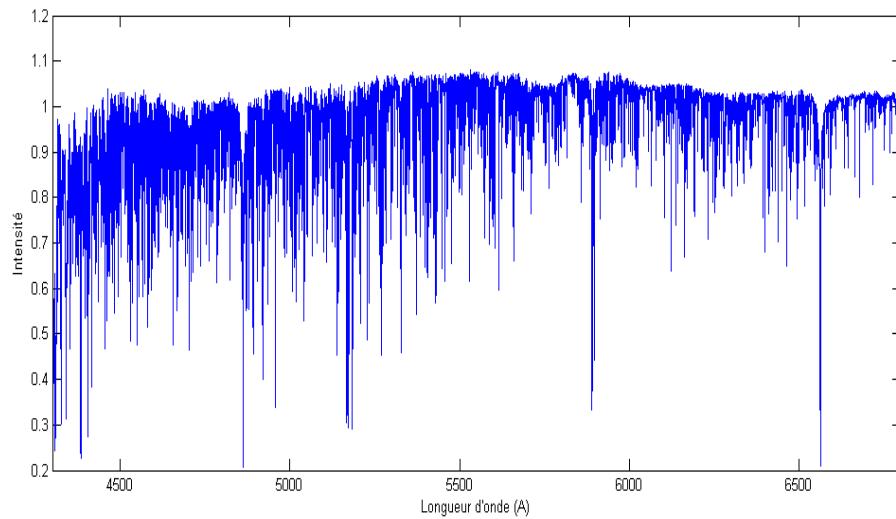


Attention, le calcul doit être effectué sur une base en vitesse, pas en longueur d'onde.

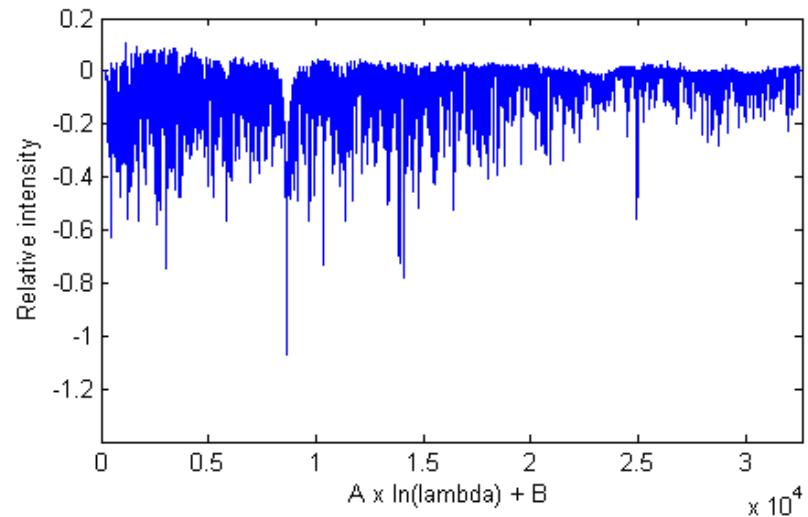
En effet, le décalage Doppler en longueur d'onde n'est pas constant (étirement) – il l'est sur une échelle de vitesse.



## La linéarisation en vitesse d'un spectre



Echelle en longueur d'onde  
Décalage en vitesse non linéaire



Echelle en vitesse (log naturel)  
Décalage en vitesse linéaire

$$n = A \times \ln(\lambda) + B = \text{rang du bin dans le spectre linéarisé}$$

Si  $N$  est le nombre de bin total choisi et si  $[\lambda_1, \lambda_2]$  est l'intervalle spectral analysé, alors

$$A = N / \ln(\lambda_2 / \lambda_1) \text{ et } B = -N \ln(\lambda_1) / \ln(\lambda_2 / \lambda_1)$$

Intervalle en vitesse correspondant à un intervalle de 1 bin =  $\Delta V = c \ln(\lambda_2 / \lambda_1) / N$   
avec  $c$  = vitesse de la lumière = 299792.458 km/s

Exemple :  $\lambda_1 = 4400 \text{ Å}$ ,  $\lambda_2 = 6445 \text{ Å}$ ,  $N = 32767 \rightarrow A = 85845$ ,  $B = -720194$  et  $\Delta V = 3,49 \text{ km/s}$

## Méthode pratique utilisée pour la présente étude

Corrélation croisée du spectre de référence et du spectre observé :  
le calcul de la CCF (Cross-Correlation Function ) est fait dans le domaine spatial  
(autre possibilité : domaine de Fourier)  
et dans l'espace des vitesses

Le spectre de référence est ici un vrai spectre stellaire observé à haut rapport signal sur bruit et de type spectral voisin de celui de l'étoile étudiée (masque de corrélation « naturel »)

La (ou les) étoile(s) de références sont choisie(s) pour être stable(s) en vitesse radiale.

On exclut du produit de corrélation les zones d'absorption de l'atmosphère (bandes telluriques H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>) et les raies de l'hydrogène (trop larges spectralement).

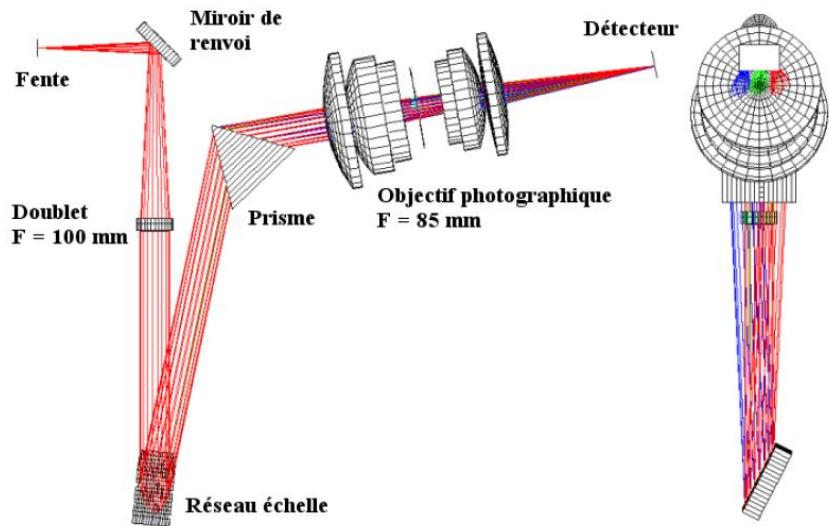
### Protocole d'observation :

**Un cycle de mesure : Thorium – Etoile référence - Thorium – étoile cible - Thorium – Etoile référence – Thorium**  
**1 point de mesure vitesse radiale = moyenne de 3 cycles indépendants**

Codage de la méthode Lomb-Scargle (périodogramme) pour trouver la période l'exoplanète  
(voir A. Cumming, G. Marcy, P. Butler, AJ, 526, 890, 1999 et M. Zechmeister, M. Kürster, A&A, 496, 577, 2009)

# Comment acquérir un spectre bien résolu sur un large domaine spectral ?

En exploitant un spectrographe échelle !

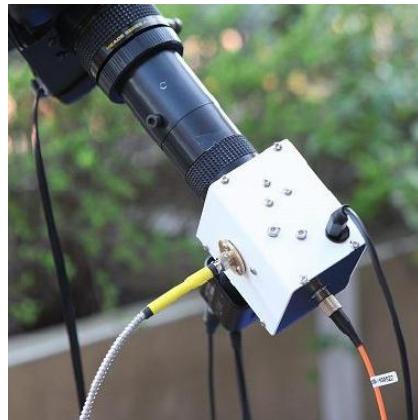


## Comment bien étalonné spectralement ?

En exploitant la technologie des fibres optiques !

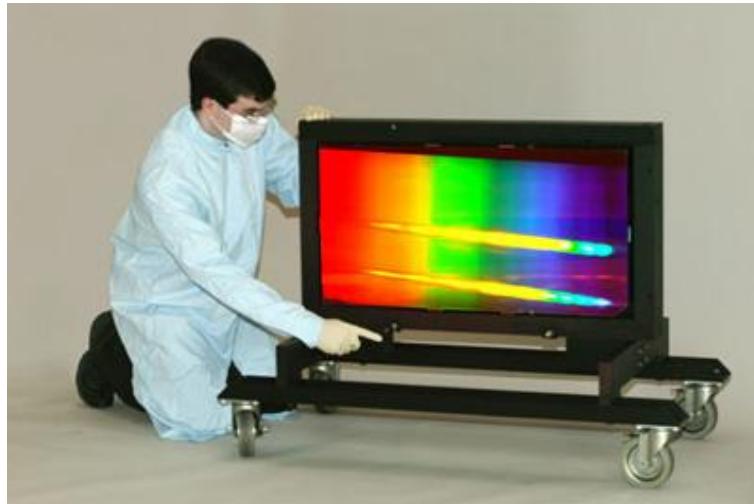


(on évite les biais induits par les flexions d'un spectrographes monté sur le télescope et le spectrographe peu être lourd et isolé thermiquement)

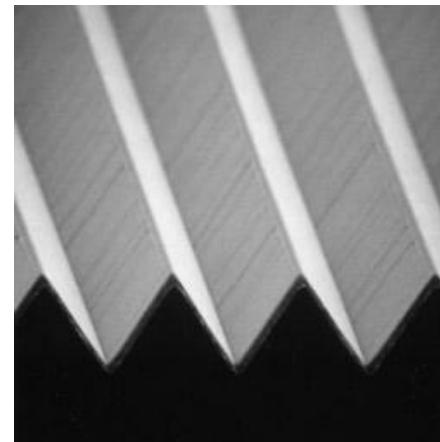


Interface télescope du spectrographe eShel

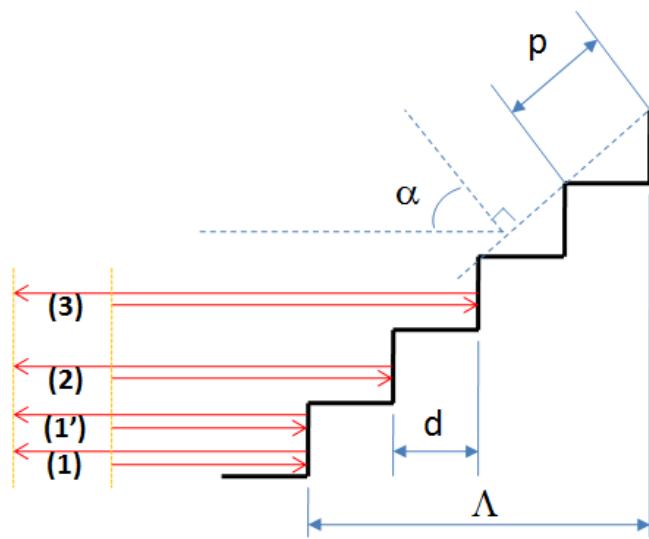
## Réseau échelle = profil de gravure rectangulaire utilisé sous une forte incidence (configuration « anti-blaze »)



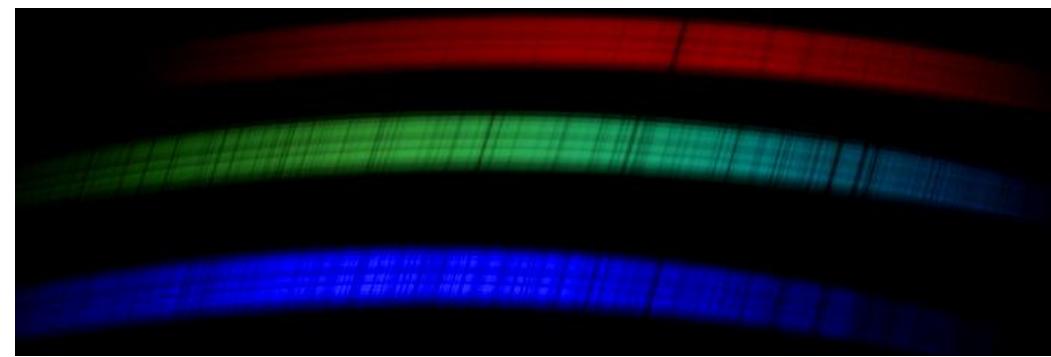
*Structure diffractive*



*Profil de gravure*



*Interférences en onde multiples*



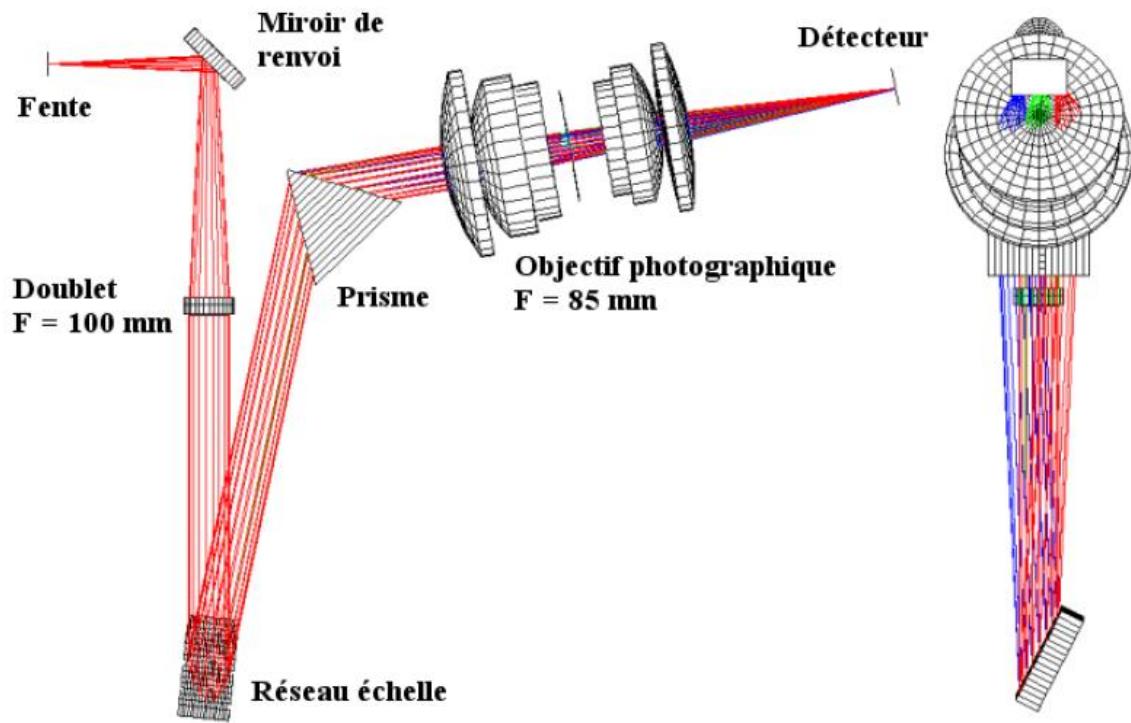
*Multiplexage spectral*

## Exemple de spectrographe échelle : eShel - R = 11000

(modèle commercial – Shelyak Instrument)

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

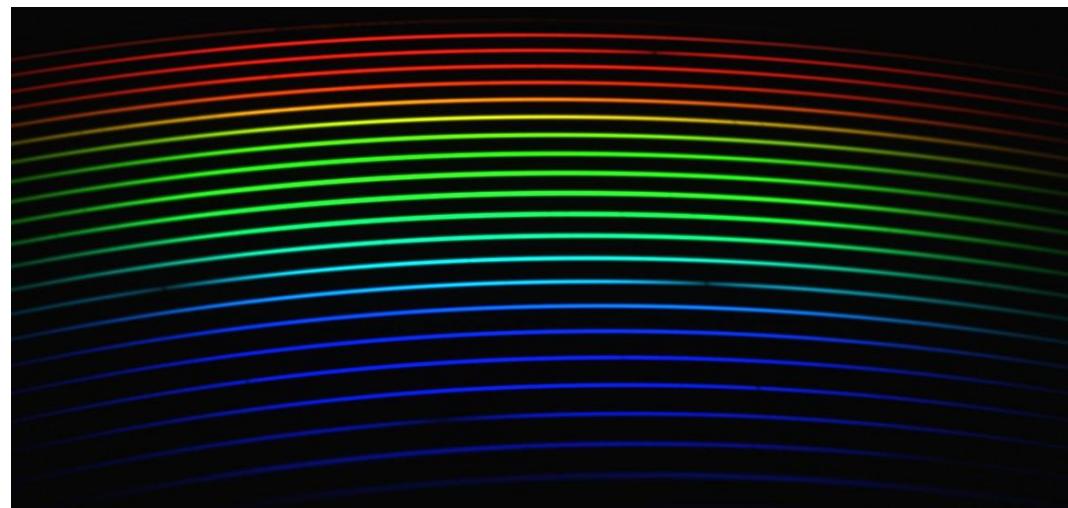
R = pouvoir de résolution  
 $\lambda$  = longueur d'onde de travail  
 $\delta\lambda$  = finesse spectrale



## Exemple de spectre échelle

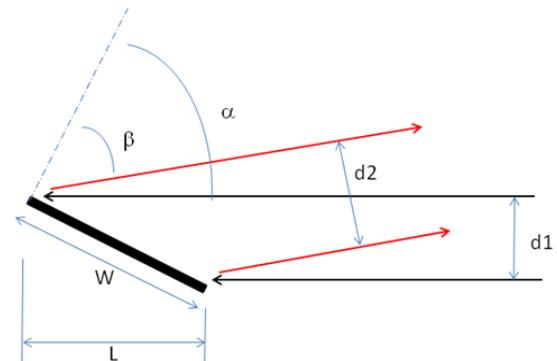
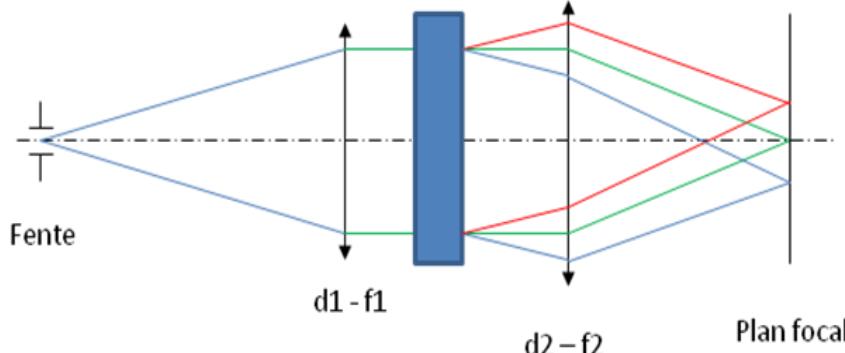
*Une succession d'ordres d'interférence*

*Ce spectre 2D ce lit comme les lignes de texte dans un livre !*



# Le pouvoir de résolution spectrale (R)

proportionnel au produit de la densité de gravure et de l'ordre de diffraction



$$\frac{\lambda}{d\lambda} = R = \frac{d_1}{\phi D} \left( \tan \alpha + \frac{\sin \beta}{\cos \alpha} \right)$$

Avec  $\phi$  = largeur angulaire de la fente dans l'espace objet (en radians)

$D$  = le diamètre du télescope d'entrée

Si  $k$  est l'ordre de diffraction et  $d_1$  le diamètre de la pupille interne:

Mode Littrow :

$$R = \frac{2 d_1 \tan \alpha}{\phi D}$$

Autre forme générale :

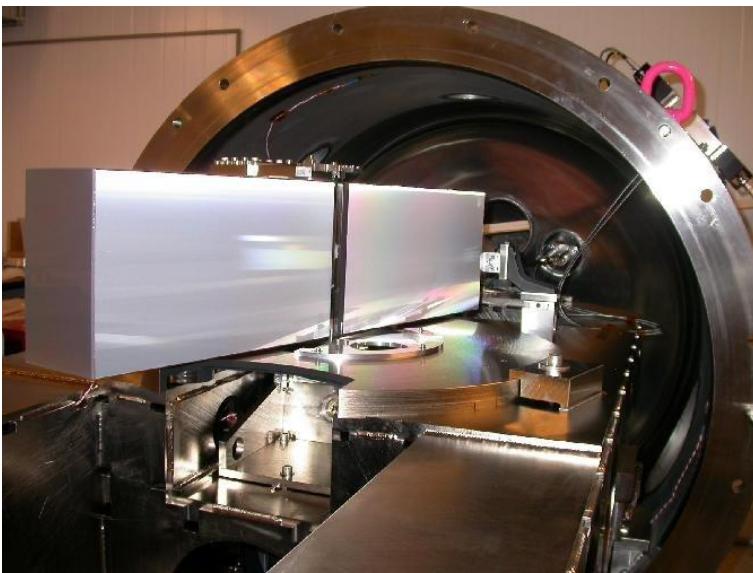
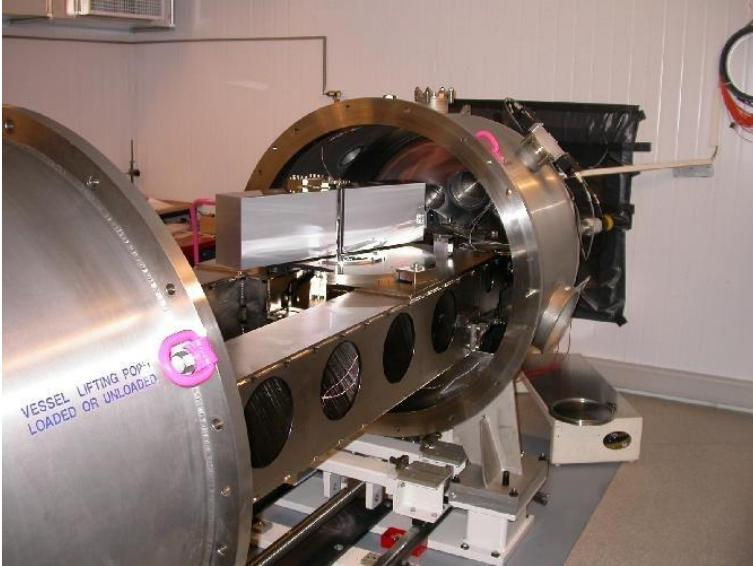
$$R = \frac{k m d_1}{\phi D \cos \alpha}$$

Réseau échelle type :  
 $\alpha = 63$  à  $72^\circ$  et  $k$  compris entre 20 et 80)

Note : le pouvoir de résolution est aussi inversement proportionnel au diamètre de la pupille d'entrée ( $D$ )

# Le spectromètre HARPS

(télescope de 3,6 m La Silla – ESO)



Le plus grand réseau échelle jamais fabriqué :  
2 X 420 mm x 214 mm  
(Richardson USA)

## Pouvoir de résolution $R = 110\,000$

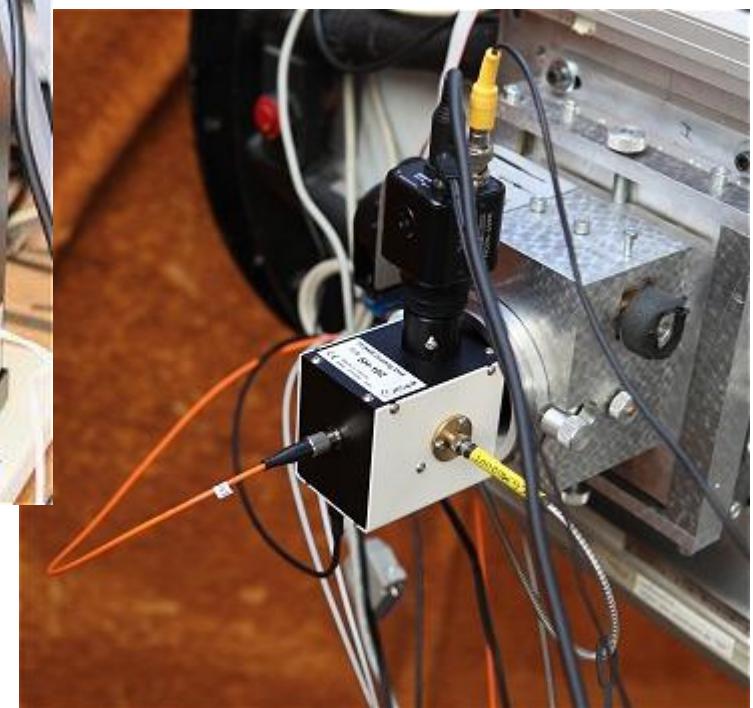
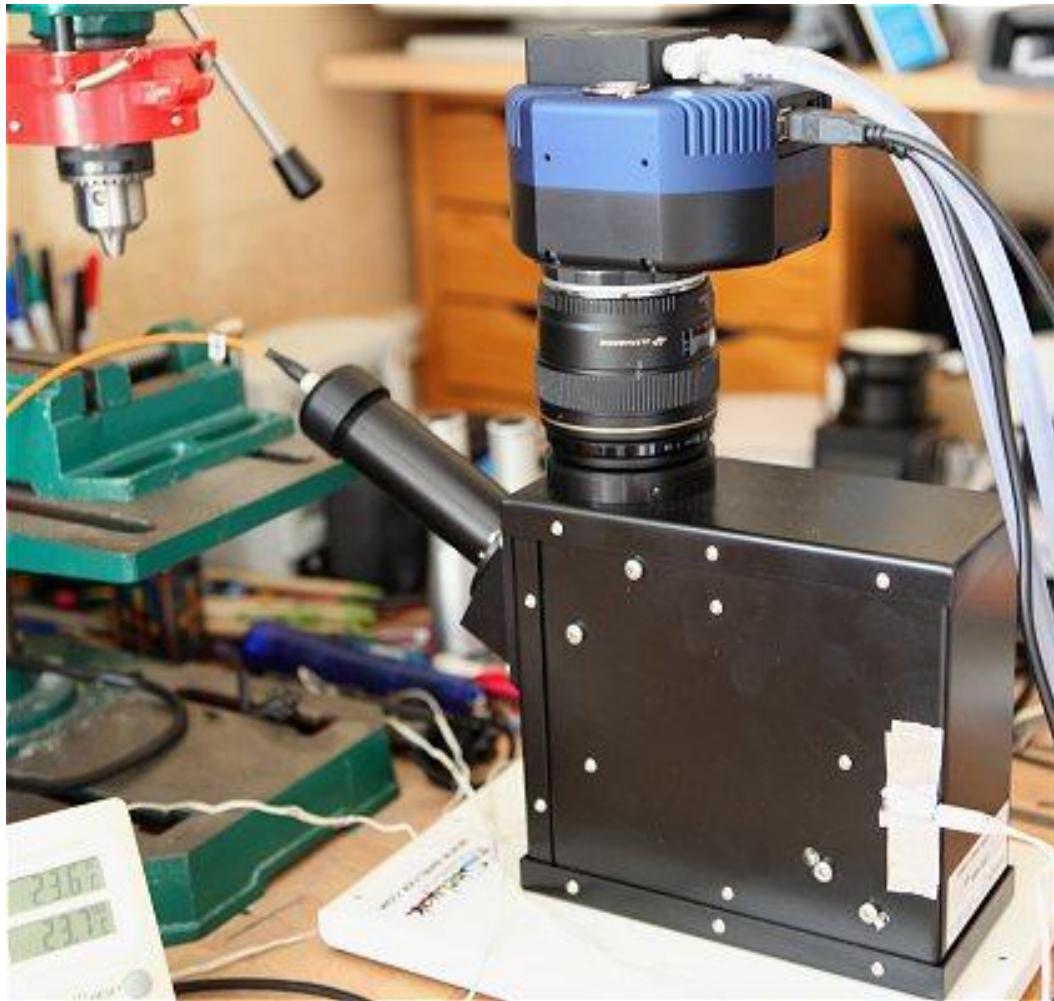
SNR = 45 pour une étoile de magnitude 8 par pixel en une minute de pose ( $\Delta\lambda = 0.0147 \text{ \AA}$  à  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ )

**Précision en routine de l'ordre de 1 m/s**  
**Précision court terme de qq centimètres /s**

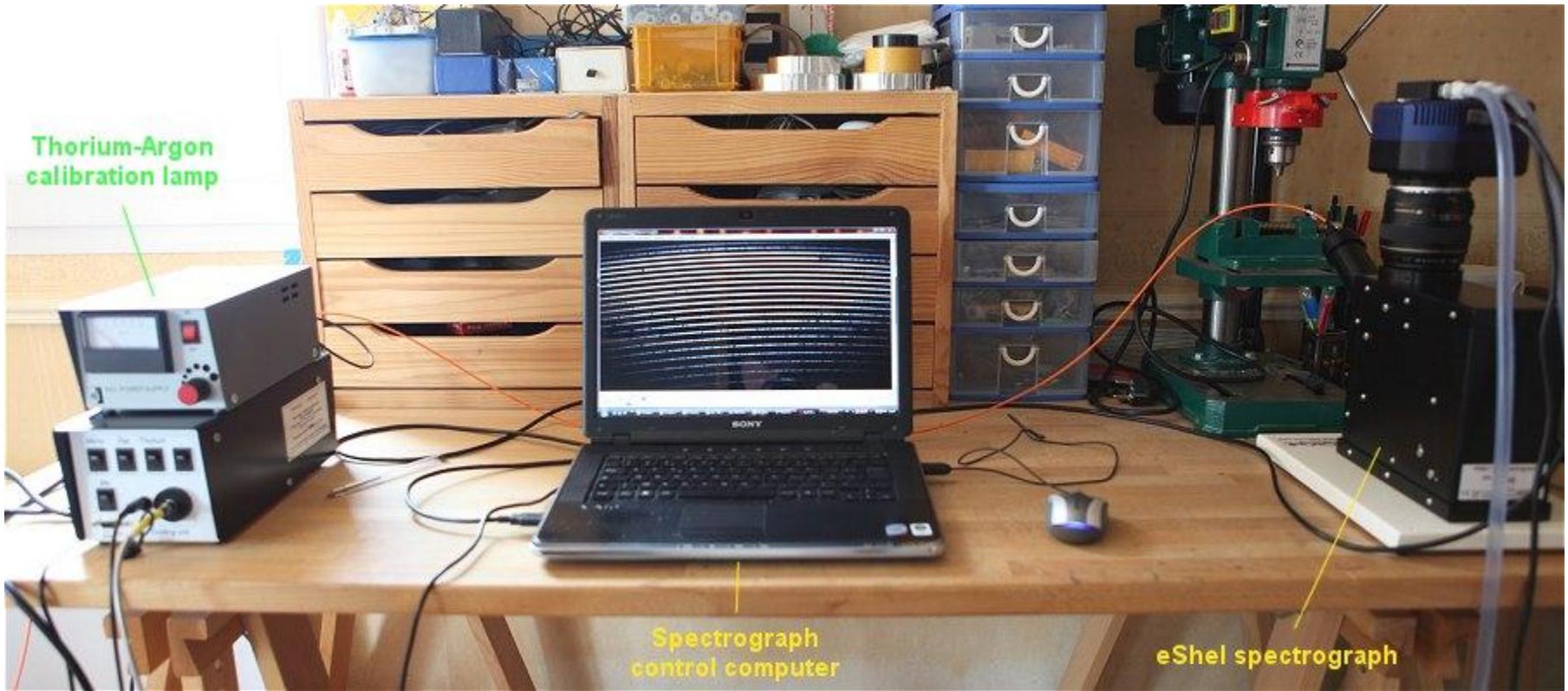
*Noter le fort angle d'incidence sur la surface du réseau*

# Le spectrographe eShel

(société Shelyak Instrument)



## Utilisation du spectrographe eShel (1/3)



Pas de flexions mécaniques

Environnement thermique relativement stable

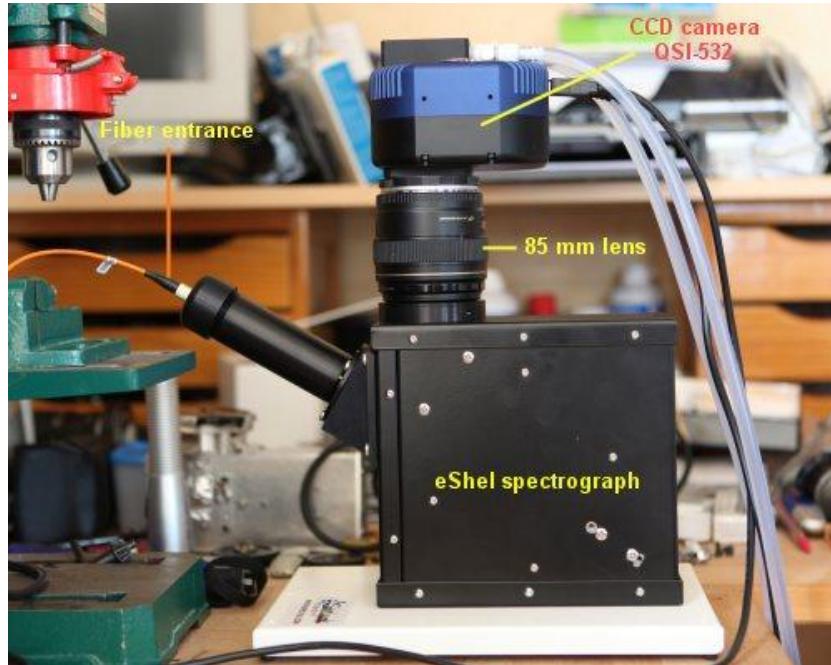
Caméra CCD QSI-532  
(CCD Kodak KAF3200)  
Refroidissement aidé par circulation liquide

### Repères :

- Une variation de 1 degré Celsius = décalage spectral de 300 m/s
- Une variation de 1 mBar = décalage spectral de 90 m/s

Rappel : la demi amplitude induite par de tau Boo b est de +/- 460 m/s seulement !

## Utilisation du spectrographe eShel (2/3)



Spectrographe détaché du télescope  
(environnement thermique contrôlé, pas  
de flexions mécaniques)

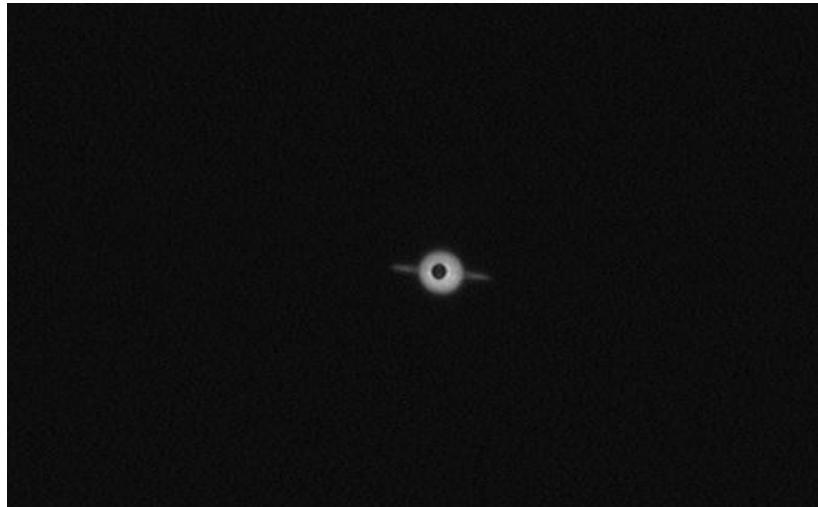


Fibre optique  
Très faible masse sur le télescope (et mise en route rapide)

## Utilisation du spectrographe eShel (3/3)



Bonnette : trou d'entrée du spectrographe de 50 microns



Centrage très précis des objets observés

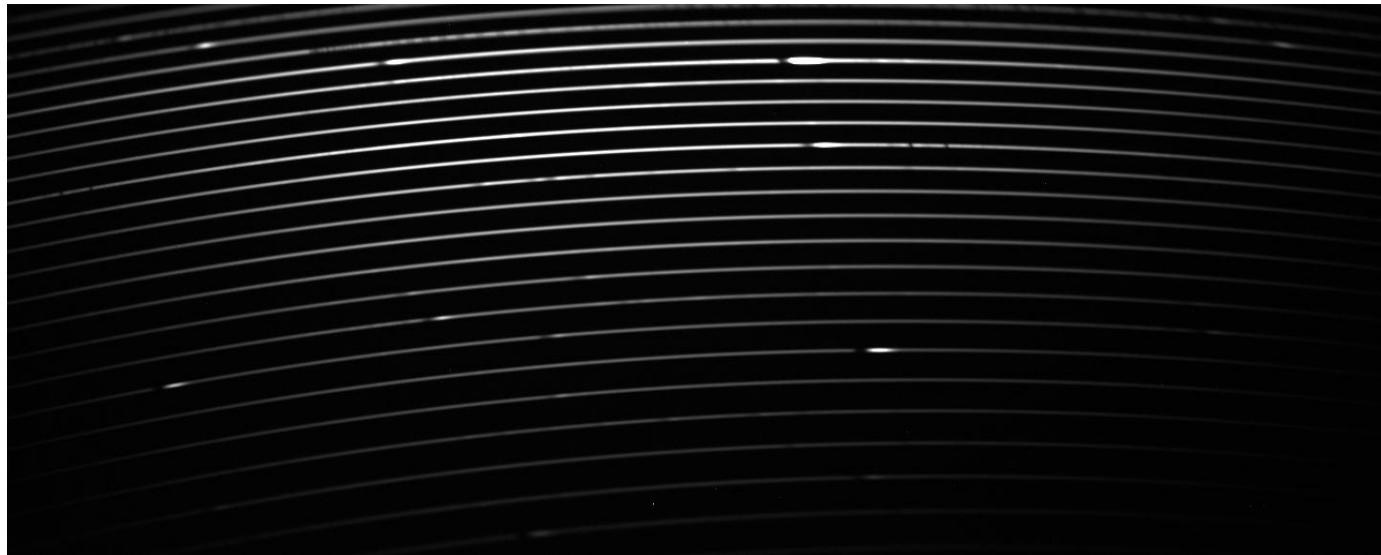


Forte automatisation (étalonnage spectral, lampe ThAr)

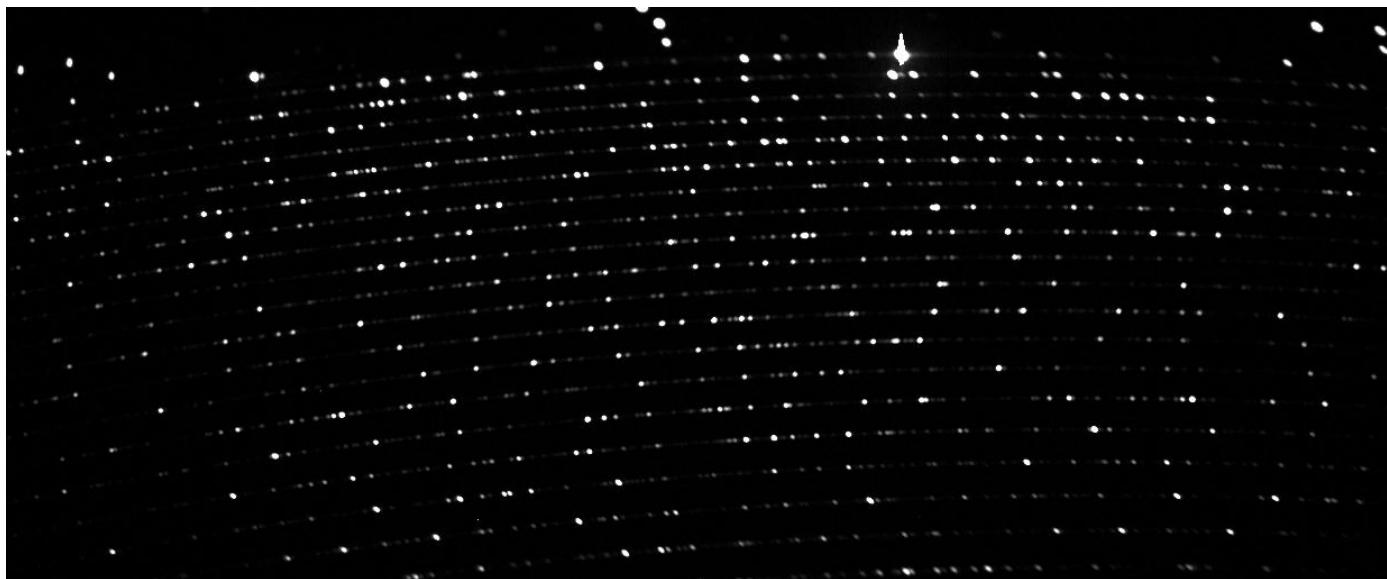


Refroidissement efficace (circuit d'eau sur caméra QSI)

## Criticité de l'étalonnage spectral (usage d'une lampe ThAr)



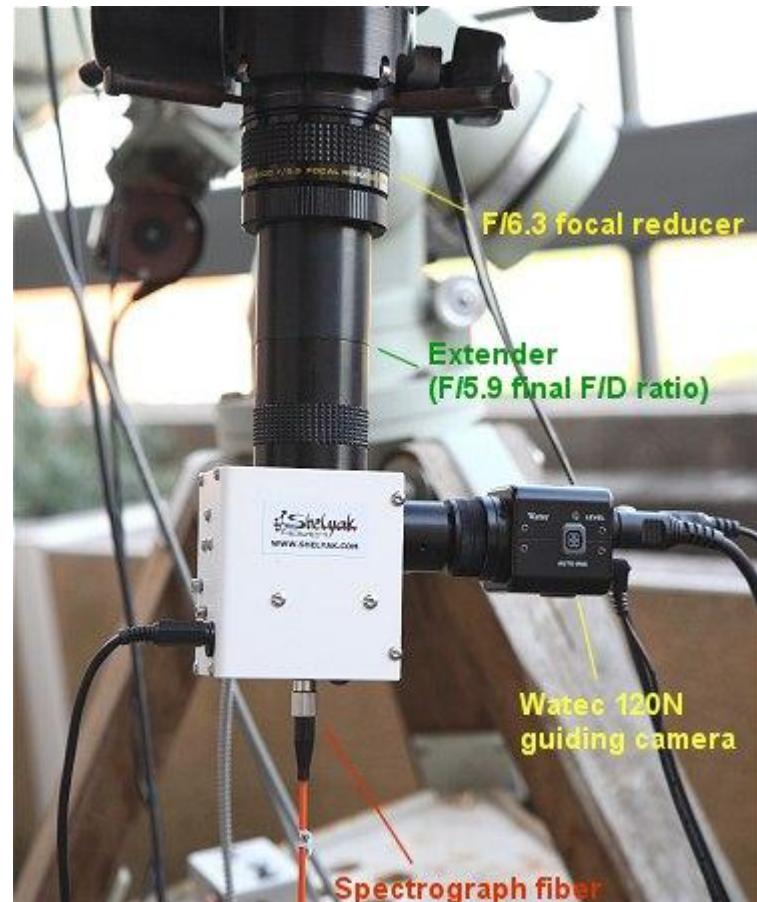
Spectre de l'étoile *P Cyg* (télescope C11)



Spectre d'une lampe d'étalonnage Thorium-Argon

## Le télescope

(C11 - D = 0.28 m)



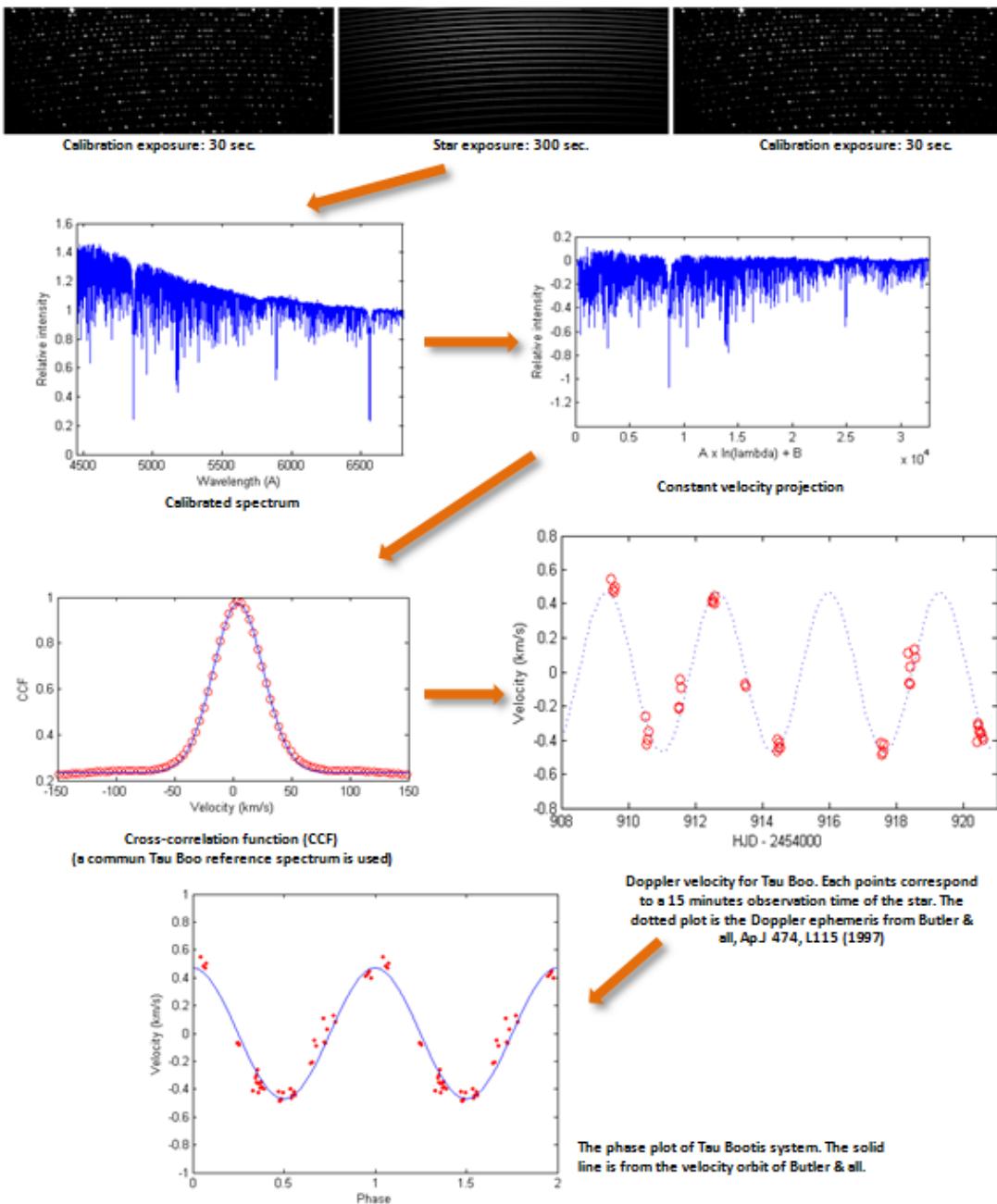
$$\delta V = A \frac{\sqrt{FWHM}}{S/B}$$



La précision de mesure en vitesse est inversement proportionnelle au rapport signal sur bruit (S/B)  
Privilégier les gros télescopes (comme souvent ;-)!

A = constante fonction de l'instrument

# Acquisition et traitement



Ecriture d'un programme informatique de traitement automatisé et précis (périodogramme Lomb-Scargle, corrections héliocentrique, CCF, ...)

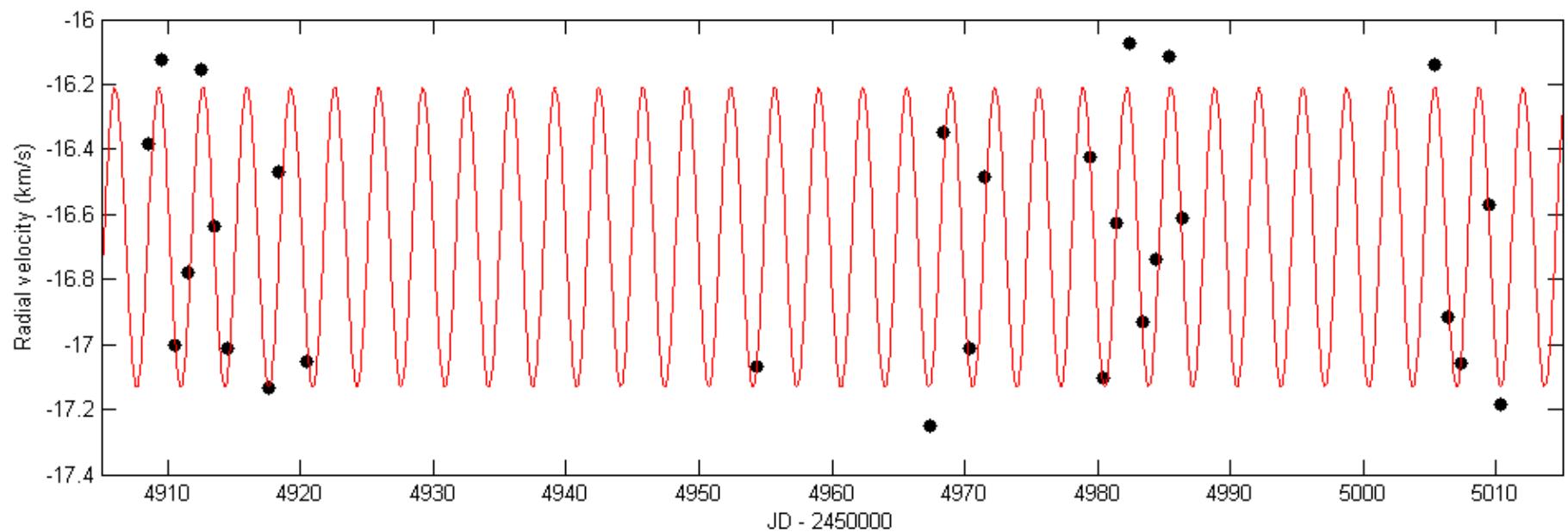
## Repères :

- **Vitesse de la Terre autour du Soleil = 29,8 km/s en moyenne, à corriger.**
- **Rotation de la Terre sur elle-même = 464 m/s, à corriger.**
- **Mesure du temps (variation de la vitesse de la Terre 1 m/s par minutes de temps).**
- **Un point de mesure représente 2 heures d'observations (alternances étoile / ThAr)**

## Détection de tau Boo b



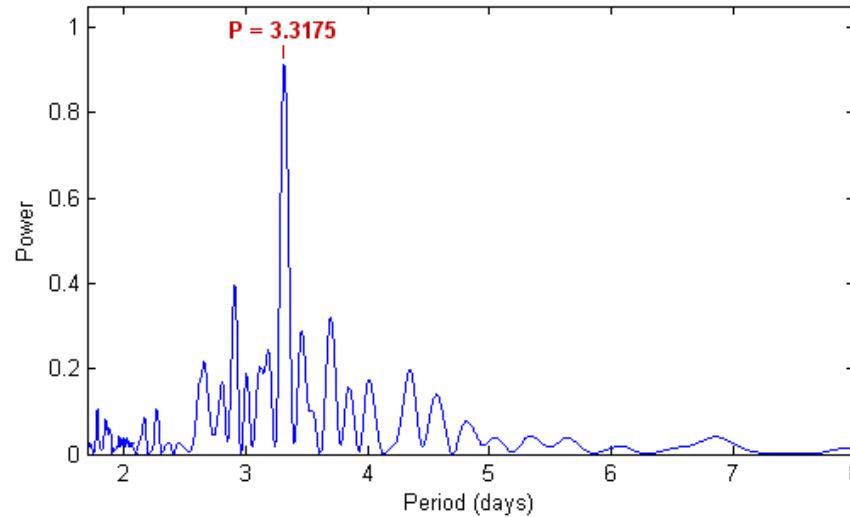
Localisation de tau Boo dans le ciel



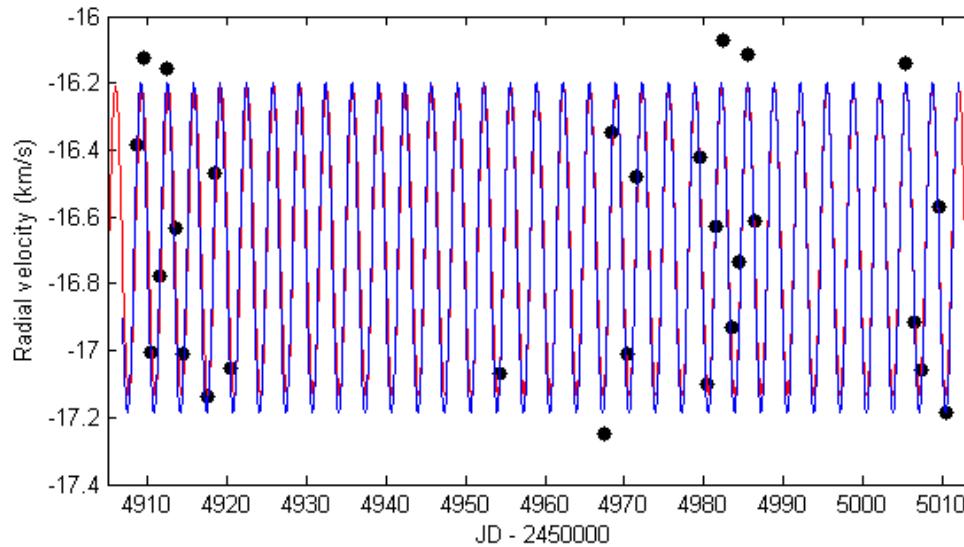
Vitesse radiale mesurée en fonction du temps (points noirs)  
(en rouge, l'éphéméride théorique, période de 3,312 jours)

*Repère : le déplacement des raies à détecter vaut typiquement 1/100 de la taille des pixels !*

## Evaluation des paramètres observationnels de la planète

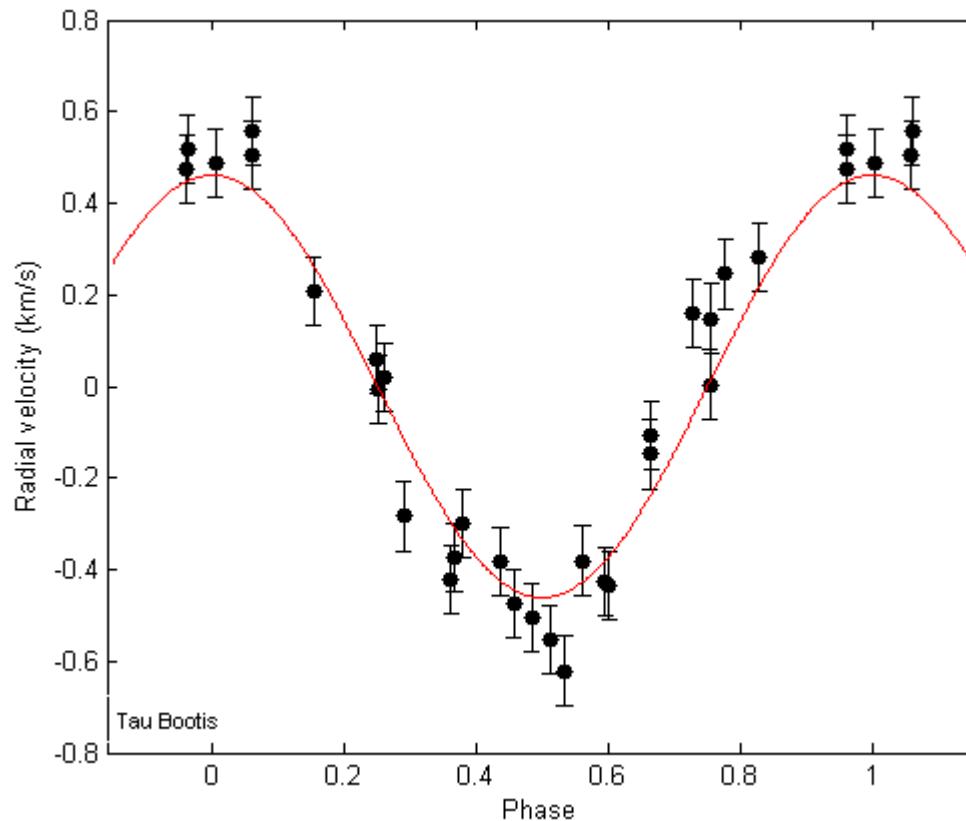


Périodogramme. Période orbitale trouvée : 3.317 jours. Valeurs officielle :  
3,312 jours. Ecart de 0,1% seulement !



Superposition de l'éphéméride calculée et de l'éphéméride officiel.

## Le résultat final



Courbe de phase du système tau Boo  
(la barre d'erreur représente 75 m/s)

## Paramètres physiques déduits de l'observation de l'exoplanète tau Boo b

**Masse projetée (relativement à Jupiter) :**

$$m[M_{Jup}] \sin i = \frac{K[m/s] M_*^{2/3}[M_\odot] P^{1/3}[days]}{203}$$

$M_*$ [ $M_\odot$ ] = masse de l'étoile relativement au Soleil

$P$  = période orbitale observée

$K$  = demi-amplitude de vitesse observée

**Application :**

$$m[M_{Jup}] \sin i = \frac{494 \times 1.35^{2/3} \times 3.3175^{1/3}}{203} \simeq 4.43$$

*Valeur officielle = 4,12 x masse Jupiter*

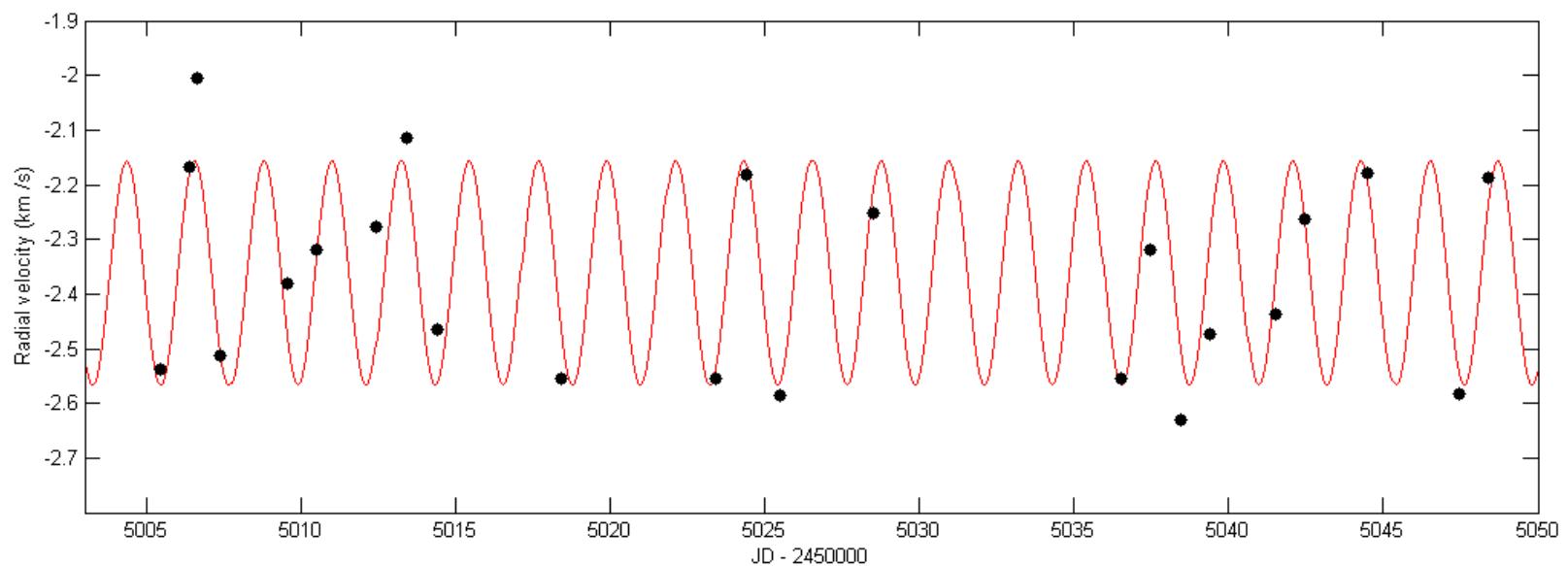
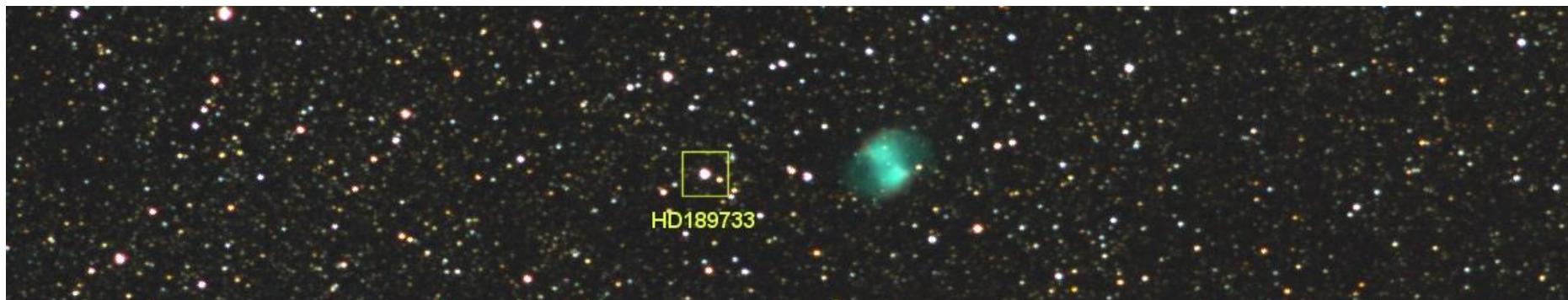
**Cette formule permet de calculer le demi-grand axe de tau Boo b**

Demi-grand axe :  $a[UA] = 0.0196 P^{2/3}[days] M_*^{1/3}[M_\odot]$

$$a[UA] = 0.0196 \times 3.3175^{2/3} \times 1.35^{1/3} \simeq 0,0479$$

(valeur adopté dans la littéraire  $a = 0,0481$  UA)

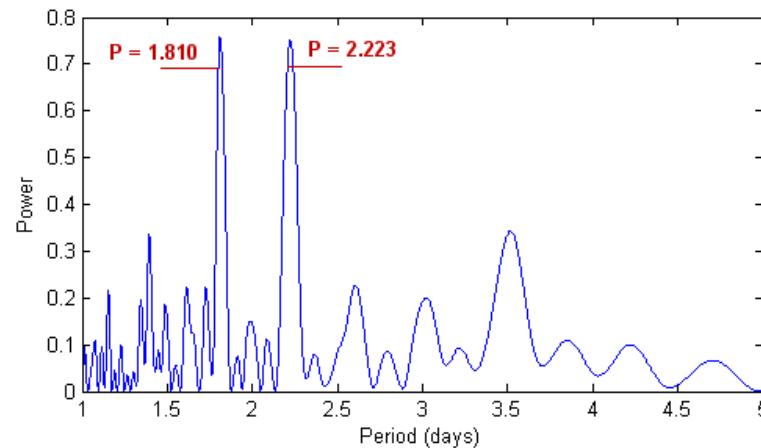
# Observation de la planète extrasolaire HD189733 b



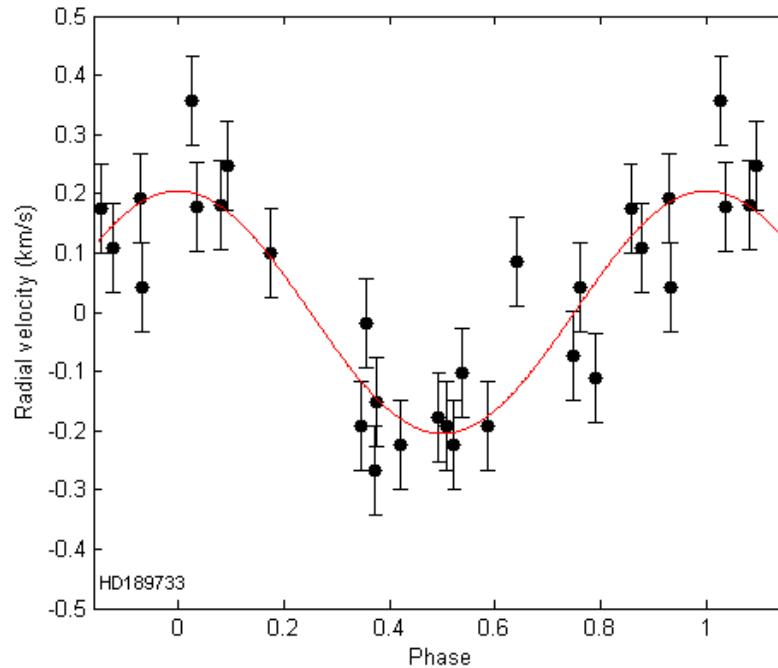
Vitesse radiale observée

Période = 2.218573 jours, demi-amplitude = 205 m/s

# Observation de la planète extrasolaire HD189733 b



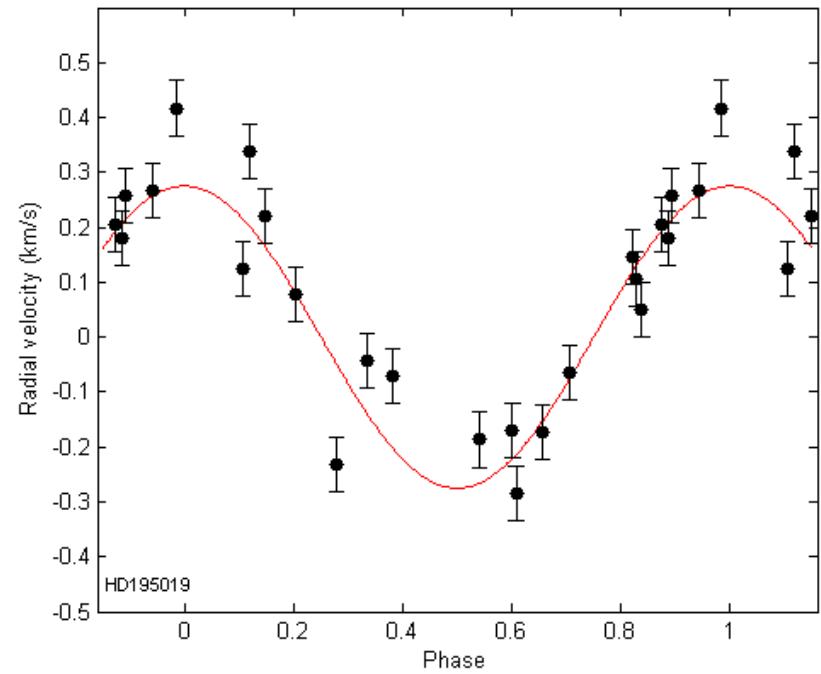
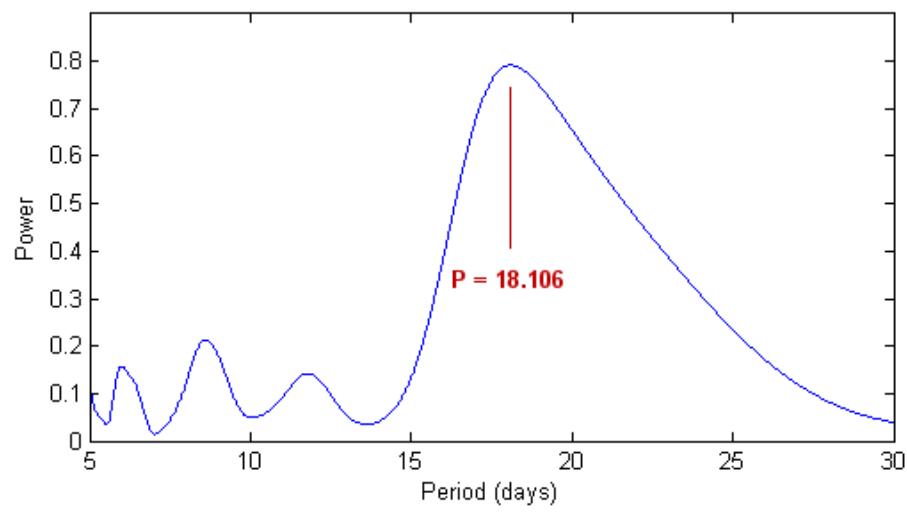
Périogramme (la double période est un effet de l'échantillonnage)



Courbe de phase

## Assez facile : HD195019 b

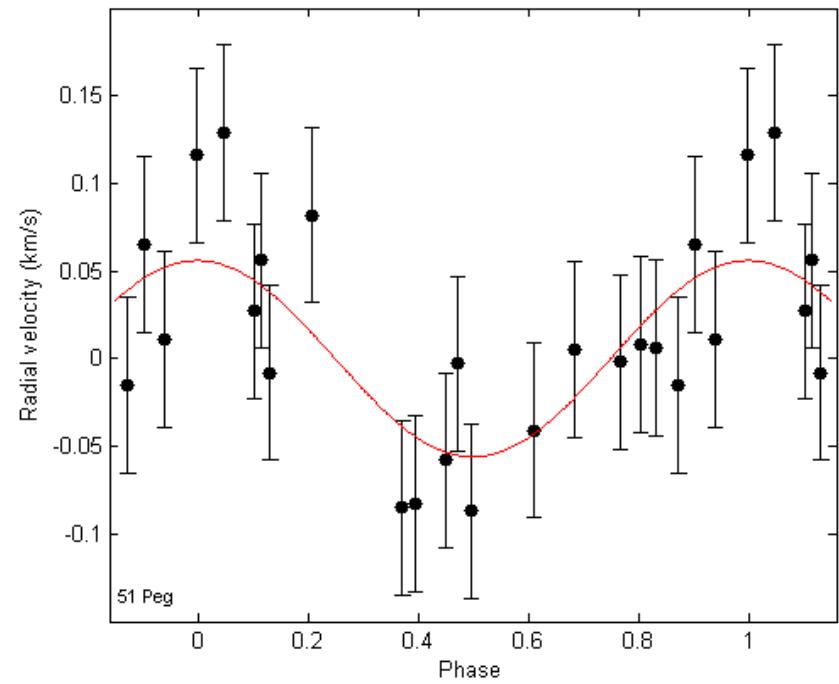
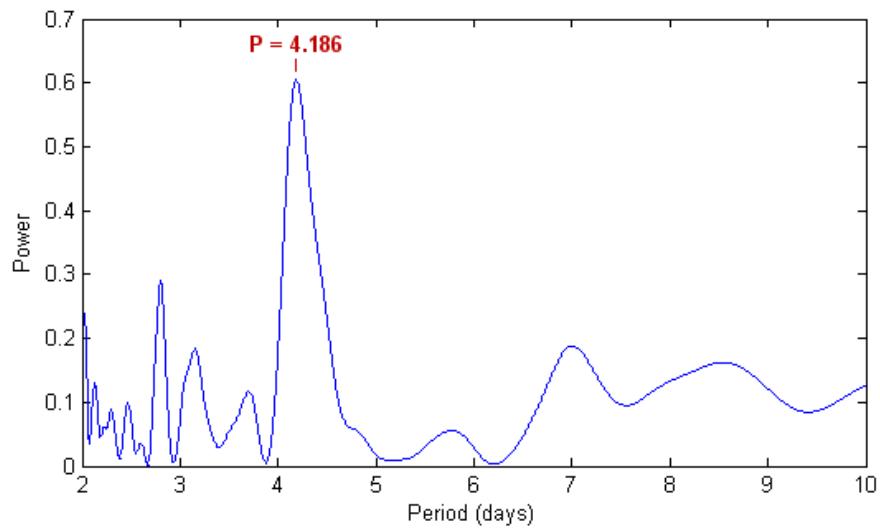
Magnitude 6,9 – Période = 18,2 jours –  $K = 275 \text{ m/s}$



Barre d'erreur de +/- 50 m/s

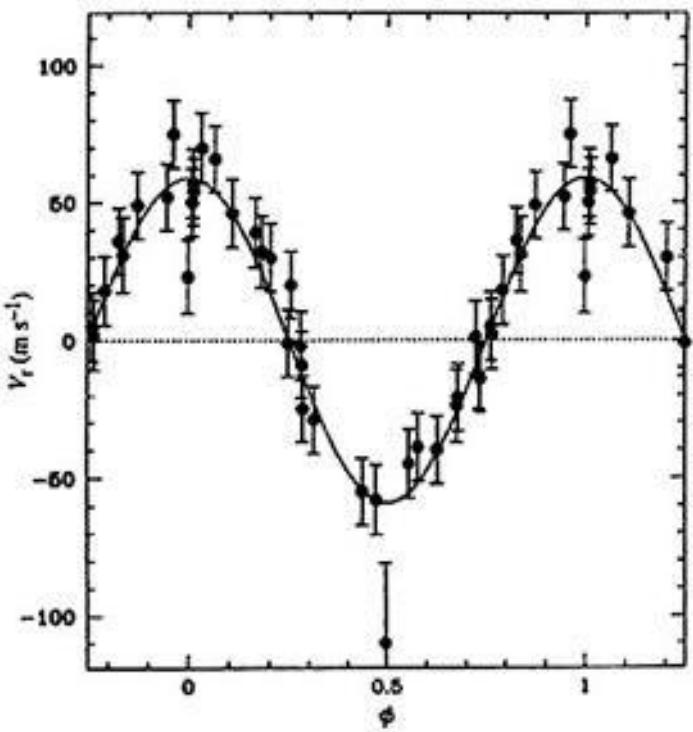
## Assez difficile : 51 Peg b (un objet mythique !)

Magnitude 5,5 – Période = 4,23 jours –  $K = 56 \text{ m/s}$

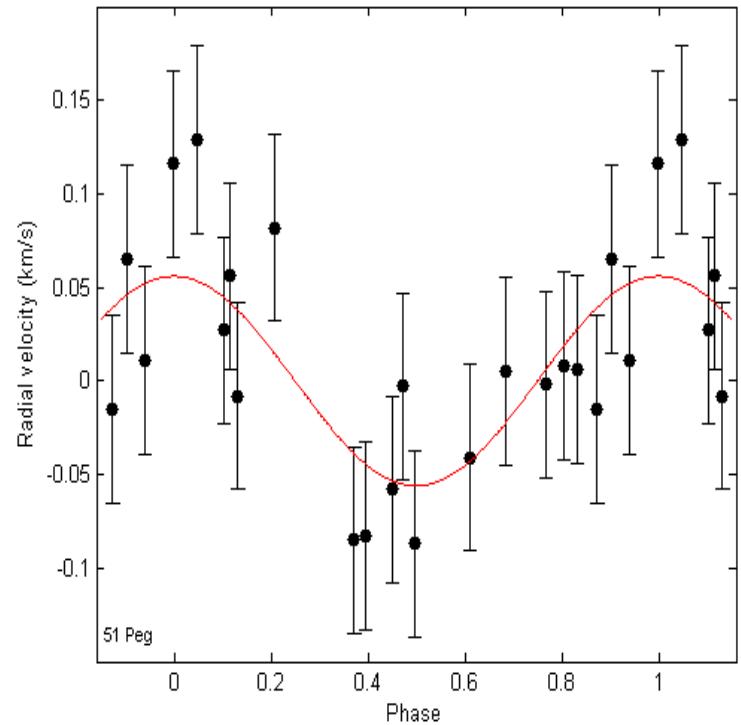


Barre d'erreur de +/- 50 m/s

## Le sens de l'histoire...



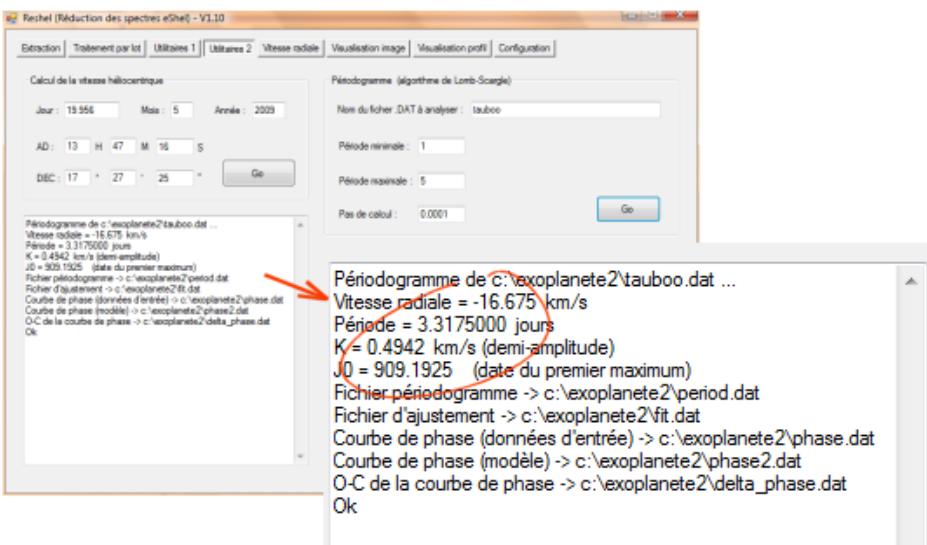
**51 Pégase**  
Michel Mayor, Didier Queloz  
**Septembre 1994 – Septembre 1995**  
Spectrographe Elodie – Télescope de 1,93 m  
Observatoire de Haute-Provence



**51 Pégase**  
Christian Buil  
**24 juin 2009 – 5 aout 2009**  
Spectrographe eShel – Télescope de 0,28 m  
Observatoire de Castanet-Tolosan

# Observations réalisées en milieu urbain et avec petit télescope (D = 0, 28 m) !

## Castanet Tolosan – Banlieue de Toulouse (France)



## Erreur de mesure en vitesse radiale (RV) :

$$\delta RV = \frac{\sqrt{FWHM}}{(S/B)\sqrt{W}}$$

FWHM = finesse spectrale

S/B = rapport signal sur bruit

W = largeur spectrale observée

### Evaluation pour eShel :

| Magnitude | Celestron 11 - f/5.9 | 60 cm - f/3.5 |
|-----------|----------------------|---------------|
| 3         | 37 m/s               | 18 m/s        |
| 4         | 56 m/s               | 28 m/s        |
| 5         | 95 m/s               | 46 m/s        |
| 6         | 175 m/s              | 75 m/s        |
| 7         | 360 m/s              | 140 m/s       |

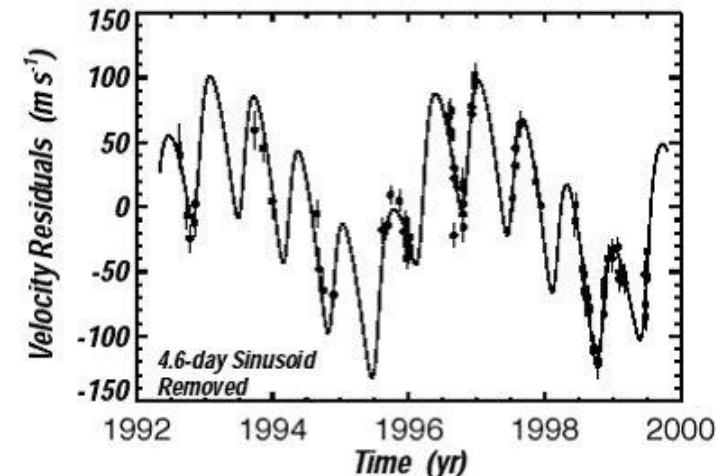
(erreur de mesure à 3 sigma)

## Possibilités de découvertes...

- Observation d'étoiles chaudes (type A ou B)
- Observation sur de longues périodes
- ...

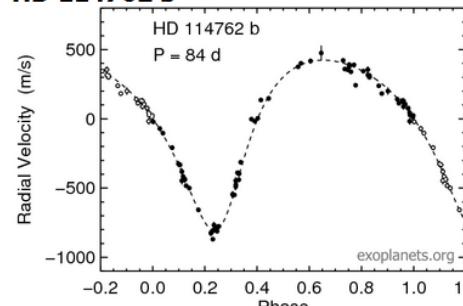
## et les produits dérivés...

- Observation des pulsations (RR Lyr, ...)
- Observation de la surface des étoiles (imagerie Doppler)
- ...



*Système Upsilon And. Trois planètes de périodes 4,6 jours, 241,2 jours et 1266,6 jours.*

### HD 114762 b



[NSTED Velocities and Light Curves](#)

#### Discovery and References

|                        |                                  |
|------------------------|----------------------------------|
| First Publication Date | 1989                             |
| Method of Discovery    | RV                               |
| Orbit Reference        | <a href="#">Butler 2006</a>      |
| First Reference        | <a href="#">Latham 1989</a>      |
| Star Type Reference    | <a href="#">Valenti 2005</a>     |
| Star Mass Reference    | <a href="#">Valenti 2005</a>     |
| Parallax Reference     | <a href="#">van Leeuwen 2009</a> |
| EPE Link               | <a href="#">HD 114762</a>        |
| NSTED Link             | <a href="#">64426</a>            |
| SIMBAD Link            | <a href="#">HD 114762</a>        |

#### Orbital Parameters

|                         |            |                 |
|-------------------------|------------|-----------------|
| Msin(i)                 | [mjupiter] | 11.7±0.843      |
| Semi-Major Axis         | [au]       | 0.363           |
| Orbital Period          | [days]     | 83.888±0.0086   |
| Velocity Semiampplitude | [m/s]      | 615±6.7         |
| Orbital Eccentricity    |            | 0.336±0.0091    |
| Argument of Periastron  | [deg]      | 202±1           |
| Time of Periastron      | [jd]       | 2449805.4±0.370 |

#### Orbital Fit Properties

|                     |      |
|---------------------|------|
| Reduced Chi Squared | 1.21 |
| # of Observations   | 45   |
| RMS of Velocities   | 24   |

#### Stellar Properties

|                |                           |             |
|----------------|---------------------------|-------------|
| Star Name      | <a href="#">HD 114762</a> |             |
| Spectral Type  | F9V                       |             |
| Binary Flag    | 1                         |             |
| Mass of Star   | [msun]                    | 0.89±0.0895 |
| [Fe/H]         |                           | -0.65±0.03  |
| Teff           | [k]                       | 5950±44     |
| $\log_{10}(g)$ |                           | 4.54±0.06   |
| Vsin(i)        | [km/s]                    | 1.8±0.5     |
| Components     |                           | 1           |

#### Stellar Magnitudes

|                      |       |
|----------------------|-------|
| V mag                | 7.3   |
| B-V                  | 0.525 |
| 2MASS J              | 6.144 |
| 2MASS H              | 5.887 |
| 2MASS K <sub>S</sub> | 5.812 |

#### Coordinates and Catalogs

|                     |                              |           |
|---------------------|------------------------------|-----------|
| RA (h:m:s)          | <a href="#">13:12:20.099</a> |           |
| DEC (d:m:s)         | <a href="#">+17:31:01.66</a> |           |
| Parallax            | [mas]                        | 25.9±0.76 |
| Distance to Star    | [pc]                         | 39±1.14   |
| Hipparcos Catalog # |                              | 64426     |

Exemple  
d'exoplanète  
« facile »



**Merci !**



