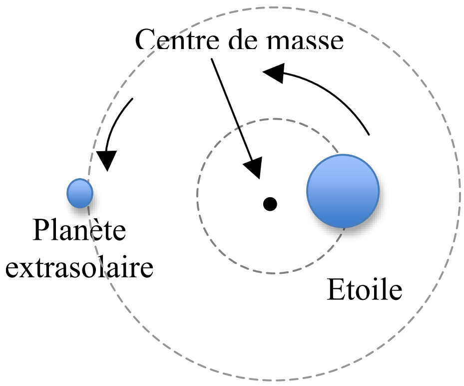
Détection de planètes extrasolaires : méthode des vitesses radiales

Cet exercice a été préparé à l'origine par Roger Ferlet (Institut d'astrophysique de Paris) et Michel et Suzanne Faye, qui l'ont testé en lycée. Il a été mis à jour par S. Bertone, G. Chagnon et A.-L. Melchior.

Dans cet exercice, nous expliquons comment une planète invisible peut être détectée en mesurant le déplacement de son étoile. La méthode des vitesses radiales utilise le fait qu'une étoile avec une planète tourne autour du centre de masse du système et non pss sur elle-même.



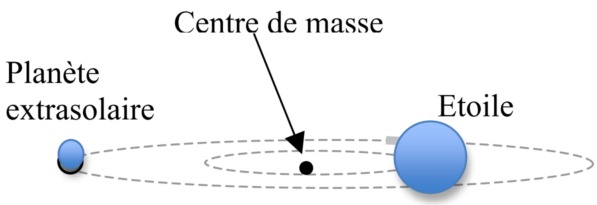
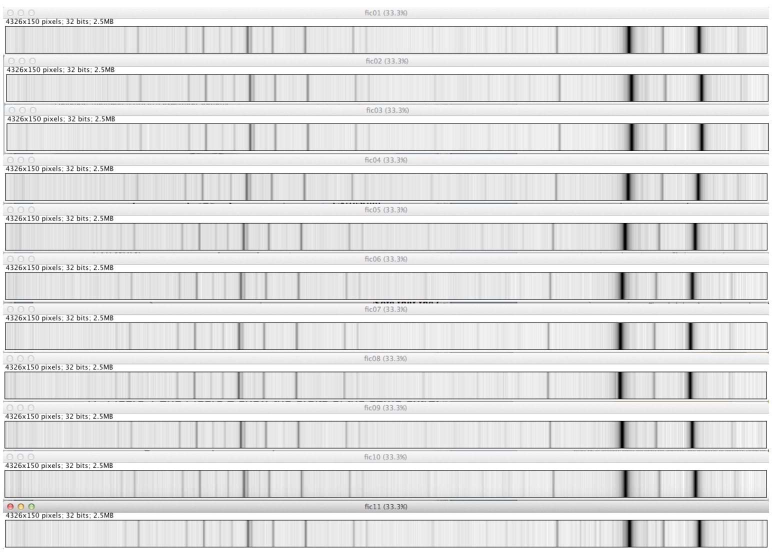


Figure de gauche : vue d'une planète orbitant autour de son étoile
Figure de droite : même système vu par la tranche.
Notez que la planète extrasolaire se déplace vers vous.
Cette représentation graphique n'est pas à l'échelle!



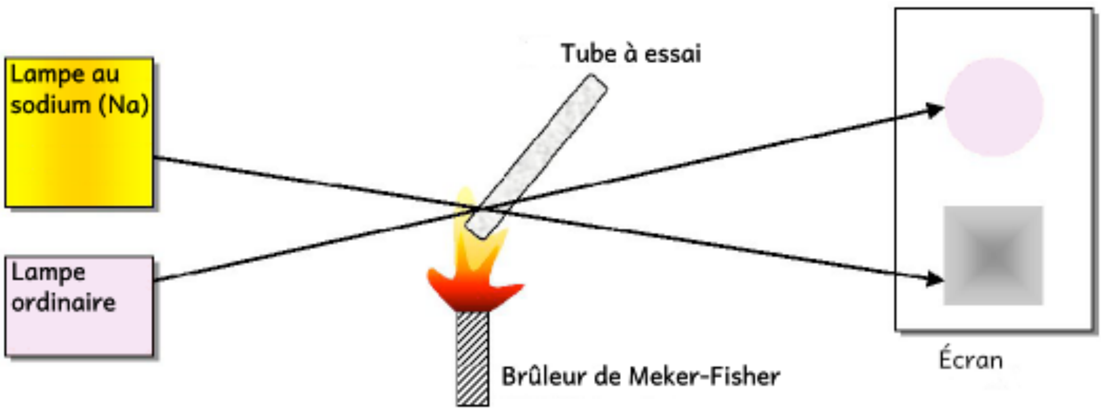
La figure ci-contre illustre le principe de l'exercice: le spectre de l'étoile ci-contre a été mesuré 11 fois en 10 jours. Ces 11 mesures sont représentées ci-contre.

Les raies spectrales se déplacent en fonction du temps. Chacun des 11 spectres a été pris à une époque différente. L'observateur peut observer la variation de la vitesse radiale observée le long de sa ligne de visée. Cela se détecte avec le déplacement par décalage Doppler des raies spectrales de l'étoile.

Spectroscopie

1. Les étoiles émettent un spectre continu en raison des réactions nucléaires, avec des raies d'absorption dues à leur atmosphère. Nous allons étudier 11 spectre d'une étoile binaire pris à des dates différentes, en nous concentrant sur le spectre au voisinage des raies du sodium Na. Notez qu'il est possible de réaliser des expériences simples avec des lampes au sodium ou du sel de cuisine ordinaire.

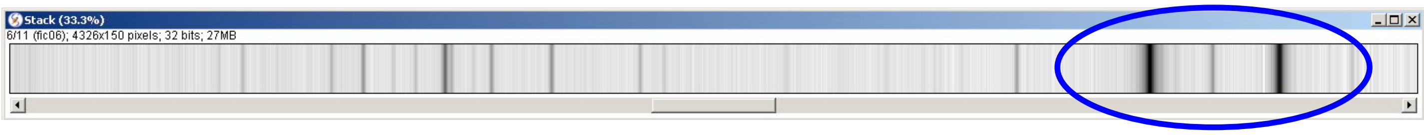
   Le tube à essai contient du chlorure de sodium (NaCl) ; chauffé à haute température, il émet de la lumière dans les raies du sodium, qui absorbe la lumière issue de la lampe à sodium tandis que la lumière issue d'une lampe torche semble inchangée. Ce phénomène est appelé « résonance des raies du sodium ».



2. Ouvrir les 11 images nommées **Data/images_radialvel/fic01.fit** à **fic11.fit** avec **Fichier/Ouvrir**, prises à différentes dates comme indiqué dans le tableau ci-dessous:

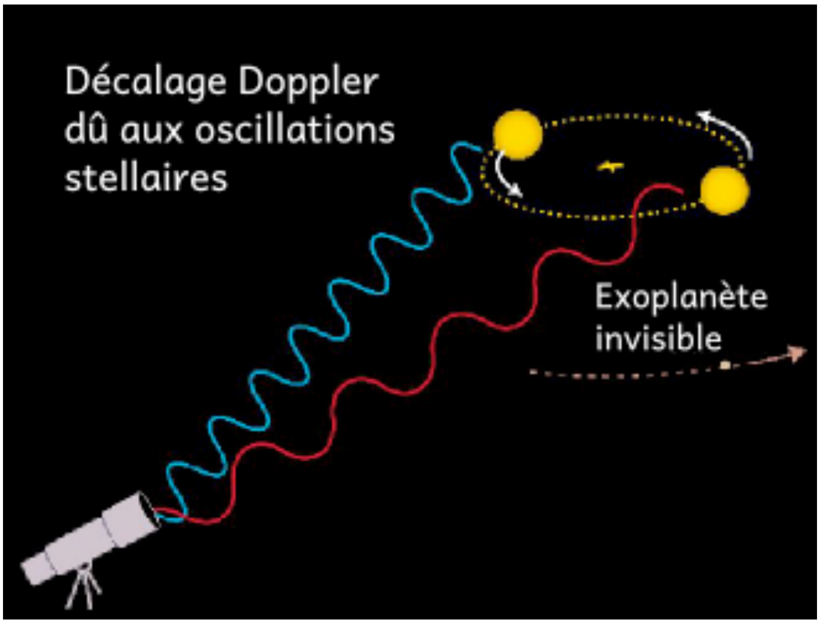
Numéro du spectre	Date (jours)
1	0
2	0,974505
3	1,969681
4	2,944838
5	3,970746
6	4,886585
7	5,924292
8	6,963536
9	7,978645
10	8,973648
11	9,997550

3. Placer ces 11 images dans une pile pour réaliser une animation avec « **Image/Piles/Transférer images dans pile** », puis « **Image/Piles/Démarrer animation** ».



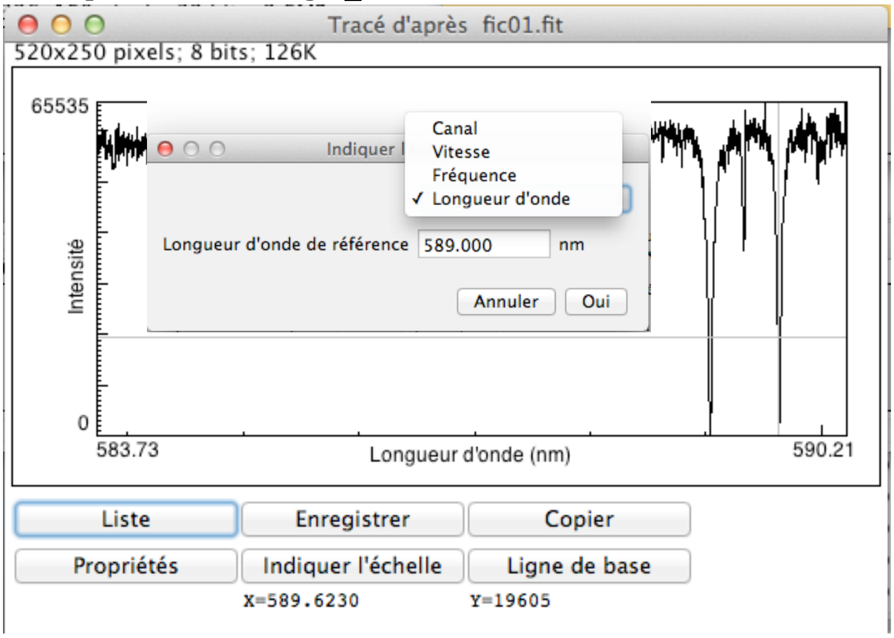
Doublet du sodium

Chaque objet dans un système binaire se déplace autour du barycentre. Par conséquent, la position des raies se déplacent en raison de l'effet Doppler.



Il est possible de faire cette animation en lançant une macro **Plugins/Macros/Radial Velocity method (animation).**

4. Ouvrir[1] le spectre **Data/images_radialvel/fic01.fit** avec **Fichier/Ouvrir un spectre**.

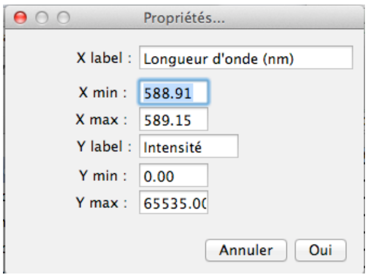


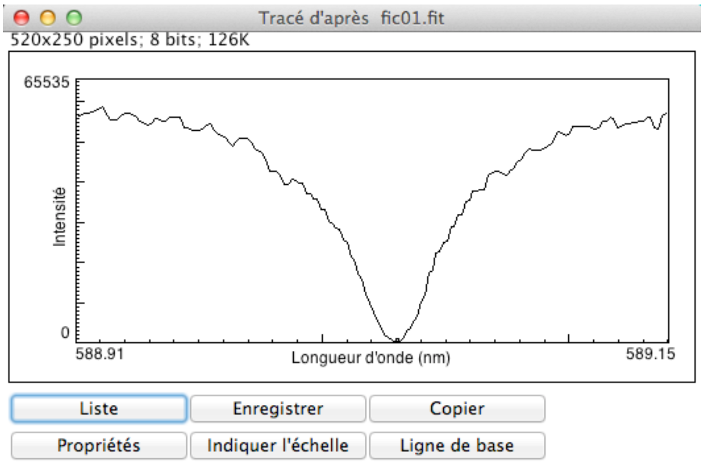
C'est le premier spectre. Allez dans **Indiquez l'échelle** et choisissez **Longueur d'onde**. Le curseur donne la position des différents points sur le spectre avec la résolution du spectre.

Vous pouvez remarquer sur ce spectre les deux profondes raies d'absorption du sodium (Na) que nous allons utiliser. Comparez les deux longueurs d'onde du spectre

[1] Attention, il s'agit du même fichier que précédemment. Nous avons préparé SalsaJ de façon à pouvoir ouvrir ces fichiers comme image et comme spectre. Cela ne marche que pour ce jeu de données.

observé, données par X : $\boldsymbol{\lambda_1}$**=5890,411 Å** ; $\boldsymbol{\lambda_2}$ **=5896,351 Å**. Comparez ces valeurs avec les valeurs de référence mesurées en laboratoire sur Terre : $\boldsymbol{\lambda_{Na\ D1}}$ **= 5889,950 Å** ; $\boldsymbol{\lambda_{Na\ D2}}$**=5895,924 Å**. Les différences entre les valeurs de référence et les mesures correspondent au décalage Doppler.
Il est possible de zoomer sur une raie ou une portion du spectre en cliquant sur **Propriétés** et choisissant les intervalles utiles de chaque axe.

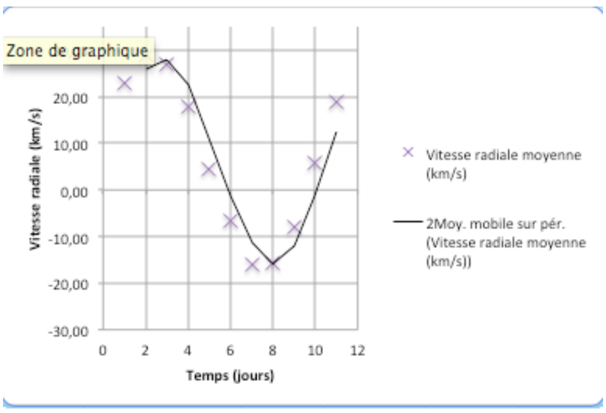




Quand on positionne le curseur sur un point du spectre, les valeurs X et Y correspondantes s'affichent en bas de la fenêtre. Il est également possible de les stocker dans une fenêtre résultats **Results** en double cliquant sur un point du spectre. Il est ensuite possible de les "couper-coller" dans un fichier excel ou de sauver ce fichier.

5. Répétez ces mesures pour les dix autres spectres.

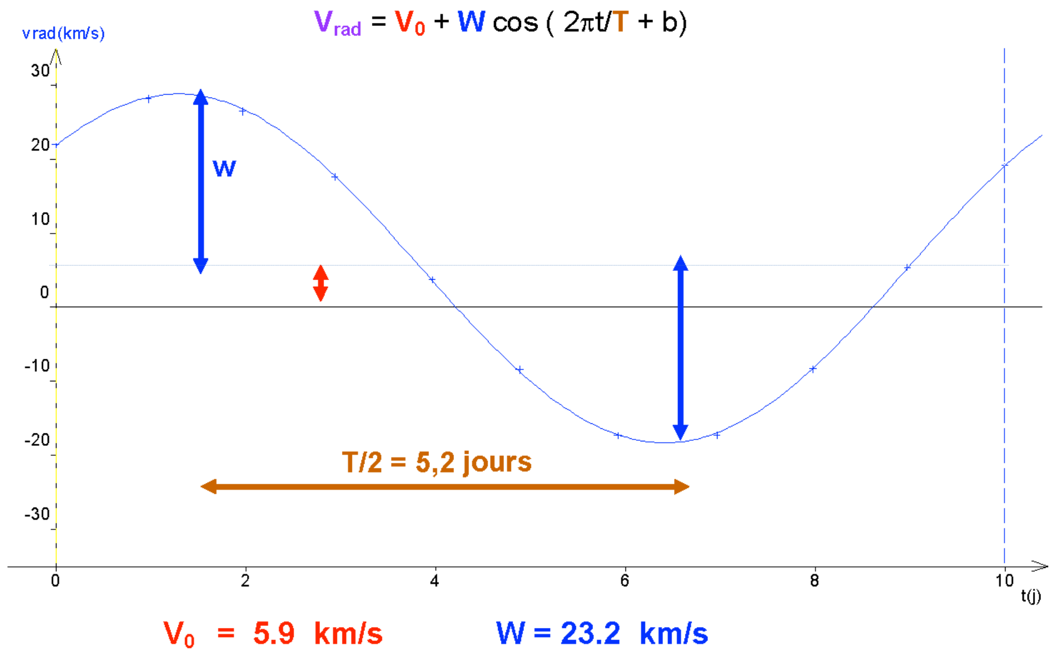
6. Ouvrez le fichier `FichierReponse_radialvel` et stocker les valeurs ainsi mesurer dans les colonnes prévues à cet effet.
La vitesse radiale est définie comme $\mathbf{v_{rad}/c = \Delta\lambda_i / \lambda_{Nai}}$, où $\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_{Nai}$; $i =$ 1 ou 2, λ_{Nai}: la longueur d'onde de référence et λ_i la longueur d'onde mesurée ; v_{rad} est la vitesse projetée de l'étoile le long de la ligne de visée, et inclut la vitesse du barycentre et le déplacement de l'étoile autour du barycentre du système ; c est la vitesse de la lumière. Estimer la vitesse radiale avec la raie D1 du sodium, puis avec la raie D2. Utiliser les deux améliore la précision des mesures.



A partir de vos mesures, il est possible de mesurer la vitesse radiale de l'étoile à chaque époque et de la représenter en fonction du temps. On obtient une sinusoide caractéristique de cette méthode de détection.

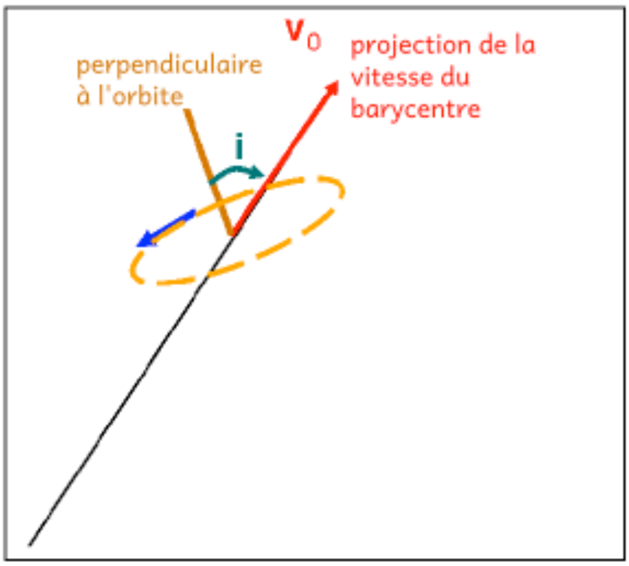
Comme expliqué ci-dessous, il est possible d'extraire de cette courbe des paramètres qui peuvent aider à caractériser le compagnon invisible de cette étoile.

Nous allons utiliser le modèle simple suivant : $V_{rad} = V_0 + W * \cos((2*\pi*t/ T)+ b))$. Le mieux est de superposer cette fonction sur les mesures réalisées précédemment et d'ajuster les 4 paramètres V_{rad}, V_0, W et T de façon à obtenir un bon ajustement. Cette opération a été préparée dans le fichier `FichierReponse_radialvel`.



En raison de l'angle i entre la perpendiculaire à l'orbite et la ligne de visée, W est la limite inférieure de la vitesse de rotation V de l'étoile :

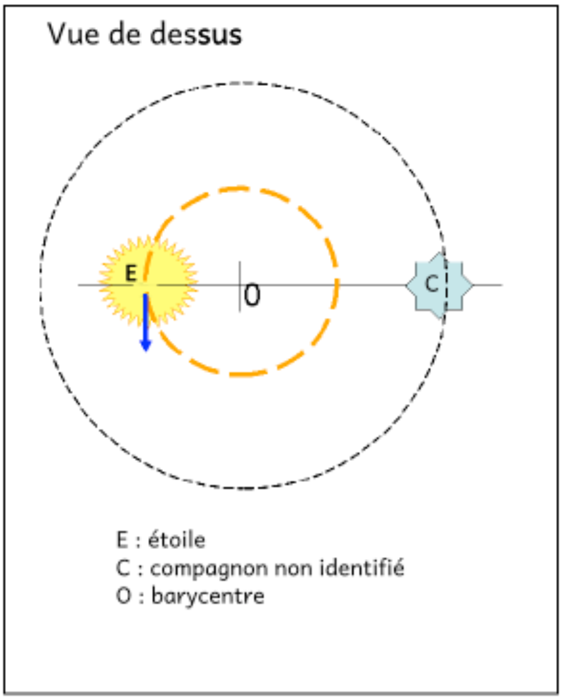
$$V = W / \sin i.$$



Nous allons poursuivre avec l'approximation sin(i)=1 soit V=W.

Détermination de la masse du compagnon

Il est possible d'extraire de nos mesures la masse du compagnon invisible de notre étoile. Pour cela, on sait que la masse de l'étoile visible : $M_E=1{,}05M_{Sol}$.



On suppose les orbites circulaires, et on utilise la loi de Kepler. La masse du compagnon, que l'on souhaite calculer, est notée m_C, O est le barycentre du système.

- Loi de Kepler : $\mathbf{T^2/(EC)^3 = 4\,\pi^2/[G\,(M_E + m_C)]}$
- Formule du barycentre : $\mathbf{EC = [(M_E + m_C)\,/m_C]OE}$
- Orbite circulaire : $\mathbf{v_{Étoile} = 2\,\pi\ OE/T = W\ /\ \sin(i)}$

Il vient :

$$\boxed{2\pi\, G\, m_C^3 = v_{Étoile}^3\, T\, (m_C+M_E)^2}$$

On supposera que la masse du compagnon est faible devant celle de l'étoile, i.e.
$\mathbf{M_E + m_C = M_E}$ car $m_C/\,M_E \ll 1$. En déduire la masse du compagnon m_C.

Le compagnon est une naine brune qui n'émet quasiment aucune lumière dans le visible ! Rappelons que sin(i)=1 donne une limite inférieure à la masse du compagnon.

Si le compagnon était un Jupiter, quelle serait la vitesse de l'étoile? A quelle différence de longueur d'onde $\Delta\lambda_i$, cela correspondrait-il? Qu'est-ce que cela implique pour les données spectrales?

Données

- Masse de la Terre, planète tellurique : $M_T=6.10^{24}$ kg
- Masse de Jupiter, planète géante : $M_J=2.10^{27}$ kg
- Masse du Soleil : $M_S=2.10^{30}$ kg