



Exploitation de données « brutes »

Découverte d'Isis, exoplanète de Alopex

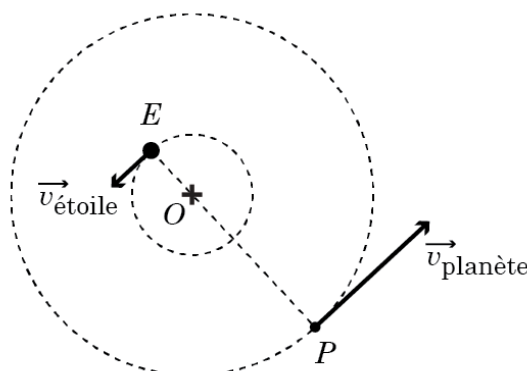
Mise en évidence et étude d'une exoplanète à l'aide de l'effet Doppler – Fizeau



Ce scenario est adossé au programme de la partie « Ondes » de la spécialité SPCL (Sciences Physiques et Chimiques en Laboratoire) de la classe de terminale. Il repose sur les notions abordées dans la séquence 10 : « mesurer des vitesses à l'aide de l'effet Doppler ».

Préambule : la méthode Doppler ou « méthode des vitesses radiales »

La méthode Doppler, dite « méthode des vitesses radiales », est historiquement la méthode ayant conduit Michel MAYOR et Didier QUELOZ à mettre en évidence la première planète extrasolaire en 1995 : 51 Pegasi b. Cette méthode repose sur un fait que nos élèves ignorent *a priori* : le centre d'une étoile n'est pas le foyer de l'orbite d'une planète. Étoile et planète sont en orbite autour du centre de masse du système {étoile + planète}, ce que l'on peut schématiquement représenter (dans l'hypothèse d'une orbite circulaire) par :



Le mouvement de l'étoile par rapport au centre de masse (donc en première approximation par rapport à un observateur terrestre) engendre un effet Doppler-Fizeau sur la lumière qu'elle émet.

Ce sont les variations des longueurs d'onde des raies d'absorption dans les spectres d'émission des étoiles qui permettent de conclure à l'éventuelle présence d'une exoplanète autour d'elle.

Présentation de la séquence proposée

Le but de cette séquence est de reproduire le raisonnement ayant conduit, en 2005, à la découverte de HD 189733 Ab (surnommée Isis), planète extrasolaire en orbite autour de HD 189733 A, naine orange surnommée Alopex, dans la constellation du Petit Renard. Ce sont les données acquises par le spectromètre ELODIE, à l'Observatoire de Haute Provence, qui ont conduit François Bouchy et al. à publier sa découverte mais nous utilisons ici les données récoltées par SOPHIE, spectromètre ayant succédé à ELODIE, en raison de sa meilleure résolution.

Voir l'article original annonçant la découverte de HD 189733 b (ou Isis) : <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0510119>

NB : nous choisissons le couple Alopex / Isis, plutôt que 51 Pegasi a et b (premier système étoile / planète extrasolaire historique) pour une raison pédagogique : Isis (exoplanète) est à la fois très massive (environ 1,4 masses joviennes) et exceptionnellement proche de son étoile, les perturbations engendrées dans le spectre d'émission de l'étoile sont donc parmi les plus aisées à mettre en évidence.

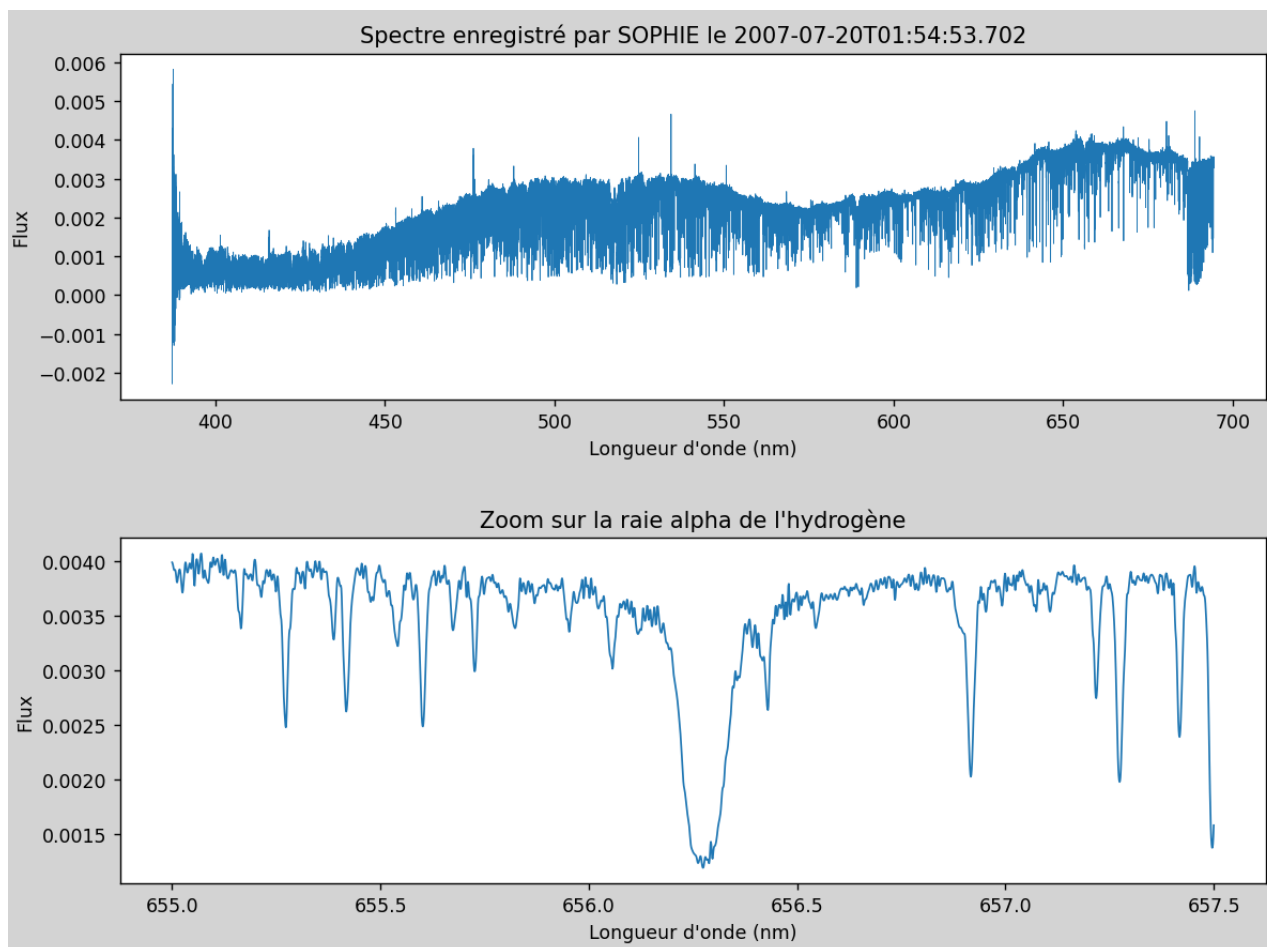
1. Affichage et étude d'un spectre d'émission de Alopex

Le dossier "Spectres_SOPHIE" contient une centaine de spectres d'émission de l'étoile Alopex acquis par SOPHIE à l'Observatoire de Haute Provence entre 2006 et 2023. Ils sont stockés au format FITS et librement téléchargeables à l'adresse : <http://atlas.obs-hp.fr/sophie/sophie.cgi?n=sophies&a=htab&ob=ra,seq&c=o&o=HD%20189733>.

Nous allons commencer par lire ces fichiers et stocker les données utiles (longueur d'onde, flux, date d'observation) dans des tableaux, avant de tracer l'un des spectres (flux en fonction de la longueur d'onde).

Le programme Python « Affiche_Spectre.py » lit les données présentes dans les spectres originaux, stocke les données utiles (date, flux lumineux, longueur d'onde) dans des tableaux et affiche un spectre au choix parmi ceux disponibles (modifier la ligne 22 pour choisir le spectre à afficher).

Un « zoom » autour de la raie d'absorption α de l'hydrogène de ce même spectre est également affiché.



Exploitations possibles

On peut exploiter ce spectre pour mesurer graphiquement la longueur d'onde de la raie H α à l'aide du curseur. On trouve : $\lambda_{H\alpha} \approx 656,28 \text{ nm}$

La question se pose de savoir si des mesures de $\lambda_{H\alpha}$ peuvent suffire pour mettre en évidence le mouvement de Alopex dû à la présence de son exoplanète. Dans ce but nous pouvons évaluer l'incertitude-type de la mesure graphique précédente :

$$u(\lambda_{H\alpha}) = \frac{\text{largeur à mi-hauteur}}{\sqrt{3}} \approx \frac{0,06}{\sqrt{3}} = 0,03 \text{ nm}$$

Calculons à présent l'ordre de grandeur des décalages Doppler qu'il faut mettre en évidence.

La valeur de la vitesse de Alopex par rapport au centre de son orbite vaut environ : $v \approx 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Ce qui donne un décalage Doppler de l'ordre de :

$$\Delta\lambda \approx \lambda_{H\alpha} \frac{v}{c} = 656 \times \frac{200}{3 \times 10^8} = 0,0004 \text{ nm}$$



Même si la raie H α est particulièrement large, le constat serait le même avec d'autres raies : l'incertitude de mesure rend impossible la détection d'un éventuel décalage Doppler par des mesures de longueurs d'onde d'une raie unique.

2. Exploitation d'un grand nombre de raies d'absorption

2.1. Évolution en fonction du temps du décalage Doppler en longueur d'onde

La mesure de la longueur d'onde d'une seule raie d'absorption dans un spectre ne peut pas suffire pour mettre en évidence un éventuel décalage Doppler : comme nous l'avons montré plus haut, le décalage que nous sommes censés mettre en évidence est beaucoup plus faible (plusieurs ordres de grandeur) que l'incertitude-type d'une longueur d'onde mesurée.

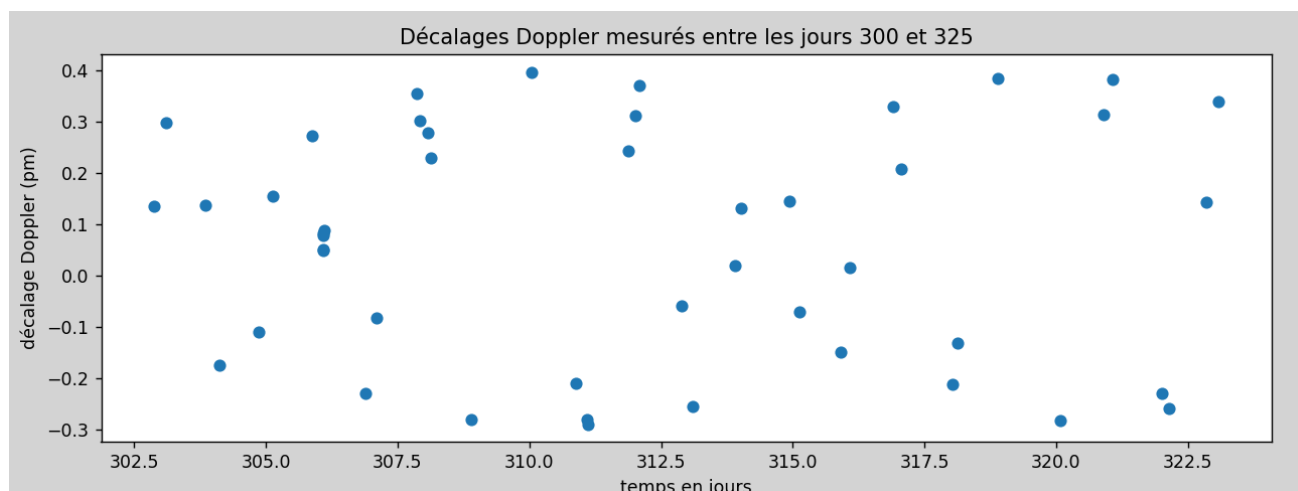
Nous allons donc procéder par corrélation croisée, en utilisant des raies comprises entre 500 et 540 nm. En effet :

- c'est dans cette gamme (correspondant au vert) que SOPHIE a le meilleur rapport signal / bruit ;
- c'est entre ces longueurs d'onde que se trouve une "forêt" de raies d'absorption métalliques (Fe, Mg, Ni, Ti, etc.) ;
- la mesure du décalage tenant compte de plusieurs centaines de raies d'absorption qui, toutes, subissent le même décalage Doppler, permet de réduire considérablement le poids de la résolution du spectromètre parmi les causes d'incertitudes.

Nous n'entrons pas dans le détail de ce que signifie « corrélation croisée » ; retenons seulement qu'il s'agit d'une méthode permettant de tenir compte de plusieurs centaines de raies d'absorption.

Le programme « Decalage_Doppler.py » utilise tous les spectres enregistrés pour représenter graphiquement le décalage Doppler des raies d'absorption en fonction du temps.

On obtient :



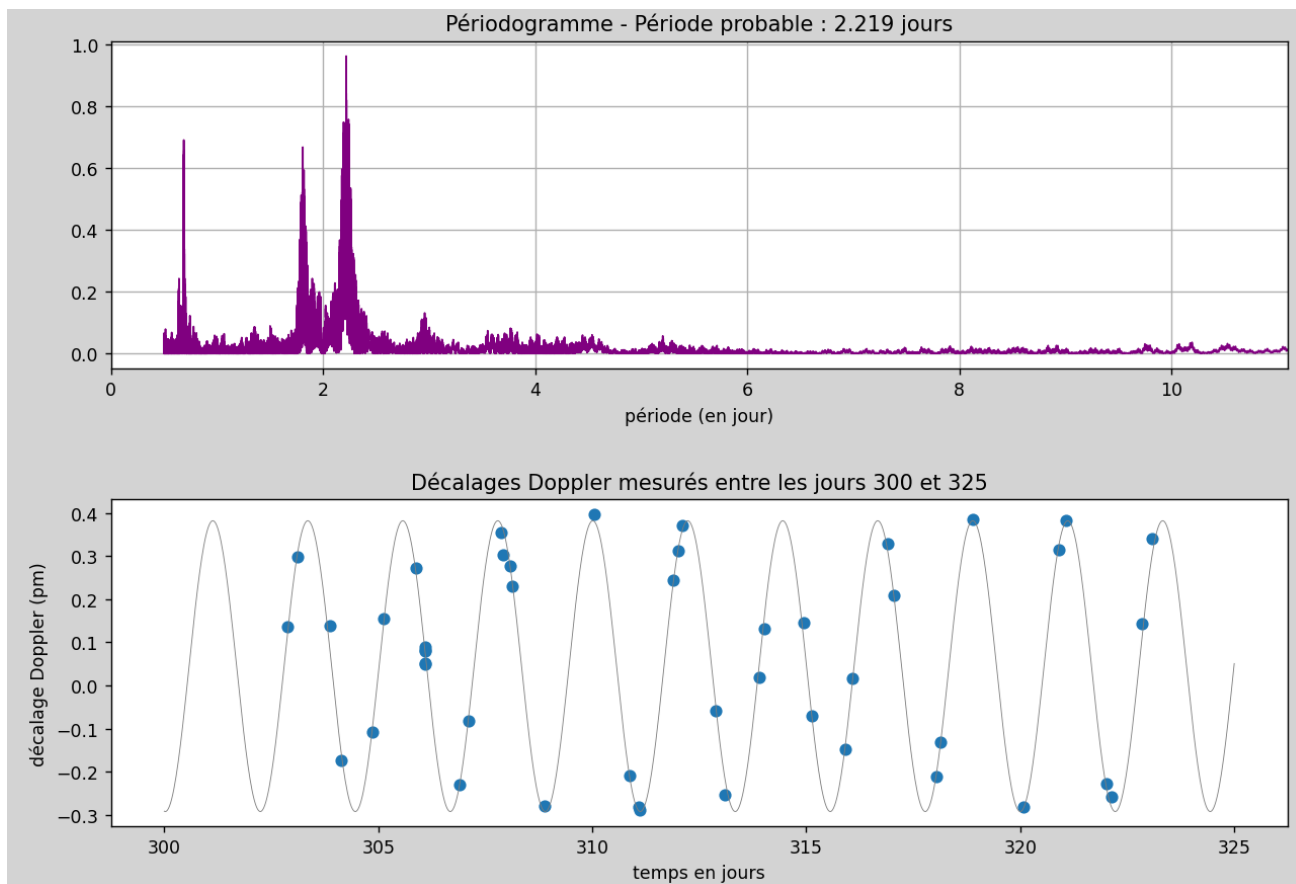
On obtient un nuage de points qui, à première vue, semble aléatoirement dispersé autour d'une valeur approximativement nulle... Mais cherchons tout de même si ce nuage de points ne présente pas une périodicité.

2.2. Recherche d'une périodicité

Comme les données ne sont pas échantillonnées régulièrement dans le temps, la transformée de Fourier rapide (FFT) ne peut pas être utilisée pour mesurer une fréquence. Nous appliquons la méthode de Lomb-Scargle : il s'agit d'une méthode statistique utilisée pour détecter des périodicités (des cycles ou des fréquences) dans des données qui ne sont pas échantillonnées régulièrement dans le temps.

Le programme « Modelisation_Decalage_Doppler » applique la méthode de Lomb-Scargle pour déterminer la « période probable » du mouvement de Alopex et modélise le graphique précédent par une fonction sinus.

On obtient le résultat suivant.



On observe que le nuage de points n'est pas dispersé aléatoirement mais suit approximativement une évolution sinusoïdale :

$$\Delta\lambda(t) = \Delta\lambda_{\max} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right)$$

Avec

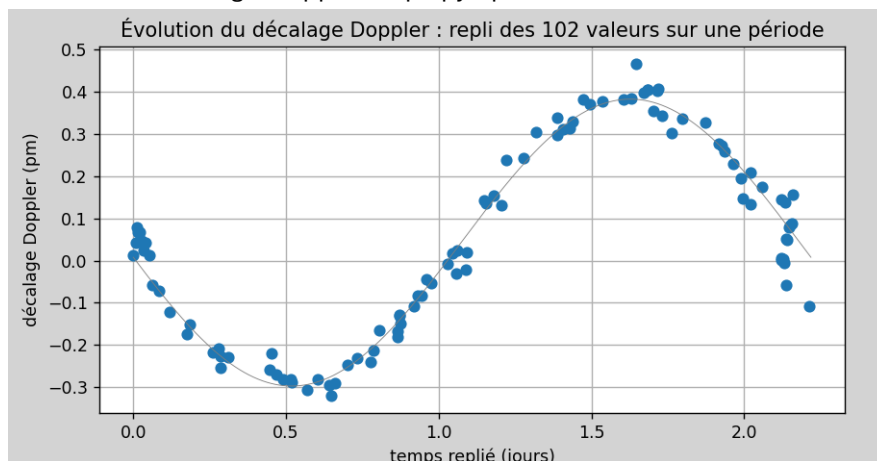
- la période $T \approx 2,219$ jours ;
- l'amplitude $\Delta\lambda_{\max} \approx 0,337$ pm.

2.3. Repli sur une période

Afin de vérifier que la modélisation sinusoïdale précédente, sur une fenêtre restreinte de quelques jours, n'est pas juste un heureux hasard, appliquons la méthode du « repli ». Celle-ci consiste à remplacer le temps réel par une variable calculée par :

$$t_{\text{repli}} = t_{\text{réel}} \bmod T$$

Le programme « Modelisation_Decalage_Doppler_Repli.py » permet d'obtenir :



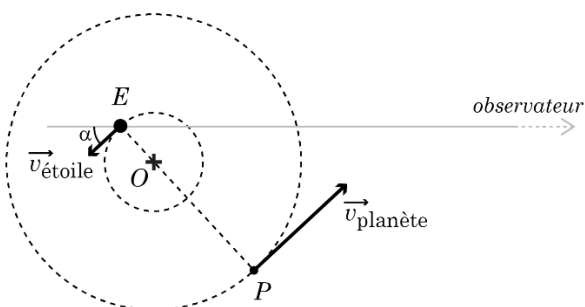
3. Exploitations possibles

3.1. Expliquer la périodicité de l'évolution de $\Delta\lambda$

Les connaissances que les élèves de terminale STL possèdent concernant l'effet Doppler leur permettent de comprendre pourquoi $\Delta\lambda$ évolue de manière périodique. Ils peuvent être guidés pour établir l'explication qui suit. La périodicité temporelle du décalage Doppler dans le spectre de l'étoile HD 189733 s'explique par la présence d'une planète géante en orbite autour d'elle.

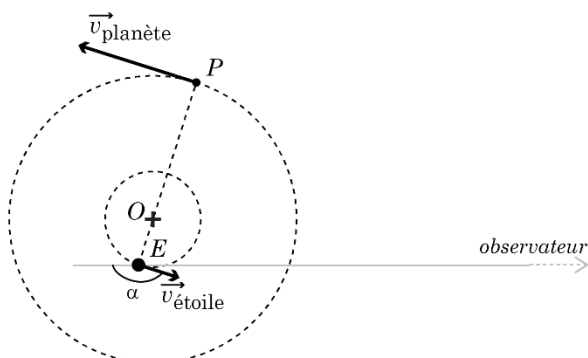
Deux situations pour mieux comprendre.

Situation 1 :



Dans cette situation $\alpha < \pi$ (l'étoile **s'éloigne** de l'observateur) donc $\Delta\lambda > 0$: décalage vers le rouge.

Situation 2 :



Dans cette situation $\alpha > \pi$ (l'étoile **s'approche** de l'observateur) donc $\Delta\lambda < 0$: décalage vers le bleu.

3.2. Estimation de la vitesse d'Alopec sur son orbite

Les élèves peuvent être guidés pour estimer la vitesse de l'étoile sur son orbite. Le raisonnement est le suivant.

Si l'on note v la vitesse de l'étoile autour du centre de masse du système {planète + étoile} :

$$\frac{v \cos(\alpha)}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

$v \cos(\alpha)$ est la vitesse radiale de l'étoile. Elle est égale à sa vitesse lorsque $\alpha = 0$, c'est-à-dire lorsque l'étoile s'éloigne de l'observateur, dans l'axe observateur / étoile. Le décalage Doppler est donc maximal. On peut donc estimer la vitesse de l'étoile :

$$v = c \frac{\Delta\lambda_{\max}}{\lambda_0} = 3,00 \times 10^8 \times \frac{3,37 \times 10^{-13}}{525 \times 10^{-9}} \simeq 194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

NB : ce calcul n'est valable que si la direction étoile-observateur appartient au plan de l'orbite du système {étoile + exoplanète} ce qui, concernant le système {Alopec + Isis} étudié, est approximativement le cas.