

# INTRODUCTION À L'ÉTUDE DES ÉTOILES DOUBLES SPECTROSCOPIQUES

## Introduction to the study of spectroscopic double stars

Guillaume Bertrand

gbe.astro@pm.me

<https://guillaumebertrand.notion.site/>



### Résumé

Cet article est une introduction à l'étude des étoiles doubles spectroscopiques par des astronomes amateurs. Il explique comment déterminer les paramètres orbitaux d'une binaire à partir de mesures de vitesses radiales. Deux exemples d'application sont donnés pour les étoiles Mizar A et Alpha Draconis.

### Abstract

This paper is an introduction to the study of spectroscopic binary stars by amateur astronomers. It explains how to determine the orbital parameters of a binary from measurements of radial velocities. Two application examples are given for the stars Mizar A and Alpha Draconis.

**Keywords :** stars: fundamental parameters binaries: spectroscopic - stars: individual: Mizar,  $\alpha$  Dra  
**techniques:** radial velocities



### Introduction

Nous allons nous intéresser ici à l'observation amateur des binaires dites spectroscopiques, c'est à dire à des couples d'objets très serrés, en général non séparés visuellement, étudiés grâce à leurs spectres lumineux. Dans ces systèmes, chaque composante du couple va, en fonction de son mouvement par rapport à l'observateur, avoir un effet sur les raies du spectre. Celles-ci se décaleront vers le rouge si l'étoile s'éloigne ou vers le bleu si elle s'approche de nous. C'est l'effet Doppler-Fizeau. C'est en mesurant ce décalage relatif dans le temps que nous pouvons en déduire les vitesses radiales et les principaux paramètres orbitaux de l'étoile double. Ces binaires présentent des périodes variées de l'ordre de quelques heures à plusieurs années.

Il existe plusieurs types de binaires spectroscopiques, les deux types principaux sont :

- SB1 (single lined spectroscopic binary), seul le spectre de la composante principale est détecté à cause d'une trop grande différence de magnitude entre les deux composantes.
- SB2 (double lined spectroscopic binary), le spectre des deux composantes peut être détecté.

L'étude des binaires spectroscopiques a longtemps été difficilement accessible aux amateurs car elle nécessite de pouvoir faire des spectres à haute résolution. Pour cela, il faut disposer, en plus d'un télescope, d'un spectrographe adapté (souvent onéreux) et d'une suite de logiciels de réduction de données bien maîtrisée.

Depuis peu, avec l'avènement de l'impression 3D et l'investissement considérable de certains amateurs, des projets de spectrographes à monter soi-même ont vu le jour. Le Star'Ex [1] et [2] imaginé par Christian Buil en est un parfait exemple. Il permet de s'initier à la spectroscopie haute résolution à moindre

frais et d'obtenir très rapidement des résultats de qualité professionnelle. Un effort important a été porté sur la partie logicielle avec des solutions comme SpecINTI [3] permettant d'obtenir un spectre traité en "un clic".

### Méthode

Les vitesses radiales que nous cherchons à mesurer sont de l'ordre de quelques dizaines de km/s. C'est-à-dire un décalage des raies souvent inférieur à 1 Angström. Pour avoir un repère, une vitesse de 30km/s équivaut à un décalage de 0.66Å. Pour mesurer un tel décalage, il faudra un spectrographe haute résolution où  $R \geq 15\ 000$  que nous centrerons sur la raie H $\alpha$ . La résolution spectrale est définie par  $R = \lambda / \Delta\lambda$ . C'est le rapport entre la longueur d'onde  $\lambda$  et le plus petit détail visible dans cette longueur d'onde  $\Delta\lambda$ . Un spectre est dit basse résolution pour  $R \leq 1000$  et haute résolution si  $R \geq 10\ 000$  (Figure 1). Par exemple, si  $R = 30\ 000$  à une longueur de d'onde de 6000 Å, le spectrographe pourra séparer des détails de 0.2Å.

La vitesse radiale  $V_r$  est déterminée en mesurant l'écart de la position de la raie H $\alpha$  par rapport à sa position théorique (Figure 2) puis en appliquant la formule 1 (loi Doppler-Fizeau).

$$V_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c \quad (1)$$

$$c = 299792.458 \quad \text{Speed of light [kms]}$$

$$\lambda_0 = 6562.8 \quad \text{H}\alpha \text{ line [\AA]}$$

Avant de mesurer le décalage de la raie H $\alpha$ , il faudra au préalable calibrer correctement les spectres en longueur d'onde et effectuer la correction héliocentrique.

Concernant la calibration, plusieurs techniques existent. Pour la haute résolution, le plus simple est la calibration dite "en mode latéral". Un flux de lumière néon est envoyé à l'avant du télescope via un système de fibres optiques pendant toutes les acquisitions. Ainsi tous les spectres contiennent, en plus du spectre de l'objet observé, des raies de références bien connues du néon permettant au logiciel de réduction de données de calibrer automatiquement et très précisément le spectre final.

La correction héliocentrique quant à elle consiste à appliquer un décalage en longueur d'onde aux spectres, décalage lié au mouvement de la Terre autour du Soleil et autour de son propre axe de rotation. Grâce à cette correction, la vitesse radiale mesurée de la binaire devient celle que l'on observerait si nous étions situés au centre du Soleil.

La mesure sur plusieurs nuits du décalage de la position de la raie spectrale H $\alpha$  permettra d'établir une courbe de vitesse radiale de la composante principale (SB1) ou des deux composantes (SB2) de l'étoile double. La période de rotation **P** du système peut être trouvée en mesurant l'écart entre deux maximums sur la courbe de vitesse radiale. À partir de ce paramètre et du paramètre **T** (correspondant à l'époque du passage au périastre), les points de mesure de vitesse radiale peuvent être ramenés en fonction de la phase du système à l'aide de la formule 2 :

$$\phi = \frac{T_{obs} - T}{P} \pmod{1} \quad (2)$$

La forme de la courbe obtenue dépend principalement de l'excentricité *e* de l'orbite et de son inclinaison *i*. Par exemple, une courbe de vitesse radiale en forme de sinusoïde peut indiquer une orbite circulaire. La figure 3 montre plusieurs types de courbe en fonction de ces paramètres.

On peut ensuite déduire plusieurs paramètres orbitaux grâce à un ajustement numérique de la forme 3 :

$$V_r = K \cdot [e \cdot \cos(\omega) + \cos(\nu + \omega)] + \gamma \quad (3)$$

$\gamma$  : vitesse radiale moyenne du barycentre du système

*K* : demi-amplitude en km/s

*e* : excentricité de l'orbite

$\omega$  : longitude du périastre par rapport au nœud

$\nu$  : anomalie vraie

Pour une orbite elliptique, on a accès au demi-grand axe **a** à un facteur  $\sin i$  près par la formule 4. Sauf dans le cas des binaires à éclipses pour lesquelles l'inclinaison *i* est proche de

$$a \sin i = \frac{P}{2\pi} \sqrt{1 - e^2} K \quad (4)$$

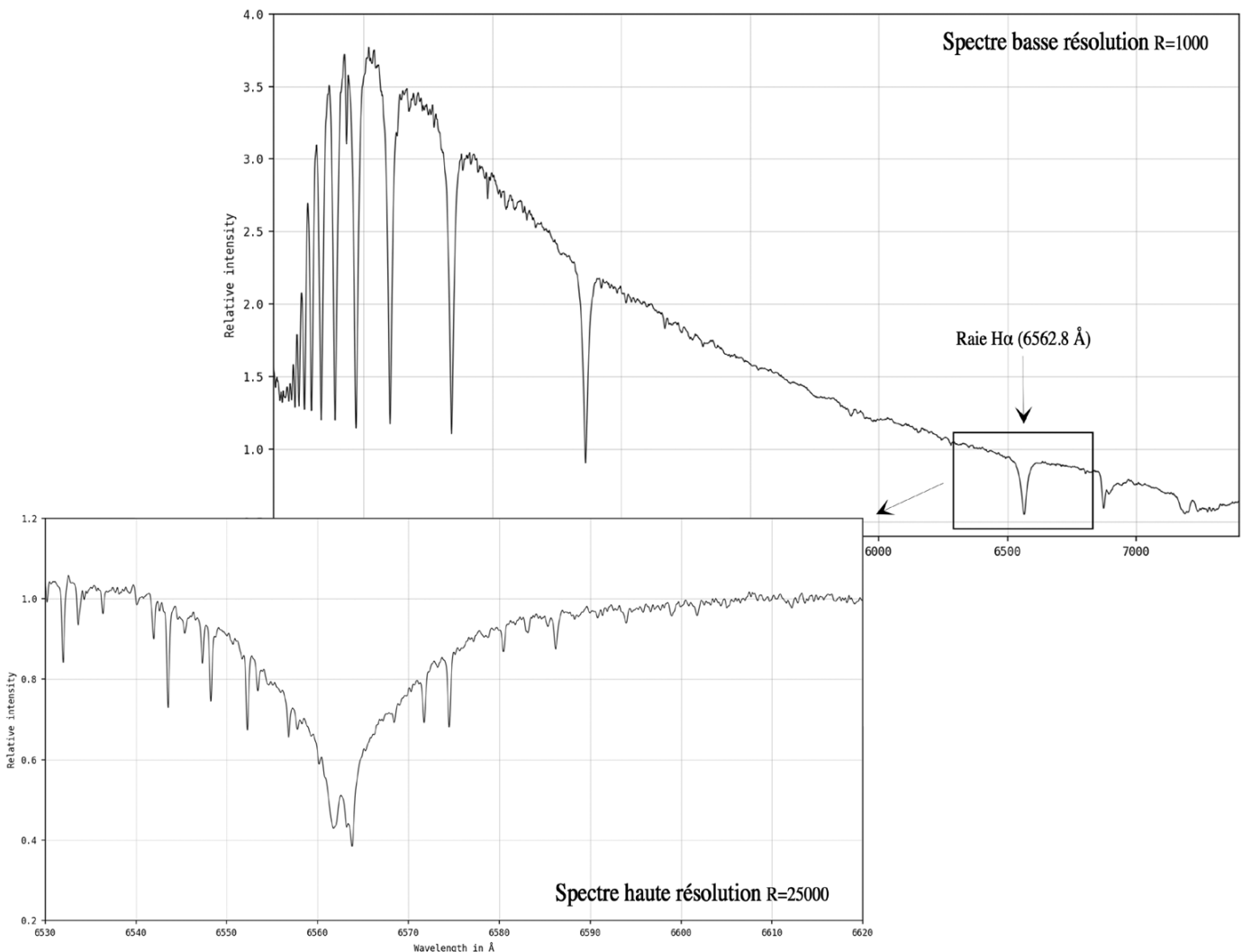


Figure 1 : Comparaison d'un spectre basse résolution et d'un spectre haute résolution.

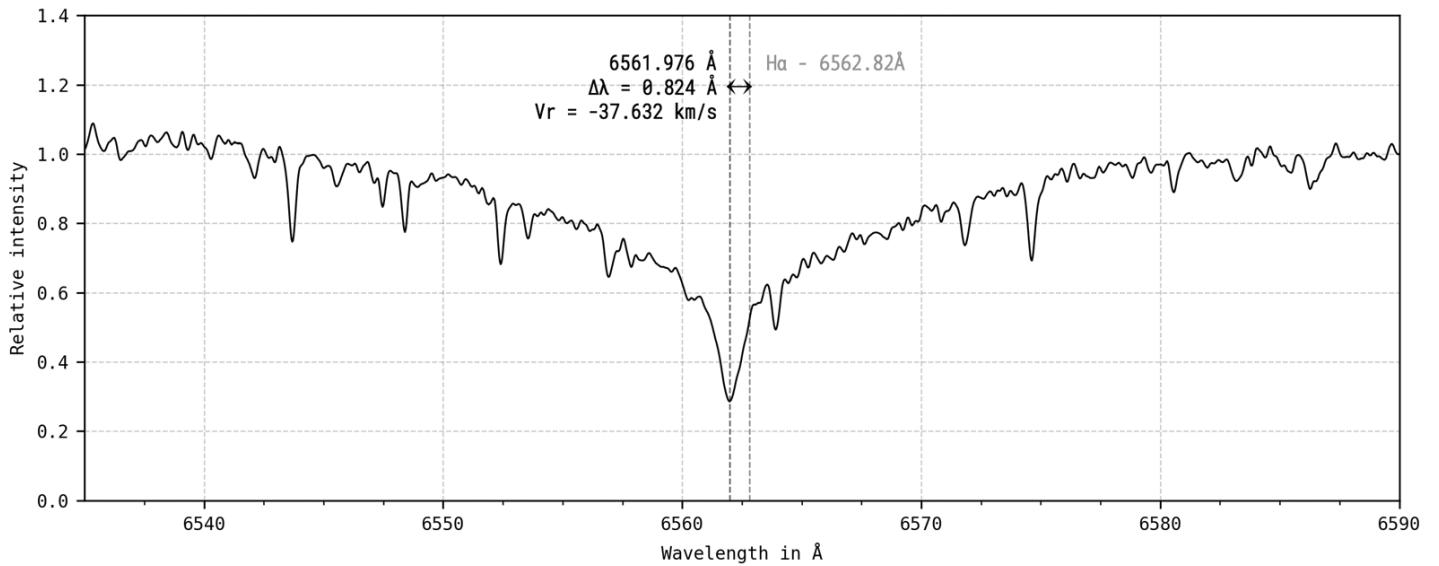


Figure 2 : Exemple de mesure du décalage du spectre par rapport à la raie Ha au repos sur Alpha Draconis

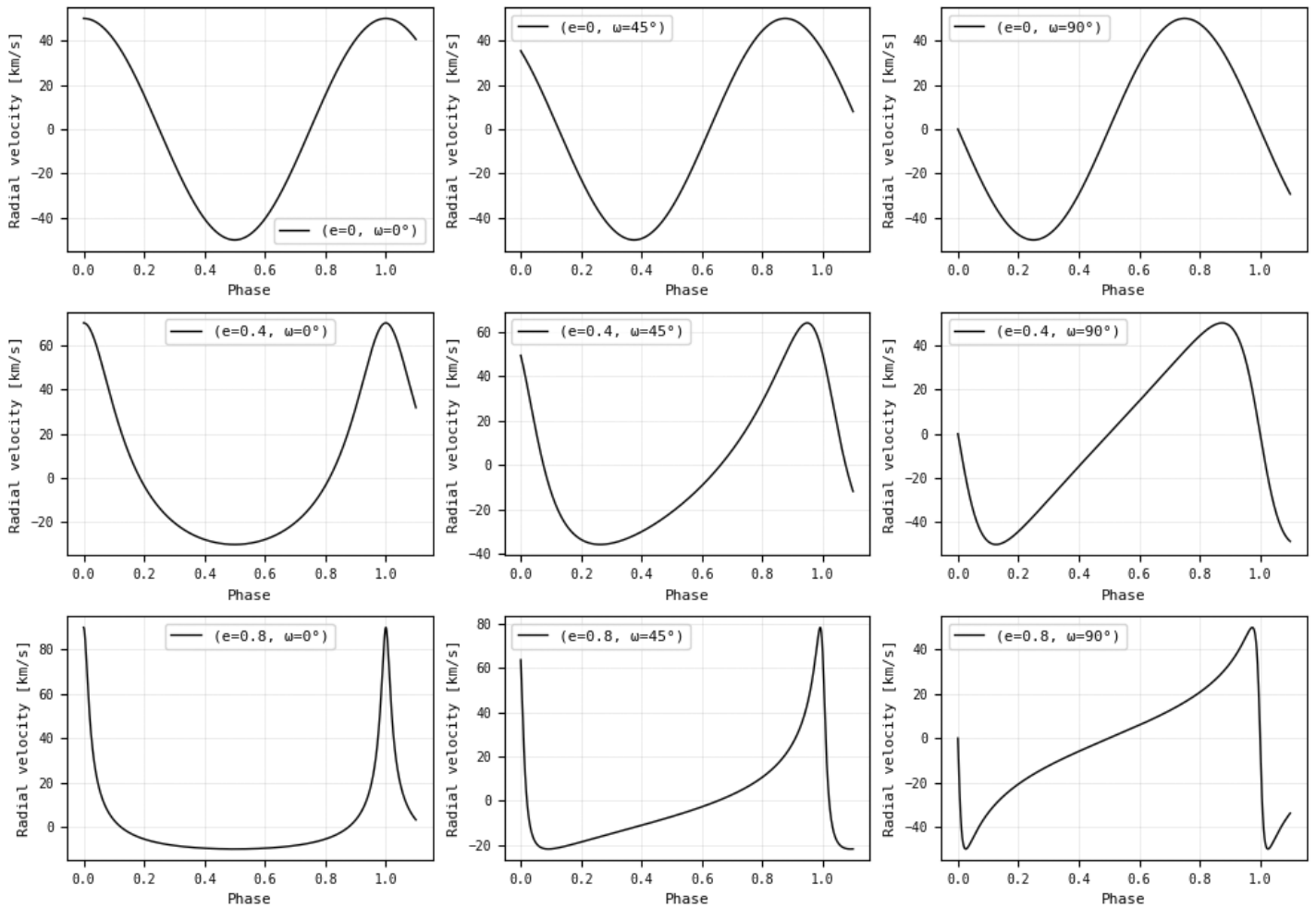


Figure 3 : Exemple de courbes de vitesse radiale avec  $K=50$  km/s et différents paramètres pour l'excentricité  $e$  et la longitude du périastre  $\omega$ . Courbes tracées à l'aide d'un script développé en python/matplotlib et de l'équation (3).

$90^\circ$ . Pour rappel, si la vitesse est  $\mathbf{v}$  et  $i$  l'angle de cette vitesse par rapport à l'axe de visée, alors la composante radiale est  $\mathbf{v} \sin i$  et la composante tangentielle est  $\mathbf{v} \cos i$ . La spectroscopie nous permet de mesurer uniquement la composante radiale de la vitesse d'où ce facteur  $\sin i$ .

De plus, la "fonction de masse" (équation 5) nous donne une indication sur les masses de chaque étoile :

$$f(M) = \frac{(M_B \cdot \sin i)^3}{(M_A + M_B)^2} = \frac{(a_A \cdot \sin i)^3}{P^2} \quad (5)$$

Dans le cas d'une binaire de type SB2, le rapport de masse se simplifie par la formule 6.

$$\frac{M_A}{M_B} = \frac{K_B}{K_A} \quad (6)$$

Pour nous faciliter la tâche, le programme libre BinaryStarSolver [4] est disponible. Pour une série de vitesses radiales en fonction du temps, ce programme résout divers paramètres orbitaux. À savoir, l'excentricité ( $e$ ), l'argument du périastre ( $\omega$ ), l'amplitude de vitesse ( $K$ ), la vitesse radiale moyenne à long terme ( $\gamma$ ) et la période orbitale ( $P$ ).

Pour plus d'informations sur l'implémentation de ce code, voir l'article "A Python Code to Determine Orbital Parameters of Spectroscopic Binaries" [5].

## Exemples d'application

### 1 Mizar A

Voici un premier exemple sur la célèbre étoile double spectroscopique Mizar A (zet UMa A). Il s'agit de la première étoile double spectroscopique découverte par Antonia C. Maury en 1889. La période de rotation du système est de 20,53835 jours. C'est une binaire de type SB2 car le spectre des deux composantes peut être détecté en spectrographie haute résolution.

Le matériel utilisé pour capturer le spectre de Mizar A est une lunette SkyWatcher 72ED f/6, le spectrographe est un Star'Ex [1] équipé d'un réseau de 2400 tr/mm et d'une fente de 10  $\mu$ m. Coté caméras, c'est une ZWO ASI 183 MM PRO pour l'acquisition et une ZWO ASI 178 MM pour le guidage. Le tout est monté sur une petite monture SkyWatcher Heq5 Pro. Les logiciels utilisés sont SharpCap [6] pour l'acquisition, PHD2 [7] pour le guidage, Carte du Ciel [8] pour le pointage et SpecInti + ISIS [9] + Scripts python pour la réduction de données.

Notez que le matériel utilisé est relativement modeste, c'est d'ailleurs la courte focale de la lunette combinée au spectro Star'Ex qui permet ici d'atteindre une haute résolution spectrale (ici  $R=30000$ ). C'est contre-intuitif, mais en spectrographie l'usage d'un petit instrument autorise l'emploi d'une fente très étroite permettant d'atteindre un niveau de résolution comparable à des instruments professionnels.

Au total, j'ai pu faire 12 nuits d'observations entre mai 2022 et juin 2022 (figure 4). C'est en théorie trop peu pour couvrir convenablement un cycle sans laisser de zones sans point de mesure. Cependant le résultat est déjà intéressant et permet déjà d'obtenir des paramètres orbitaux proches des valeurs attendues.

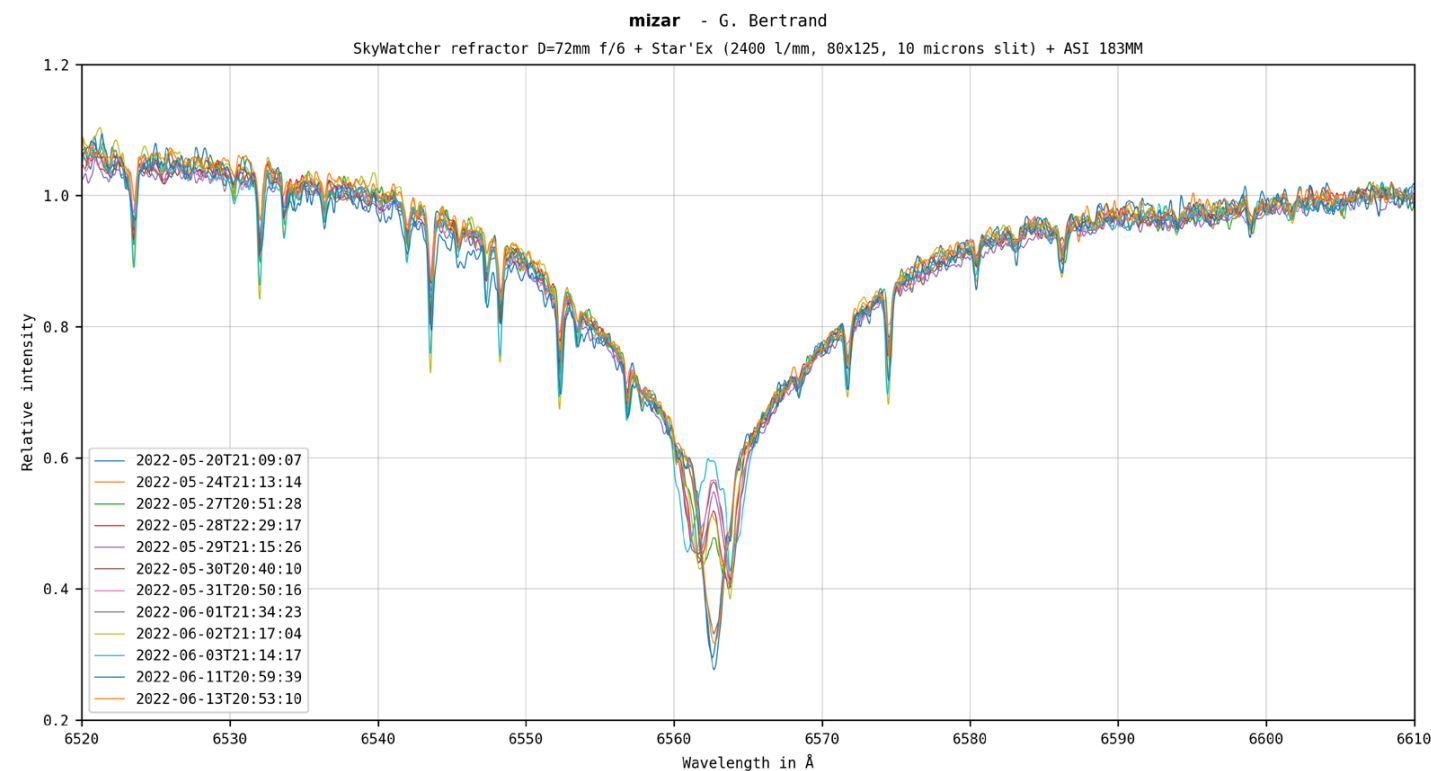


Figure 4: 12 spectres haute résolution centrés sur la raie Ha de Mizar.

#### 1.1 Réduction des données

La réduction des données est effectuée par le logiciel specINTI de manière quasi-automatique. (D'autres options de logiciels gratuits s'offrent à vous [10], specINTI est le plus récent et certainement l'un des plus simples à prendre en main). Une première étape de pré-traitement classique dark/flat/offset est réalisée par specINTI pour chaque spectre. Petite subtilité pour le flat où il faudra utiliser une source de lumière continue (ex lampe halogène) ne contenant pas de raies spectrales. Le logiciel se charge ensuite d'effectuer un retrait automatique du fond de ciel permettant de conserver uniquement le profil de l'étoile observée et ainsi de retirer les raies liées à la pollution lumineuse ou à des effets atmosphériques. Puis des corrections

géométriques sont appliquées, à savoir :

- Correction du "smile" : courbure des raies
- Correction du "slant" : inclinaison des raies
- Correction du "tilt" : inclinaison de la trace du spectre

SpecINTI va également détecter automatiquement les raies du néon se trouvant dans nos spectres bruts (voir figure 5) lui permettant ainsi d'établir le lien entre les numéros de pixels et la longueur d'onde exprimée en Angströms. Ce lien est trouvé via une méthode mathématique dite des « moindres carrés », à partir de laquelle sont ajustés au mieux les termes d'une fonction polynomiale. Dans le jargon, nous parlons de « polynôme de dispersion ».

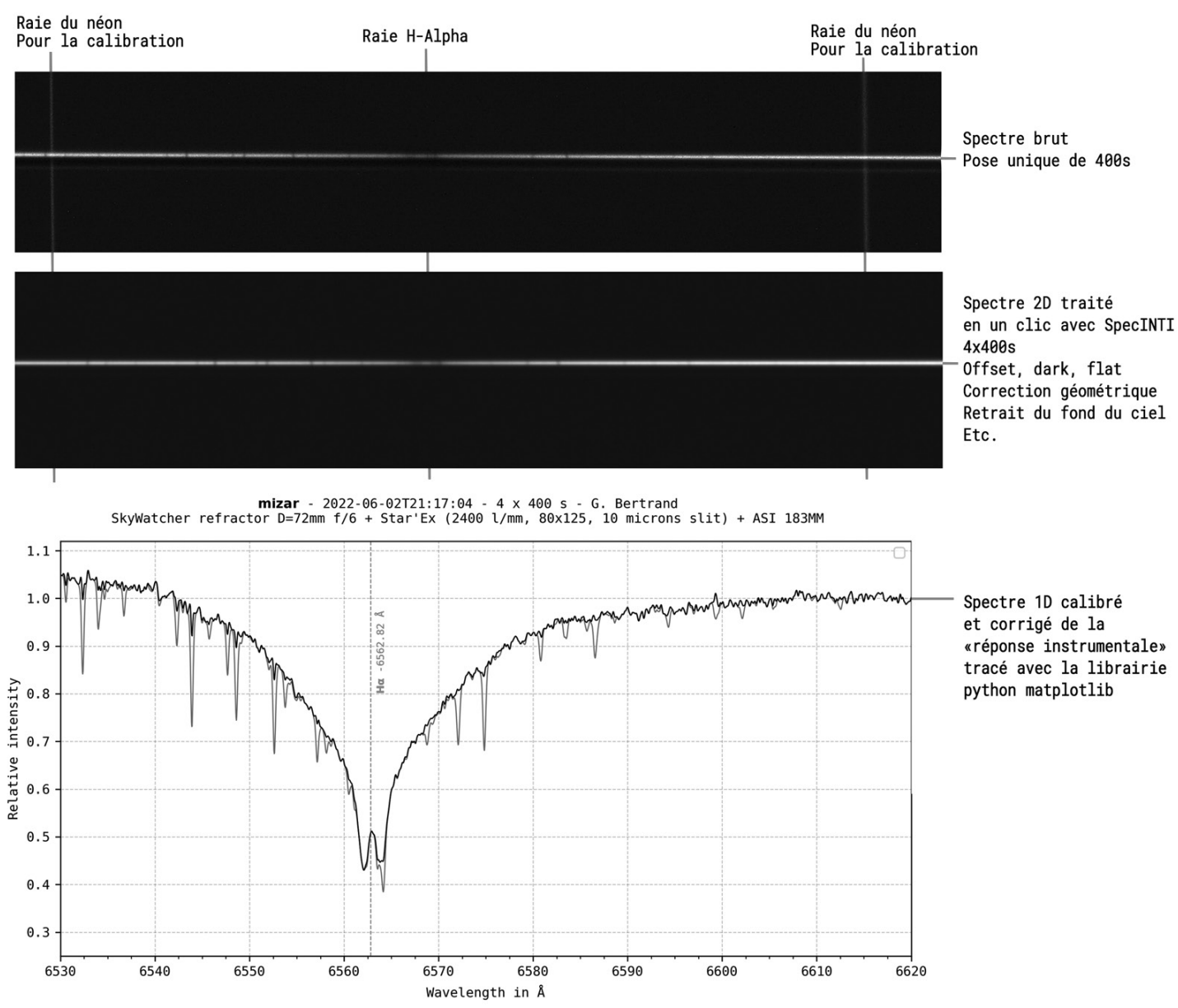


Figure 5 : Spectre brut, 2D traité et 1D de Mizar A. Sur le spectre 1D (figure du bas), notez le dédoublement de la raie Ha, signature des deux composantes de la binaire. En noir, les raies telluriques ont été retirées pour faciliter la mesure de la position des raies des deux composantes. Ces raies telluriques proviennent de l'absorption par les molécules H<sub>2</sub>O (vapeur d'eau dans l'atmosphère) et apparaissent lorsque la lumière de l'étoile traverse l'atmosphère terrestre.

Ensuite, le logiciel nous aide à calculer une "réponse instrumentale" permettant de rectifier les distorsions du spectre par l'atmosphère et l'instrumentation. Pour finir, un décalage est appliqué automatiquement sur chaque spectre en fonction de la date d'acquisition pour compenser la vitesse radiale héliocentrique de la Terre.

### 1.2 Mesures et résultats

La vitesse radiale  $V_r$  peut maintenant être déterminée en mesurant l'écart de la position des raies des deux composantes par rapport à la position théorique de la raie H-alpha (figure 2). Les mesures sont réalisées à l'aide du logiciel ISIS.

Une fois toutes les vitesses radiales obtenues, le programme BinaryStarSolver [11] est utilisé pour trouver les paramètres orbitaux présentés dans le tableau 1 permettant de tracer la courbe présentée sur la figure 6. L'anomalie moyenne et l'anomalie excentrique permettant de calculer l'anomalie vraie sont obtenues en utilisant les méthodes du module python OrbitalPy [12]. Le logiciel ISIS permet d'interpoler les points de mesure et de générer un spectre 2D de notre système binaire

(voir figure 7). ISIS produit une image en deux dimensions, avec l'axe spectral horizontal et l'axe temporel vertical. Le résultat permet de suivre de manière parlante l'évolution temporelle des objets.

	<i>Budovicová, et al.   Jul, 2004</i>	<i>G. Bertrand   Jul, 2022</i>
$P$ [d]	$20.53835 \pm 0.00001$	<b><math>20.4313 \pm 0.09</math></b>
$T$ [jd-2450000]	$49114.81 \pm 0.06$	<b><math>59733.30 \pm 0.043</math></b>
$K1$ [km/s]	$68.85 \pm 0.02$	<b><math>68.0160 \pm 0.5</math></b>
$K2$ [km/s]	$65.51 \pm 0.4$	<b><math>63.849 \pm 0.5</math></b>
$\gamma$ [km/s]	$-5.6$	<b><math>-5.244 \pm 0.39</math></b>
$\omega$ [°]	$104.16 \pm 0.05$	<b><math>107.978 \pm 2.5</math></b>
$e$	$0.542 \pm 0.004$	<b><math>0.558 \pm 0.021</math></b>

Tableau 1 : Paramètres orbitaux obtenus pour Mizar et comparés avec une étude professionnelle datant de 2004.

**Mizar** - HD116656 - Phased radial-velocities - 8 observations collected from May to June 2022

SkyWatcher refractor D=72mm f/6 + Star'Ex (2400 l/mm, 80x125, 10  $\mu$ m slit) + ASI 183MM

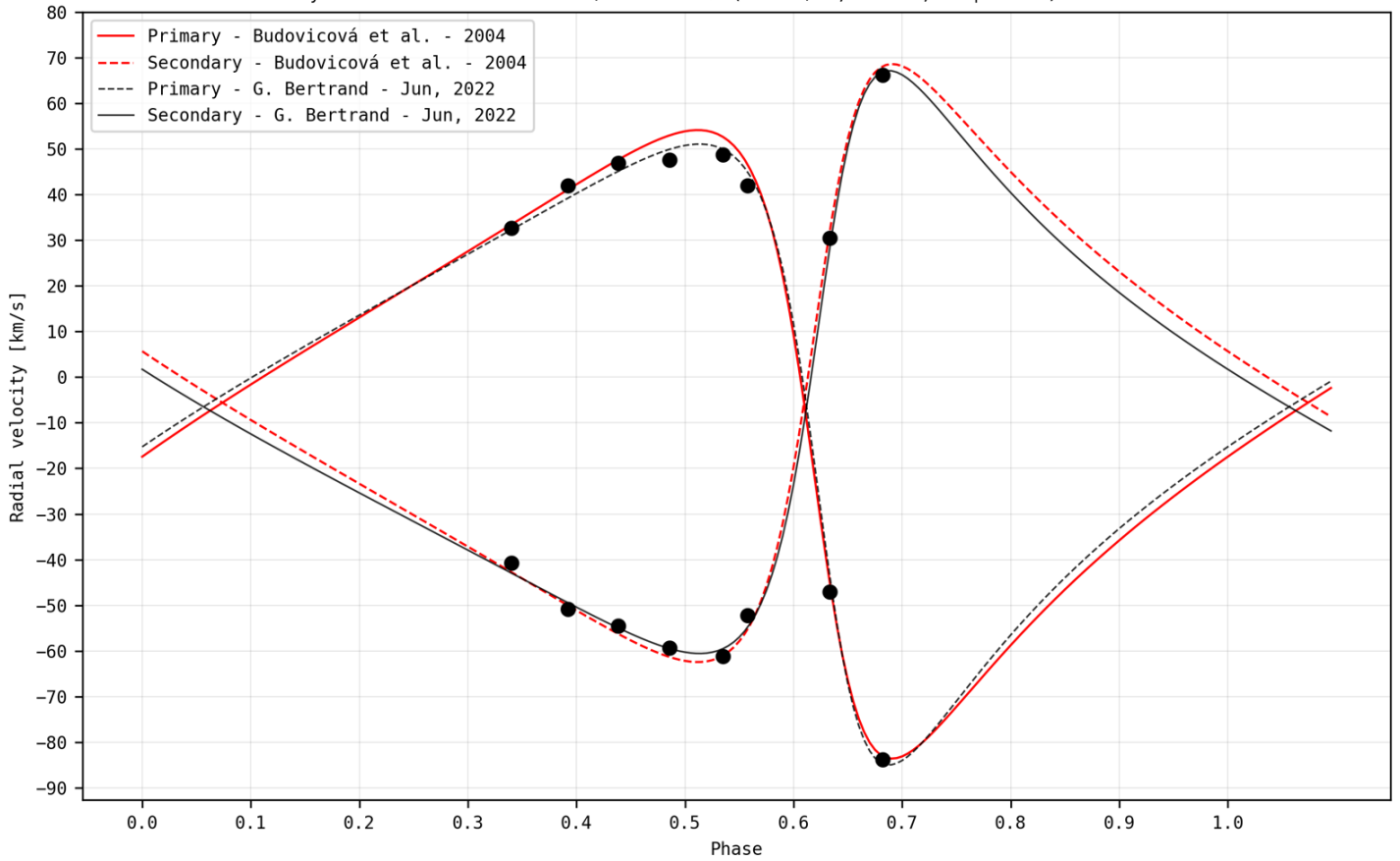


Figure 6 : Courbe de vitesses radiales de Mizar. En noir, les courbes de vitesse radiale des deux composantes ajustées à l'aide de Binary Star Solver et les points de mesure des 8 observations dans lesquels les spectres des deux composantes sont séparés. En rouge, pour comparaison, les courbes de vitesse radiale tirées de l'étude de Budovicová et al, 2004.

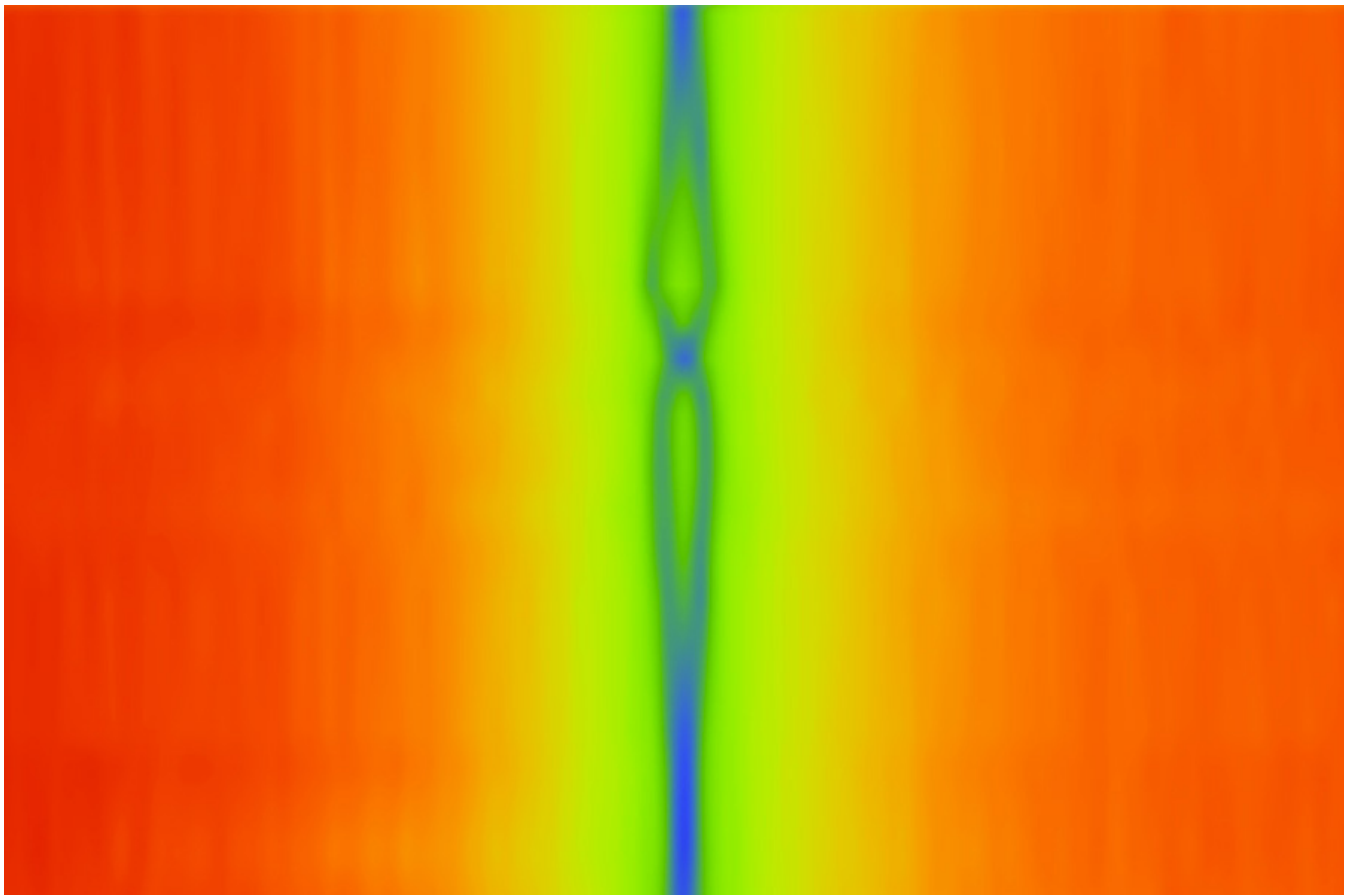


Figure 7 : Spectre 2D obtenu à partir de 12 spectres à l'aide d'ISIS. La hauteur du graphique représente une période de la binaire. Le temps s'écoule de bas en haut.

## 2 Alpha Draconis

$\alpha$  Dra (Thuban, HD 123299) est une binaire spectroscopique de type spectral A0III bien étudiée en tant que système SB1 (Single-lined Spectroscopic Binary). Seul le spectre de la composante principale est détecté.

La première détermination des paramètres orbitaux d' $\alpha$  Dra a été réalisée par Harper en 1907, puis affinée avec des études plus récentes : Kallinger et al. (2004) [13] et Bischoff et al. (2017) [14]. L'étoile a également été résolue pour la première fois avec l'interféromètre optique de précision Navy (NPOI). En 2019, Bedding et al. [15] découvrent en analysant les courbes de luminosité du satellite TESS que  $\alpha$  Dra est également une binaire à éclipse, une des plus brillantes actuellement découverte ( **$V=3.68$** ). En 2021, K Pavlovski et al. [16] publient une première analyse de la binaire en tant que système SB2 (Double-lined Spectroscopic Binary). Ils ont pour cela utilisé le spectrographe haute-résolution ( **$R=85\ 000$** ) HERMES, installé sur le télescope Mercator (1,2 m) à La Palma et les données du satellite TESS.

L'idée ici est de redéterminer les paramètres orbitaux de

l'étoile à l'aide du spectrographe Star'Ex monté sur une lunette de 72mm en fixant la période du système avec  $P=51.41891$  (K Pavlovski et al. 2021) obtenue à partir des courbes de luminosité de TESS.

Les observations sont réparties sur 8 nuits entre mai 2022 et octobre 2022 (Figure 8), le matériel, les logiciels et la méthode de réduction des données sont les mêmes que pour Mizar A sauf pour la mesure des vitesses radiales où j'ai automatisé tout le processus en développant un script Python. Pour Alpha Draconis, le spectre n'est pas dédoublé (SB1). Nous obtenons uniquement la courbe de vitesse radiale de la composante principale (Figure 9).

Les résultats obtenus (tableau 2) à partir de seulement 8 spectres sont cohérents avec les études récentes, cependant il faudrait plus de points de mesure pour déterminer précisément la période du système. Si je laisse ce paramètre libre j'obtiens pour le moment  **$P=51.56$  jours** et une amplitude pour la composante principale  **$K= 46.983$  km/s**.

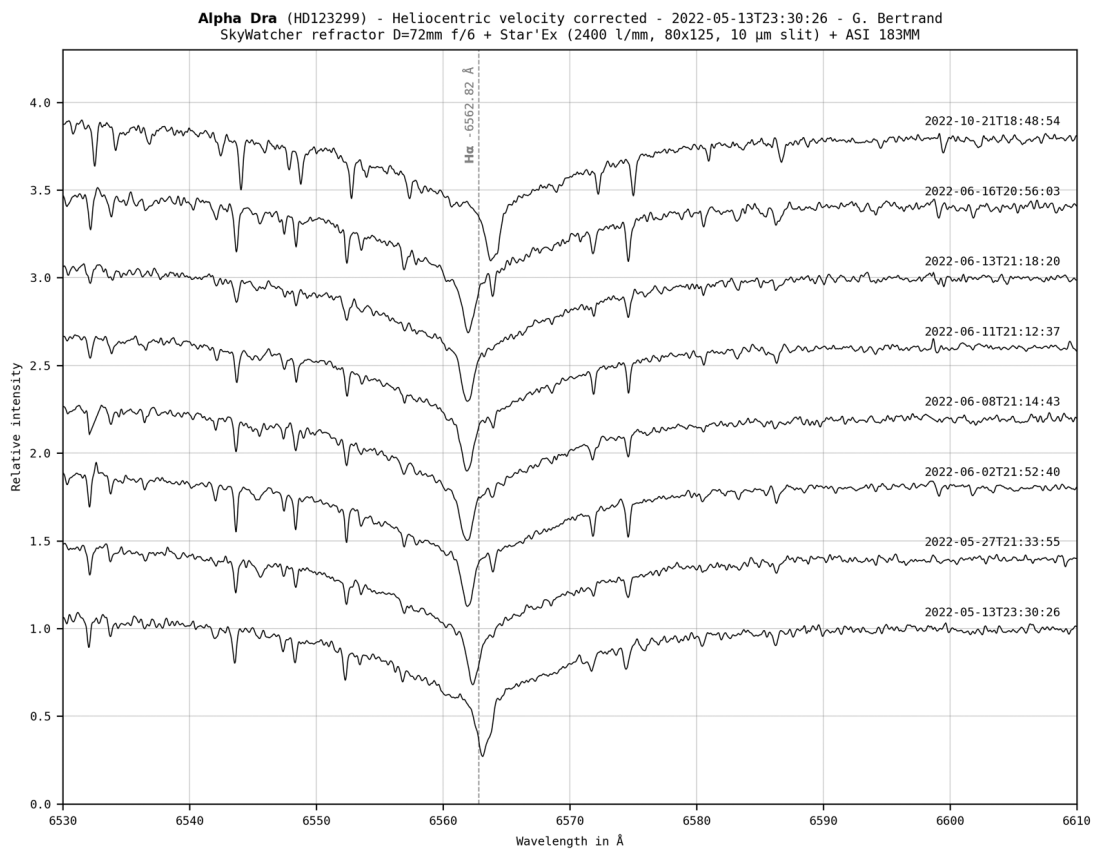


Figure 8 : 8 spectres haute-résolution d'Alpha Draconis. La position de la raie Ha au repos est indiquée en rouge.

	<i>R.Bischoff, et al. 2017 [14]</i>	<i>K.Pavlovski, et al. 2021[16]</i>	<i>G.Bertrand 2022</i>
$P$ [d]	$51.440 \pm 0.024$	$51.41891$ (fix)	<b><math>51.41891</math> (fix)</b>
$K_{\text{primary}}$ [km/s]	$47.48 \pm 0.21$	$48.512 \pm 0.054$	<b><math>47.816 \pm 0.79</math></b>
$K_{\text{secondary}}$ [km/s]	-	$63.58 \pm 0.41$	-
$\gamma$ [km/s]	$13.50 \pm 0.12$ -	-	<b><math>13.937 \pm 0.48</math></b>
$\omega$ [°]	$21.8 \pm 0.6$	$21.28 \pm 0.13$	<b><math>20.9712 \pm 3.89</math></b>
$e$	$0.426 \pm 0.004$	$0.4229 \pm 0.0012$	<b><math>0.43301 \pm 0.013</math></b>
$f$ (m) [en masse solaire]	$0.422 \pm 0.008$		<b><math>0.42658 \pm 0.023</math></b>

Tableau 2 : Paramètres orbitaux obtenus pour Alpha Draconis et comparés avec deux études professionnelles récentes.

## $\alpha$ Dra – Phased radial – velocities – observations collected from April 2022 to April 2023

Star'Ex HR (2400 l/mm) - G. Bertrand & A. Leduc

T0=2451441.804 P=51.4381

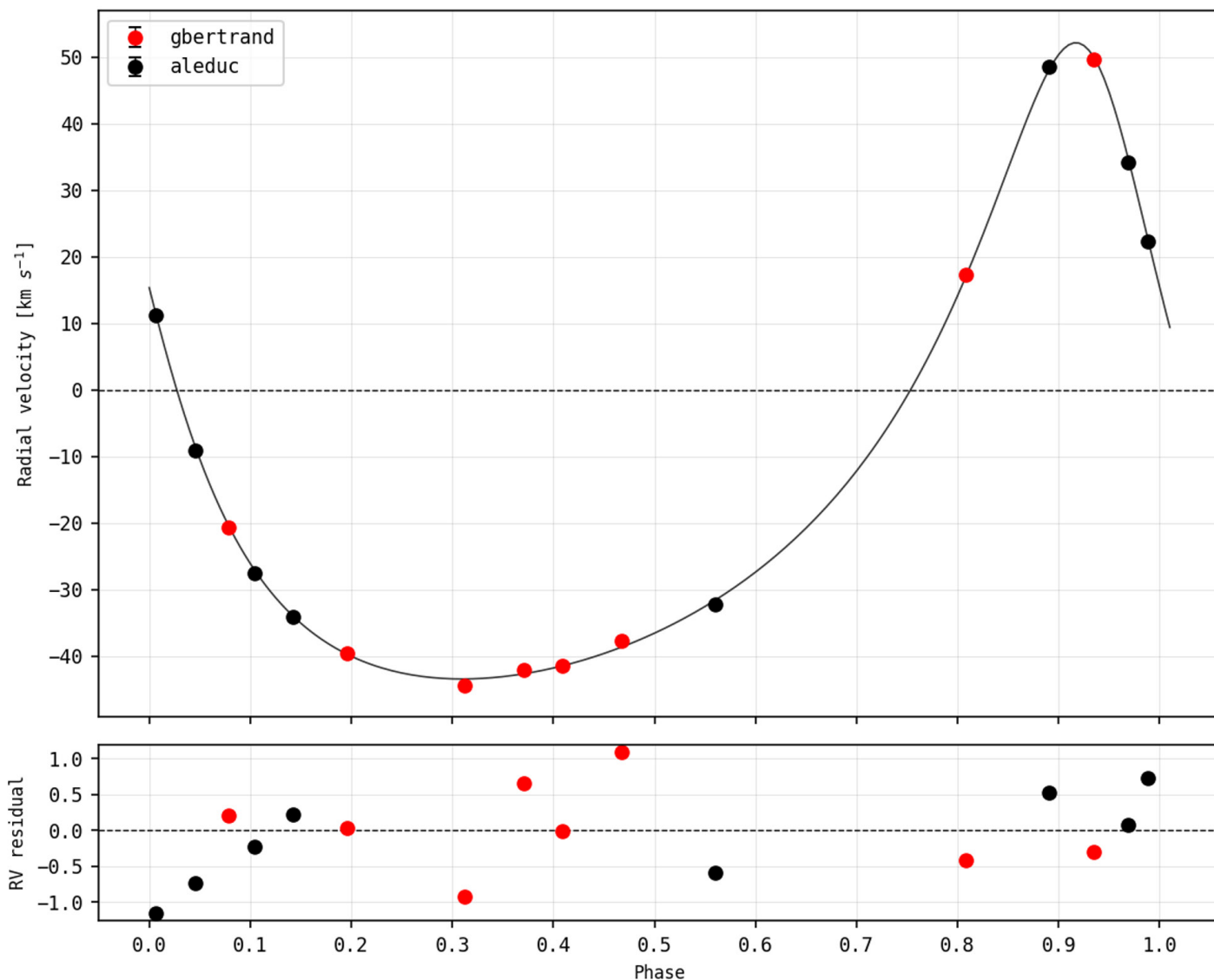


Figure 10: Courbe de vitesse radiale ajusté par Binary Star Solver avec 16 points de mesure. Les paramètres orbitaux de la solution calculée se trouvent dans le tableau 2 colonne "G. Bertrand, A. Leduc, 2023".

Début 2023, Arthur Leduc a réalisé 8 spectres haute résolution avec un Star'Ex associé à un Newton SkyWatcher 130 F/8 ou un téléobjectif Maksutov MTO 100 f/7.5 [17]. Les résultats sont très bons et illustrent une fois de plus le formidable potentiel des petits instruments en spectrographie. L'ajout de ces nouveaux points de mesure (figure 10 et tableau 2) améliore sensiblement la précision des résultats et permet de ne plus fixer la période du système.

### Perspectives

Les deux exemples ci-dessus démontrent qu'il est possible, pour un astronome amateur motivé, d'effectuer des mesures précises des principaux paramètres orbitaux d'une étoile double spectroscopique avec du matériel abordable et des logiciels de réduction de données bien documentés, faciles à prendre en main.

La précision des résultats pourrait être affinée en ajoutant des points de mesure et en regroupant nos observations. Nous pourrions alors envisager de concentrer les efforts de plusieurs observateurs sur des binaires où il reste des paramètres à

préciser, à confirmer ou à déterminer.

L'initiative STAROS [17] qui vient d'être lancée va dans ce sens-là. Il s'agit d'une base de données spectrales interactive permettant de faciliter les échanges et la coordination entre les observateurs. Ce sera la plateforme parfaite pour se lancer dans la spectrographie et progresser vers des objectifs ambitieux. Des étoiles doubles spectroscopiques seront très probablement au programme !

En attendant voici une liste de mes prochaines cibles (tableau 3). Deux objectifs pour moi : le premier sera d'essayer de réussir à calculer les erreurs liées à l'incertitude des mesures, à la précision de la calibration etc. afin de les propager dans la chaîne de calcul. Le second objectif sera de voir jusqu'où mon matériel me permet d'aller en termes de capacité de mesure de petite vitesse radiale, d'où le choix de cibles brillantes de type SB1 mais avec des demi-amplitudes K relativement petites  $\leq 10$  km/s. La sélection a été réalisée à l'aide du catalogue SB9 (Pourbaix et al. 2004) [18] regroupant les caractéristiques (vitesses radiales et paramètre orbitaux) de plus de 5000 étoiles



Aa Name	Type s...	N° HD	# Mag (V)	# K (km.s...	# Period (P)	Ref
8 Cep	B0.5IIs	205021	3.23	3.1	10.893	<a href="http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1969ApJ...158..269F">http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1969ApJ...158..269F</a>
Iam Tau	B4IV	25204	3.41	10.5	33.07	<a href="http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1982ApJ...263..289F">http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1982ApJ...263..289F</a>
sig01 Tau	A4m	29479	5.076	7.9	38.951	<a href="http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1985ApJS...59..229A">http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1985ApJS...59..229A</a>
iot Crb	A0pHg	143807	5.12	2.3	35.474	<a href="http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1980MNRAS.191..521D">http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1980MNRAS.191..521D</a>
4 Cyg	B8p	183056	5.15	5.7	35.0225	<a href="http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1973ApJS...25..137A">http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?1973ApJS...25..137A</a>

Tableau 3 : Prochaines cibles

doubles spectroscopiques.

## Références

- [1] Le projet Sol'Ex & Star'Ex C. Buil, <http://www.astrosurf.com/solex>, et <https://www.shelyak.com/boutique/debuter/solex-starex-kit/>
- [2] Chaîne Youtube astro-spectro C. Buil, [https://www.youtube.com/channel/UCdlVj1AAV7y\\_KxBlwhjChug](https://www.youtube.com/channel/UCdlVj1AAV7y_KxBlwhjChug)
- [3] Les logiciels specINTI et spectINTI Editor C. Buil, [http://www.astrosurf.com/solex/specinti1\\_fr.html](http://www.astrosurf.com/solex/specinti1_fr.html)
- [4] Module Python : Binary Star Solver <https://github.com/NickMilsonPhysics/BinaryStarSolver>
- [5] "A Python Code to Determine Orbital Parameters of Spectroscopic Binaries": <https://arxiv.org/abs/2011.13914>
- [6] SharpCap, <https://www.sharpcap.co.uk/>
- [7] PHD2, <https://openphdguiding.org/downloads/>
- [8] Cartes du Ciel P. Chevalley, <https://ap-i.net/skychart/fr/start>
- [9] Isis : <http://www.astrosurf.com/buil/isis-software.html>
- [10] Logiciels de réduction de données :
- Demetra : <https://www.shelyak.com/logiciel/logiciel-demetra/>
  - SpcAudace : <http://spcaudace.free.fr/>
  - Visual Spec : <http://www.astrosurf.com/vdesnoux/>

[11] Script python : Spectroscopic Binary Star System <https://github.com/guillbertrand/spectrobinarystarsystem> Pour une série de spectre : calcul de la correction barycentrique automatique, mesure des centres raies automatique, calcul des vitesses radiales et de la solution orbitale, mise en forme des résultats.



### Guillaume Bertrand

Astronome amateur depuis l'âge de 15 ans. J'ai très rapidement intégré le club "Village du ciel" basé en Vendée et la SAF. Mon premier instrument était un 114/900, utilisé en astrophotographie, avec un partage de mes observations avec la commission des observations planétaires de la SAF. En parallèle, de 2005 à 2009, j'ai développé et maintenu le logiciel de calcul d'éphémérides planétaires AstroCalc. Cet exercice m'a permis de m'auto-former au développement logiciel et web et d'en faire mon métier. En 2018, je décide de me construire un dobson de 400mm compact dédié uniquement au visuel et au dessin... Fin 2021, je découvre le projet Sol'ex/Star'ex initié par Christian Buil. Je décide d'investir le sujet avec l'idée de me mettre à la spectrographie. Tout va très vite, les premiers résultats me donnent des frissons ! Je lis énormément de choses sur le sujet. La spectro me passionne ! Pouvoir répéter des observations pro avec des configurations matérielles minimales ou encore de mieux collaborer à des projets pro-am est ultra motivant.

[12] Module python OrbitalPy : <https://pythonhosted.org/OrbitalPy/modules/utilities/>

[13] Orbital solutions for the A-type binaries  $\alpha$  Dra and Mizar A using spectrum disentangling Budovicová, A., et al. | Jul, 2004. <https://articles.adsabs.harvard.edu/full/2004IAUS..224..923B/0000925.000.html>

[14] Radial velocity measurements and orbit determination of eight single-lined spectroscopic binary systems R. Bischoff, et al. | Jul 17, 2017. <https://arxiv.org/pdf/1707.05090>

[15] A Dance with Dragons: TESS reveals  $\alpha$  Draconis is a detached eclipsing binary Bedding et al., <https://arxiv.org/abs/1910.12449>

[16] Dynamical parallax, physical parameters and evolutionary status of the components of the bright eclipsing binary  $\alpha$  Draconis K. Pavlovski, et al. | Nov 9, 2021 <https://arxiv.org/abs/2111.03887>

[17] Base de données interactive STAROS <https://staros-projects.org/>

[18] SB9: The Ninth Catalogue of Spectroscopic Binary Orbits <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0406573> Version dynamique consultable sur le web : <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/star-catalog/sborbitcat.html>

## Documentation supplémentaire

- La binaire spectroscopique beta Aurigae : <https://www.shelyak.com/la-binaire-spectroscopique-beta-aurigae/>
- Astronomie Astrophysique - 5e éd. 2019 - Agnès Acker - Ed. Dunod ISBN 2100798588

