

ETUDE DE LA PROPAGATION DES ONDES SONORES DANS L'ATMOSPHERE DE L'ÉTOILE

R SCUTI

Rapport Final

Théo Govekar, Julie Leproux, Pauline Lomba

09/05/2022

Equipe SRS:

srscuti.projet@gmail.com

Encadré par:

Philippe Mathias

philippe.mathias@irap.omp.eu



“C'est dans les étoiles que brille la lumière des songes.”
Sonia LAHSAINI

Remerciement

Nous adressons nos remerciements les plus respectueux au Docteur Philippe Mathias qui nous a encadré lors de ce travail de fin de licence. Il s'agit là de notre première expérience dans le monde de la recherche et nous avons apprécié le faire sous sa direction.

Nous avons beaucoup appris sur la démarche scientifique (et sur ses limites parfois), sur les contraintes et aléas de la science. Pour résumer, nous avons vécu une passionnante aventure scientifique, et nous exprimons à nouveau notre reconnaissance envers M. Mathias ainsi que à toute l'équipe pédagogique, qui nous a permis d'apprendre et de grandir par leurs remarques et leurs enseignements.

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de l'évolution de la vitesse du son

Figure 2 : Calcul des phases de R Scuti

Figure 3 : Explication de la reconstitution du profil de vitesse moyenne par des courbes gaussiennes

Figure 4 : Evolution de la vitesse moyenne de R Scuti pour plusieurs cycles de pulsations

Figure 5 : Caractéristiques des gaussiennes pour les vitesses moyennes de R Scuti

Figure 6 : Caractéristiques des gaussiennes pour la raie FeI (654.6 nm)

Figure 7 : Caractéristiques des gaussiennes pour la raie H α (656.3 nm)

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des phases obtenues

Glossaire

Classe spectrale : Classement d'étoiles en fonction de leur température, allant de M (moins de 3500 K) à O (plus de 25 000 K).

Étoile de population II : Étoiles créées il y a environ 11 à 13 milliards d'années, elles possèdent notamment une faible teneur en métaux.

Étoile variable : Étoile dont la luminosité varie au cours du temps.

Jour julien : Le jour julien est un système de datation consistant à compter le nombre de jours à partir d'une date conventionnelle fixée au 1^{er} janvier de l'an 4713 av. J.-C.

Métaux : Éléments autres que l'hydrogène et l'hélium.

Magnitude : Mesure de la luminosité, sans unité.

Magnitude apparente : Magnitude observée depuis la Terre ($m = -2,5 \log(l) + K$), avec l la luminosité de l'étoile et K une constante. Une étoile est considérée comme visible à l'œil nu pour $m \leq 6$.

Photosphère : Couche externe de l'atmosphère d'une étoile. Il s'agit de la couche qui émet l'essentiel des photons reçus.

Post-AGB : Post-Asymptotic Giant Branch. Étoile en fin de vie caractérisée par le fait que son noyau de carbone/oxygène est entouré par de l'hélium et une enveloppe d'hydrogène.

Recombinaison : Formations d'atomes ou d'ion par associations d'électrons et de noyau atomique.

Spectropolarimètre : Appareil de mesure permettant la mesure du spectre et de la polarisation de la lumière.

Redshift : Décalage de toutes les longueurs d'ondes du spectre vers les longueurs d'ondes rouges, ce phénomène est une conséquence de l'éloignement de la source par rapport à l'observateur.

Blueshift : Décalage de toutes les longueurs d'ondes du spectre vers les longueurs d'ondes bleues, ce phénomène est causé par le rapprochement de la source par rapport à l'observateur.

Sommaire

Remerciement

Liste des figures

Liste des tableaux

Glossaire

Sommaire

Introduction 1

Présentation de la méthodologie 3

Calcul des phases 3

 Identification des données 3

 Association phase/jour 4

 Comparaison des phases 5

Etude de la vitesse moyenne de l'étoile 6

 Reconstitution des profils de vitesse par des courbes gaussiennes 6

 Analyse des caractéristiques des courbes gaussiennes 9

Etude des raies atomiques 11

Conclusion 15

Références 16

Notre avie sur le TER 17

Annexes 18

1. Introduction

Les étoiles RV Tauri sont un groupe d'une centaine d'étoiles, elles entrent dans la catégorie des étoiles pulsantes. Une des étoiles représentative de ce genre est R Scuti (ou R Sct), qui en est la plus brillante (GCVS¹).

Cette étoile se situe dans la constellation du Scutum, elle est visible entre avril et octobre depuis l'hémisphère nord. Il s'agit d'une étoile de masse relativement faible, entre 0,6 et 0,7 masse solaire (Matsuura et al., 2002), et de température effective de l'ordre de 4500 K (Kipper & Klochkova, 2013). R Scuti s'éloigne du Soleil, sa vitesse relative est estimée à 42 ± 5 km/s (S. Georgiev, 2022). Les étoiles RV Tauri sont des étoiles de population II, d'après Wallerstein & Cox (1984), dont la période de variation de luminosité est comprise entre 30 et 150 jours.

R Scuti est une étoile dont la variation est chaotique. En effet, lors de l'analyse de la magnitude de cette étoile, différents pics ont été observés. Ces pics périodiques ont été nommés : minima principaux et minima secondaires. Une période a alors été définie comme l'intervalle de temps séparant deux minimums principaux successifs (Gillet et al., 1990). Une période moyenne a toutefois été estimée à 142 jours (Lèbre & Gillet 1991a).

La magnitude apparente moyenne de R Scuti est de 4.2, l'étoile est alors visible à l'œil nu. Mais lorsqu'elle est dans un état de minimum principal sa magnitude peut monter jusqu'à 8.6 (GCVS), il devient alors nécessaire d'utiliser des instruments pour l'observer.

Bien que R Scuti soit observée depuis des centaines d'années, le mécanisme à l'origine des variations de luminosité est encore mal connu.

Lorsque R Scuti pulse, des ondes sonores sont émises dans toutes les directions depuis les couches subphotosphériques. La partie de l'onde allant vers le centre de l'étoile est rapidement absorbée. Les ondes de matière se propageant vers l'extérieur peuvent donner lieu à des ondes de choc marquées par des minimums principaux et secondaires. En 1991, Lèbre & Gillet², ont associé la présence de ces deux ondes de chocs à des pics d'accélération photosphérique. Ils déterminent que la plus forte accélération est un marqueur du minimum principal et l'accélération la plus faible un marqueur du minimum secondaire.

En allant vers l'extérieur, le rapport entre la pression et la masse volumique du gaz constituant le milieu diminue, ce qui entraîne la diminution de la vitesse du son dans le milieu environnant. En diminuant, la vitesse du son devient inférieure à la vitesse de l'onde, l'onde sonore devient supersonique et engendre une onde de choc. La figure 1 illustre un exemple de ce phénomène, où la vitesse de l'onde est considérée comme constante.

¹ General Catalogue of Variable Stars

² Lèbre & Gillet 1991a

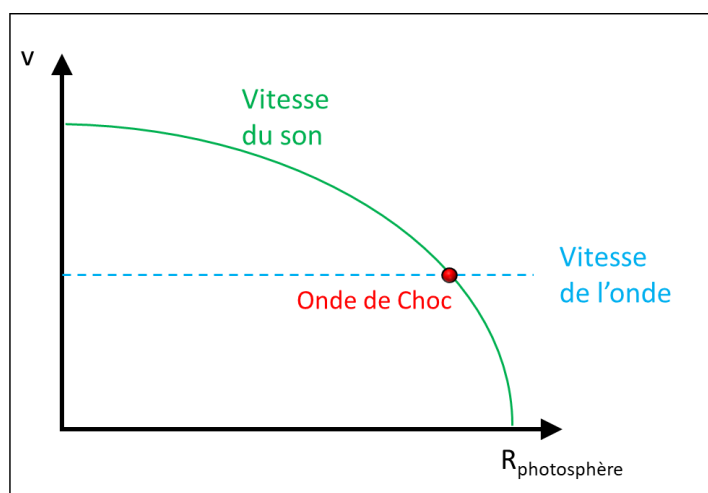


Figure 1: Schéma de l'évolution de la vitesse du son

Légende : Représentation simplifiée de la vitesse du son (vert) et de la vitesse de l'onde sonore (bleu) en fonction du rayon de la photosphère. Le point de déferlement de l'onde de choc est indiqué en rouge.

Dans le spectre de R Scuti, les ondes de choc se manifestent de plusieurs manières, entre autres : un dédoublement des raies d'absorptions des métaux (Lèbre & Gillet, 1991b), et un pic d'émission d'hydrogène α (Gillet et al., 1990).

Le dédoublement des raies métalliques est dû au passage de l'onde de matière dans la photosphère. Le gaz se situant après le front de l'onde est en partie entraîné par le passage de celle-ci. A contrario, le gaz en aval du front d'onde est encore dans la dynamique du cycle précédent, il retombe vers l'étoile. C'est cette différence de vitesse qui donne, par application directe de l'effet Doppler, l'impression que la raie d'absorption se dédouble. Ce phénomène de dédoublement des raies de lumière dû à une différence de vitesse est nommé le mécanisme de Schwarzschild (Schwarzschild, 1952).

En ce qui concerne le pic d'émission de $H\alpha$, il est créé par la recombinaison des atomes dans le sillage de l'onde.

De manière à étudier la propagation de ces ondes dans la photosphère de R Scuti, nous nous appuyerons sur les travaux réalisés par Stephen Georgiev et Khadija Chafouai dans le cadre de leur thèse. Philippe Mathias, qui a participé à l'encadrement de ces thèses, nous a donné accès à leurs jeux de données. Ces données ont été obtenues à l'aide des spectropolarimètres Narval (2014-2019) et Neo-Narval (2020-2022) de l'Observatoire du Pic du Midi, ainsi que sur le site AAVSO³.

Nous nous concentrerons sur l'étude de la vitesse de déplacement des ondes de choc dans l'atmosphère de R Scuti, afin de mettre en évidence l'interaction entre la dynamique de ces ondes et les régions de formation des différentes raies spectrales.

L'étude de la vitesse de déplacement dans l'atmosphère de R Scuti passe par la comparaison de ses phases. Ainsi, la première partie de cette étude consiste en la conversion des jours d'observations de l'étoile en phases. En effet, le regroupement par phase est essentiel pour pouvoir comparer les périodes entre elles.

³ Association américaine des observateurs d'étoiles variables

Une fois les phases de R Scuti identifiées, le spectre de l'étoile pourra être analysé pour en calculer la vitesse de propagation des ondes dans son atmosphère. Pour ce faire, notre travail se concentrera sur les raies spectrales de certains atomes, ces raies seront alors isolées, puis seront ajustées par un ensemble de profils gaussiens pour en connaître les caractéristiques précises.

Présentation de la méthodologie

Pour cette étude, trois types d'informations ont été utilisées⁴.

Un fichier de référence contenant les informations relatives aux nuits d'observations, nommé `night.all` et 195 fichiers contenant les données mesurées par Narval et Neo-Narval répartis en deux catégories nommés `avN1` et `avs`. Il existe au moins un fichier `avN1` et `avs` par nuit d'observation.

Les fichiers de catégorie `avN1` contiennent les relevés de flux lumineux normalisés mis en relation avec les vitesses de déplacement de R Scuti. Ces vitesses se fondent sur une moyenne de toutes les longueurs d'ondes du spectre. Les fichiers `avs` présentent également des valeurs de flux lumineux, mais cette fois-ci, elles sont associées à des longueurs d'ondes allant des proche ultra-violet au proche infrarouge ($\sim 1 \mu\text{m}$).

Tous les fichiers sont lus par l'intermédiaire du logiciel Spyder et donc du langage de programmation Python.

Pour analyser les données transmises, nous nous sommes appuyés sur le programme nommé `fitngauss.py`. Ce programme permet d'ajuster, par une à trois gaussiennes, les courbes représentant les raies spectrales par rapport aux vitesses pour les fichiers `avN1`. Notre premier travail fût d'améliorer ce programme pour que le nombre de courbes gaussiennes tracées soit variable, et s'adapte à la situation.

Dans un deuxième temps, nous avons récupéré les paramètres des gaussiennes en sortie de `fitngauss.py`, (flux, vitesse et largeur à mi-hauteur des gaussiennes) pour obtenir une représentation en fonction des phases de pulsation de R Scuti. Cette manipulation a eu pour but la visualisation de motifs dans la périodicité de ces paramètres. Elle permet également de vérifier la continuité entre les instruments Narval et Neo-Narval.

Enfin, nous avons adapté le programme `fitngauss.py` pour permettre l'analyse des fichiers `avs`. Dans ce cas, il a fallu choisir des longueurs d'ondes spécifiques à étudier. Les longueurs d'ondes choisies sont les suivantes : 654.6 nm (FeI), 586.6 nm (TiI), 667.8 nm (HeI) et la première raie de balmer 656.3 nm (H α). Il s'agit des longueurs d'ondes déjà étudiées par le groupe de TER, FeNaH (Lazzarotto & Louis, 2018).

2. Calcul des phases

Identification des données

Les données collectées par Narval et Neo-Narval, entre le 15 juillet 2014 et le 20 août 2021, sont des données spectrométriques, il est donc impossible d'en déduire les phases de R Scuti. Nous nous sommes donc appuyés sur les données transmises par le site amateur AAVSO qui recense les magnitudes apparentes de R Scuti. Ces données présentent l'avantage d'être continues, plus denses et plus

⁴ Le détail de ces fichiers est présenté dans l'annexe 1.

conséquentes car les relevés s'étendent du 20 juin 1843 au 20 décembre 2021. En effet, cette étoile étant très brillante, elle est donc facilement observable.

L'intervalle de temps couvert par les données AAVSO étant très étendu, il a fallu dans un premier temps cibler les données encadrant et correspondant aux nuits d'observations de Narval et Neo-Narval. Sachant qu'une période de pulsation de R Scuti dure en moyenne 140 jours, nous avons décidé d'ajouter ± 100 jours aux bornes de la durée initiale, allant du 15 juillet 2014 au 20 août 2021. Ainsi, nous avons pu utiliser un jeu de données allant du 8 avril 2014 au 28 novembre 2021.

Cet ajustement est réalisé au travers d'un programme développé en langage Python, nommé : Phase_AAVSO.py.

Association phase/jour

Une fois les données de AAVSO réduites, le calcul des phases de pulsations de R Scuti a pu débuter. Pour associer une phase et un jour, il faut au préalable que les jours correspondants aux minimums principaux de luminosité aient été isolés et identifiés comme étant des phases entières des pulsations de R Scuti.

Nous avons d'abord cherché à automatiser la recherche des minimums principaux en essayant de comparer la magnitude moyenne d'un jour donné avec les moyennes des magnitudes apparentes des 20 jours précédents et suivants. En effet, nous avons considéré que si la moyenne journalière est plus grande que les moyennes l'encadrant, le jour devrait être considéré comme un minimum.

Mais, il s'avère que l'étoile R Scuti est trop chaotique pour appliquer cette comparaison. Ainsi sur le conseil de Philippe Mathias, les jours associés aux minimums principaux ont été déterminés graphiquement (Figure 2.a).

Les valeurs ainsi obtenues ont ensuite été ajustées par une boucle Python permettant de vérifier que l'intervalle entre deux minimums successifs est bien de l'ordre de 140 jours.

Une fois que la validité des valeurs des jours correspondants aux minimums principaux de luminosité fut établie et qu'elles correspondaient bien aux phases entières de pulsations de R Scuti, n'importe quel jour a pu être associé à une phase par la formule suivante :

$$\varphi = \frac{jd - jd_{Min}}{P} \quad (1)$$

φ : La phase calculée
 jd : Le jour julien regardé
 jd_{Min} : Premier jour julien de la phase
 P : La période courante

Il est à noter que la phase du premier minimum principal est considérée comme la phase 0. Les valeurs précédant ce minimum sont donc considérées comme ayant une phase négative.

La Figure 2.b représente les magnitudes apparentes en fonction des phases calculées par la formule (1).

Là encore, la caractéristique chaotique des pulsations de R Scuti rend l'application de la formule (1) complexe. En effet, la période n'étant pas définie, le programme Phase_AAVSO.py doit à chaque itérations calculer la durée de la période dans laquelle se situe le jour étudié.

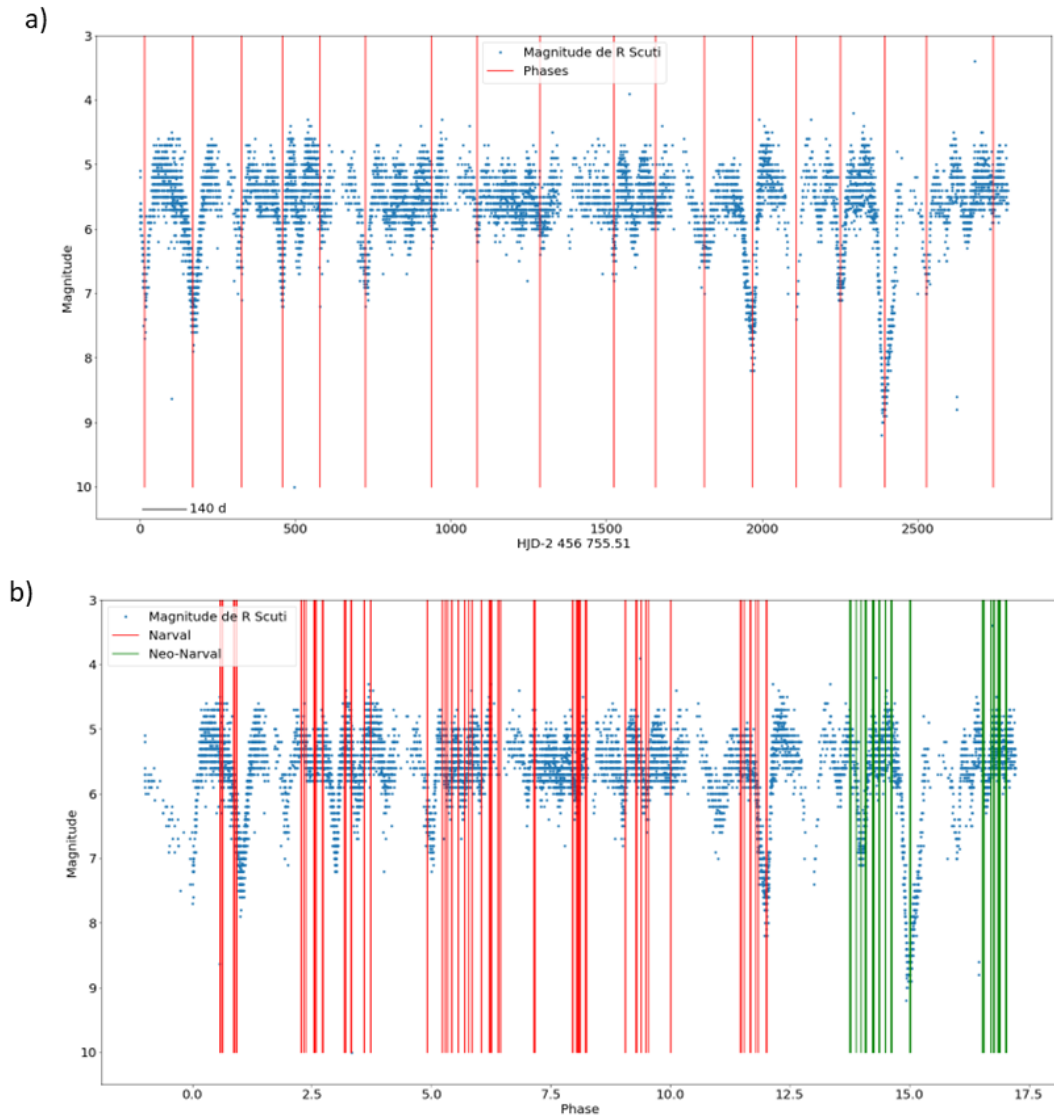


Figure 2 : Calcul des phases de R Scuti

Légende : Magnitude de R Scuti en fonction des jours juliens provenant de AAVSO (point bleu). a) Les bandes rouges représentent les phases entières déterminées graphiquement. b) Les bandes rouges représentent les nuits d'observation de Narval et les bandes vertes celles de Néo-Narval

Comparaison des phases

De manière à pouvoir valider les phases obtenues, nous les avons comparées à la conversion des dates d'observations de Narval en phases présenté par S.Georgiev (Annexe 2). Cette comparaison est partielle car notre intervalle d'étude est plus étendu que celui utilisé par Georgiev dans le cadre de sa thèse.

Nous avons considéré que pour une erreur relative inférieure ou égale à 5% la phase calculée est significativement juste.

Un échantillon de cinq nuits pris au hasard a été utilisé pour illustrer cette comparaison (Tableau 1), le reste des nuits est présenté dans l'annexe 3.

	ϕ_{SRS}	ϕ_{Georgiev}	Erreur relative
15/06/2014	0,58	0,57	1,75 %
28/08/2015	3,33	3,46	3,76 %
22/06/2016	5,56	5,58	0,35 %
01/09/2016	6,05	6,08	0,49 %
20/04/2017	7,16	7,71	7,1 %

Tableau 1 : Comparaison des phases obtenues

Légende : Comparaison des phases obtenues avec celle de Georgiev pour une même nuit d'observation.

L'erreur relative moyenne étant de 3.11 % sur l'entièreté des mesures et la valeur médiane de 2.07 %, nous sommes sous le critère de 5 %. Nos résultats sont donc en adéquation avec ceux obtenus par Georgiev. Nous pouvons de ce fait admettre que notre méthode de calcul est fiable.

Il existe toutefois des sources d'erreurs identifiées, les principales étant la méthode de calcul des phases et le jour de référence.

Concernant, la méthode de calcul des phases, le programme Phase_AAVSO.py se base toujours sur la borne inférieure de la période courante ($j_{\text{d}_{\text{Min}}}$), alors que Georgiev utilise un même jour de référence pour plusieurs périodes.

Les jours de références, associés aux phases entières, ont été choisis manuellement dans les pics de magnitude correspondant aux minimums principaux. Il est donc admis une différence maximum de deux jours avec les jours choisis par Georgiev, sachant qu'une période s'étend sur 140 jours.

3. Etude de la vitesse moyenne de l'étoile

Dans le cadre de l'étude de la vitesse de propagation des ondes dans l'atmosphère de R Scuti, nous avons dans un premier temps étudié les données Narval et Neo-Narval portant sur l'évolution de la vitesse moyenne (av_{N1}) de l'étoile.

Reconstitution des profils de vitesse par des courbes gaussiennes

Le programme fitngauss.py permet l'analyse des fichiers transmis. Ces fichiers contiennent des relevés, pris sur une période allant du 15 juillet 2014 au 20 août 2021, du flux lumineux normalisé et de la vitesse relative de l'atmosphère de R Scuti, par rapport au Soleil. Les vitesses relevées se fondent sur une moyenne de toutes les longueurs d'ondes du spectre.

Afin de pouvoir analyser les données des spectres récoltées par les spectropolarimètres, il a été nécessaire, dans un premier temps, d'ajuster les courbes des profils spectraux en fonction de la vitesse de l'étoile par des gaussiennes pour pouvoir en tirer les caractéristiques générales.

L'équation caractéristique d'une courbe gaussienne est la suivante :

$$f_{gaussienne} = r_f \times e^{\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}} \quad \left| \begin{array}{l} r_f : \text{Le flux résiduel} \\ \lambda \text{ et } \lambda_0 : \text{Les longueurs d'ondes obtenues et longueur} \\ \text{d'onde de référence} \\ \sigma : \text{L'écart type} \end{array} \right.$$

Pour ce faire, un intervalle de recherche de gaussienne a dû être déterminé. Les bornes de chaque intervalles sont calculées de manière à être modulables par un calcul d'écart type et une comparaison de valeurs.

Ainsi, pour définir la borne inférieure, l'écart type des cinquante premières valeurs du flux est mesuré. Puis la borne est fixée dès que la valeur de flux dépasse cinq fois cet écart type. La même méthode s'applique pour la borne supérieure avec cette fois les cinquante dernières valeurs de flux.

Le traitement des valeurs comprises dans l'intervalle doit reconstituer le pic principal de vitesse par une gaussienne. Le programme cherche à ajuster une gaussienne dans le flux, si l'écart type des valeurs du flux entre les bornes est inférieur à 4.5 fois la moyenne de l'écart type⁵ à l'extérieur des bornes. Alors, le programme soustrait la courbe gaussienne à la courbe de flux, et réitère cette opération dans le flux résiduel. Dans le cas contraire, le programme conclut qu'il n'y a pas de pic de vitesse et le résidu est alors considéré comme du bruit. Le programme passe donc à l'analyse des données du jour suivant.

Cette méthode permet d'adapter le nombre de courbes gaussiennes utilisées pour reconstituer la courbe de flux lumineux. En effet, en comparant, à chaque itération, l'écart type intérieur et extérieur à l'intervalle, il devient possible de déterminer le moment où s'arrête le signal réel et où commence le bruit.

La figure 3 montre un exemple de reconstitution du flux lumineux à partir de deux gaussiennes.

⁵ Valeur choisie arbitrairement

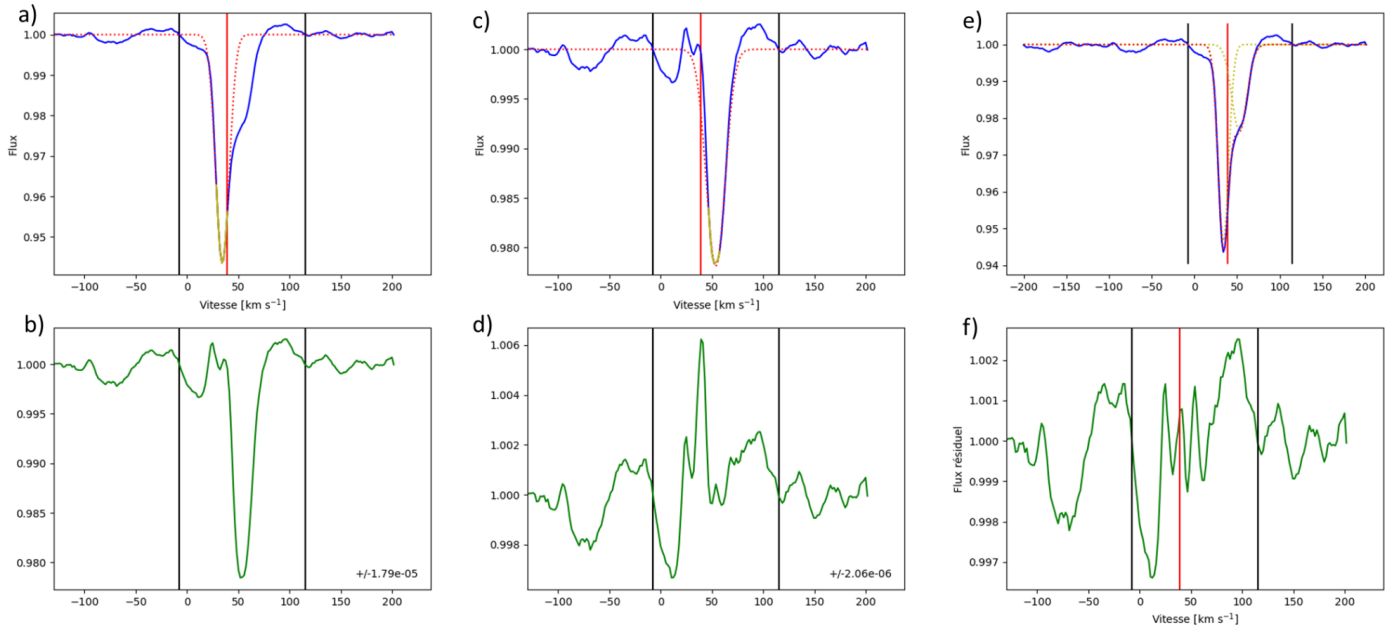


Figure 3 : Explication de la reconstitution du profil de vitesse moyenne par des courbes gaussiennes

Légende : La démonstration est appliquée aux données récupérées le 15 août 2014. Dans tous les graphiques, les traits noirs verticaux représentent les bornes et le trait rouge représente la vitesse relative de R Scuti (42 km/s). Le graphique a) montre par une courbe bleue le flux total récupéré par Narval en fonction des vitesses relatives. La courbe rouge en pointillée indique la courbe gaussienne ajustée à la courbe du flux. Le graphique c) montre par une courbe bleue le flux après soustraction de la gaussienne. e) montre par une courbe bleue le flux total récupéré par Narval en fonction des vitesses relatives. Les courbes jaunes en pointillées indiquent les courbes gaussiennes ajustées à la courbe de flux. La courbe rouge représente la somme des courbes gaussiennes ajustées à la courbe de flux. Dans les graphiques b), d) et f) la courbe verte dessine la courbe résiduelle après soustraction des gaussiennes obtenues en a), c) et e).

Ce traitement a été appliqué à toutes les nuits d'observations (Figure 4).

Dans cette figure, les courbes gaussiennes obtenues sont superposées aux profils spectraux observés. Les données relatives aux différentes phases de R Scuti sont disposées les unes au-dessus des autres. Cette figure permet de bien visualiser les montées et les descentes de la photosphère. En effet, quand le pic de vitesse se déplace vers la gauche de la vitesse moyenne, la photosphère s'élève et se rapproche de l'observateur, il s'agit d'un blueshift de la couche émettrice, donc de la région de formation de la raie. A contrario, quand le pic de vitesse est déplacé vers la droite, la photosphère retombe sur R Scuti, il s'agit d'un redshift de la couche émettrice, donc de la région de formation de la raie.

En plus de ces observations sur les phases de pulsations, la figure 4 permet de constater que la reconstitution des courbes de flux par gaussiennes est fiable, à l'exception des deux dernières. En effet, si certaines courbes de flux sont mal ajustées par les courbes gaussiennes, il ne faudra pas prendre en compte les paramètres de ces gaussiennes dans l'analyse future.

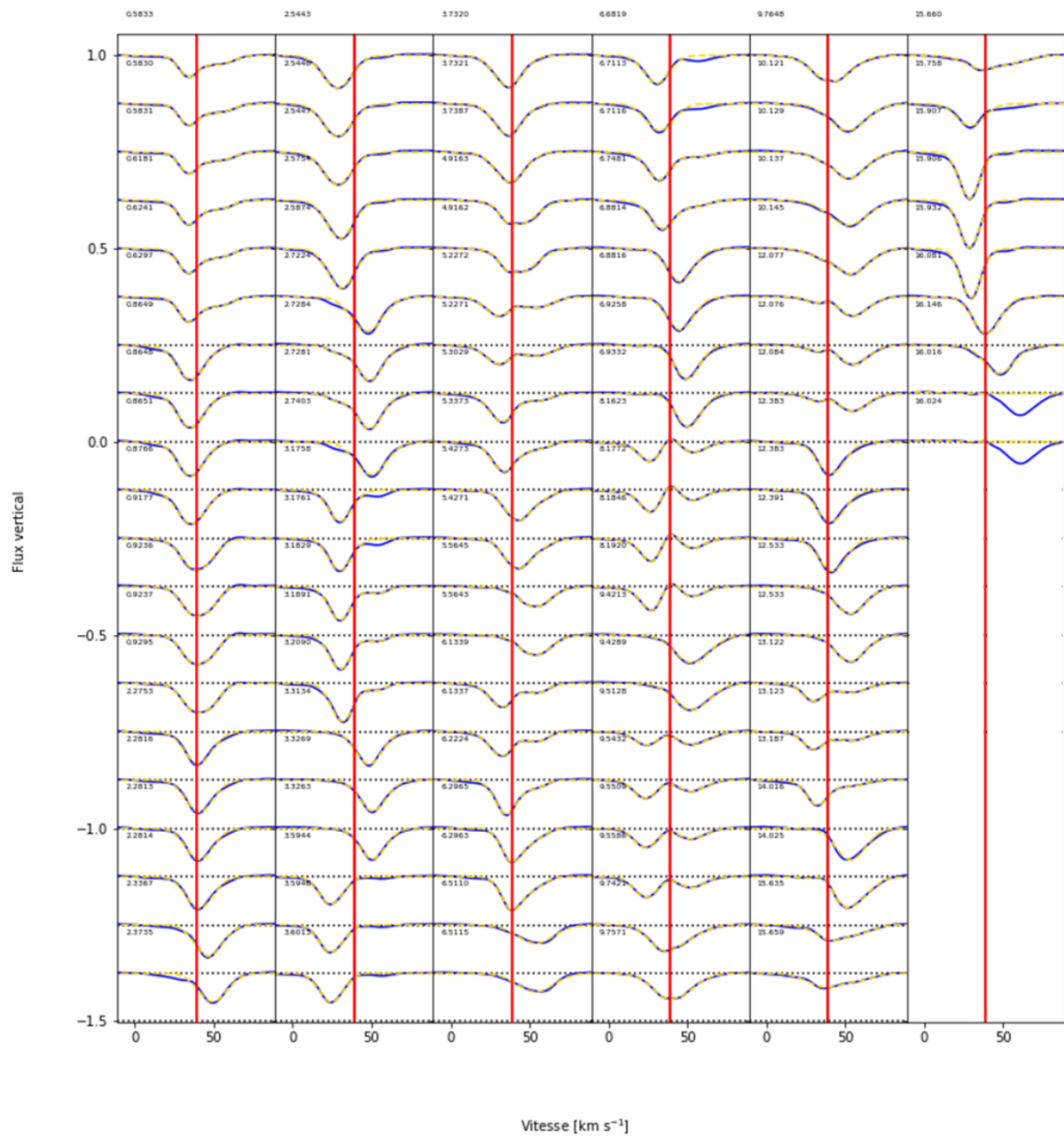


Figure 4 : Evolution de la vitesse moyenne de R Scuti pour plusieurs cycles de pulsations

Légende : Représentation des profil du flux moyen en fonction de la vitesse (bleu) et des courbes gaussienne (pointillés jaunes) associées en fonction des phases de pulsations de R Scuti. La vitesse moyenne radiale de R Scuti, $42 \pm 5 \text{ km.s}^{-1}$, est indiquée par une droite rouge.

Analyse des caractéristiques des courbes gaussiennes

De manière à comparer les phases de pulsations de R Scuti entre elles, les caractéristiques des courbes des gaussiennes analysées pour chaque jours ont été mises en relation. Parmi ces caractéristiques, trois ont été étudiées : la valeur minimum du flux, la vitesse associée et la largeur de la gaussienne à mi-hauteur (Figure 5).

Les profils de ces caractéristiques ont été, dans un premier temps, tracés en fonction de la partie décimale de ces phases (Figure 5.b,d et f), puis en fonction des phases cumulées (Figure 5.a,c et e).

Nous avons d'abord concentré notre analyse sur la répartition des gaussiennes en fonction des phases décimales (Figure 5.b, 5.d et 5.f). Nous avons pu noter qu'entre les phases 0.0-0.2 et 0.5-0.6, plus de gaussiennes secondaires sont trouvées. Cette présence d'une seconde gaussienne indique un découplage des raies d'absorptions expliqué par le mécanisme de Schwarzschild. En effet au début de la phase, lorsque l'onde est émise, la matière est encore perturbée par l'onde précédente. Une partie de la matière tend alors à se re-stabiliser pendant que l'autre est perturbée par le sillage de l'onde. Les gaussiennes secondaires témoignent du passage des ondes. On observe de nouveau ce phénomène à la phase 0.5 ce qui signifie que la seconde onde sonore vient d'avoir lieu et qu'elle traverse, elle aussi, l'atmosphère. Cette information permet donc de confirmer que la seconde onde se propage à mi-période.

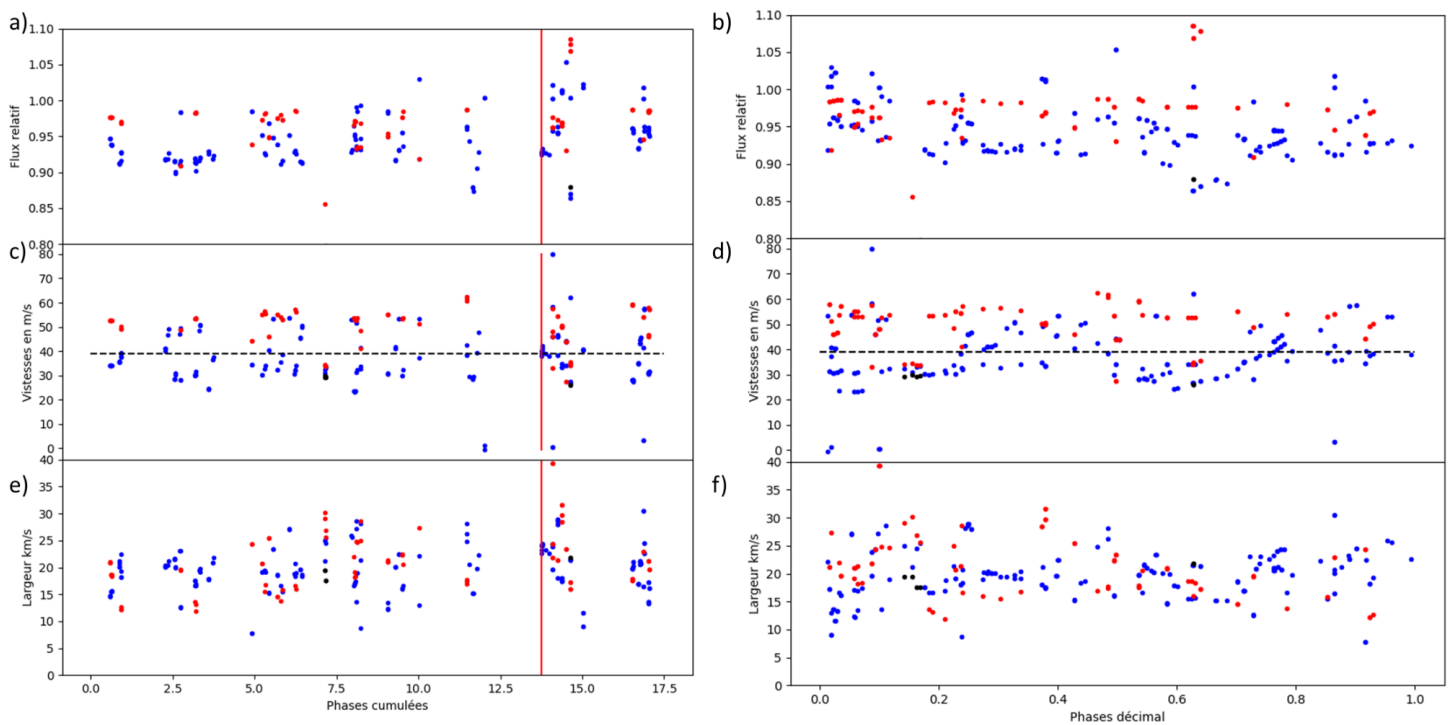


Figure 5 : Caractéristiques des gaussiennes pour les vitesses moyennes de R Scuti

Légende : Dans ces graphiques, les points bleus correspondent aux premières gaussiennes ajustées et les points rouges aux deuxièmes gaussiennes. La colonne de gauche contient les graphiques en phases cumulées et la colonne de droite contient les graphiques en phases décimales. Tous les graphiques sont tracés pour Narval et Néo-Narval, la délimitation entre les deux spectropolorimètres est représentée par le trait rouge. a) et b) représentent le flux mesuré de l'étoile. c) et d) présentent les profils des vitesses mesurées. Le trait noir discontinu représente la vitesse relative moyenne de R Scuti à 42 km/s. e) et f) consigne les largeurs à mi-hauteur des gaussiennes.

Dans un deuxième temps, les vitesses ont été analysées dans les Figure 5.c et 5.d. L'intérêt de ces graphiques est de permettre la visualisation de deux composantes de l'atmosphère : la partie entraînée vers l'extérieur par l'onde de matière et la partie retombant vers l'intérieur de l'étoile après le passage de l'onde précédente.

Sachant que R Scuti s'éloigne de la Terre, toutes les vitesses supérieures à 42 km/s correspondent à la couche retombante et les vitesses inférieures à 42 km/s correspondent à la couche entraînée vers l'extérieur. Le profil des vitesses permet de confirmer, à nouveau, les pulsations de R Scuti.

En effet, dans la Figure 5.d, les vitesses des phases allant de 0.0 à 0.4 augmentent de manière linéaire. Ces vitesses vont de 34 à 53 km/s, cette variation est due au passage de la première onde. Une deuxième droite est visible et va des phases 0.6 à 0.8, une fois encore, la vitesse varie linéairement entre 34 à 53 km/s. Cette seconde droite est un marqueur du passage de la seconde onde. Ces motifs peuvent être retrouvés dans la Figure 5.c et bien que plus diffuses et pentues, plusieurs droites parallèles sont visibles entre les phases 2 et 12.

Il est aussi à noter que lorsque la luminosité de R Scuti est minimale, sa vitesse radiale est maximale. Ce qui signifie que l'onde de choc vient d'être libérée. L'accélération moyenne de ces couches externes est calculable au cours des phases décimales. En admettant qu'une phase moyenne fasse 142 jours, l'accélération moyenne de l'atmosphère pour la première perturbation est d'environ 32 cm/s² et de 23 m/s² pour la seconde. L'accélération de la première onde est plus importante que la seconde, l'énergie mise en jeu est donc plus importante ce qui se traduit par une plus forte luminosité. Les vitesses des secondes gaussiennes sont plus élevées que celles des premières, ceci est une fois encore dû au mécanisme de Schwarzschild. Ce résultat est un ordre de grandeur supérieur à celui trouvé par Lèbre et Gillet (Lèbre & Gillet, 1991a)

Enfin, la largeur des gaussiennes à mi-hauteur en fonction des phases est représentée par les Figures 5.e et 5.f. Ces largeurs renseignent sur l'étalement des gaussiennes. Cette caractéristique est surtout liée à la température des couches photosphériques. Plus la largeur à mi-hauteur est élevée, plus la température est haute. En mettant ce paramètre en relation avec les deux autres, nous constatons, alors, que la température est minimale lorsque la vitesse radiale est maximale. La température extérieure de R Scuti varie, donc, de la même manière que le flux. Ceci n'est pas le cas de toutes les étoiles variables.

4. Etude des raies atomiques

Après avoir étudié les caractéristiques du profil spectral moyen de l'étoile, nous allons nous intéresser aux déplacements de la matière au sein de la photosphère, et plus précisément, à la dynamique des différentes couches de cette photosphère. Pour cela, nous nous baserons uniquement sur les données collectées par le spectropolarimètre Narval, car celles de Néo-Narval ne nous ont pas été transmises.

Les données de Narval contiennent les flux de luminosité normalisés en fonction d'un spectre dont la longueur d'onde s'étend de 369 nm à environ 1048 nm. Au vu de la taille du spectre, nous avons choisi de nous focaliser sur quelques longueurs d'ondes précises, préalablement identifiées par un groupe de TER précédent (Lazzarotto & Louis, 2018) : 654,6 nm (FeI), 586.3 nm (TiI), 656.3 nm (H_α), 667,8 nm (HeI).

De manière à calculer la vitesse de déplacement de l'élément étudié, nous avons utilisé la formule de l'effet Doppler :

$$v = c \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 \right)$$

λ : La longueur d'onde du spectre

λ_0 : La longueur d'onde de référence de l'élément choisi

c : La vitesse de propagation de la lumière dans le vide

v : Les vitesses des couches de chaque élément

Les vitesses des couches de chaque élément seront, alors, comparées à la vitesse relative de R Scuti ainsi qu'à la vitesse du centre de masse.

En utilisant une version adaptée du programme `fitngauss.py`, nous avons ajusté le profil de flux de luminosité par des courbes gaussiennes pour toutes les phases de Narval (Annexe 4 à 7), nous avons ensuite tracé les caractéristiques de ces gaussiennes (Figures 6 à 9).

Chaque graphique obtenu met en évidence des éléments différents sur les mécanismes se déroulant dans la photosphère de l'étoile. L'analyse spectrale, quant à elle, a fourni trois types de pics à analyser. Le premier type contient des pics d'absorption simples avec des flux de luminosité inférieurs à 1. Il s'agit là des pics d'absorption habituellement obtenus en laboratoire pour l'atome concerné, au redshift près. Le deuxième type présente des pics d'émissions simples, le flux de luminosité est supérieur à 1. Ces pics témoignent du passage de l'onde de choc. En effet, la propagation de l'onde entraîne une compression ponctuelle du milieu, ce qui permet la conversion d'une partie de l'énergie mécanique en énergie thermique. En se réchauffant, les atomes du milieu s'ionisent. Puis dans le sillage de l'onde, la température diminue, les atomes se recombinent, ce qui amène à une forte émission de photons. Il est à noter que la raie d'émission caractéristique du passage de l'onde est la raie d'hydrogène α . Le dernier type de pics contient les pics d'absorption doubles. Ces pics sont révélateurs du mécanisme de Schwarzschild. En effet, l'alternance de la prédominance des composantes bleues et rouges signifie que l'atmosphère s'élève au passage d'une onde de choc puis retombe après son passage.

Nous pouvons d'abord nous intéresser à un élément présent dans les plus basses couches de l'atmosphère : le FeI.

Les raies de Fer I présentent les trois types de pics préalablement définis. Ces pics sont présents au cours de toutes les phases de pulsations (Annexe 4). A l'aide des caractéristiques de flux, de vitesses et de largeur à mi-hauteur des gaussiennes, un schéma de l'organisation d'une période a été établi.

Il est à noter que, l'ajustement par les gaussiennes n'étant pas parfait si le flux relatif des deuxièmes et troisièmes gaussiennes est proche de 1 alors ce ne sont pas vraiment des pics, mais plutôt du bruit.

Les vitesses des premières gaussiennes (figure 6) ont toujours le même type d'évolution, lors d'une phase, la vitesse varie linéairement dans un intervalle de [25;62] km/s. Lorsque la vitesse est inférieure à la vitesse de l'étoile (42 km/s) les atomes de fer se rapprochent de l'observateur, ils s'élèvent donc dans l'atmosphère de l'étoile. A contrario lorsque la vitesse est supérieure à 42 km/s les atomes de fer s'éloignent de l'observateur donc retombent dans les basses couches de l'étoile. Ils restent néanmoins dans sa photosphère.

Durant la même phase, nous pouvons observer plusieurs cycles de pulsations de l'élément. En s'intéressant à la phase 2 (figure 6), nous pouvons en compter deux, nous émettons l'hypothèse qu'il y aurait au minimum deux cycles de déplacement de l'atome par phase. Ce résultat est vérifié par les résultats obtenus par K. Chafouai.

Une des interprétations de ce "double cycle", serait la visualisation des minimums principaux et secondaires de luminosité. En effet le premier cycle commence à la phase $\phi=0$ qui correspond au pic du minimum principal, et donc à la première onde de choc. Le deuxième cycle commence environ à $\phi=0.5$ qui correspond au pic secondaire de luminosité, et à la seconde onde de choc.

Enfin nous remarquons quelques pics en émissions pour la raie du fer I principalement des pics secondaires et tertiaires.

Nous avons enfin pu calculer l'accélération du FeI pour chacun des cycles. L'accélération est estimée, à 16 cm/s^{-2} , pour le premier cycle, et à 15 cm/s^{-2} , pour le second cycle. Dans leur article, Lèbre et Gillet⁶ trouvent une accélération de 1.7 cm/s^{-2} . Encore une fois, notre résultat est un ordre de grandeur supérieur à celui de Lèbre et Gillet. Il est toutefois à noter que, dans l'article, l'accélération du fer est calculée par dérivée de sa vitesse, alors que dans notre cas, l'accélération est calculée par la pente des vitesses par rapport au phase (Figure 6.b).

Comme les atomes de FeI, les atomes de TiI sont des métaux, toutefois contrairement au FeI, le TiI se forme dans les hautes couches de l'atmosphère de R Scuti. En étudiant les caractéristiques des gaussiennes reconstituant les profils de TiI (Annexe 8), nous n'observons que des pics en absorption simple ou double avec, comme pour le FeI, le "double cycle" des vitesses à la phase 2, le premier commençant à $\phi=0$ (si nous extrapolons les données) et $\phi=0.5$. Ces résultats sont aussi reproduits pour l'atome d'hélium (Annexe 9).

Nous allons ensuite nous intéresser au spectre de la raie $H\alpha$ (Annexe 7). Deux types de pics sont clairement visibles pour presque toutes les phases : un pic d'absorption et un pic d'émission. Comme expliqué précédemment, les pics d'émissions témoignent du passage de l'onde de choc. Ils sont présents dans le spectre de $H\alpha$ puisque l'énergie nécessaire à la transition du premier niveau énergétique de l'hydrogène est faible (Annexe 10). En effet, lors du passage de l'onde de choc, l'atome emmagasine une partie de l'énergie mécanique, sous forme d'énergie thermique, excitant son électron. Cet électron passe de l'état fondamental à l'état excité. Lorsque le milieu se refroidit suite au passage de l'onde, les atomes se recombinent, en se desexcitant que l'électron émet un photon.

Nous constatons, sur la Figure 7, que la vitesse de $H\alpha$ décroît au cours des cycles. Cette observation est contraire à celle obtenue pour le FeI et le TiI. Cependant deux cycles sont toujours présents. Ils témoignent donc du passage des ondes de chocs dans la région de formation de $H\alpha$, une principale et une secondaire. Nous remarquons également que les pics d'absorption sont tous décalés vers des vitesses plus élevées que la vitesse radiale de l'étoile et donc par application direct de l'effet Doppler, les longueurs d'ondes sont déplacées vers le rouge (redshift) et les vitesses des pics d'émissions étant plus faible que la vitesse radiale de l'étoile, les longueurs d'ondes sont déplacées vers le bleu (blueshift). Donc lorsque les atomes retombent, ils émettent en absorption et quand ils montent, ils émettent en émission.

La dynamique de l'atmosphère de l'étoile se fait en deux cycles pour une phase de pulsation de l'étoile. Ceci est confirmé par les trois atomes analysés ci-dessus. Les métaux présentent des profils de déplacement assez similaires, leurs déplacements en phase se fait dans le même sens alors que le profil de déplacement de $H\alpha$ se fait en sens contraire. Les déplacements des métaux sont induits par le passage de deux ondes mécaniques caractérisées par le minimum principal et le minimum secondaire. A chaque onde de matière est libérée une onde de choc. La dynamique de R Scuti est donc complexe de par ses pulsations chaotiques mais également de par les différentes dynamiques des atomes qui la composent.

⁶ Lèbre, A., & Gillet, D. 1991a

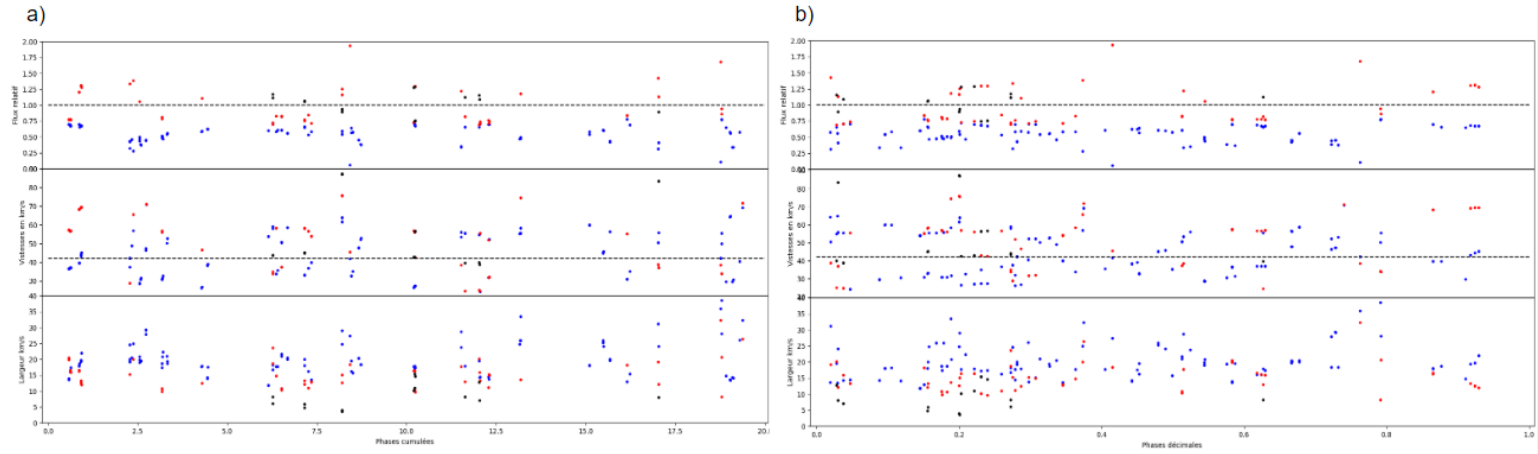


Figure 6 : Caractéristiques des gaussiennes pour la raie FeI (654.6 nm)

légendes : a) caractéristiques en fonction des phases cumulées, b) caractéristiques pour les phases décimales et pour le graphique
a) et b) les premiers tableaux correspondent au flux de luminosité, les deuxièmes tableaux à la vitesse et les troisième tableaux à la largeur des gaussiennes ajustées sur les signaux

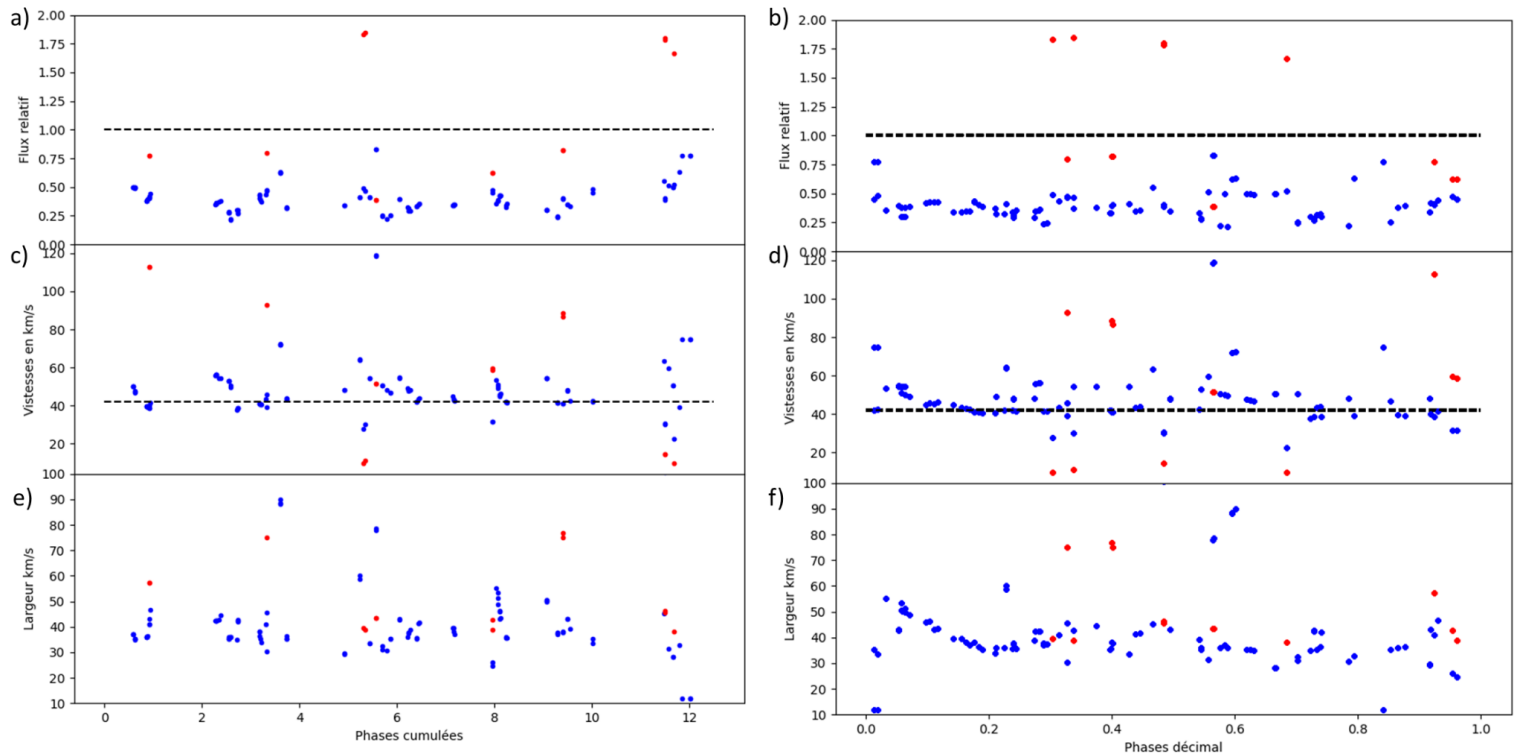


Figure 7 : Caractéristiques des gaussiennes pour la raie H α (656.3 nm)

légendes : a) caractéristiques en fonction des phases cumulées, b) caractéristiques pour les phases décimales et pour le graphique
a) et b) les premiers tableaux correspondent au flux de luminosité, les deuxièmes tableaux à la vitesse et les troisième tableaux à la largeur des gaussiennes ajustées sur les signaux

5. Conclusion

Notre projet s'est construit autour de l'étude des données réduites des spectropolarimètres Narval et de Néo-Narval (Annexe 11). Ce travail avait pour objectif le calcul de vitesse de la propagation des ondes dans l'atmosphère de R Scuti.

Pour ce faire, nous avons dans un premier temps réalisé un programme permettant de calculer les phases de pulsation dans lesquelles se trouvait R Scuti, au moment de la prise de mesure. Nous nous sommes appuyés sur les phases des nuits d'observations de 2014 à 2017, calculées par S. Georgiev, pour comparer ces résultats et valider notre programme.

Une fois les phases identifiées, nous avons reconstitué les profils de raies avec une ou plusieurs courbes gaussiennes. Cette manipulation a, dans un premier temps, été réalisée pour le spectre moyen de R Scuti, puis pour des raies atomiques particulières. En représentant, côte à côte, toutes les gaussiennes (Figure 4 et Annexe 4 à 7), il est devenu possible de visualiser le mécanisme de Schwarzschild. En effet, en s'attardant sur les composantes bleu et rouge de chaque pics du spectre, nous avons pu distinguer les montées de l'atmosphère (dû au passage des ondes, composante bleu) et les retombées de cette atmosphère (suite au passage des ondes, composante rouge). L'alternance de prédominance de l'une ou l'autre de ces composantes, nous a permis de reconnaître les phases de pulsations de R Scuti.

Les trois paramètres de flux relatif, de vitesse et de largeur à mi-hauteur des gaussiennes sont ensuite représentés en fonction des phases cumulées et décimales (Figure 5 à 9). Ces nouveaux graphiques, nous ont permis de visualiser une fois de plus les pulsations de R Scuti et de nous renseigner sur la répartition des vitesses des raies observées en fonction de la phase. Cette information, nous a permis de calculer l'accélération générale de l'atmosphère, et de connaître le comportement des basses couches (raies métalliques) et des hautes couches (raie de H α) de l'atmosphère.

Grâce à l'effet Doppler, nous avons pu analyser la propagation d'éléments présents dans les basses et hautes couches de l'atmosphère, le Fe I et le Ti I. Nous avons alors constaté un double cycle pour ces éléments lors de la pulsation de R Scuti, ce qui confirme bien les observations des minimums principaux et secondaires des courbes de luminosité obtenues.

Il nous reste encore énormément à découvrir sur R Scuti, notamment sur sa polarisation que nous n'avons pas pu aborder par manque de temps.

Enfin, ce projet nous a énormément apporté tant sur le plan scientifique que dans la cohésion d'équipe. En effet, le fait de pouvoir mener un tel projet en licence est une chance exceptionnelle. Cela a été l'occasion de toucher du doigt le monde de la recherche, auquel nous aspirons. De plus, nous avons été initiés à la gestion de projet qui sera, assurément, un outil essentiel pour notre futur professionnel, quel qu'il soit.

5. Références

- Boyd, D. (2014). Spectroscopic observations of the bright RV Tauri variable R Scuti. *arXiv preprint arXiv:1409.8598*.
- K. Chafouai, 2022, Spectroscopic study of the atmospheric dynamics and pulsation of the RV Tauri star R Scuti
General Catalogue of Variable Stars, type RV, Institut astronomique Sternberg, Moscou, Russie
(<http://www.sai.msu.su/groups/cluster/gcvs/cgi-bin/typ.cgi?type=RV>)
- S. Georgiev, 2022, Surface magnetism in the pulsating RV Tauri star R Scuti
- Gillet, D., Burki, G., & Duquennoy, A. (1990). The pulsation of the photosphere of the RV Tauri stars-AC Herculis and R Scuti. *Astronomy and Astrophysics*, 237, 159-168
- Kipper, T., & Klochkova, V. G. (2013). Peculiarities and Variations in the Optical Spectrum of the RV Tauri-type Star R Sct. *Open Astronomy*, 22(2), 77-99.
- Lazzarotto & Louis, (2018). Dynamique atmosphérique de R Scuti, Rapport final, Equipe FeNaH
- Lèbre, A., & Gillet, D. (1991). The bright RV Tauri star R Scuti during an exceptional irregular light phase. *Astronomy and Astrophysics*, 246, 490-502.
- Lèbre, A., & Gillet, D. (1991). The multicomponent motion of the very high atmosphere of the RV Tauri star-R Scuti. *Astronomy and Astrophysics*, 251, 549-559.
- Matsuura, M., Yamamura, I., Zijlstra, A. A., & Bedding, T. R. (2002). The extended atmosphere and evolution of the RV Tau star, R Scuti. *Astronomy & Astrophysics*, 387(3), 1022-1031.
- Schwarzschild, M. (1952). Transaction of the IAU VIII, ed. P. Th. Oosterhoff.
- Wallerstein, G. E. O. R. G. E., & Cox, A. N. (1984). The population II Cepheids. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 96(583), 677.

6. Notre avie sur le TER

Pauline

Ce projet fut l'occasion pour moi de découvrir le monde de la recherche, voie dans laquelle je compte m'orienter professionnellement et également d'en apprendre davantage sur les étoiles pulsantes notamment R Scuti. Ce qui m'a motivé à choisir ce sujet fut l'astrophysique et je suis très heureuse car j'ai appris énormément de choses, autant au niveau culture générale qu'au niveau scolaire. Ces connaissances sont un réel bonus pour la suite de mes études (physique stellaire, gestion de projet, soutenances, rédaction de rapports) et je voudrais remercier les enseignants d'avoir créé cette UE qui est à mes yeux essentielle à notre formation scientifique par la variété des domaines qu'elle aborde.

Julie

Ce projet a été pour moi très enrichissant aussi bien au niveau scientifique qu'au niveau du travail en autonomie. J'avais choisi ce projet car je m'intéressais à l'astrophysique et souhaite poursuivre mes études dans ce domaine. Ce projet a confirmé mes perspectives d'avenir. Il a été une véritable découverte du travail d'un astrophysicien, il m'a permis d'acquérir de nombreuses connaissances sur les étoiles et l'astrophysique en général. De plus, il a fallu également apprendre à gérer un projet et à travailler en équipe (ce qui n'est pas toujours le plus facile). Je ne retiens de ce projet que des points positifs.

Théo

Pour ma part, ce projet fut ma seconde expérience de recherche. J'ai donc pu y appliquer certaines connaissances sur la méthode scientifique que j'avais pu acquérir. Ce projet m'a aussi beaucoup appris, je pense notamment à toute la partie gestion de projet, qui m'a permis de mieux appréhender l'organisation de mon travail. L'autre grand apprentissage de ce projet fut le travail en équipe. Bien que nous ayons souvent l'opportunité de travailler en groupe, il est rare que ce soit sur des projets d'une telle ampleur. Ce fut pour moi l'occasion d'apprendre à partager le travail que j'avais l'habitude de faire seul, et de me confronter à d'autres outils informatiques avec lesquels j'étais peu familier (outils de documents partagés : Google docs, Google slides).

Enfin, ce projet a été très enrichissant au niveau scientifique, j'ai beaucoup apprécié découvrir, et discuter avec M. Mathias, des mécanismes prenant place au sein de R Scuti. Et ce projet a confirmé mon envie de travailler dans la recherche scientifique.

7. Annexes

Annexe 1 : Contenu des fichiers transmis par Philippe Mathias

Le fichier nommé night.all.txt est composé de 5 colonnes :

- La 1^{ère} colonne est la concaténation de la notation de l'instrument de mesure utilisé (n : Narval et N : Neo-Narval) et la date à laquelle a été effectuée la mesure
- La 2^{ème} colonne contient les vecteurs de Stokes (vecteur de polarisation u, v et q)
- La 3^{ème} colonne indique le nombre de pose
- La 4^{ème} colonne contient le jour Julien de la mesure
- La dernière colonne contient la vitesse relative de la terre dans l'axe Terre/R Scuti (cette vitesse est toujours égale à 0), cette colonne n'est donnée que pour les données Narval

A noter : les colonnes 2 et 5 ne sont pas intéressantes pour cette étude.

Les fichiers de mesures en .avs :

Dans ce fichier les données ne commencent qu'à la 3^{ème} ligne, la 1^{ère} ligne étant dédiée au titre du fichier et la 2^{ème} renseigne sur le nombre de mesures et le nombre de colonnes du fichier.

- La 1^{ère} colonne indique la longueur d'onde (en nanomètre) observée
- La 2^{ème} colonne correspond au flux résiduel (après normalisation)
- La 3^{ème} colonne désigne la polarisation du signal
- La 4^{ème} colonne est le signal nul (N1 ou N2)
- La 5^{ème} colonne donne l'écart type de la mesure

A noter : dans Neo Narval, les données .avs ne nous ont pas été fournies

Les fichiers de mesures en .avN1 :

Dans ce fichier les données ne commencent qu'à la 3^{ème} ligne, la 1^{ère} ligne étant dédiée au titre du fichier et la 2^{ème} renseigne sur le nombre de mesures et le nombre de colonnes du fichier.

- La 1^{ère} colonne indique la vitesse de Doppler des longueurs d'ondes, cette vitesse est prise relativement au Soleil
- La 2^{ème} colonne correspond aux flux moyens sur la totalité des raies du spectre
- La 3^{ème} colonne désigne l'erreur relative de la colonne 2
- La 4^{ème} colonne donne la polarisation moyenne sur la totalité des raies du spectre
- La 5^{ème} colonne désigne l'erreur relative de la colonne 4
- La 6^{ème} colonne est la valeur de signal nul (N1)
- La 7^{ème} colonne désigne l'erreur relative de la colonne 6

Annexe 2 : Valeurs de phases obtenu par S.Georgiev

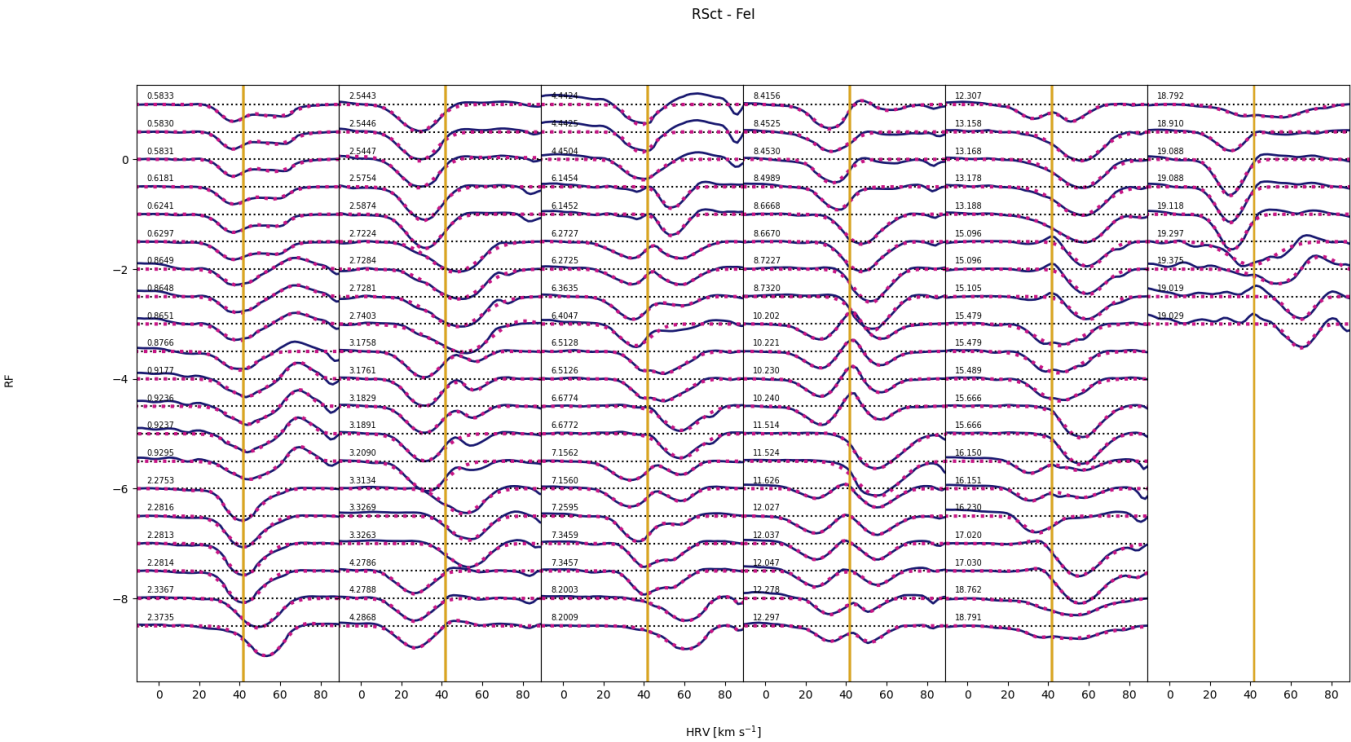
Date	HJD	Phase	Sequences	SNR	Date	HJD	Phase	Sequences	SNR
2014/07/15	6854.5	0.57	1Q,1U,2V	994	2016/10/27	7689.3	6.47	1U	868
2014/07/22	6861.4	0.62	10V	765	2016/10/28	7690.3	6.48	2Q	763
2014/09/01 [‡]	6902.3	0.91	1Q,1U	1025	2017/04/18	7862.6	7.70	9V	1179
2014/09/02 [‡]	6903.3	0.92	6V	828	2017/04/20	7864.6	7.71	2U	1333
2014/09/11 [‡]	6912.3	0.98	1Q,6V,1U	855	2017/04/21	7865.6	7.72	2Q	1340
2015/04/13	7126.6	2.50	3V	1021	2017/08/21 [‡]	7987.4	–	6V	1162
2015/04/14	7127.6	2.50	1Q,1U	1067	2017/08/22 [‡]	7988.4	–	2Q	956
2015/04/23	7136.6	2.57	2V	588	2017/09/02	7999.4	–	4Q	753
2015/05/27	7170.5	2.81	3V,1Q,1U	878	2017/09/06	8003.3	–	2Q	1176
2015/06/02	7176.6	2.85	9V	819	2017/09/07	8004.3	–	2U	1650
2015/06/26 [‡]	7200.5	3.02	2U,2Q,9V	1447	2017/09/08	8005.3	–	3V	1451
2015/08/05	7240.4	3.30	2Q,2U	751	2017/10/02 [‡]	8029.3	–	2U	982
2015/08/06	7241.9	3.31	16V	751	2017/10/04 [‡]	8031.3	–	2Q	541
2015/08/10	7245.4	3.34	6V	1010	2017/10/05 [‡]	8032.3	–	3V	1051
2015/08/26 [‡]	7261.4	3.45	2Q	637	2017/10/30 [‡]	8057.3	–	2U	1338
2015/08/28 [‡]	7263.4	3.46	2U,6V	1234	2017/10/31 [‡]	8058.2	–	2Q	1121
2015/10/08	7304.3	3.75	1Q,1U	796	2017/11/01 [‡]	8059.8	–	9V	1134
2015/10/09	7305.3	3.76	6V	796	2018/06/18	8288.5	0.05	2U,2Q	1010
2015/10/29	7325.3	3.90	1Q,1U	950	2018/06/19	8289.5	0.06	3V	761
2015/10/30	7326.3	3.91	5V	1414	2018/07/27	8327.5	0.32	2U,2Q	868
2016/03/17 [‡]	7465.6	4.89	1U,1Q	883	2018/07/28	8328.5	0.33	3V	1142
2016/05/04	7513.6	5.23	1U,1Q	1262	2018/08/15	8346.5	0.45	2Q,2U	1166
2016/05/15	7524.6	5.31	3V	1044	2018/08/31	8362.4	0.56	2Q,2U	938
2016/05/20	7529.6	5.34	3V	1105	2018/09/08	8370.4	0.61	3V	1227
2016/06/02	7542.6	5.44	1U,1Q	1083	2018/10/24 [‡]	8416.3	0.92	2Q	840
2016/06/22	7562.5	5.58	1U,1Q	1141	2018/10/25 [‡]	8417.3	0.93	2U	954
2016/07/12	7582.5	5.72	1U,1Q	1436	2019/06/15	8650.5	2.51	3V,2Q	1090
2016/07/24	7594.4	5.80	3V	1147	2019/06/27	8662.5	2.59	3V	1153
2016/08/03	7604.4	5.87	1U,1Q	1049	2019/07/15	8680.4	2.71	2Q,2U	1338
2016/09/01	7633.3	6.08	1Q,1U	759	2019/07/18	8683.5	2.74	3V	1274
2016/09/24	7656.4	6.24	1Q	717	2019/08/05	8701.5	2.86	2U	1088
2016/09/28	7660.3	6.27	3V,1U	873	2019/08/13	8709.4	2.91	2Q	847
2016/10/03	7665.3	6.30	3V	1103	2019/08/31 [‡]	8727.4	3.03	6V	755

S. Georgiev, Surface magnetism in the pulsating RV Tauri star R Scuti

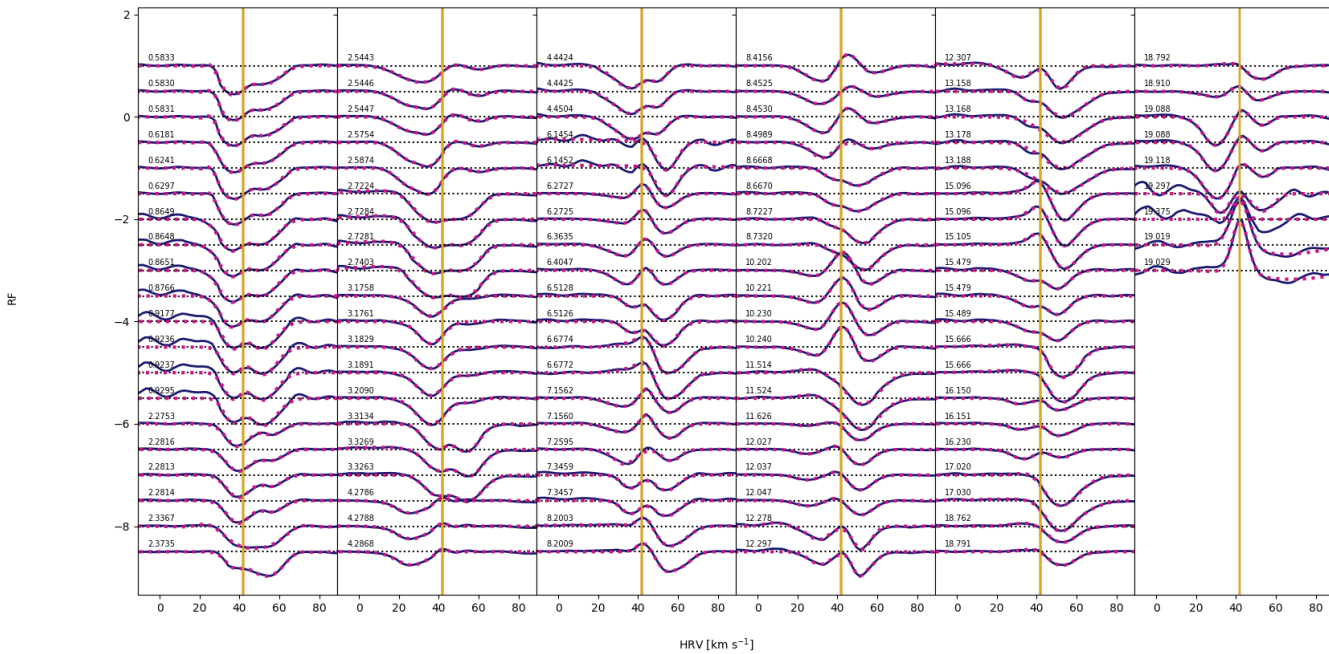
Annexe 3 : Comparaison avec les phases calculées par Georgiev

	ϕ_{Georgiev}	ϕ_{SRS}	Erreur relative
2014/07/15	0,57	0,58	1,75 %
2014/07/22	0,62	0,62	0,00 %
2014/09/01	0,91	0,87	4,40 %
2014/09/11	0,98	0,92	6,12 %
2015/04/13	2,5	2,28	8,80 %
2015/04/14	2,5	2,28	8,80 %
2015/04/23	2,57	2,34	8,95 %
2015/05/27	2,81	2,54	9,61 %
2015/06/26	3,02	2,73	9,60 %
2015/08/05	3,3	3,18	3,64 %
2015/08/06	3,31	3,18	3,93 %
2015/08/10	3,34	3,21	3,89 %
2015/08/26	3,45	3,31	4,06 %
2015/08/28	3,46	3,59	3,76 %
2015/10/08	3,75	3,59	4,27 %
2015/10/09	3,76	3,6	4,26 %
2015/10/29	3,9	3,73	4,36 %
2015/10/30	3,91	3,74	4,35 %
2016/03/17	4,89	4,91	0,41 %
2016/05/04	5,23	5,23	0,00 %
2016/05/15	5,31	5,3	0,19 %
2016/05/20	5,34	5,34	0,00 %
2016/06/02	5,44	5,43	0,18 %
2016/06/22	5,58	5,56	0,36 %
2016/07/12	5,72	5,7	0,35 %
2016/07/24	5,8	5,78	0,34 %
2016/08/03	5,87	5,85	0,34 %
2016/09/01	6,08	6,05	0,49 %
2016/09/24	6,24	6,21	0,48 %
2016/09/28	6,27	6,24	0,48 %
2016/10/03	6,3	6,27	0,48 %
2016/10/27	6,47	6,44	0,46 %
2016/10/28	6,48	6,45	0,46 %
2017/4/20	7,71	7,16	7,13 %
2017/04/21	7,72	7,56	2,07 %

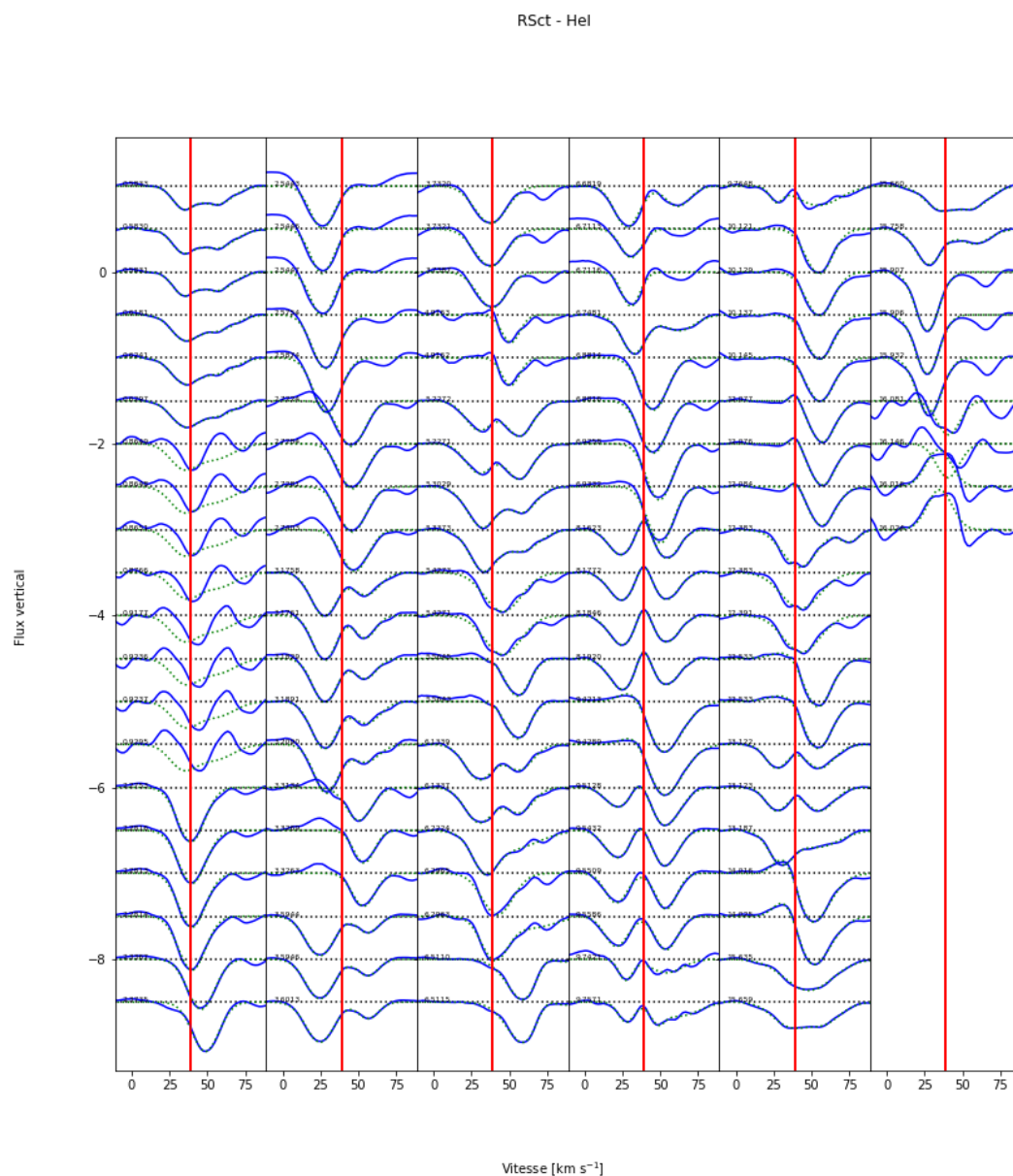
Annexe 4 : Reconstitution du profil de raie par des gaussiennes pour la raie du FeI (654.6 nm)



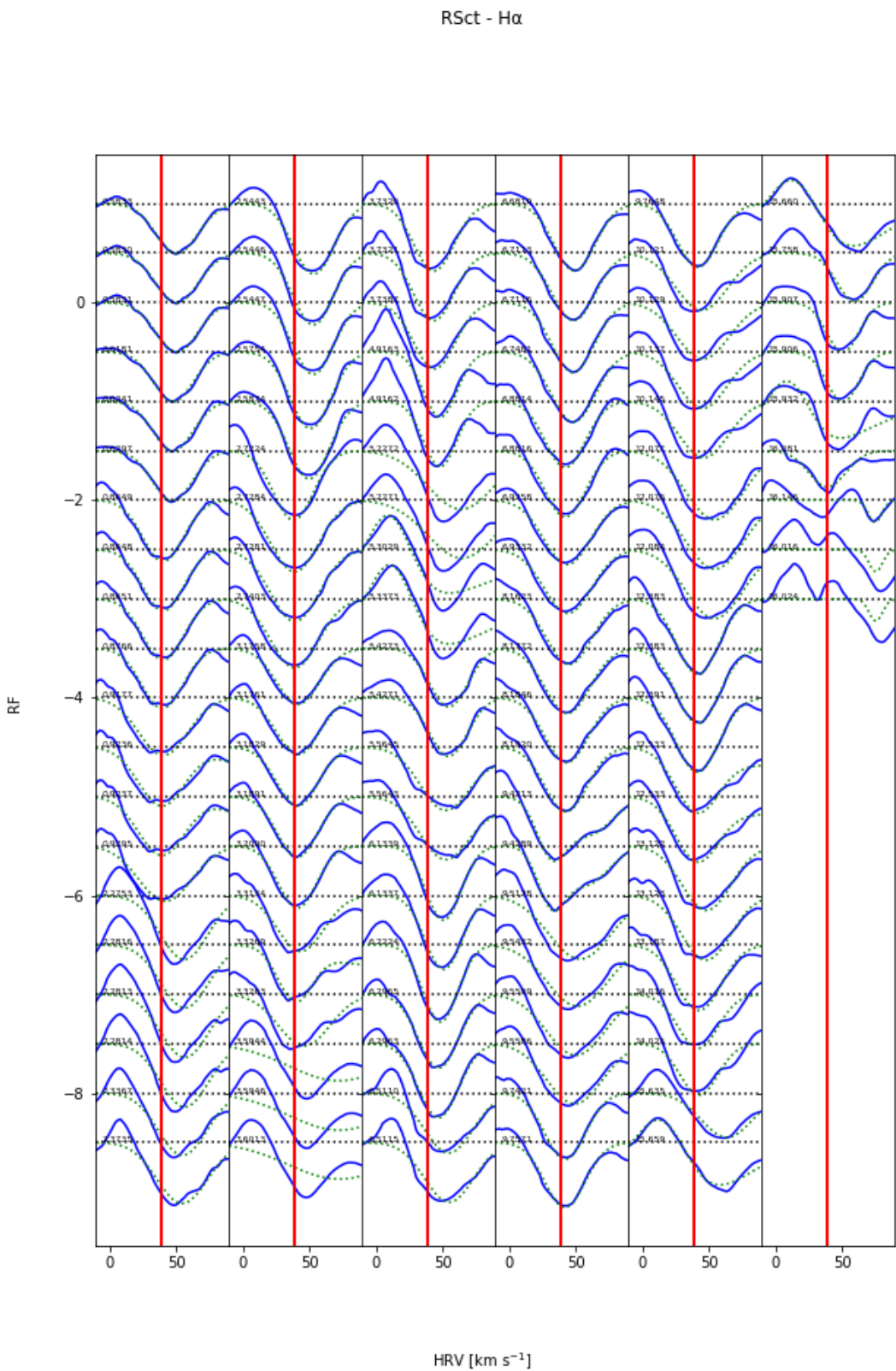
Annexe 5 : Reconstitution du profil de raie par des gaussiennes pour la raie du TiII (586.6 nm)



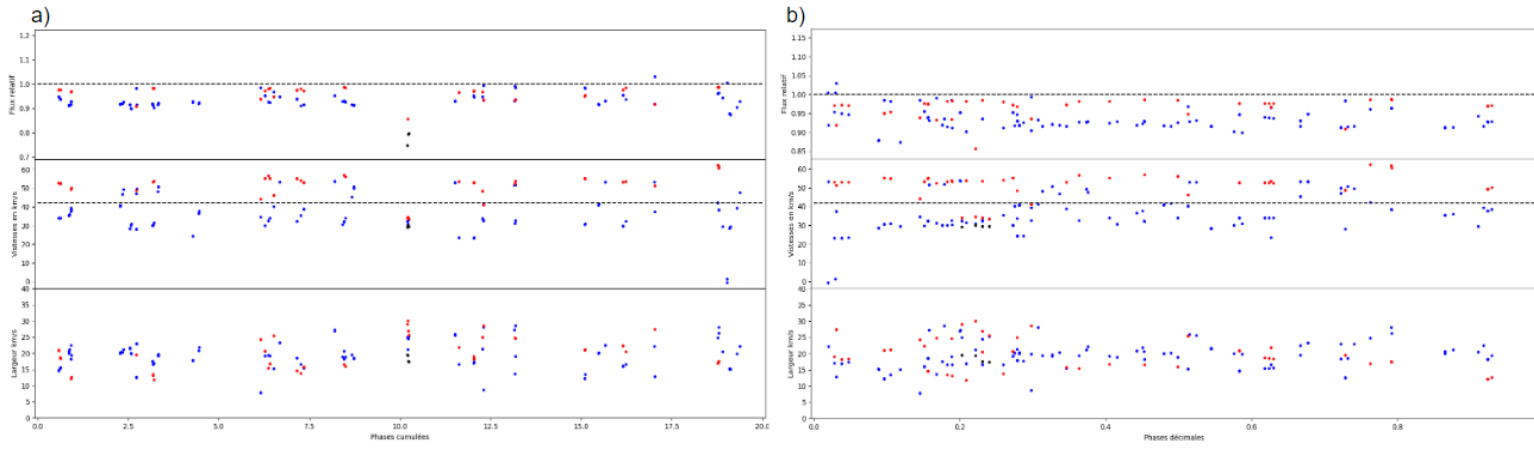
Annexe 6 : Reconstitution du profil de raie par
des gaussiennes pour la raie du HeI (667.8 nm)



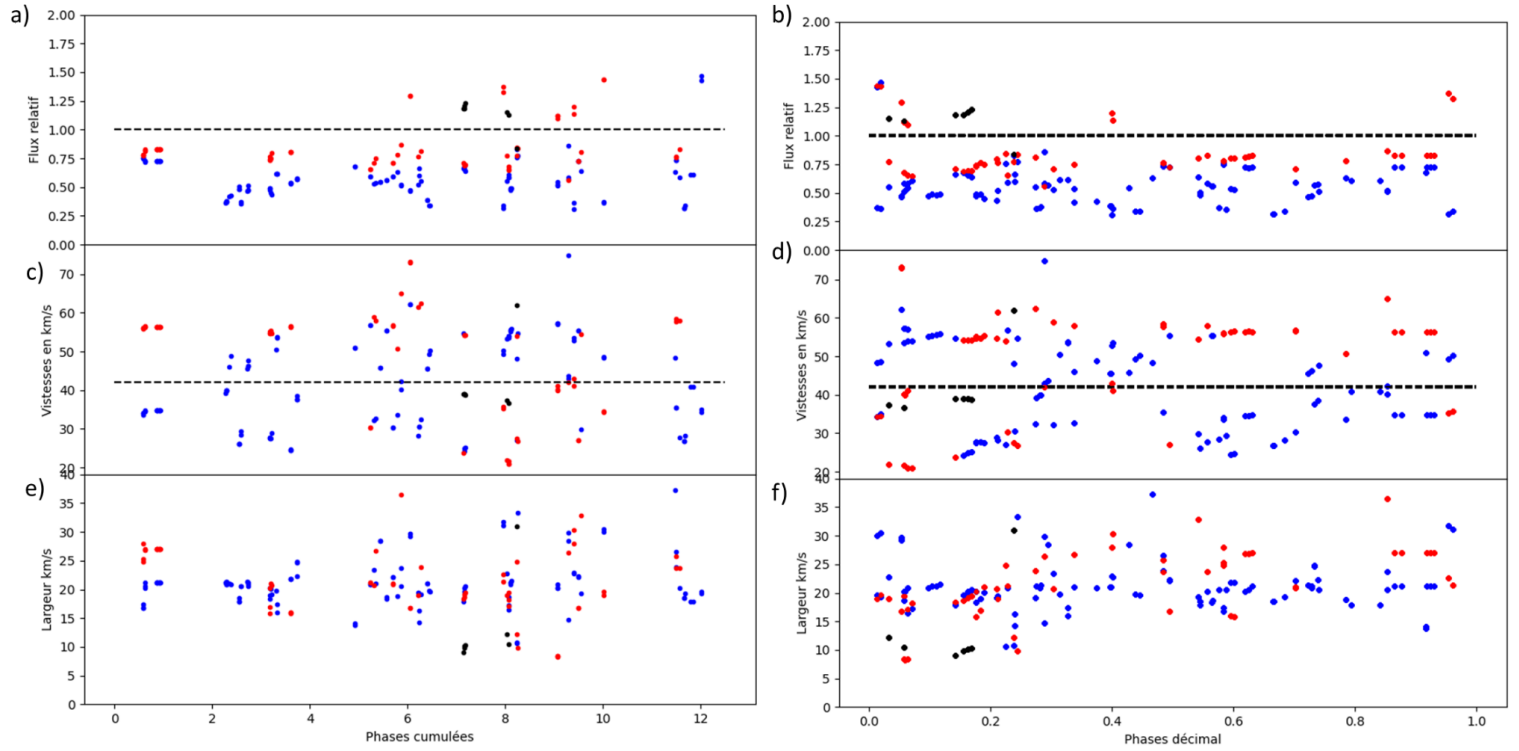
Annexe 7 : Reconstitution du profil de raie par
des gaussiennes pour la raie du H α (656.3 nm)



Annexe 8: Caractéristiques des gaussiennes pour la raie Til (586.6 nm)



Annexe 9 : Caractéristiques des gaussiennes pour la raie Hel (667.8 nm)



Annexe 10 : Énergies d'ionisations des atomes étudié

	1 ^{er}	2 ^e	3 ^e	4 ^e	5 ^e	6 ^e	7 ^e	8 ^e	9 ^e	10 ^e
H	13,598									
He	24,587	54,417								
Ti	6,828	13,575	27,491	43,267	99,30	119,53	140,8	170,4	192,1	215,92
Fe	7,902	16,187	30,652	54,8	75,0	99,1	124,98	151,06	233,6	262,1

Légende : Énergie des dix premières ionisations en eV

Annexe 11 : Notre projet

En plus d'une approche scientifique, ce projet de TER a été pour nous une ouverture sur le monde de la gestion de projet. En effet, pour mener à bien un projet de cette envergure, il fût impératif de s'organiser. Et ce surtout pour un travail en groupe, les disponibilités de chacun sont à prendre en compte, ainsi que celle de notre tuteur.

Début du projet

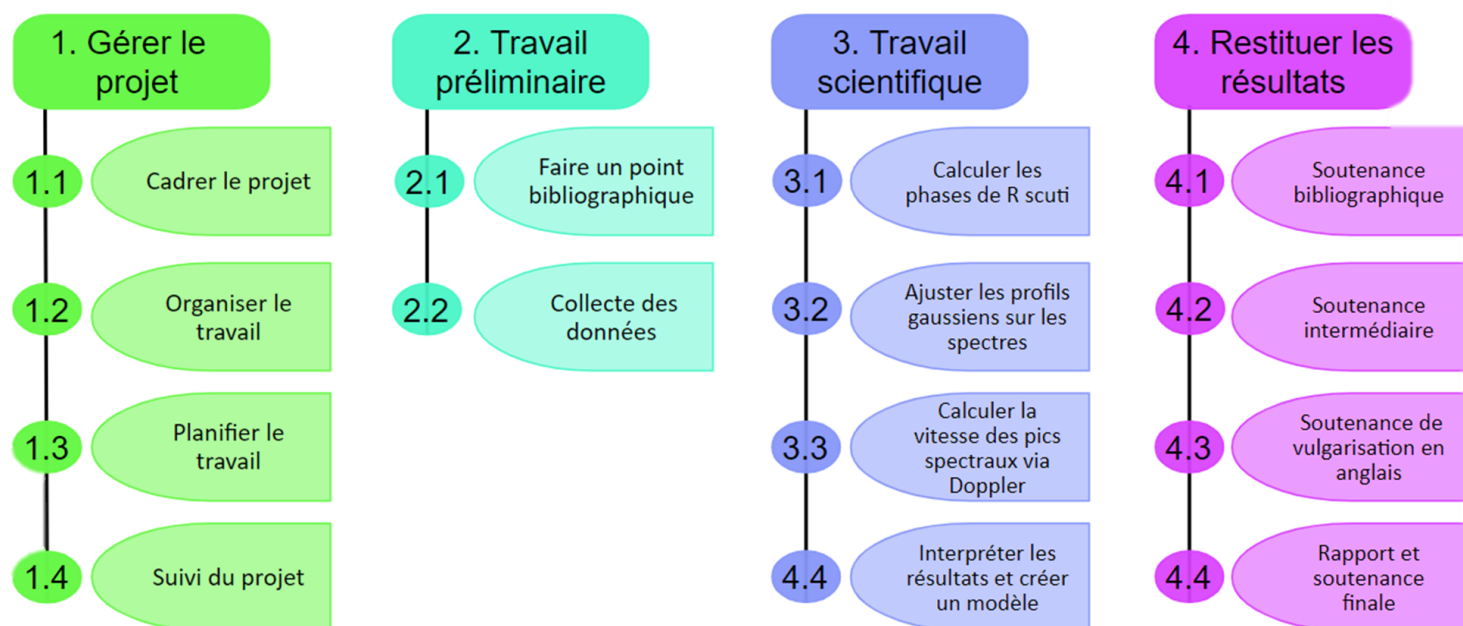
Nous avons commencé ce projet par la création d'un logo, voir page de garde, ainsi que d'un nom d'équipe: SRS pour Study of R Scuti. Afin de centraliser nos documents, nous avons regroupé notre travail sur google drive. Les débuts de ce projet furent un peu difficiles, en effet nous avons dû apprendre à se connaître et à travailler ensemble, la première soutenance fut l'occasion pour nous de cerner nos difficultés pour mieux les résoudre, en prenant par exemple plus de rendez-vous avec notre tuteur et entre nous. Suite à ces échanges nous avons mieux cerné le projet et pu avancer plus efficacement. Depuis ce jour, nous n'avons plus rencontré de problème lié à la communication au sein de notre équipe.

Organisation

L'organisation d'un projet commence par la rédaction d'un cahier des charges et sa signature par le maître d'ouvrage, dans notre cas il s'agit de notre tuteur : Philippe Mathias. Ce cahier des charges nous a permis de mieux appréhender le sujet de notre travail, et d'identifier les tâches importantes à effectuer.

Une fois les tâches importantes identifiées, il devient possible de décomposer le projet en lot de travaux. Ces travaux sont représentés dans un diagramme appelé Work Breakdown Structure (WBS), ce diagramme permet de visualiser rapidement les lots de travaux et les tâches qui leurs sont associés. Le WBS ci-dessous est une version simplifiée plus adaptée à un rapport.

WBS : Etude de la propagation des ondes sonores dans l'atmosphère de l'étoile R Scuti



Une fois les tâches identifiées dans le WBS, il faut les organiser dans le temps au travers d'un réseau d'enchaînement des tâches, puis dans un diagramme de Gantt. Ce diagramme nous permet entre autres de créer un prévisionnel des heures de travail à réaliser et de répartir ces heures entre les différentes tâches à réaliser.

N'ayant pas d'expérience dans la prévision des heures de travail, nous les avons réparties en se basant sur les différents jalons composant notre projet. Nous avons toutefois pris en compte les pics d'heures de travail à l'approche des différentes dates butoires (oral, date de rendu rapport).

Au terme du projet

En analysant plus en détail ces prévisions d'heures, des pics de travail se dégagent, correspondant à la préparation nécessaire avant chaque oral. Il est à noter que suite au premier oral, nous avons mieux pris conscience du temps nécessaire à cette présentation et avons revu nos estimations.

Toutefois, certains écarts restent visibles, en semaine 11 par exemple, nous avons de nouveau mal estimé le temps de travail nécessaire à la production de la soutenance intermédiaire. Les deux autres écarts importants correspondent aux semaines 16 et 19. Pour ce qui est de la semaine 16, il s'agit de la semaine de vacances précédant les examens, nous avons alors décidé de nous concentrer sur la restitution des rapport de travaux pratiques et sur la révision des examens à venir. Concernant la semaine 19, nous nous étions trompés d'une semaine, confondant la date de rendu du compte rendu de TER avec la date de rendu de la version corrigée de ce compte rendu.

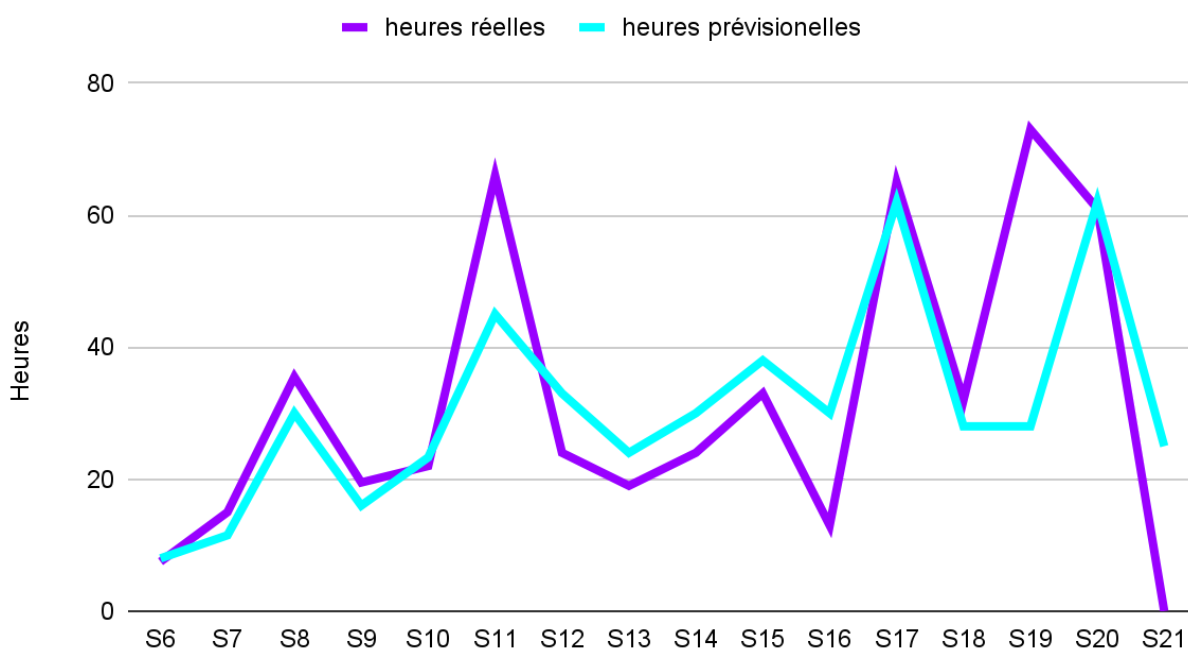


Figure : Courbe de charge du projet

Nous avons fait un point sur nos objectifs une semaine avant la fin de notre projet. Celui-ci est visible sur le récapitulatif du diagramme de Gantt ci-dessous.

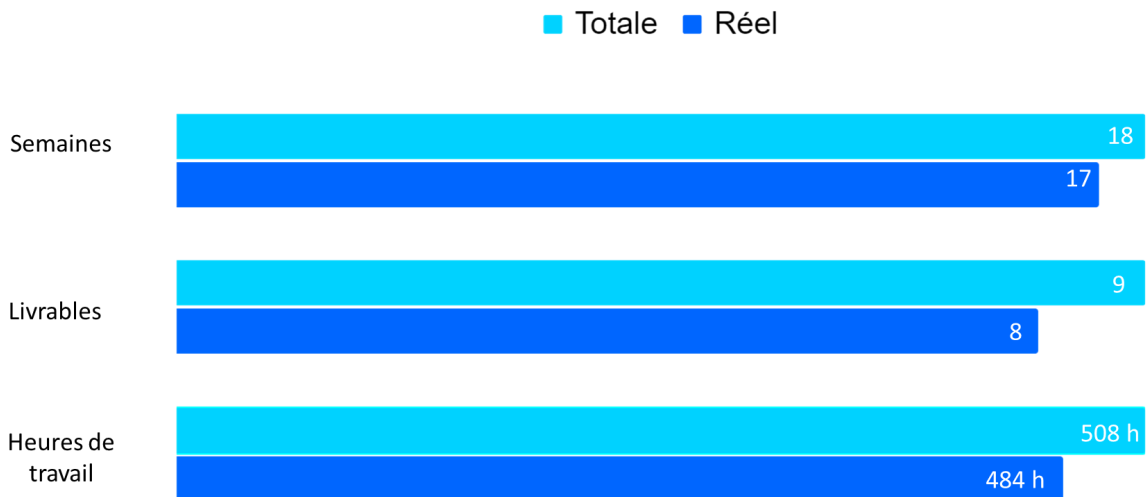


Figure : Résumé du diagramme de Gantt

Il ne nous reste actuellement qu'un livrable à rendre, il s'agit de l'oral final et son support. Sachant qu'il s'agit de l'oral final, le plus long des quatre, 50 heures semble être une bonne estimation de la charge de travail. Toutefois, une seconde version de ce rapport (version corrigée) est attendu pour le 16/05. En prenant en compte ce fait, il paraît évident que nous risquons de dépasser la charge de travail initialement prévue d'une dizaine d'heures.

Mémo de bibliographie

/!\ Ce mémo à été écrit au début de ce projet, n'ayant à l'époque pas tout compris, il est partiellement faux.

Généralités sur l'étoile

L'étoile R Scuti appartient à la catégorie des post-AGB (Géantes rouges). Elle se trouve dans la constellation du Scutum, à environ 400 pc (1.234×10^{16} km) du Soleil. Sa masse est estimée entre 0.5 et 0.8 fois celle du Soleil pour un rayon de 84 rayons solaires. L'une des particularités de R Scuti est qu'il s'agit d'une étoile pulsante, c'est-à-dire que sa luminosité n'est pas constante mais qu'elle varie avec une certaine période entre 138.5 et 146.5 jours. C'est vers cette caractéristique que notre travail va se porter.

Dynamique atmosphérique de R Scuti

B. Beirens, J.-S. Carrière et A. Zebbach nous expliquent qu'au sein des étoiles règnent deux forces : la gravité, qui écrase l'étoile sur elle-même, et l'énergie de réactions thermonucléaires, qui repousse la gravité. En temps normal, ces deux forces s'équilibrent parfaitement. On appelle cela l'équilibre hydrostatique. L'étoile est donc stable, elle se situe sur la séquence principale du diagramme HR et son rayon, sa température et son éclat ne varient pas (cette variation est négligeable).

Les étoiles pulsantes/instables naissent d'un déséquilibre hydrostatique. Ce déséquilibre est dû à deux grands mécanismes: la convection et le kappa mécanisme. C'est ce dernier mécanisme qui va nous intéresser, il est actif uniquement si la zone d'ionisation d'un élément particulier (l'hélium dans notre cas) est situé à la bonne températures (environ 1.000.000 à 250.000K, donc très loin des températures centrales où le carburant brûle 10^8 K). Ce paramètre est corrélé à la profondeur de l'étoile qui, dans notre cas, est d'environ 10% du rayon sous la photosphère. Dans le Soleil, cette zone est trop profonde, et les ondes émises par le kappa-mécanisme sont immédiatement amorties par la forte densité du milieu. Les post-AGB (dont R Scuti) ont une atmosphère beaucoup plus étendue, et le gradient de densité y est suffisamment faible pour que les ondes survivent et franchissent la photosphère, où elles peuvent déferler en onde de choc...

Grâce au kappa-mécanisme, dans les couches ionisées, la matière se déplace vers l'intérieur de l'étoile, elle devient plus dense et l'opacité augmente. La matière emmagasine donc les photons rayonnés par le cœur de l'étoile jusqu'à un point critique où la pression devient trop élevée. L'étoile gonfle alors très vite (son atmosphère est repoussée vers l'extérieur), libérant une onde de choc hypersonique. Les couches externes se désionisent, en se refroidissent, ce qui les fait s'écrouler sur elles-mêmes. Cet écroulement entraîne un réchauffement des couches étudiées. Le résultat est un phénomène cyclique car de façon répétée la couche se déplace vers l'intérieur puis est repoussée vers l'extérieur. Suite à de la libération de l'onde de choc.

Lorsque l'étoile se dilate, son rayon augmente et sa température ainsi que son éclat diminuent. Sur les courbes de lumière quand le rayon est maximal, la température et l'éclat sont minimum et inversement quand le rayon diminue, l'étoile se contracte et ses couches s'échauffent, donc sa température et son éclat augmentent.

Selon A. Lèbre et D. Gillet (1991), ces variations sont dues à des ondes de choc dans l'atmosphère de l'étoile. Ces ondes de chocs sont régulières et au nombre de deux par période, elles sont étudiées au travers de spectres lumineux. En effet, les spectres d'absorption du sodium (élément étudié dans cet article) admettent des variations et notamment deux états minimums : le minimum profond (« deep minimum »), qui correspond à la première onde de choc, et le minimum peu profond (« shallow minimum »), qui correspond à la seconde onde de choc. Une période est habituellement comptée entre deux minimums profonds. Les ondes de chocs étant une résultante des pulsations de l'étoile et non à d'autres phénomène d'hydrostatique, R Scuti ne pulserait pas en phase (le rayon de l'étoile augmente en tous points, puis diminue) mais sous forme de front d'onde (« running wave »).

Dans son article à paraître, S. Georgiev, avance l'idée que la première onde de choc émerge de la photosphère de l'étoile juste avant le minimum profond. Cette onde entraînerait une élévation de l'atmosphère. Toujours d'après S. Georgiev, les effets de la gravité provoqueraient une chute de l'atmosphère qui avait précédemment subi l'élévation, induisant une disparition de la première onde de choc. La seconde onde de choc émerge alors, elle aussi, de la photosphère, suivie par le minimum peu profond.

La propagation des ondes de chocs produit des mouvements de l'atmosphère qui peuvent être à l'aide de spectres lumineux grâce au décalage des raies caractéristiques de certains atomes ou de certaines molécules. K. Chafouai présente ainsi, dans son article en cours de rédaction, le spectre d'absorption de l'hydrogène alpha ($H\alpha$) au cours de différentes phases de pulsation de R Scuti. La raie caractéristique de l' $H\alpha$ est très bien connue ($\lambda = 656.2808 \text{ nm}$), elle résulte du passage d'un électron du troisième au deuxième niveau d'énergie de l'atome d'hydrogène. Dans les travaux de K. Chafouai, il est possible d'observer que les raies d'absorption et d'émission de l' $H\alpha$ se déplacent du rouge vers le bleu, et vice versa. Ce comportement représente bien les pulsations de l'étoile. Il est d'ailleurs possible de calculer la vitesse de déplacement de l'onde de choc grâce aux déphasages des raies, et ce par effet Doppler, à savoir : $\lambda = \lambda_0(1 + \frac{v}{c})$. Ce sont ces calculs de vitesse qui seront en grande partie l'objet de notre travail sur R Scuti.

Liste des références

K. Chafouai, Spectroscopic study of the atmospheric dynamics and pulsation of the RV Tauri star R Scuti

Fabas, N., Lèbre, A., & Gillet, D. (2011, April). Shock-Induced Polarized Hydrogen Emission Lines in Omicron Ceti. In *Solar Polarization 6* (Vol. 437, p. 265).

Fadeyev, Y. A., & Gillet, D. (2004). The structure of radiative shock waves-V. Hydrogen emission lines. *Astronomy & Astrophysics*, 420(2), 423-435.

S. Georgiev, Surface magnetism in the pulsating RV Tauri star R Scuti

Gillet, D., Burki, G., & Duquennoy, A. (1990). The pulsation of the photosphere of the RV Tauri stars-AC Herculis and R Scuti. *Astronomy and Astrophysics*, 237, 159-168

Lèbre, A., & Gillet, D. (1991). The bright RV Tauri star R Scuti during an exceptional irregular light phase. *Astronomy and Astrophysics*, 246, 490-502

Lèbre, A., & Gillet, D. (1991). The multicomponent motion of the very high atmosphere of the RV Tauri star-R Scuti. *Astronomy and Astrophysics*, 251, 549-559.

Matsuura, M., Yamamura, I., Zijlstra, A. A., & Bedding, T. R. (2002). The extended atmosphere and evolution of the RV Tau star, R Scuti. *Astronomy & Astrophysics*, 387(3), 1022-1031.

B. Beirens, J. S. Carrière et A. Zebbache, Observation et analyse des étoiles variables, project de master d'astrophysique l'université Nice Sophia-Antipolis

(<http://physique.unice.fr/sem6/2015-2016/PagesWeb/PT/Etoiles/index.html>)

Wikipedia, article sur le Kappa-mecanisme

(https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canisme_Kappa#cite_note-maeder2009-1)