

# Pulsating Stars Newsletter

## Serial number 2

Sous le haut patronage de Denis Gillet

1. Édito	1
2. La classification des étoiles RR Lyræ	1
3. Quand observer RR Lyræ ?	3
4. Les dernières nouvelles des pulsantes	4
5. Dédoubllement de raies et mesure de la vitesse de l'onde de choc dans le spectre de RR Lyræ	7

## 1. Édito



Par Benjamin MAUCLAIRE  
E-mail : [bma.ova@gmail.com](mailto:bma.ova@gmail.com)

La compagne RR Lyræ bat son plein. En effet le maximum observé début juin a montré une intensité non négligeable. Je vous relate les soubressauts de cette pulsante dans rubrique n°4.

Fouad SEFYANI et Benhida ABDELMAJID nous décrivent leur observatoire situé au Maroc ainsi qu'une méthode de mesure de la vitesse des ondes sévissant dans RR Lyræ. Certains d'entre nous irons participer au congrès qu'ils ont organisé à Marrakech au mois d'octobre. N'hésitez pas à vous inscrire.

Les articles de Fouad et Benhida, de Thibault et Benjamin vont vous donner les clefs de la compréhension des phénomènes physiques et de la mesure de certains, qui animent RR Lyræ . Quelque soit la physique qui y est décrite, nous gardons un souci constant d'un message accessible à tous.

J'attire votre attention sur le fait que RR Lyræ n'est pas la seule étoile pulsante visible actuellement. Philippe MATHIAS met à disposition une liste d'étoiles à diagnostiquer et il y a l'étrange étoile X Cygni. Celle-ci est présentée dans la section 4.3.

C'est notre bulletin. À ce titre, vous avez tous la parole dans cette newsletter. Débutants comme chevronés, nous avons tous une expérience à relater, un savoir à transmettre.

N'hésitez pas à préparer un petit article, court ou long, nous vous aiderons dans votre démarche de contributeur qui ap-

porte toujours une satisfaction toute particulière. Les articles à plusieurs sont aussi une belle expérience.

Pour l'envoi des articles, merci de contacter Benjamin :

[bma.ova@gmail.com](mailto:bma.ova@gmail.com)

Merci d'avance à ceux qui participeront.

Pour déposer vos spectres et tableaux de mesures photométriques, c'est ici dès le 28 juin :

<http://www.pulsating-stars.org/base>

Nous gardons le contact quotidien grâce à la mailing-list GRRR. Pour s'inscrire, c'est ici :

[https://fr.groups.yahoo.com/neo/groups/Groupe\\_RR\\_Lyrae/info](https://fr.groups.yahoo.com/neo/groups/Groupe_RR_Lyrae/info)

Bonne lecture !

## 2. La classification des étoiles RR Lyræ



Par Thibault DEFRANCE  
E-mail : [thibault.astro@gmail.com](mailto:thibault.astro@gmail.com)

## 2.1. Les modes de pulsation

Les étoiles pulsantes montrent un cycle d'expansion et de contraction de leurs couches supérieures. Ces mouvements sont décrits par les modes. Ceux-ci peuvent être radiaux, ou non radiaux.

### 2.1.1. Modes radiaux

Ils sont dirigés selon l'axe du rayon de l'étoile.

– *Le mode fondamental* :

C'est le plus simple des modes de pulsation. Les éléments de l'atmosphère de l'étoile se dilatent et se contractent à l'unisson. Il n'y a pas de nœud (point sans mouvement) entre le centre et la surface : la matière impliquée dans la pulsation se déplace dans la même direction à tout instant donné. L'étoile RR Lyræ pulse dans ce mode.

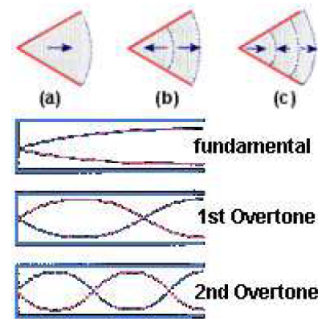
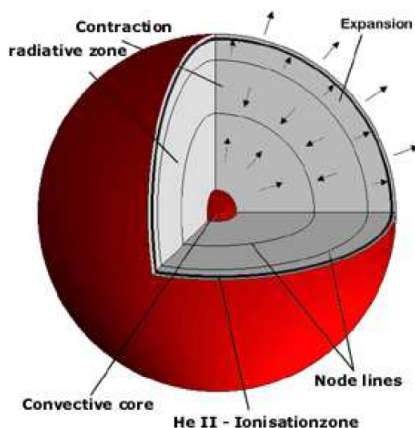
– *La première harmonique* :

La zone extérieure de l'enveloppe de l'étoile s'étend quand la partie interne de l'enveloppe se contracte et vice versa. Il y a un nœud entre le centre et la surface : la matière se déplace dans deux directions opposées par rapport au nœud à tout instant donné.

– *Les autres harmoniques* :

De la même façon, des harmoniques d'ordres supérieurs avec leurs nœuds supplémentaires associés peuvent être définies.

Les illustrations ci-dessous empruntées à Dave Kilkenny (University of the Western Cape) montrent d'une part une étoile schématisée dans le mode de pulsation radial de seconde harmonique et d'autre part une analogie entre les modes acoustiques de tuyaux d'orgues et les modes de pulsations stellaires radiaux.

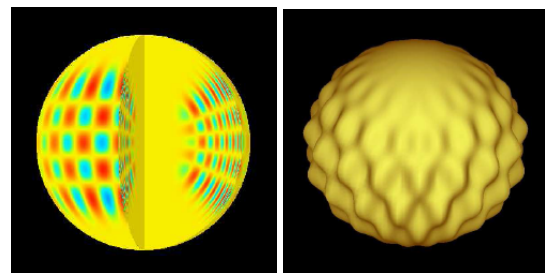


Comme pour les instruments de musique, une étoile peut montrer différents modes d'oscillation simultanément.

### 2.1.2. Modes non radiaux

Ces modes sont plus complexes, certaines parties de la surface se déplacent vers le centre quand d'autres se déplacent vers l'extérieur. Alors qu'un seul nombre  $n$  l'ordre de l'harmonique suffit pour décrire une pulsation radiale, trois nombres sont nécessaires pour décrire les pulsations non radiales ( $n$ ,  $l$  et  $m$ ). **Les RR Lyr, sujet du présent article, pulsent dans des modes radiaux.** Les modes non radiaux ne seront donc pas développés plus avant ici.

Les illustrations ci-dessous empruntées à Dave Kilkenny (University of the Western Cape) montrent : d'une part une étoile schématisée dans un mode de pulsation non radial et dans une représentation où les différentes couleurs montrent les différents mouvements de chute et d'expansion où alternativement les régions se réchauffent et se refroidissent. Et d'autre part dans une représentation où les mêmes déplacements sont figurés mais de manière exagérée.



## 2.2. Classification de Bailey

Les étoiles de type RR Lyræ possèdent des courbes de luminosité différentes, ce qui a permis de faire des catégories. Évidemment, les modes de pulsation générant ces courbes de lumière diffèrent selon le type, mais ce n'était pas le critère de Bailey.

– *Les RRab* :

Les RRab sont des étoiles avec une variation de forme de courbe de lumière très éloignée de la sinusoïde et de forte amplitude (1 à 2 magnitudes). Ces étoiles pulsent dans le mode radial fondamental. Leur facteur de symétrie est défini par :

$$\epsilon = \frac{T_{Max} - T_{Min}}{T}$$

TMax et TMin représentant respectivement l'instant du maximum et du minimum et P désignant la période de pulsation.

$\epsilon$  est compris entre 0.1 et 0.3

Leur période est typiquement plus longue que 0.45 jour.

Historiquement les RRA et RRb étaient séparées en deux types, mais ont été plus tard fusionnées dans la classe des RRab, car la transition graduelle entre les deux classes les rendaient indistinguables. Ces deux types pulsent dans le même mode, le mode radial fondamental.

**L'étoile RR Lyræ elle-même est le modèle de la classe RRab.**

– Les RRc :

Les RRc pulsent radialement dans le mode de la première harmonique. Les étoiles de type RRc présentent une courbe de lumière proche de la sinusoïde et de plus faible amplitude, moins de 0.5 mag.

Leur facteur de symétrie  $\epsilon$  est compris entre 0.4 et 0.5 et leur période est comprise entre 0.2 et 0.4 jour.

– Les RRd :

Les RRd pulsent radialement dans les deux modes, tant dans le fondamental que dans la première harmonique.

Généralement la première harmonique a une période comprise entre 0.33 et 0.41 jour et possède une plus grande amplitude que le mode fondamental ce qui en fait le mode dominant.

– Les RRe :

Les RRe pulsent quant à elles radialement dans le mode de la seconde harmonique.

– Nouvelle classification (Alcock et al. 2000) :

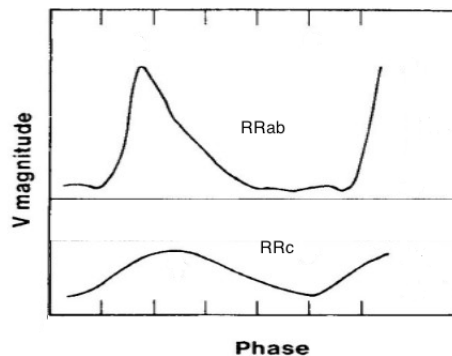
Cette nomenclature utilise des chiffres à la place des lettres, ces chiffres désignent les modes de pulsation. On a le tableau de correspondance suivant :

Ancien nom	Nouveau nom	Mode de pulsation
RRab	RR0	fondamental
RRc	RR1	première harmonique
RRd	RR01	fondamental et première harmonique
RRe	RR2	seconde harmonique

– D'autres catégories non confirmées pour l'instant existaient :

RR12 (1ère et 2 harmonique) et RR3 (3ème harmonique).

La figure ci-dessous montre les formes typiques des courbes de lumière pour les RRab et les RRc :



## Bibliographie et netographie :

Stellar Cycles : Photometric observations of the Blazhko Effect in RR Lyrae stars (thesis) , Elisabeth Guggenberger, 2008.

Variable Stars, vol. II – Pulsating stars, cours de Dave Kilkeny, University of the Western Cape.

## 3. Quand observer RR Lyræ ?



Par Daniel VERILHAC

E-mail : daniel.verilhac@free.fr

### 3.1. Les éphémérides de "Tonton"

Voici les éphémérides de RR Lyræ de période 13h36min. où figurent les maxima photométriques pour les nuits de juillet à septembre 2014 (tableaux 1, 2 et 3 page 4).

On peut télécharger les éphémérides complètes sur : <http://www.pulsating-stars.org/ephemeris>

### 3.2. RR Lyræ en direct

Pour voir où on en est, le graphique de Thibault donne la phase en direct :

<http://pulsating-stars.org/generateur.php>

### 3.3. Quand observer en photométrie ?

Si c'est possible, démarrez et observez dès que vous pouvez voir RR Lyræ et laissez tourner ensuite. Si vous le pouvez, imagez aussi les minima.

Cycle	JD	Jour	Mois	Heure (TU)
1345	2456839,73653676	1	juillet	5h40
1348	2456841,43688276	2	juillet	22h29
1350	2456842,57044676	4	juillet	1h41
1352	2456843,70401076	5	juillet	4h53
1355	2456845,40435676	6	juillet	21h42
1357	2456846,53792076	8	juillet	0h54
1359	2456847,67148476	9	juillet	4h06
1364	2456850,50539476	12	juillet	0h07
1366	2456851,63895876	13	juillet	3h20
1371	2456854,47286876	15	juillet	23h20
1373	2456855,60643276	17	juillet	2h33
1378	2456858,44034276	19	juillet	22h34
1380	2456859,57390676	21	juillet	1h46
1382	2456860,70747076	22	juillet	4h58
1385	2456862,40781676	23	juillet	21h47
1387	2456863,54138076	25	juillet	0h59
1389	2456864,67494476	26	juillet	4h11
1394	2456867,50885476	29	juillet	0h12
1396	2456868,64241876	30	juillet	3h25

TABLE 1 – Éphémérides des maxima de RR Lyræ pour le mois de juillet 2014.

Cycle	JD	Jour	Mois	Heure (TU)
1454	2456901,51577476	1	septembre	0h22
1456	2456902,64933876	2	septembre	3h35
1461	2456905,48324876	4	septembre	23h35
1463	2456906,61681276	6	septembre	2h48
1468	2456909,45072276	8	septembre	22h49
1470	2456910,58428676	10	septembre	2h01
1472	2456911,71785076	11	septembre	5h13
1475	2456913,41819676	12	septembre	22h02
1477	2456914,55176076	14	septembre	1h14
1479	2456915,68532476	15	septembre	4h26
1482	2456917,38567076	16	septembre	21h15
1484	2456918,51923476	18	septembre	0h27
1486	2456919,65279876	19	septembre	3h40
1491	2456922,48670876	21	septembre	23h40
1493	2456923,62027276	23	septembre	2h53
1498	2456926,45418276	25	septembre	22h54
1500	2456927,58774676	27	septembre	2h06
1502	2456928,72131076	28	septembre	5h18
1505	2456930,42165676	29	septembre	22h07

TABLE 3 – Éphémérides des maxima de RR Lyræ pour le mois de septembre 2014.

Cycle	JD	Jour	Mois	Heure (TU)
1401	2456871,47632876	1	août	23h25
1403	2456872,60989276	3	août	2h36
1408	2456875,44380276	5	août	22h39
1410	2456876,57736676	7	août	1h51
1412	2456877,71093076	8	août	5h03
1415	2456879,41127676	9	août	21h52
1417	2456880,54484076	11	août	1h04
1419	2456881,67840476	12	août	4h16
1422	2456883,37875076	13	août	21h05
1424	2456884,51231476	15	août	0h17
1426	2456885,64587876	16	août	3h30
1431	2456888,47978876	18	août	23h30
1433	2456889,61335276	20	août	2h43
1438	2456892,44726276	22	août	22h44
1440	2456893,58082676	24	août	1h56
1442	2456894,71439076	25	août	5h08
1445	2456896,41473676	26	août	21h57
1447	2456897,54830076	28	août	1h09
1449	2456898,68186476	29	août	4h21
1452	2456900,38221076	30	août	21h10

TABLE 2 – Éphémérides des maxima de RR Lyræ pour le mois d'août 2014.

**En spectroscopie, le “flash”  $H_{\alpha}$  est autour de la phase 0,85, soit environ 1 heure avant le maximum photométrique. Ne vous faites pas piéger par l'avance ou le recul des maxima : observez avec une large marge de sécurité. 1 h avant et 1 h après est une bonne marge.**

## 4. Les dernières nouvelles des pulsantes



Par Benjamin MAUCLAIRE  
E-mail : bma.ova@gmail.com

Notre observateur le plus nordique nous a rejoint dans cette campagne : Franck HOUPERT proche de Strasbourg. Pour sa part, deux observations au Lhires3 2400 t/mm et un échantillonnage temporel de 300 s.

### 3.4. Quand observer en spectrométrie ?

N'oubliez pas d'observer et de démarrer dès que vous pouvez voir RR Lyræ et **laissez tourner ensuite hors maximum. Les choses changent après la phase 0,16.**

#### 4.1. Le maximum du 30 mai 2014

On observe bien la raie He I 6678 Å en émission, preuve d'un maximum Blazkho.

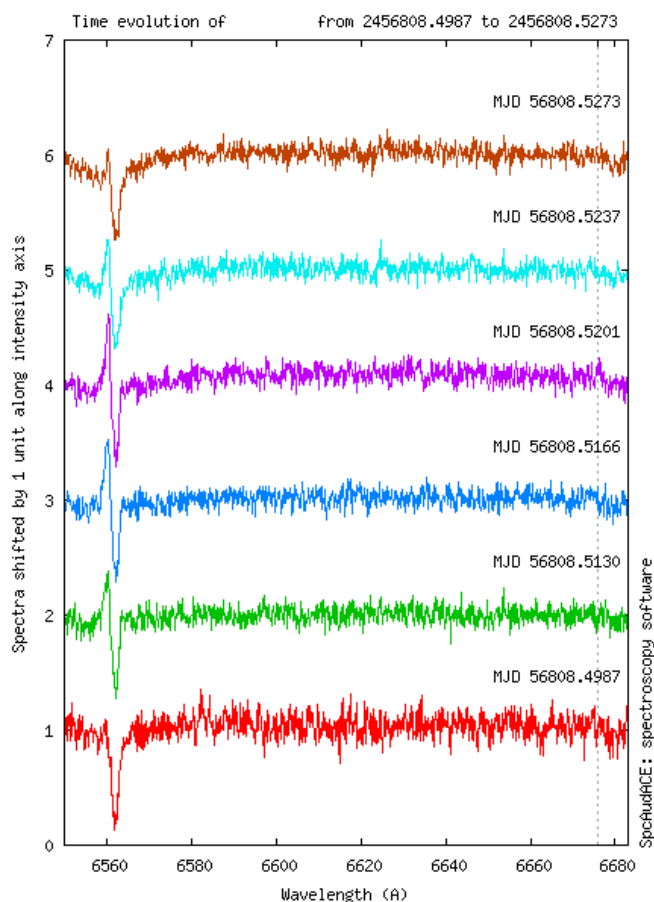


FIGURE 1 – Série spectrale autour du maximum avec la raie He I 6678 Å en émission (spectre violet).

La figure 1 provient d'une sélection dans un répertoire de 6 spectres de Franck autour du maximum et est obtenue à l'aide d'une fonction bien pratique de SpcAudace<sup>1</sup> :

```
spc_multifit2pngdec 1 6550 6683 6676
```

La détection est nette à la fraction de jour 0.5201. Cela confirme le régime de choc fort encore prévalent cette année et une fois de plus cela a duré plus d'une semaine, comme l'année dernière en juin.

Le sursaut He est situé cette année à 6677 Å au lieu de 6676 Å. Mais j'ai laissé le trait de repère calé sur 6676 Å car je n'ai pas eu l'occasion de vérifier la calibration.

D'autre part, vous verrez que la détection de He I 6678 Å est facilitée grâce à la résolution temporelle, ici 300 s. L'émission de la raie est absente sur la pose d'avant et celle d'après. Il semble que les poses plus longues que 300 s ne sont pas souhaitables pour avoir des détections nettes de cette raie.

## 4.2. Le maximum du 7 juin 2014

Sur cet autre spectre de Franck, on y constate encore la présence en émission de la raie He I 6678 Å. Le maximum

1. <http://wsdiscovery.free.fr/spcaudace/>

Blazhko a donc duré plus d'une semaine !

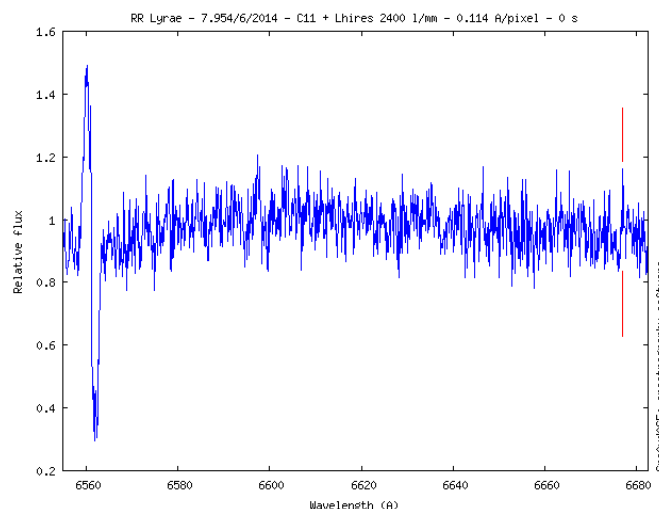


FIGURE 2 – Spectre du 7 juin 2014 montrant l'émission de la raie He I 6678 Å.

## 4.3. X Cygni : une pulsante d'intérêt

Parmi les étoiles pulsantes, il y a les variables céphéides dont  $\delta$  Cephei est le prototype. X Cygni (HD 197572) de type spectral F7Ib est l'une d'elles et est située aux coordonnées  $\alpha = 20\ 43\ 24.192$  et  $\delta = +35\ 35\ 16.08$ . Elle possède une période de pulsation de 16,3863 jours (AAVSO) et une magnitude variant de 5,8 à 7,6. Cette pulsante a attiré l'attention de Denis GILLET.

En effet, il souhaiterait acquérir tout le film des variations des profils des raies les plus représentatives de la dynamique atmosphérique et ainsi se donner la possibilité de construire le modèle observationnel le plus élaboré du mouvement de pulsation des différentes couches atmosphériques.

Ce que l'on recherche, c'est la manifestation de l'effet Schwarzschild [SCHWARZCHILD 1983] :

- le dédoublement des raies, notamment de  $H_{\alpha}$  ;
- émissions dans les raies métalliques (partout autour de  $H_{\alpha}$ ) ;
- profils P-Cygni inverses non permanents autour de la phase 0,458.

J'ai donc entrepris au printemps 2013 une série d'observations pour tâter la bête. Un script dédié a calculé la phase de chaque observation puis a tracé les profils ordonnés selon la phase (figure 3 page 6).

On constate le passage d'une onde dans la raie  $H_{\alpha}$  et bien d'autres variations dans les raies métalliques environnantes. Nous en reparlerons dans un prochain article. En attendant, vos observations de X Cygni sont utiles. Alors n'hésitez pas à braquer votre télescope dessus !

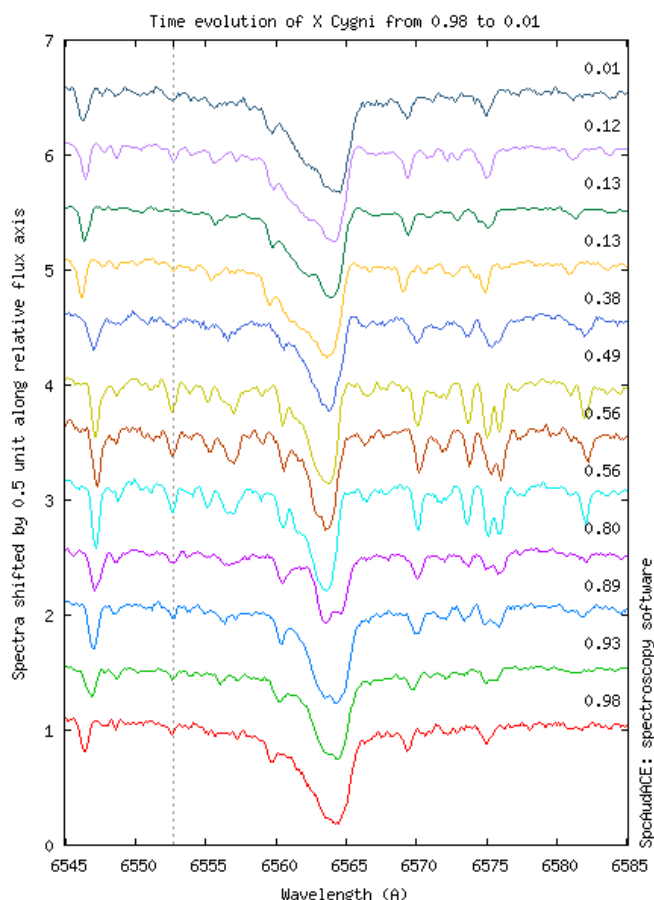


FIGURE 3 – Série de spectres de X Cygni réalisée durant le 3ème trimestre 2013 par B. MAUCLAIRE. Un repère sur une raie tellurique montre que la calibration est stable.

#### 4.4. Quand et pourquoi observer RR Lyræ ?

Les moments d'intérêt à chaque maximum photométrique sont :

- **phase 0,92** : émission des raies  $H_{\alpha}$ , He I 6678 Å et 5876 Å et guetter He II à 4686 Å lors des ondes très rapides ;
- **phase 0,30** : troisième émission de la raie  $H_{\alpha}$  sous forme d'une émission à la base de l'aile rouge. Cela forme un profil P-Cygni ;
- **autour de ces phases** : les émissions des raies peuvent arriver un peu avant ou un peu après les phases indiquées ci-dessus, les pulsations ne sont pas rigoureusement périodiques.

Ces moments correspondent respectivement aux phénomènes physiques décrits ci-dessus selon le modèle de Denis GILLET [FOKIN 1997] et [GILLET 2014]. Ils ont lieu lors d'une pulsation en mode fondamental de RR Lyræ, c'est-à-dire lors du passage d'une onde accompagnant la dilation et la contraction de l'ensemble de l'atmosphère de l'étoile (voir à ce sujet l'excellent article de Thibault DE FRANCE dans ce numéro).

#### – phase 0,92 :

L'onde traversant la photosphère comprime la matière au niveau de son front, entraîne un chauffage de la matière [FOKIN 1997] et excite alors les atomes d'hydrogène H et d'hélium He lorsque sa vitesse est hypersonique (pour environ  $v_{onde} \geq 5v_{son}$ ). Les ions  $He^+$  sont excités lorsque la vitesse est hypersonique forte ( $v_{onde} \gg 5v_{son}$ ) et donnent naissance à la rare raie He II à 4686 Å.

Lors de la désexcitation de ces atomes et ions, chacun produit un photon créant la raie d'émission associée ;

#### – phase 0,30 :

L'onde se déplace au delà de la photosphère sous forme d'une coquille de matière radiative en expansion [GILLET 2014]. Ainsi, vu depuis la Terre, la coquille chaude est en expansion symétrique : une partie se rapproche de nous et l'autre s'éloigne de nous. Elle produit alors une raie large d'émission centrée sur sa longueur d'onde catalogue.

Mais la partie de la photosphère nous faisant face et qui est moins chaude que la coquille l'entourant, se propage vers nous. Elle produit alors une raie d'absorption qui est par conséquent décalée vers le bleu par effet Doppler-Fizeau.

On a donc au final une raie en émission dont le côté bleu se trouve sous le continuum [OWOCKI 2014].

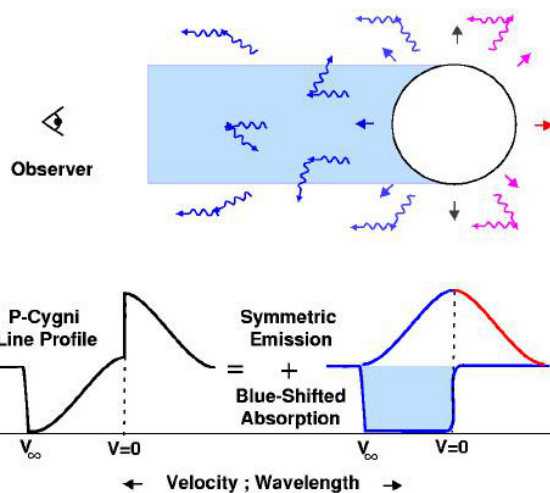


FIGURE 4 – Formation d'une raie de type P-Cygni [OWOCKI 2014].

Notez que la partie de l'enveloppe qui est située derrière l'étoile et qui donnerait le décalage spectral maximum vers le rouge, est occultée par l'étoile et ne peut donc être observée. C'est donc sur la composante en absorption de la raie que l'on peut mesurer la vitesse d'expansion de l'enveloppe ;

#### – autour de ces phases :

Selon l'état dans lequel est laissée la photosphère au

passage de l'onde précédente, l'onde de choc n'arrive pas toujours lors du maximum de luminosité.

En effet, la matière retombe lentement après le passage d'une onde précédente, augmentant ainsi de densité, ce qui freine la prochaine onde et entraîne un écart d'un cycle à l'autre.

## 4.5. Conclusion

Fin mai et début juin, nous avons clairement été dans une phase intense du maximum Blazhko avec He II en émission observée par Thierry GARREL. Comme l'an dernier, a eu lieu un décalage de 10-15 jours d'avance par rapport au maximum Blazhko prévu par les éphémérides. C'est un fait nouveau qui nous était apparu au Teide en août 2013 et il faudra expliquer pourquoi cette période d'environ 39 jours ([LE BORGNE 2014], tableau 2) se décale elle aussi. Les O-C sont ici dans l'im-passe et il y a un point de plus à élucider.

Poursuivez vos observations même hors maxima, les événements que nous recherchons sont tous à certaines phases particulières prédite par la théorie.

## Références

- [SCHWARZCHILD 1983] Schwarzschild, M., 1952, Transaction of the IAU VIII, Ed. P. Th. Oosterhoff, CUP, 811
- [FOKIN 1997] Fokin A. B., Gillet D., 1997, *A&A* 325, 1013
- [GILLET 2014] D. Gillet and A. B. Fokin, 2014, *A&A* 565, A73
- [OWOCKI 2014] <http://www.bartol.udel.edu/owocki/>
- [LE BORGNE 2014] Le Borgne J. F. et al., 2014, *MNRAS* 441, Issue 2, p.1435-1443

## 5. Dédoublage de raies et mesure de la vitesse de l'onde de choc dans le spectre de RR Lyræ



Par Benhida ABDELMAJID et Fouad SEFYANI  
E-mail : sefyani2002@yahoo.fr,  
abdelmajidbenhida@yahoo.fr

### 5.1. Résumé

Les ondes de choc traversent l'atmosphère de l'étoile RR Lyræ à chaque cycle de pulsation. Le passage de ces ondes engendre un changement de mouvement d'ensemble des différentes couches atmosphériques donnant naissance au phénomène de dédoublement de raies interprété par Schwarzschild [SCHWARZCHILD 1952] en 1952 sur la base d'une atmosphère à trois couches. Ce dédoublement de raies, qui découle de l'effet Doppler, est parfaitement visible dans nos spectres, enregistrés le 12 octobre 2013 durant le cycle 884, sur les raies  $H_\alpha$  et les raies  $D_1$  et  $D_2$  du sodium.

Nous présentons dans cet article la mesure aussi de la différence de vitesse entre la couche ascendante et descendante de matière déduite de l'écart entre la composante bleu et rouge de chaque raie correspondante au mouvement en sens opposé de la couche atmosphérique subissant le passage de l'onde de choc renversant ici brusquement le sens de son mouvement.

### 5.2. Introduction

L'observatoire astronomique d'Oukaïmeden (code J43) est une entité de recherche appartenant à l'université Cadi Ayyad. Il est situé à une altitude de 2700 m sur la chaîne du grand Atlas à 78 km au Sud de Marrakech ( $7^\circ 52' 52''$  Ouest et  $31^\circ 12' 32''$  Nord). La qualité du ciel de l'observatoire est indéniable aussi bien pour la photométrie que pour l'imagerie. En effet, le seeing moyen mesuré est de l'ordre de 1 arcsec ce qui permet d'obtenir des enregistrements de spectre de haute résolution avec un bon SNR.

À l'observatoire, plusieurs thématiques de recherches sont en cours telles l'étude de qualification des sites astronomiques, modélisation de la turbulence optique, extinction, photométrie et aérosols, haute résolution angulaire et interférométrie, physique solaire : activité solaire et météorologie

spatiale, planétologie détection des flashes lunaires, détection d'astéroïdes, comètes et suivi des météores, confirmation d'exoplanètes par mesures photométriques, observation directe d'exoplanètes par coronagraphie et apodisation de pupille et récemment l'implication de notre observatoire dans la campagne de mesure sur l'étoile RR Lyræ.

Nous présentons dans cet article le dédoublement de raies apparaissant dans la raie  $H_\alpha$  et les raies du sodium  $D_1$  et  $D_2$  ainsi que les mesures de vitesse de l'onde de choc à partir associées ces raies.



FIGURE 5 – Observatoire d'Oukaïmeden

### 5.3. Mode Opérateur

La mesure du spectre de l'étoile RR Lyræ a été réalisée pendant la nuit du 12 octobre 2013 durant le cycle 884 correspondant à un maximum Blazhko. L'acquisition des spectres est réalisée à l'aide du télescope C14 monté sur la monture Astrophysics 1200 et pilotée par le logiciel PRISM. L'autoguidage est réalisé par une caméra DMK et l'acquisition des spectres avec un spectrographe eShel, de résolution 10 000 environ, équipé d'une caméra QSI 532ws utilisant le capteur CCD Kodak KAF 3200 à 3.2 Mégapixels.

La calibration est réalisée avec une lampe de Thorium-Argon. La caméra est quant à elle refroidie à  $-20^\circ\text{C}$  en dessous de 0 tout au long des mesures effectuées entre 20h47mn et 00h08mn TU. Le temps de pose est de 300s pour chaque enregistrement. Les spectres ont été filtrés avec un filtre gaussien de largeur  $\sigma = 0.7 \text{ \AA}$  et le traitement est réalisé avec le logiciel Audela. La dispersion spectrale est d'environ  $0.1 \text{ \AA}/\text{pixel}$ . Le rapport signal sur bruit mesuré est d'environ 30.

### 5.4. Dédoublement de raies

L'étoile RR Lyræ est une étoile variable qui a atteint un âge assez avancé la faisant sortir de la séquence principale. Elle entame la combustion de l'hélium. La stabilité de l'étoile résulte de l'équilibre entre la force de pression du gaz conju-

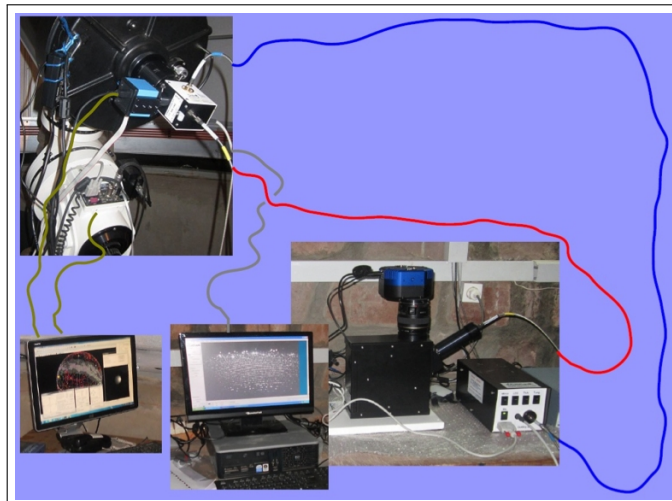


FIGURE 6 – Montage du Spectrographe eShel

guée à celle du rayonnement qui tend à faire éclater l'étoile et la force de gravitation qui tend à la contracter. Il en résulte un phénomène d'oscillation du mouvement de son atmosphère. On dit que l'étoile pulse et elle pulsera durant des centaines de milliers d'années [CHADID 1996]. Les pulsations se répètent de façon périodique toute les 13h36mn. Pendant chaque pulsation, la luminosité de l'étoile passe par un maximum et un minimum de sa courbe de lumière et le type spectral passe de A8 à F7.

Ces pulsations vont engendrer un mouvement d'ensemble de l'atmosphère de l'étoile la faisant osciller entre deux valeurs limites autour d'un rayon moyen de  $5.1 R_\odot$  [STELLINGWERF 1975] avec une plage de variation d'environ  $1 R_\odot$  (70 000 km).

Actuellement, il est bien établi que les ondes de choc traversent l'atmosphère durant les mouvements périodiques de pulsation. Parmi les faits expérimentaux en faveur de ces ondes, il y a la discontinuité dans la courbe de vitesse radiale, le dédoublement de raies d'absorption, l'apparition de raies en émission et l'effet Van Hoff. Cet effet a été détecté pour la première fois sur RR Lyræ par Mathias et al. [VAN HOFF 1953, MATHIAS 1995] en 1995. Il consiste à un léger décalage de  $0.04P$  ( $P$  = période de pulsation) de la courbe de vitesse radiale de l'hydrogène  $H_\beta$  par rapport à celle des raies métalliques.

Le dédoublement des raies a été interprété par Schwarzschild en 1952 [SCHWARZCHILD 1952] sur la base d'une atmosphère à trois couches. Durant la compression (courbe de lumière décroissante) toutes les couches de l'atmosphère se déplacent vers l'intérieur, le front de l'onde de choc pénètre la couche basse de l'atmosphère, puis une inversion du sens de mouvement se produit ce qui engendre un mouvement rapide des couches atmosphériques de l'intérieur vers l'extérieur dans l'intervalle de phase  $[0.9 - 0.1]$ .

Ainsi la couche atmosphérique ayant un mouvement vers l'extérieur et celle ayant un mouvement vers l'intérieur donne lieu à un effet Doppler. Deux raies d'absorption, l'une décalée



vers le rouge, qui décroît, correspondant à la partie atmosphérique se déplaçant vers l'intérieur et l'autre composante de la raie décalée vers le bleu qui correspond à la partie atmosphérique se déplaçant vers l'extérieur. Ce dédoublement de raie est parfaitement visible dans nos spectres sur la raie  $H_\alpha$  et les raies  $D_1$  et  $D_2$  du sodium. Le dédoublement des raies  $D_1$  et  $D_2$  du sodium a notamment été observé sur RR Lyræ par Lèbre et al. [CHALABAEV 1983] en 1982.

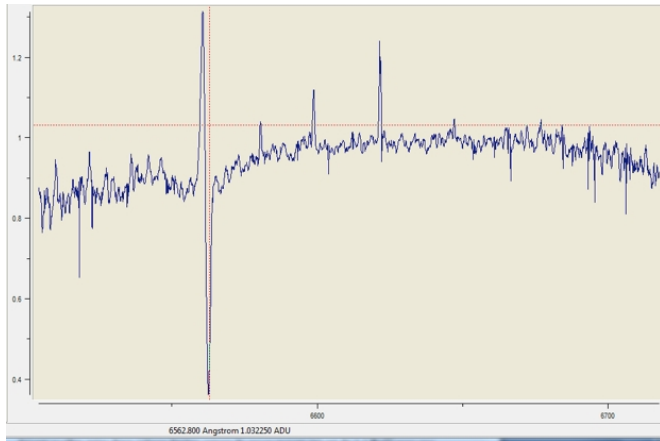


FIGURE 7 – Emission de la raie  $H_\alpha$  au maximum de la phase Blazhko. Le trait rouge indique la longueur de  $H_\alpha$  au laboratoire

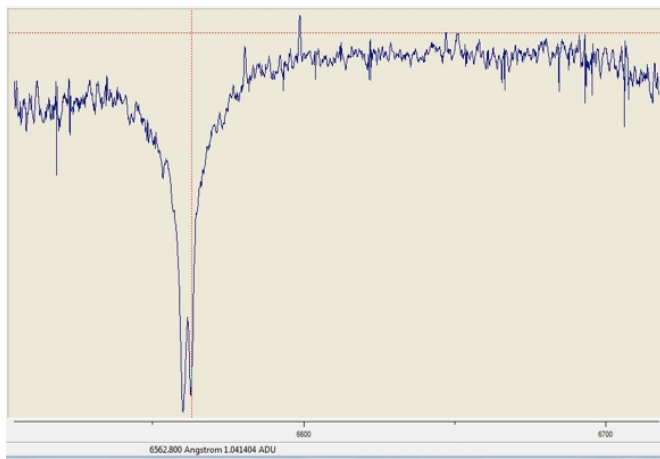


FIGURE 8 – Dédoublement de la raie  $H_\alpha$ . Le trait en rouge indique la longueur d'onde de  $H_\alpha$  au laboratoire

## 5.5. Mesure de la différence de vitesse des couches

La mesure de la différence de vitesse entre la couche montante entraînée par le choc et la couche descendante du choc précédent entraînée par gravité est obtenue à partir de la mesure de l'écart entre les deux composantes spectrales bleu et rouge [CHADID 1997] corrigée d'un facteur  $p$ . Ce dernier permet de transformer les vitesses radiales mesurées en vitesses de

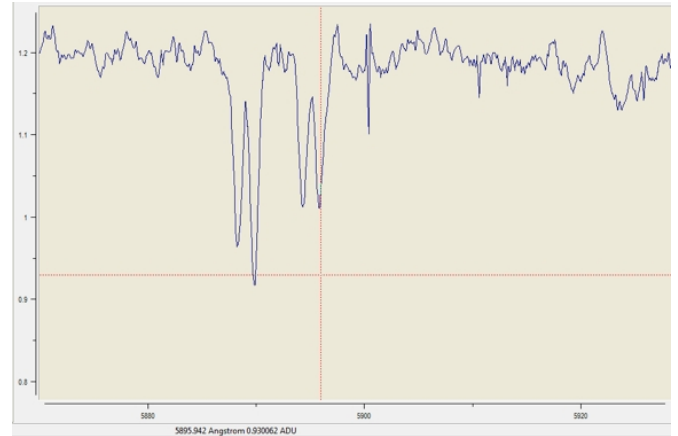


FIGURE 9 – Dédoublement des  $D_1$  et  $D_2$  du sodium. Le trait en rouge indique la longueur d'onde de  $D_2$  au laboratoire

pulsations. Dans le cas de mode de pulsation radiale comme ici, il permet de tenir compte notamment de l'effet géométrique de projection de la vitesse radiale sur l'axe de visée ainsi que de l'assombrissement du limbe.

Ce facteur est établi à 1.36 par Burki et al. [LÈBRE 1992] en 1992.

Les mesures ont donné les résultats suivants : une vitesse de l'onde de choc présente dans le dédoublement de  $H_\alpha$  d'environ  $165 \pm 10$  km/s. Tandis que la vitesse de l'onde de choc associée au dédoublement des raies  $D_1$  et  $D_2$  du sodium est d'environ  $107 \pm 10$  km/s.

## 5.6. Interprétation

Les couches atmosphériques de l'étoile sont supposées stratifiées. Les éléments chimiques lourds (Fe, Mg, Ti, ...) se trouvent dans les couches basses tandis que les couches les plus externes sont remplies d'hélium et d'hydrogène. Lors des pulsations, au passage d'une onde de choc ascendante, la matière est entraînée et rencontre une couche de matière descendante par gravité qui avait été déplacée lors du passage de l'onde précédente.

Ainsi on peut avoir une idée sur la durée de passage de l'onde de choc à travers grâce au dédoublement apparaissant respectivement dans les raies du sodium et d'hydrogène. Mais une méthode différente utilisant ces dédoublement serait nécessaire.

L'onde de choc démarre depuis la photosphère où se forment les raies métalliques et se propagent jusqu'à la haute atmosphère où se forment les raies d'hydrogène en gagnant de la vitesse suite à la diminution de la densité avec l'altitude.

## 5.7. Conclusion

Le dédoublement dans la raie  $H_\alpha$  de l'hydrogène et les raies  $D_1$  et  $D_2$  du sodium détecté dans le spectre de l'étoile RR Lyræ montrent que nous pouvons bien observer le phéno-

mène de propagation de l'onde de choc avec un petit spectrographe bien optimisé.

De ces résultats, nous avons pu mesurer approximativement la différence de vitesse des couches ascendante et descendante à  $107 \pm 10$  km/s traversant la couche du sodium. Cette différence de vitesse d'environ atteint  $165 \pm 10$  km/s en traversant la couche supérieure de l'atmosphère (hydrogène). Ces observations sont possibles à des moments où les ondes de choc sont suffisamment violentes, c'est-à-dire pendant la phase maximale de Blazhko.

Pendant ce cycle 884, nous avons aussi observé l'émission de la raie D<sub>3</sub> de He I à 5876 Å et à 6678 Å prouvant que nous sommes bien dans un régime hypersonique [GILLET 2013].

## Références

- [SCHWARZCHILD 1952] Schwarzschild, M., 1952 Transaction of the IAU VIII, Ed. P. Th. Oosterhoff, Cambridge University Press page 811.
- [CHADID 1996] Thèse de Doctorat, Chadid, M., 1996, OHP, Université Paul Sabatier.
- [STELLINGWERF 1975] Stellingwerf, R., F., 1975, ApJ 195, 441
- [VAN HOFF 1953] Van Hoff, A., Struve, O., 1953, PASP 65, 158
- [MATHIAS 1995] Mathias, P., Gillet, D., Fokin, A.B., Chadid, M., 1995, A&A 298, 843
- [CHALABAEV 1983] Burki, G., Mayor, M., & Benz, W. 1982, A&A, 109, 258
- [CHADID 1997] Chadid, M., Gillet, M., 1997, Astron. Astrophys. 319, 154
- [LÈBRE 1992] Lèbre, A., Gillet, D., 1992, A&A, 255, 221
- [GILLET 2013] Gillet, D., 2013, Astron. Astrophys. 445, 14



FIGURE 10 – Observatoire d'Oukaïmeden, Maroc.