

# Introduction aux étoiles variables RR Lyrae

*par Marc SERRAU,  
d'après le chapitre d'introduction de « RR Lyrae Stars » de Horace A. Smith  
Cambridge Astrophysics Series N°27*

Résumé : Ce texte d'introduction dresse une revue historique de la reconnaissance des RR Lyrae en tant que classe d'étoiles variables bien définie. Il présente ensuite les principales caractéristiques de ces étoiles et précise leur évolution tant à l'échelle de leur vie, que pendant le cycle de leur pulsation. La conclusion appelle les astronomes amateurs à rejoindre les observateurs de RR Lyrae.

## I. Une classe distincte d'étoiles variables

L'étude des étoiles variables de type RR Lyrae a débuté dans les dernières décades du XIX<sup>ème</sup> siècle. A cette époque, les astronomes commencèrent à scruter attentivement certains amas globulaires et y appliquèrent notamment les techniques de la photographie. Ils découvrirent que certaines étoiles d'amas étaient des variables. Par la suite de ces recherches, leur nombre augmenta fortement, les nombreux travaux s'y consacrant permirent de les ranger dans une classe d'étoiles variables importante et bien définie, les RR Lyrae.

Directement ou indirectement, ces investigations menées depuis plus d'un siècle ont contribué à de nombreuses branches de l'astrophysique moderne :

- les étoiles RR Lyrae sont les traceurs des propriétés chimiques et dynamiques de vieilles populations stellaires de notre galaxie et des ses voisines proches.
- Ces étoiles furent également utilisées comme étalon de distance standard pour l'établissement de la distance des amas globulaires, le centre de la galaxie et les systèmes du groupe local
- les RR Lyrae servent de test aux théories et modèles d'évolution des étoiles de faible masse et de pulsation des étoiles.

Aujourd'hui encore, les RR Lyrae sont toujours le sujet d'études particulièrement actives et le resteront dans un futur proche. Voici l'histoire de leur découverte et un bilan très synthétique de nos connaissances au sujet de ces étoiles.

La dernière édition du GCVS (General Catalogue of Variable Stars, Kholopov et al., 2008) définit les étoiles RR Lyrae comme des « étoiles géantes pulsantes de type spectral A à F ayant une période comprise entre 0,2 et 1,2 jours et une amplitude de variation de luminosité de 0,2 à 2 magnitudes en bande V ». Cette brève définition résume des décades de travail, qui commencèrent avec l'application de la photographie sur l'étude du ciel.

La découverte des RR Lyrae est intimement liée à la reconnaissance d'étoiles variables dans les amas globulaires. La première en date fut une nova en éruption dans Messier 80, observée en 1860. Pickering annonça ensuite en 1889 la découverte d'une variable proche du centre de Messier 3. D'autres variables furent ensuite découvertes dans les amas globulaires. Cependant, leur étude principale commença en 1893 lorsque l'astronome Solon I. Bailey initia un programme photographique sur les amas globulaires à la station d'Arequipa au Pérou pour le compte de l'observatoire du Collège de Harvard. Les découvertes successives et rapides de variables dans les amas Oméga Centauri et 47 Tucanae stimulèrent des recherches complémentaires.

Vers 1913, plus de 500 variables avaient été découvertes dans 23 amas. Bailey lui-même avait entrepris de déterminer les périodes et amplitude de variation de ces étoiles et il devint rapidement clair que nombreuses étaient celles d'un type particulier : période inférieure à un jour, amplitude de l'ordre de la magnitude.

De plus, la magnitude apparente de ces astres à courte période au sein d'un amas était environ la même donnant l'espoir de déterminer un étalon standard de distance. Ces variables de « type amas », comme elles étaient nommées à l'époque, étaient celles que l'on appelle aujourd'hui les étoiles RR Lyrae.

Quelle fut la première étoile RR Lyrae découverte ? Celle observée par Pickering en 1889 était une céphéïdes plutôt qu'une RR Lyrae. Bien que n'en ayant pas déterminé la période, la première étoile de ce type à être étudiée le fut par D.E. Packer vers 1890 au sein de l'amas Messier 5. U Leporis fut la première RR Lyrae découverte hors d'un amas, avec une période de 0,58 jour. Elle fut annoncée par Kapteyn quelques jours avant celle de Packer.

Si le crédit de cette première revint à Kapteyn, celui de la découverte de la classe particulière des RR Lyrae revient à Bailey lui-même. Dans un article de 1902, Bailey divisait les « variables d'amas » en trois types : a, b et c, selon l'allure de la courbe de variation de luminosité. En plus, des centaines de variables d'amas étudiées par Bailey, quelques exemples hors amas avaient été produits : U Leporis déjà citée, S Arae en 1898 et, peu avant Juillet 1899, Fleming découvrait une variable de magnitude 7 dans la Lyre avec une période de 0,56 jour. Pickering nota la proximité des caractéristiques de cette dernière avec celles des variables d'amas. Selon la méthode en vigueur elle fut désignée RR Lyr et resta la plus brillante représentante de son groupe.

Le nombre des variables hors amas grossit progressivement et leur étude s'intensifia rapidement du fait de leur plus grande proximité et donc de leur plus grande brillance qui en permit l'analyse par spectrographie. Cette technique ne pouvait alors pas s'appliquer aux variables d'amas de bien plus faible éclat.

A partir de 1915, avec de nombreuses données accumulées, il devint possible de statuer sur le fait que les étoiles d'amas ou celles leurs ressemblant continuent à être incluses dans le groupe des céphéïdes ou fassent partie d'un nouveau groupe particulier. En effet, bien que de période plus courte, la forme des courbes de lumière des RR Lyrae était similaire à celle des variables de type céphéïdes. Les analyses

spectroscopiques donnant les évolutions des vitesses radiales, indiquaient également des comportements dynamiques proches de ces variables. Il faut aussi noter qu'à l'époque, nombreux étaient ceux qui pensaient encore que la nature de ces étoiles variables était celle d'une binaire spectroscopique non résolue. Cependant, en 1914, Shapley avait publié un papier avançant l'idée que la pulsation était responsable de la variation pour les RR Lyrae comme pour les céphéïdes. Cette similarité avait d'ailleurs encouragé à utiliser des RR Lyrae dans la calibration de la célèbre relation entre période et luminosité de ces étoiles. Des RR Lyrae jouèrent ainsi à l'époque un rôle vital dans la détermination par Shapley de la distance au centre de notre galaxie.

D'autres raisons poussèrent à distinguer les RR Lyrae des céphéïdes. Hertzsprung montra le premier que nombreuses de ces dernières étaient concentrées dans le plan galactique. Les RR Lyrae, quant à elles, étaient dispersées à toutes les latitudes galactiques. Aujourd'hui nous disons que les premières font partie de la population I, alors que les RR Lyrae incluent aussi le halo de la population II. Plus récemment, à la lumière de la compréhension du mécanisme interne de leur cœur en fusion, d'autres arguments astrophysiques sont venus s'ajouter à ceux qui militent pour une catégorie particulière de ces variables.

Il a été aussi nécessaire de distinguer les RR Lyrae d'autres groupes d'étoiles variables à savoir les  $\delta$  Scutii et les SX Phoenixi. Ces variables également pulsantes ont des périodes encore plus courtes – moins de 0,2 jours – et des amplitudes faibles en V. En effet, après avoir réalisé que ces étoiles diffèrent tant dans leur état d'évolution que de magnitude absolue des « étoiles d'amas », il a été admis de les ranger dans des classes distinctes, tout comme le montre les positions de ces groupes sur le diagramme H-R sur la page suivante.

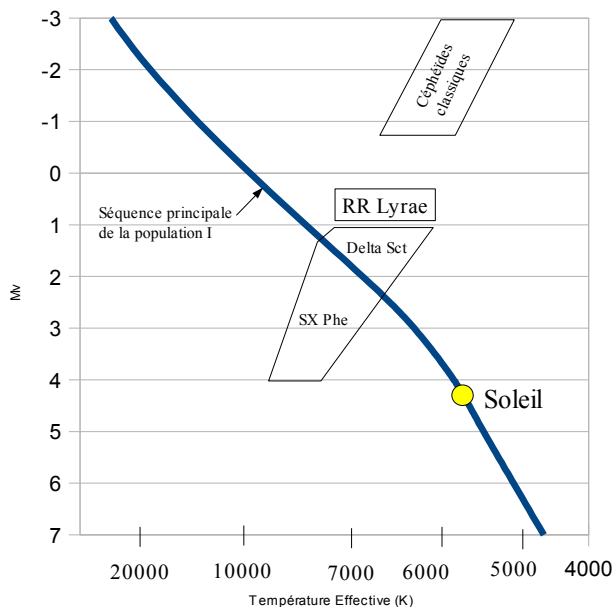


Fig. 1 Localisation approchée de différents types d'étoiles sur le diagramme H-R

Ce fut en 1948, que la commission 27 de l'UAI adopta officiellement la motion demandant à ce que les étoiles jusque-là désignées « variables d'amas » ou que les étoiles de type de celle de RR Lyr s'appellent désormais étoiles RR Lyrae, qu'elles appartiennent ou non à un amas ou à notre galaxie.

## II. Bref état des connaissances actuelles

### II.1 L'inventaire des RR Lyrae

Il est apparu depuis les travaux pionniers de Bailey que les RR Lyr sont des variables relativement communes. A la fin des années 1980, 1900 RR Lyrae avaient été découvertes dans 77 amas globulaires, représentant 90% des variables dans ces amas. Les RR Lyrae sont également bien représentées dans la Galaxie, tant dans le disque, le halo que dans le bulbe central. Le Bibliographic Catalogue of RR Lyrae Stars de Heck (1988) inclut des données relatives à 6367 de ces variables. La plupart sont reprises dans l'édition 4 du GCVS déjà évoqué où près d'un quart des 28457 variables répertoriées sont de type RR Lyrae. Celles-ci sont 7 fois supérieures en nombre aux céphéïdes ou aux étoiles W Virginis découvertes dans la Galaxie.

Environ 91% des RR Lyrae sont du type a ou b (RRab), les 9% restant étant de type RRc. Ceci ne reflète toutefois pas la véritable répartition des RR Lyrae dans le champ galactique : l'amplitude de variation plus faible chez les RRc les rend plus difficiles à déceler en tant que variable que les RRab. Une distribution des périodes est montrée dans les deux figures suivantes :

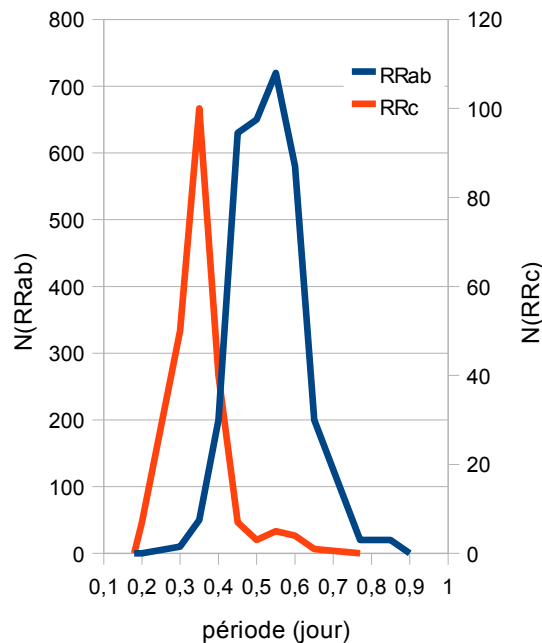


fig. 2 Répartition des périodes

Malgré les nombres élevés présentés plus haut, seule une faible proportion des RR Lyrae de notre galaxie a été découverte. En 1991, Suntzeff estimait leur nombre à 85000 dans le halo situé entre 4 et 25 kpc du centre galactique. Leur nombre total dans notre « univers-île » est donc encore plus grand.

En 1944, W. Baade avait annoncé la découverte de 2 populations distinctes d'étoiles : les étoiles de la population I dans le disque et les bras spiraux et les étoiles dites de la population II présentes dans le halo et le bulbe. La plupart des RR Lyrae incluant celles des amas globulaires sont des étoiles plutôt pauvres en métaux. Il apparaît qu'elles devraient donc être rangées dans la catégorie de la population II. Cependant, il a été montré que les RR Lyrae incluent un mélange de ces deux populations : il existe des RR Lyrae plutôt riches en métaux et d'autres plus pauvres que le Soleil.

Le domaine des RR Lyrae ne se limite pas à celui de notre galaxie. Ces étoiles ont été découvertes d'abord dans les nuages de Magellan et les autres compagnons de notre système, puis dans la Galaxie d'Andromède Messier 31. Le nombre de RR Lyrae extragalactiques atteint 1500 et devrait encore croître considérablement à mesure de la croissance de nos capacités d'observation.

## II.2 Les paramètres physiques moyens

Les RR Lyrae sont des étoiles pulsantes, mais ne sont pas instables au sens des novae et supernovae. Leurs oscillations s'effectuent autour d'un état d'équilibre qui ne change pas de façon significative au cours d'une vie humaine. Il est donc sensé de parler de cet état d'équilibre, représenté par la mesure de paramètres physiques principaux de ces étoiles. Cependant, l'obtention de valeurs moyennes des grandeurs observées fut et reste une tâche difficile, nécessitant des efforts considérables. Ce gros travail statistique a été en partie motivé par la réalisation que les RR Lyrae pouvaient servir d'étalons standard intéressant à utiliser dans la détermination de certaines distances. La table suivante résume les résultats acquis :

Table 1. Propriétés des étoiles RR Lyrae

Période	0,2 à 1,1 jours
$\langle M_V \rangle$	+0,6 ± 0,2 (étoiles à métallicité faible)
$\langle T_e \rangle$	7400K – 6100K
[Fe/H]	0,0 à -2,5
Masse	~0,7 $M_{\text{soleil}}$
Rayon	~4 à 6 $R_{\text{soleil}}$

Bien que ce tableau soit très instructif, il ne faut pas perdre de vue que notre compréhension des étoiles RR Lyrae est encore très incomplète et nous allons essayer d'en expliquer chaque ligne.

### La magnitude absolue

Depuis les travaux de Bailey, il a été reconnu que les RR Lyrae présentes dans les amas globulaires avaient des magnitudes apparentes moyenne assez peu dispersées. Pour transformer ce potentiel en véritable chandelle étalon, il a donc été nécessaire d'en déterminer la magnitude absolue.

Malheureusement aucune RR Lyrae n'est assez proche pour que l'on puisse en déterminer la distance par sa parallaxe trigonométrique. Les choses ont commencé à changer avec la venue des résultats d'Hipparcos et se poursuivront avec le projet GAIA. Pour l'essentiel, les distances de ces variables ont été obtenues par approches distinctes : parallaxes statistiques, solution dite Baade-Wesselink et détermination par l'utilisation de méthodes calibrées indépendamment (relation période-luminosité des céphéïdes, positionnement dans la séquence principale, etc) de la distance des systèmes contenant les RR Lyrae.

La valeur de +0,6 ± 0,2 donnée ci-dessus intègre les déterminations récentes relatives à des RR Lyrae pauvres en métaux, pour lesquelles les valeurs oscillent entre +0,4 et +0,8. Il apparaît donc, suite aux analyses les plus récentes, que la métallicité joue un rôle non négligeable dans la valeur de la magnitude absolue.

### La Température de surface

Sur le diagramme d'Hertzsprung-Russel présenté au début de ce texte, les RR Lyrae sont confinées dans une zone bien définie. Ces limites ont été obtenues avec toutes les étoiles RR Lyrae, tant dans le champs général de la Galaxie qu'avec celle des amas globulaires.

Toutefois, les valeurs de température ont calculées par l'intermédiaire de modèles d'atmosphères stellaires appliqués aux mesures photométriques ou spectroscopiques sur ces étoiles. Ces modèles étant imparfaits, des erreurs variés sont introduites dans les résultats.

Ainsi, les valeurs extrêmes données correspondent aux moyennes de 7400K pour les chaudes RRc et les températures de 6100K pour les RRab plus froides. Ces extrêmes peuvent différer d'au moins 300K par rapport à certains résultats obtenus avec des relations couleur-luminosité différents. Les valeurs données ici pourraient probablement être abaissées de 100 à 200K dans l'avenir.

## La composition chimique (métallicité)

Dans ce qui suit, la métallicité indique la proportion des éléments plus lourds que l'hélium au sein des photosphères. Ces proportions sont établies par photométrie ou spectrographie. Dans le cas des étoiles de faible masse comme les RR Lyrae, la création de quantités significatives d'éléments plus lourds que le carbone et l'oxygène par nucléosynthèse est exclue pendant leur cycle de vie. Dès lors, la mesure des éléments métalliques reflète l'abondance de ces éléments dans le gaz interstellaire qui a servi à créer l'étoile étudiée. De ce fait et du fait de leur âge très important, les étoiles RR Lyrae sont donc des témoins très intéressants de l'histoire chimique de la Galaxie.

Les RR Lyrae montrent une dispersion importante à ce sujet. Ainsi, celles appartenant à la vieille population du disque galactique ou certaines présentes (mais pas toutes) dans le bulbe sont peu déficientes en éléments lourds relativement à notre Soleil, certaines sont aussi riches que ce dernier, d'autres le sont plus. D'un autre côté, les RR Lyrae présentes dans le halo galactique peuvent être très déficientes en éléments lourds.

Pour caractériser l'abondance globale des éléments lourds (relative à celle du Soleil) la notation  $[Fe/H]$  est souvent utilisée. Elle signifie en fait :  $\log (Fe/H)_{\text{étoile}} - \log (Fe/H)_{\text{soleil}}$ . Avec cette notation, les RR Lyrae riches en métaux ont des valeurs de  $[Fe/H]$  de l'ordre de 0 alors que celles les plus pauvres ont des valeurs de  $[Fe/H]$  proches de -2,5, soit une déficience d'un rapport de 300 par rapport au Soleil. Bien que très pratique, l'utilisation de la quantité  $[Fe/H]$  ne doit pas faire oublier qu'elle est une simplification et qu'un simple nombre ne permet pas de décrire les abondances relatives de tous les éléments plus lourds que l'hélium.

Pour cet élément notamment, il apparaît, selon les théories stellaires actuelles, que son abondance joue un rôle important dans la détermination de l'état d'évolution et les propriétés pulsatoires d'une étoile RR Lyrae. Par malchance pour les astrophysiciens, l'abondance de l'hélium dans la photosphère de ces étoiles ne peut être mesurée précisément par spectrographie. Les incertitudes sur les mesures sont en effet trop importantes pour que les résultats puissent être

comparés aux abondances requises dans les modèles stellaires.

De ce fait, l'abondance de l'hélium est souvent déterminée indirectement, par comparaison de population d'étoiles dans un groupe par exemple. Ceci permet d'estimer que les étoiles qui deviendront des RR Lyrae naissent avec une proportion d'hélium de 20 à 30% de leur masse initiale.

## L'âge des RR Lyrae

Il a déjà été écrit plus haut que les RR Lyrae étaient des étoiles évoluées de faible masse, donc d'une durée de vie très longue. Leurs progéniteurs dans la séquence principale se sont donc formés il y a très longtemps. Mais depuis quand ?

La détermination de l'âge des amas globulaires qui en contiennent pourrait nous renseigner sur cette information. Cependant, ici aussi, il ne semble pas y avoir d'unanimité en ce qui concerne ces âges et des écarts de plusieurs milliards d'années sont constatés. Les chiffres avancés montrent que ces étoiles ont plus d'une dizaine de milliards d'années.

## III. Evolution des RR Lyrae

Les RR Lyrae sont supposées être des étoiles de faible masse ( $0,8 M_{\text{soleil}}$  à leur naissance), Elles ont d'abord passé une grande partie de leur vie (plus d'une dizaine de milliards d'années) à « brûler » de l'hydrogène : dans le diagramme HR, elles étaient dans la séquence principale.

Puis est survenu la fin de cette longue période, le cœur est désormais à court de « combustible ». La fusion de l'hydrogène continue dans les couches supérieures à celles du noyau d'hélium, l'étoile s'est transformée en géante rouge. Lorsque les conditions de température l'ont permis, la fusion de l'hélium s'est initiée (flash de l'hélium) dans le cœur.

#### IV. Le cycle de pulsation des RR Lyrae

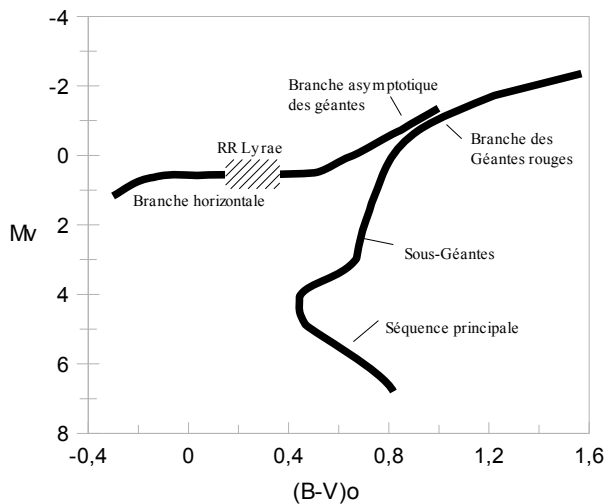


Fig.3 Diagramme Couleur-Luminosité pour un amas globulaire

L'étoile géante s'est déplacée progressivement sur la branche horizontale du diagramme HR, dans une zone dite d'instabilité où les étoiles sont pulsantes : elle est devenue une RR Lyrae.

La masse est inégalement répartie dans ces étoiles : le cœur dense d'un rayon de cinq fois celui de la Terre pour une masse de la moitié de celle du Soleil. Au dessus, les 50 pour cent extérieurs de l'étoile sont de densité très faible, totalisant un millième de la masse solaire.

L'étoile poursuivra son évolution sur la branche horizontale, utilisant deux sources d'énergies internes : la fusion de l'hélium en carbone et oxygène en son cœur, de celle de l'hydrogène dans une coquille entourant ce dernier.

Cent millions d'années plus tard, l'hélium central sera épuisé. L'étoile se stabilise et quitte la branche horizontale pour la branche asymptotique des géantes rouges jusqu'à l'épuisement de son carburant nucléaire. Sa température centrale n'augmentera plus suffisamment pour permettre la fusion des éléments carbone et oxygène en son cœur. Elle terminera en naine blanche après avoir probablement éjecté ses couches supérieures pour former ce que nous appelons une nébuleuse planétaire. Sans réaction nucléaire, la naine blanche irradiera ce milieu diffus de sa chaleur interne, à un taux sans cesse plus faible.

Durant le cycle de pulsation, les propriétés observées des RR Lyrae varient, comme le font le rayon et la luminosité de l'étoile. Mais c'est la variation cyclique de la vitesse radiale qui indique le plus clairement que l'étoile est en train de pulser.

La luminosité de l'étoile est affectée par les changements de rayon (R) et de température ( $T_e$ ). L'amplitude de variation est fonction de la longueur d'onde observée. L'étoile est plus bleue au maximum qu'au minimum et l'amplitude en B (440nm) dépasse celle en V (550 nm). Ceci a été révélé par les observations photométriques dans plusieurs bandes de couleurs faite sur de nombreuses RR Lyrae tout le long de leur cycle. Cependant ces variations sont bien supérieures à celles observés dans la bande K ( $2,2\mu\text{m}$ ).

Ce phénomène s'explique par le fait que l'étoile se comporte d'un façon très proche de celle d'un corps noir. Le flux émis dans le visible chute à proximité du pic de la fonction de Planck pour une étoile RR Lyrae. Ce flux s'exprime en  $R^2.T_e^4$ . Dans le domaine infra-rouge de la bande K, par contre, le flux est émis selon une loi en  $R^2.T_e^{1,6}$ .

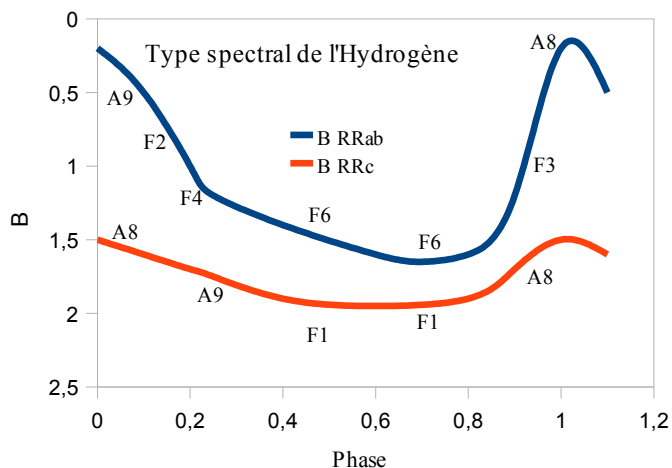
On voit donc bien que l'amplitude de variation dans le visible dépend fortement de la variation de la température alors que les variations observées en infra-rouge reflètent plutôt les variations de rayon de l'étoile.

Typiquement, la température oscillera entre 7500K au maximum de luminosité et 6100K au minimum. Les étoiles de type RRc sont observés plus chaude que celles de type RRab. Elles occupent de fait plus la partie chaude de la zone d'instabilité, au contraire de RRab.

Les observations spectrographiques effectuées au cours du cycle de pulsation montrent également des variations intéressantes. Bien que ces observations ait commencé tôt sur les étoiles les plus brillantes, la classification spectrale a été rendu difficile par la grande amplitude de composition métallique constatées sur les RR

Lyrae. Ainsi l'attribution d'un type spectral particulier est parfois très ambiguë dans le cas des étoiles pauvres en métaux.

Malgré certaines difficultés d'interprétations des spectres observés – dues parfois à la complexité des phénomènes physiques en jeu dans les photosphères de ces étoiles – il est toutefois possible de montrer que le type spectral basé sur la raie Balmer de l'hydrogène varie au cours du cycle de pulsation :



Ici encore, on constate une différence entre les cas des RRab et les RRc.

Les pulsations des RR Lyrae induisent des variations périodiques de la vitesse radiale. La présence de raies métalliques permet parfois d'en faire la mesure. On constate alors que la courbe d'évolution de la vitesse radiale est le miroir inverse de la courbe de luminosité dans le visible.

Les courbes de lumière des RR Lyrae se répètent assez précisément de cycle en cycle. Cependant, chez certaines, cette régularité n'est pas de mise. Les courbes de lumière peuvent être plus irrégulières, les maxima atteints avec retard ou avance sur les instants prévus par les éphémérides. Dans de nombreux cas, cette irrégularité peut être attribuée à la présence d'une seconde périodicité. On peut d'ailleurs distinguer 2 groupes d'étoiles RR Lyrae irrégulières : les RRd qui montrent un mélange du mode de pulsation fondamental et d'un premier harmonique et celles qui montrent une modulation périodique de leur courbe de lumière sur une période typique d'une dizaine de jours. Ce dernier effet est appelé effet Blazhko, du nom de l'observateur qui l'a découvert en 1907 en essayant de décrire les irrégularités de RW Dra.

## V. Conclusion

Si d'énormes progrès ont été réalisés depuis les travaux des pionniers de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'étude des étoiles RR Lyrae est loin d'être terminée. L'utilisation de moyens d'observations de plus en plus puissants comme des télescopes spatiaux permettra d'augmenter la portée de la découverte de ces étoiles et de d'affiner les paramètres mesurés. Les programmes de surveillance photométriques de vastes champs étoilés nécessaires à la découverte des planètes extra-solaires produiront aussi de nombreuses découvertes dans le domaine des étoiles variables et des RR Lyrae.

Cependant, des moyens bien plus simples, à la portée des astronomes amateurs, pourront aussi contribuer à bâtir un ensemble de connaissances toujours plus cohérent et complet. Il a été montré (Le Borgne et Klotz, 2009) qu'avec un simple objectif de 50mm des résultats très utiles peuvent être déjà obtenus sur RR Lyr elle-même. En Europe, le GEOS fédère de nombreux observateurs de RR Lyrae et construit une base de données observationnelles très riche.

Le champ de l'observation des RR Lyrae est très vaste et permet une coopération entre astronomes amateurs et professionnels des plus fructueuses.

## Bibliographie :

- Smith, H.A., 2003, *RR Lyrae Stars*, (Cambridge University Press)
- Le Borgne, J.F., Klotz, A., 2009, *Note circulaire GEOS NC 1105*