

Pulsation et dynamique stellaires
Observations, analyse et interprétation

Par

Marc CHIAMISA, Daniel TAPIERO et Youssef MOUMNASSI

- Rapport de Stage de Licence 3 -

Dirigé par : Dr. Merieme CHADID

Année 2007/2008

Remerciements

Nous remercions tout particulièrement :

- Notre directeur de stage l' Astronome Merieme CHADID pour nous avoir guidés tout au long de notre stage ainsi que pour nous avoir consacré une grande partie de son temps.
- L'Astronome Jean VERNIN pour avoir été à nos côtés lors de notre observation à l'Observatoire de la Côte d'Azur.
- Le professeur Hervé TRINQUET pour nous avoir bien accueilli lors de notre arrivée au laboratoire Fizeau.
- L'équipe du laboratoire Fizeau pour son aide et pour l'agréable ambiance du lieu de travail.

Sommaire

Introduction.....	5
1. Pulsation stellaire.....	6
1.1. Etoiles variables pulsantes.....	6
1.1.1. Classification.....	6
1.1.2. Céphéides et RR lyrae.....	7
1.2. Moteurs de pulsation.....	8
1.3. Intérêt majeur.....	9
2. Observations spatiales: CoRoT et HIPPARCOS.....	10
2.1. CoRoT.....	10
2.2. HIPPARCOS.....	11
3. Observations au Sol.....	12
3.1. Photométrie.....	12
3.1.1. Qu'est ce que la photométrie?	12
3.1.2. Courbes de lumière.....	12
3.1.3. Distances de l'Univers et relation Période-Luminosité.....	13
3.2. Spectroscopie.....	13
3.2.1. Raies spectrales et courbe de vitesse radiale.....	14
3.2.2. Interprétation.....	14
3.2.2.1. Observations spectroscopique.....	14
3.2.2.2. Analyse et résultats.....	16
Conclusion générale.....	17
Bibliographie.....	18

Introduction

Depuis l'Antiquité, les astronomes avaient constaté que certaines étoiles visibles à l'oeil nu présentent un éclat variable au cours du temps: il s'agit des étoiles variables.

On a déterminé ensuite qu'il existe deux types d'étoiles variables, variables intrinsèques et variables géométriques.

Les étoiles variables intrinsèques sont des variables dont les variations de luminosité sont provoquées par des changements dans leur structure interne. Quant aux variables géométriques, leur variation de luminosité est due à une cause externe à l'étoile et non à une modification de ses propriétés.

Parmi les variables intrinsèques, on distingue les variables pulsantes qui seront le principal sujet de notre stage. Ces étoiles présentent une variation périodique de leur volume, ce qui se traduit par une modification de leur luminosité. Les mécanismes de la dynamique et de la pulsation de leur atmosphère restent encore très mal compris. La modélisation de la pulsation est donc un défi pour la physique stellaire. En effet la résolution de ce problème permettrait d'avoir une théorie plus poussée quant à la dynamique des étoiles. Les progrès en astrophysique, au cours du siècle dernier ont permis de comprendre et de modéliser la pulsation stellaire.

L'étude des étoiles variables est d'une grande importance, elle permet de déterminer les distances dans l'Univers grâce aux relations du module des distances et de la Période-Luminosité. C'est ainsi qu'on a pu se donner une idée de la taille de notre Univers.

Notre stage se base sur l'étude de la pulsation et de la dynamique de l'atmosphère de ces variables pulsantes.

Une approche théorique est consacrée à l'étude de la dynamique des pulsations ainsi qu'au modèle de détermination des distances dans l'Univers.

Ensuite, une approche observationnelle spatiale et au sol nous permettra d'illustrer le modèle théorique. Nous utiliserons des données en provenance du satellite HIPPARCOS ainsi que des résultats obtenus par nos mesures réalisées à l'Observatoire de la Côte d'Azur (O.C.A.). Nous détecterons également des cibles dans les champs du satellite CoRoT.

Dans un premier temps nous nous servirons de la photométrie pour obtenir des courbes de lumière afin d'en déduire la distance qui nous sépare de l'étoile étudiée. Puis nous utiliserons la spectroscopie afin d'obtenir les raies spectrales de l'étoile pour une étude dynamique de l'atmosphère de ces étoiles.

1. Pulsation stellaire

1.1. Etoiles variables pulsantes

Les étoiles variables pulsantes intrinsèques sont des étoiles qui présentent une variation périodique de leur volume. Cette variation entraîne donc une variation de l'éclat de l'étoile. Il existe différents types de variables pulsantes: les céphéides classiques, les RRlyrae, les W virginis....

1.1.1. Classification

La classification des étoiles se fait tout d'abord grâce au Diagramme de HERTZSPRUNG-RUSSELL. Celui-ci trace la relation entre la magnitude visuelle absolue et la température de l'étoile ou le type spectral. La luminosité du Soleil est de valeur 1.

La majorité des étoiles se regroupent le long d'une bande étroite que l'on nomme la séquence principale, et où la luminosité diminue graduellement du type O au type M.

Pour d'autres étoiles, l'éclat intrinsèque est toujours grand et varie peu avec la couleur : il s'agit de la branche des géantes et des supergéantes. Enfin on trouve quelques rares étoiles de types chauds et de magnitudes absolues élevées: les naines blanches. La figure 1 montre le classement des étoiles établi par le diagramme HR.

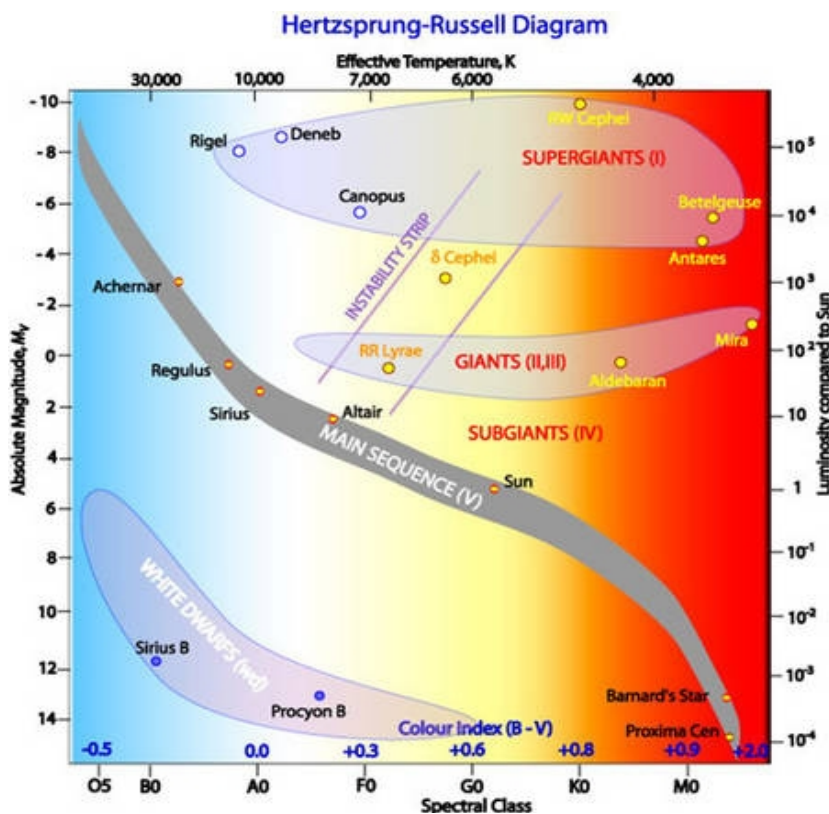


Fig.1

1.1.2. Céphéides et RR Lyrae

Parmi les variables pulsantes, nous nous intéresserons aux deux principaux types : Les céphéides ainsi que les RRlyrae

-Les céphéides :

Les céphéides sont des géantes et supergéantes. Elles ont des masses souvent comprises entre quatre et douze masses solaires. Les fluctuations de leur éclat s'observent sur une période d'une journée à un mois et demi. Dans la plupart des cas, entre 5 et 8 jours. Les variations sont d'une grande régularité. La courbe de lumière, dont l'amplitude s'établit en général entre 0,5 et 1, parfois jusqu'à 2 magnitudes, présente une asymétrie marquée : l'augmentation de luminosité est plus rapide que sa décroissance.

Deux groupes principaux de céphéides classiques peuvent être distingués : les céphéides typiques ou classiques, avec pour chef de file Delta Cephei (Céphée), sont des étoiles de population I, caractéristiques du disque de la Voie Lactée. Les W Virginis sont de population II, et on les rencontre surtout dans le halo de la Galaxie.

-Les RRlyrae :

Les RR Lyrae sont des pulsantes moins lumineuses que les Céphéides. Leurs périodes sont de dix à vingt fois plus courtes par rapport à ces dernières. Tout comme les céphéides de type I, les RR Lyrae affichent une régularité périodique dans leur pulsation. Environ 7000 variables du type RR Lyrae ont été répertoriées. Parmi ces étoiles on distingue deux sous-types : les RRab, comme par exemple RR Lyrae, et les RRC, des étoiles plus rares et dont les périodes sont encore plus courtes .

Rappels :

Eclat d'une étoile : C'est la quantité d'énergie lumineuse que nous recevons de cette étoile, par unité de surface collectrice, c'est un flux d'énergie qui se mesure en Watts par mètre carré (W/m^2).

Magnitude : C'est la mesure de la luminosité en échelle logarithmique inverse.

Magnitude apparente d'une étoile : c'est la magnitude de l'étoile vue depuis la Terre.

Magnitude absolue d'une étoile : c'est la magnitude qu'aurait l'étoile si on l'observait depuis une distance de 10 parsecs, c'est à dire 32,6 années lumières.

1.2. Moteurs de pulsation

Une étoile variable pulsante intrinsèque, Céphéide ou RR Lyrae, se dilate et se contracte au cours du temps de manière non sinusoidale. Cela entraîne une variation de la magnitude apparente de l'étoile. On peut la mesurer au cours du temps : il s'agit d'une courbe de lumière.

Voici la courbe de lumière de δ Céphée établie à partir des données en provenance de la Lunette Charlois à l'OCA :

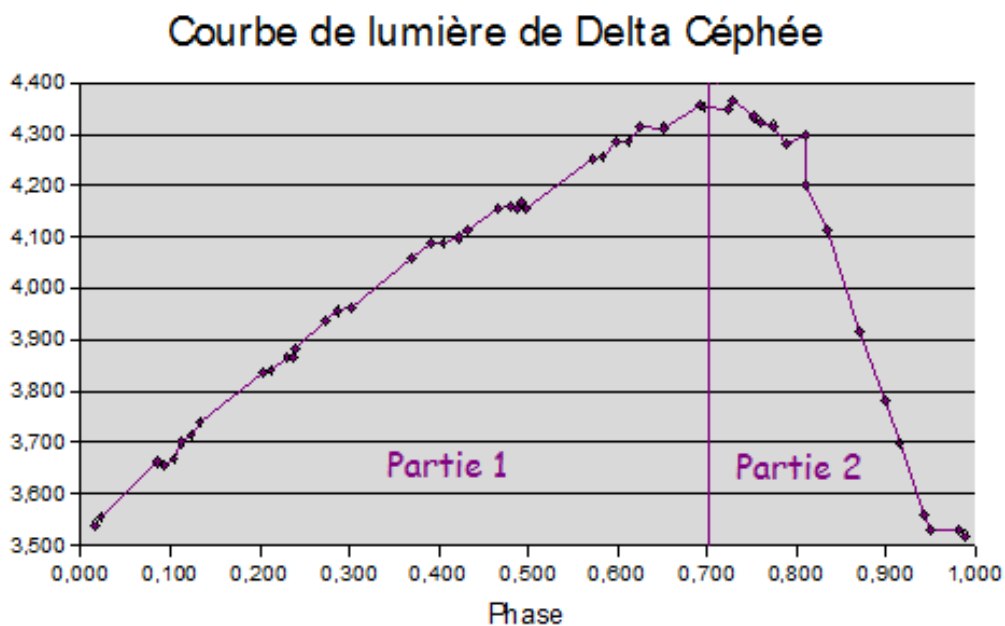


Fig.2

Nous pouvons remarquer une lente contraction suivie d'une brusque dilatation.

Sous l'effet de la gravitation, l'étoile entre en contraction et son diamètre va diminuer. La diminution du diamètre entraîne une baisse de luminosité et donc une augmentation de la magnitude. (partie 1 de la courbe)

La contraction des couches de l'étoile entraîne également une augmentation de la densité de la matière et une augmentation de la température : c'est la transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique ; par conséquent la température finit par atteindre la valeur de la température d'ionisation du gaz. Mais comme la contraction continue, il y a encore un apport d'énergie mécanique qui va se transformer en énergie d'ionisation la température restant globalement constante; l'opacité K du gaz va donc croître et donc les photons émis par l'étoile vont se retrouver piégés.

Puis les couches de l'étoile supérieures (couches atmosphériques) vont finir par atteindre et rebondir sur les couches plus basses dites "subphotosphériques" qui sont beaucoup plus denses. Cela entraîne donc un phénomène d'expansion pendant lequel la diamètre de l'étoile va croître et donc sa magnitude va diminuer (partie 2 de la courbe). Ce phénomène est bien plus rapide que le phénomène de contraction car l'expansion se fait de manière très brutale.

Pendant l'expansion la pression de radiation va être très élevée et va s'ajouter à la pression des gaz ionisés ce qui va relancer le mouvement de pulsation . Il y a donc une brusque libération des photons piégés par les gaz opaques ce qui provoque l'importante augmentation de la luminosité de l'étoile. Le diamètre de l'étoile ayant augmenté de manière importante la force de gravité finit par relancer le mouvement de contraction de l'étoile. La pulsation périodique stellaire est donc entretenue.

1.3. Un intérêt majeur

La régularité de la pulsation des étoiles variables pulsantes se traduit par une relation entre leur période et leur luminosité. Cette relation a été découverte par Henrietta Leavitt en 1912. Elle indique que la luminosité absolue de ces étoiles augmente avec leur période : les plus lentes sont les plus lumineuses.

Il lui a donc été possible de déterminer la relation suivante grâce à ses observations :

$$\mathbf{M = a(\log P - 1) + b}$$

avec M la magnitude absolue, P la période de pulsation et a et b des constantes qui dépendent du type d'étoile considéré.

Par ailleurs il existe de même une relation entre la magnitude absolue, la magnitude relative et la distance entre l'observateur et l'étoile. En effet si la lumière qu'émet l'étoile reste la même, son éclat perçu va diminuer avec la distance. On a ainsi pu établir la relation suivante :

$$\mathbf{m - M = 5 \log d - 5}$$

avec m la magnitude relative (ou apparente) et d la distance de l'étoile.

Connaissant la magnitude apparente de l'étoile grâce à des séries de mesures et connaissant sa magnitude absolue grâce à la détermination de sa période de pulsation, il va donc être possible d'en déduire la distance qui nous sépare de l'étoile considérée.

Ainsi nous pourrions par exemple déterminer la distance d'un amas d'étoiles si on parvient à déterminer la distance d'une étoile variable de cet amas.

2. Observations spatiales: CoRoT et HIPPARCOS

2.1. CoRoT

Le satellite CoRoT (pour Convection, Rotation et Transits planétaires) est un télescope spatial dédié à l'étude de la structure interne des étoiles et à la recherche d'exoplanètes. Nous avons pu déterminer certaines caractéristiques des étoiles dans les champs de ce satellite par ce satellite:

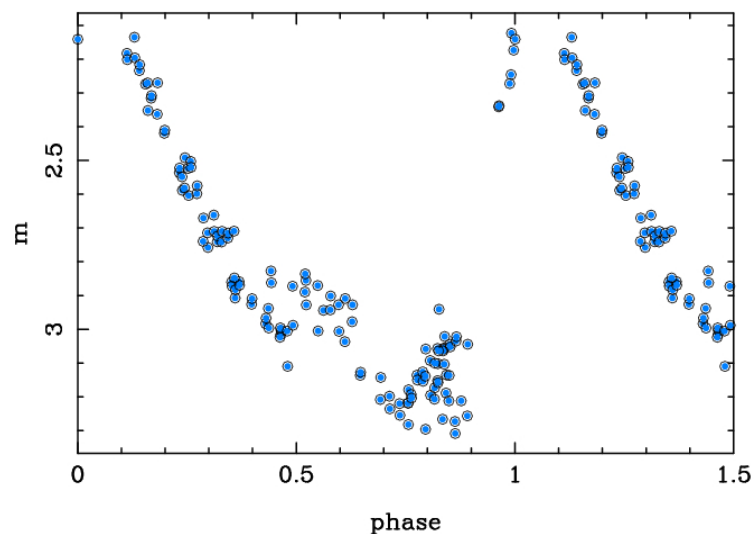
Exemple de calcul des distances interstellaires sur deux étoiles d'un des champs du satellite CoRoT :

Etoile n°1 : V920Aql

Type	RRAB
Mag. max	13.3
Mag. min	14.3
Mag. system	P
Epoch (JD)	34548.507
Period (day)	0.4955033

Fig.3

V920 Aql 136 mes. RRAB 13.30 14.30 0.490196 d



Les observations ont été réalisées par la lunette Charlois à l'O.C.A.

$$\text{On a alors } m = \frac{(\text{Mag min} + \text{Mag max})}{2} = 13.8$$

$$\text{Ensuite on a } M = -3.75 \times \log(P) + 0.3 = 1.4435$$

d'où on en déduit la distance d:

$$m - M = 12.36$$

$$3.472 = \log(d)$$

on en déduit que

$$d = 10^{3.472} = 2964.83 \text{ parsec}$$

Note : Le parsec est défini comme étant la distance à laquelle une unité astronomique (ua) sous-tend un angle d'une seconde d'arc.

$$1 \text{ Parsec} = 3,08568025 \times 10^{16} \text{ mètres}$$

Etoile n°2 : V921Aql

V921 Aql 124 mes. RRAB 13.50 15.00 0.482889 d

Type	RRAB
Mag. max	13.5
Mag. min	15.0
Mag. system	P
Epoch (JD)	35698.533
Period (day)	0.482889

Fig.4

On a alors $m = \frac{(Mag\ min + Mag\ max)}{2} = 14,25$

Ensuite on a

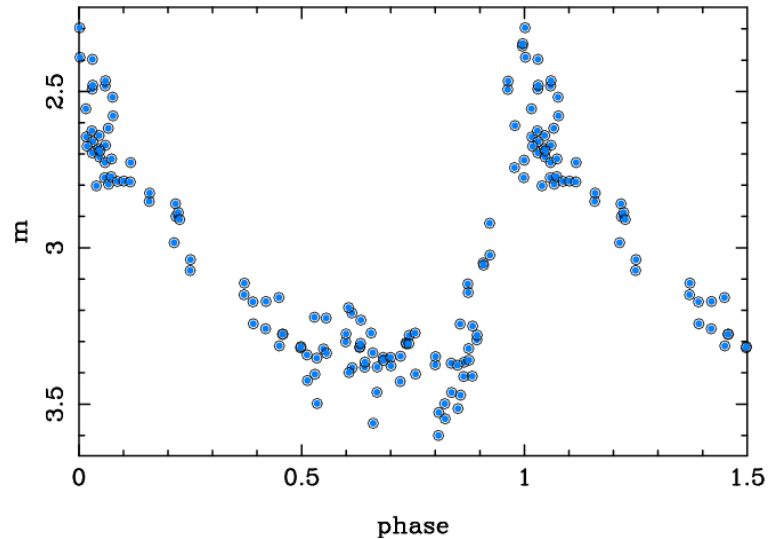
$$M = -3.75 \times \log(P) + 0.3 = 1.4855$$

d'où on en déduit la distance d:

$$m - M = 12.76$$

$$3.552 = \log_{10}(d)$$

soit $d = 3564.51$ parsec.



Les observations ont été réalisées par la lunette Charlois à l'O.C.A.

2.1. HIPPARCOS

Photométrie par HIPPARCOS :

Il semble intéressant de regarder ce que donne la photométrie Hipparcos pour les courbes de lumière. Il s'agit ici de la courbe (toujours avec toutes les observations ramenées à un seul cycle de pulsations) de RR Lyrae elle-même. On voit une importante dispersion, surtout sur la partie brillante, due à l'effet Blazhko (1907). Dans certaines RR Lyrae on a observé des cas de changement de forme de la courbe de lumière et aussi de période. Si ces changements sont périodiques, on dit qu'il s'agit de l'effet Blazhko. C'est un phénomène qui reste inconnu depuis un siècle

RR Lyrae (données Hipparcos)

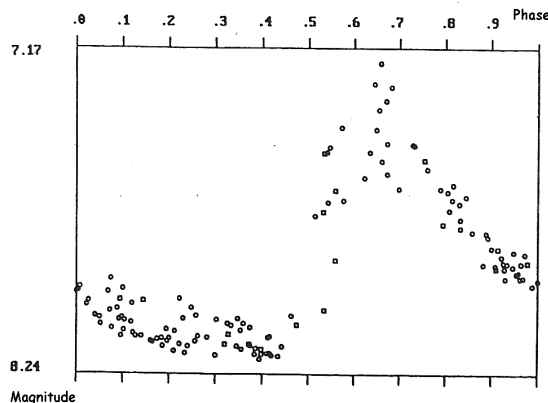


Fig.5

3. Observations au sol

3.1. Photométrie

3.1.1. Qu'est ce que la photométrie?

La photométrie est la mesure de l'énergie transportée par la lumière et de ses modifications lors de la traversée des systèmes optiques.

En astronomie, la photométrie désigne l'étude de l'intensité lumineuse des étoiles, et de sa variabilité. Elle s'oppose en quelque sorte à la spectroscopie qui s'attache à l'étude des spectres des étoiles, ou à la polarimétrie qui s'occupe du degré de polarisation de la lumière provenant des sources astronomiques.

La photométrie s'occupe de mesurer, dans une bande spectrale donnée, l'intensité de la lumière d'une étoile et de sa variation dans le temps. Après soustraction de la contribution du fond du ciel, l'intensité lumineuse est mesurée avec la fonction d'étalement du point de l'étoile, et comparée soit relativement, soit de manière absolue par rapport à des étoiles standards (qui sont connues pour ne pas varier, et dont les caractéristiques physiques sont connues). Elle permet ainsi de mesurer la magnitude apparente des étoiles et donc d'en déduire sa distance par rapport à nous via les relations établies précédemment.

Par ailleurs nous pouvons noter qu'en astronomie, la photométrie ne fait pas intervenir la sensibilité visuelle de l'œil humain et peut très bien se faire avec des rayonnements invisibles comme l'infrarouge et l'ultraviolet. En revanche, quand on s'éloigne trop du domaine visible pour atteindre des longueurs d'onde plus grandes (à partir du millimètre), on parle de radioastronomie.

3.1.2. Courbe de lumière

Courbe de lumière de Delta Céphée

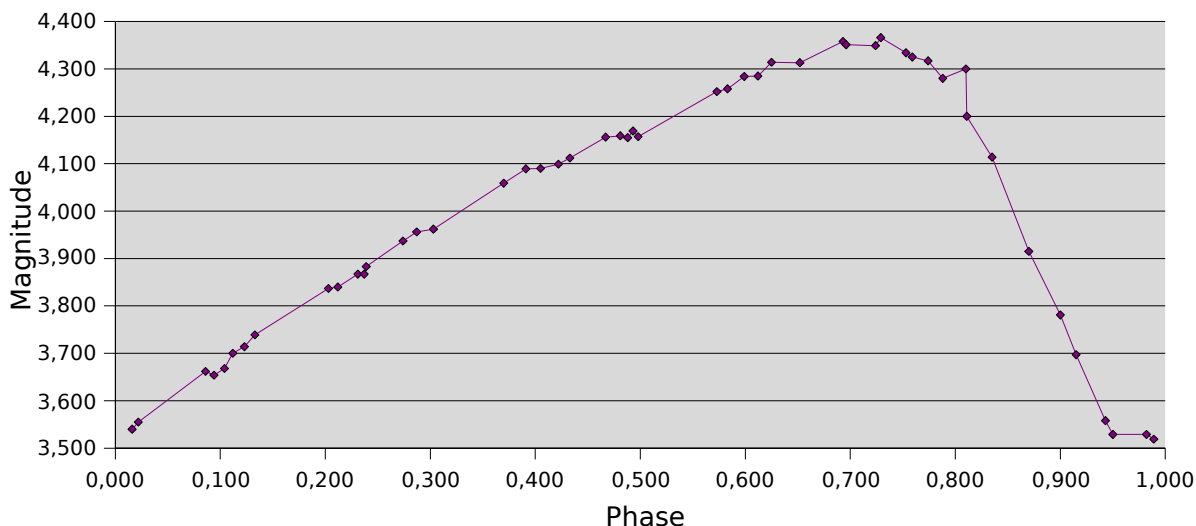


Fig.6

3.1.3. Distances de l'Univers et relation Période-Luminosité

La courbe de lumière de la figure 6 dont les données sont en provenance de la lunette Charlois à l'O.C.A. , va nous permettre de déterminer quelle distance nous sépare de cette étoile : On détermine tout d'abord les magnitudes maximum et minimum : M_{max} et M_{min} pour en déduire m :

$$M_{max}=4.284$$

$$M_{min}=3.519 \Leftrightarrow m=(M_{max}+M_{min})/2=3.9015$$

Or dans le cas des céphéides, on va avoir la relation Période-Luminosité suivante :

$$M = -2.25 * \log P - 1.5$$

Dans le cas de cette étoile on va avoir : $P=5.366316$ j

d'où $M = -3.14177155$ or on a également $m - M = 5 * \log d + 5$

$$\text{donc } d=10^{((m-M+5)/5)}$$

$$d=256.244357 \text{ parsecs}$$

On peut comparer ce résultat avec une observation bien plus précise du satellite HIPPARCOS : la valeur "théorique" de la distance est :

$$d_{théorique}=275.42 \text{ parsecs}$$

$$\text{soit une erreur de } E= \left| \frac{(d - d_{théorique})}{d_{théorique}} \right| * 100 = 7\% \text{ environ.}$$

3.2. Spectroscopie

3.2.1. Raies spectrales et vitesse radiale

La spectroscopie, ou spectrométrie, est l'étude du spectre d'un phénomène, c'est-à-dire l'étude de la répartition d'une onde ou d'un faisceau de particules en fonction de la fréquence ou de l'énergie.

La lumière visible, lorsqu'elle est « dispersée » par un prisme ou un réseau de diffraction, révèle sa composition ou spectre. L'arc-en-ciel en est l'illustration la plus connue, obtenu par la dispersion d'une lumière, celle du Soleil, par les gouttes d'eau de la pluie jouant le rôle de disperser en direction de la lumière du soleil : chaque couleur ou fréquence part dans une direction différente en raison de la différence d'indice des milieux.

En astronomie, l'invention de la spectroscopie a pu donner naissance à une nouvelle science : l'astrophysique.

Les premières analyses datent du XIX^{ème} siècle lorsque R.Bunsen et G.Kirchoff ont reproduit les raies du Soleil en faisant brûler du sel et en déterminant ainsi la raie du sodium. Ils en ont déduit qu'il y a du sodium dans le Soleil.

Il existe ainsi deux types de raies:

- les raies sombres observées dans le spectre solaire par exemple: ce sont les raies d'absorption : les électrons des atomes considérés absorbent la lumière sur une certaine longueur d'onde et gagnent de l'énergie.
- les raies brillantes observées lorsque par exemple on chauffe de la matière : ce sont des raies d'émission : dans ce cas les électrons vont se désexciter en émettant des photons sur une certaine longueur d'onde.

Un spectre est composé de toutes les longueurs d'onde: cela forme un fond continu appelé continuum. Selon la loi de Planck,

$$L_{\lambda} = \frac{2hc_{\lambda}^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc_{\lambda}}{k\lambda T}\right) - 1}$$

un corps chaud émet dans toutes les longueurs d'ondes avec maximum d'émission à une longueur d'onde donnée. Dans le cas du Soleil, le maximum d'émission correspond à la longueur d'onde de la lumière jaune.

La spectroscopie va également nous servir à mesurer des vitesses radiales des étoiles. En effet on a la relation suivante :

$$V_r = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0} c$$

avec V_r la vitesse radiale, λ la longueur d'onde mesurée et λ_0 la longueur d'onde de référence. Le décalage mesuré entre λ et λ_0 va être soit dans le rouge (cela correspond à un éloignement par rapport à l'observateur) soit dans le bleu (rapprochement). C'est une conséquence de l'effet Doppler.

La longueur d'onde mesurée va être celle d'un minimum dans le spectre d'une étoile (par exemple celle du fer II) : elle correspondra donc à une région bien particulière de l'étoile : en effet les raies "métalliques" (ex: Na, Fe....) correspondent plutôt à la chromosphère tandis que les raies de l'hydrogène correspondent plutôt à la couronne. Il est donc possible de connaître la vitesse radiale des zones de l'étoile. Cela explique pourquoi il est possible d'observer un décalage dans le bleu et dans le rouge chez les étoiles variables pulsantes : l'étoile subit des mouvements de dilatation et de contraction indépendamment de son déplacement par rapport à l'observateur.

En réalisant plusieurs mesures, il est possible d'établir une courbe des vitesses radiales en fonction du temps afin de mieux modéliser la pulsation.

3.2.2. Interpretation

3.2.2.1. Observations spectroscopique

Tout d'abord il faut obtenir à partir de nos observations des spectres des étoiles considérées : L'analyse se fait grâce au logiciel IRIS © .

Il y a 5 étapes dans cette analyse :

- **L'offset** : il s'agit d'une pose sur l'instrument. Cela est nécessaire pour supprimer le bruit de fond (les erreurs aléatoires dues à l'appareil) temps de pose: 0 s
- **Le FlatField** : il s'agit de l'analyse de l'intensité de l'arc de Tungstène: en effet celui-ci étant considéré comme constant, il suffira de diviser les spectres observés par celui du FlatField afin d'équilibrer les mesures de différents pixels. temps de pose: 10 s
- **Le Dark** : il s'agit d'une pose de l'instrument sur le fond stellaire afin de pouvoir "séparer" ensuite pendant l'analyse l'étoile du fond. temps de pose: le même que celui de l'étoile observée.
- **Pose sur l'étoile** : on réalise une mesure (spectre brut) sur l'étoile considérée puis on peut en déduire le spectre réduit grâce aux mesures précédentes:

$$\text{Spectre réduit} = \frac{(\text{Spectre Brut} - \text{offset})}{(\text{flatfield} - \text{offset})}$$

- **Etalonnage en longueur d'onde** : le spectre obtenu est représenté en fonction du numéro de pixel et non en fonction de la longueur d'onde. Pour pouvoir convertir le spectre réduit en spectre en longueur d'onde exploitable, il va falloir utiliser une mesure étalon grâce à une lampe de néon (astronomie amateur) ou au Thorium (astronomie professionnelle). Les spectres de ces lampes étant parfaitement connus, il est possible grâce au logiciel de traitement de retrouver la relation qui à un pixel associe une longueur d'onde; cette relation n'est pas linéaire - il s'agit généralement d'une parabole - L'utilisateur va donc définir quelques raies connues, identifiées à partir des résultats théoriques. Le logiciel pourra ainsi en déduire la relation liant pixel et longueur d'onde et ainsi nous permettre de convertir le spectre réduit en spectre en longueur d'onde.

Exemple de spectre obtenu à partir des données de l'observatoire de la Côte d'Azur : mesure sur l'étoile Polaire :

Spectre réduit puis analysé par le logiciel IRIS de l'étoile Polaire

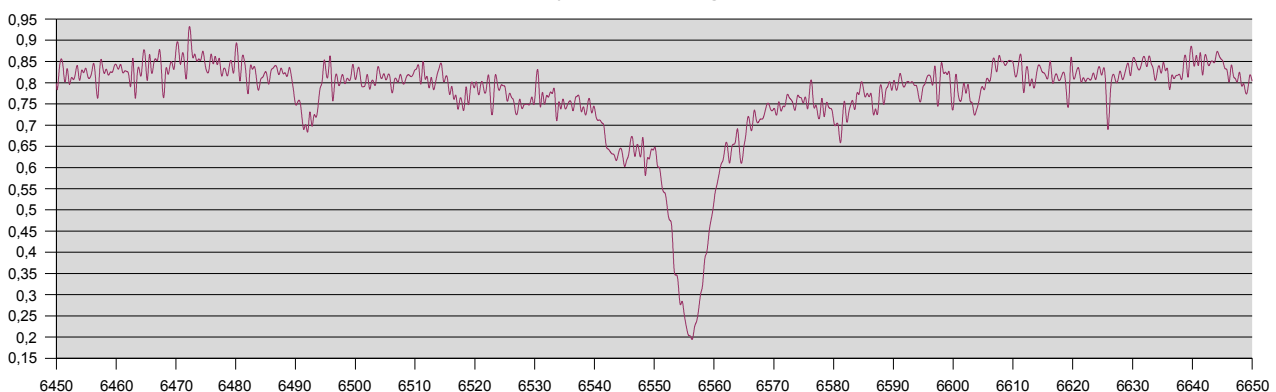
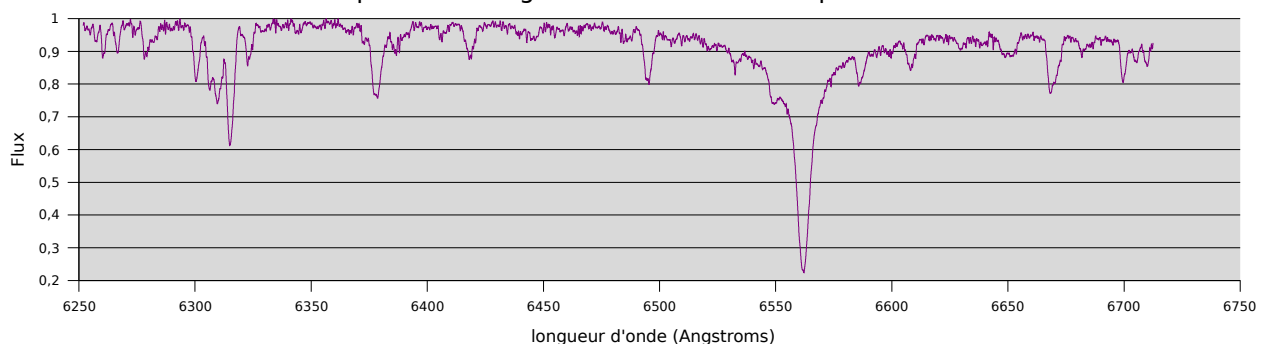


Fig.7

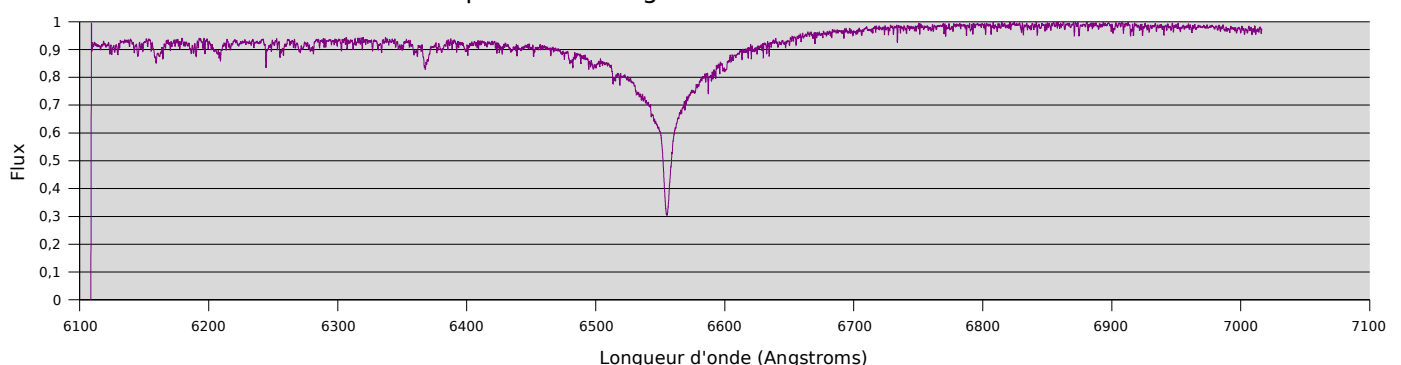
3.2.2.2. Analyse et résultats

Au cours de notre stage, nous avons réalisé des observations à l'O.C.A. sur les étoiles Sirius, Arcturus et sur l'étoile Polaire. Nous avons fait des mesures de spectres de différentes étoiles grâce au spectromètre LHIREs III. Nous avons ainsi pu déterminer les spectres du Soleil, de Sirius, de l'étoile Polaire, d'Arcturus et celui de la planète Mars. Une fois les spectres obtenus, nous les avons transformés en spectres en longueur d'onde comme cela est expliqué précédemment. Nous ne mettrons que les meilleures mesures c'est à dire celles de Sirius, d'Arcturus et de l'étoile Polaire, les autres étant de qualité moindre.

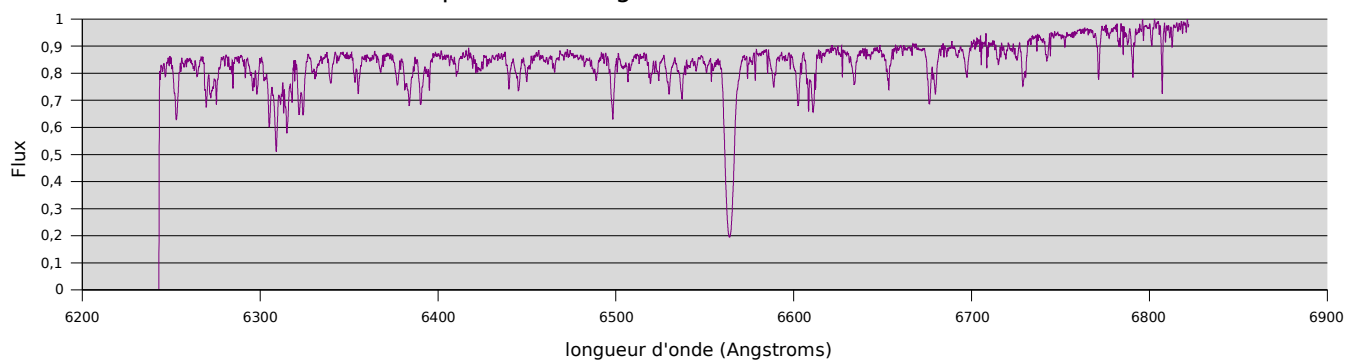
Spectre en longueur d'onde de l'étoile polaire



Spectre en Longueur d'onde de Sirius



Spectre en longueur d'onde d'Arcturus



Tous les spectres ont été recentrés sur la longueur d'onde 6562.8 Angstroms qui correspond à la raie d'absorption H-alpha. Cette raie correspond à l'élément Hydrogène. Il s'agit donc de la raie principale des étoiles puisqu'elles sont en majeure partie constituée d'Hydrogène. C'est pourquoi, on la retrouve dans tous les spectres réalisés.

Les figures montrent que la largeur de la raie d'Hydrogène varie en fonction de chaque étoile. Ce phénomène d'élargissement est dû aux constituants chimiques et aux paramètres physiques de l'étoile.

Conclusion

Ce stage fut une expérience enrichissante. Cela nous a permis de mieux comprendre comment fonctionne le milieu de la recherche. Nous avons ainsi pu avoir un aperçu du domaine particulièrement intéressant que sont l'Astrophysique et l'Astronomie.

En effet, il nous a été possible de pouvoir réaliser une étude sur les étoiles variables et les différentes méthodes d'observations au sol et dans l'espace. Nous avons pu concrétiser ce travail à l'Observatoire de la Côte d'Azur.

Le travail effectué a été d'un grand intérêt : il nous a permis par exemple de comprendre quelles étaient les méthodes pour déterminer les distances interstellaires et les mécanismes de la pulsation des étoiles variables.

En outre nous avons également pu réaliser des mesures spectroscopiques ce qui constitue une étape plus intéressante de l'astrophysique. Pour finir nous soulignons notre grand intérêt pour l'astronomie et remercions une fois l'Astronome M. Chadid qui nous a guidés.

Bibliographie

SERGE J. "Les Étoiles" de l'Encyclopédie Imago Mundi 2004

<http://www.cosmovisions.com/vapu.htm>

Observations réalisées sur la Lunette CHARLOIS, 50 cm de diamètre, Nice, Observatoire de la Côte d'Azur

CHADID M. Ondes de choc, Turbulences et modulations cycliques dans l'atmosphère de l'étoile variable pulsante RR Lyrae : Une approche observationnelle. Thèse de doctorat d'Université. Toulouse : Université Paul Sabatier de Toulouse, 1996, 89 p

GISPERT J. "Variables pulsantes" du Cours d'Astronomie Générale 2007

http://www.dil.univ-mrs.fr/~gispert/enseignement/astronomie/3eme_partie/variables/varPeriodiques.php

The Digital Library for Physics and Astronomy : The SAO/NASA Astrophysics Data System

<http://cdsads.u-strasbg.fr/>

CHADID M. Private Communication : cours de spectroscopie stellaire

Extraits du rapport du Stage de spectrographie à l'observatoire du Pic de Château-Renard avec l'association Astro-Queyras, 2003

Procédures avec © IRIS : Traitements des spectres LHIRES

<http://www.astrosurf.com/aras/tutorial1/pipelin>

Résumé

Le but de ce stage est d'étudier la pulsation des étoiles variables et plus particulièrement celles des étoiles type Céphéides classiques et RR Lyrae. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur la documentation scientifique ainsi que sur des observations réalisées à l'Observatoire de la Côte d'Azur. Nous avons établi des courbes de lumière de certaines céphéides classiques en utilisant les données d'observation photométrique au sol (à l'O.C.A.) et dans l'espace (HIPPARCOS, CoRoT). Nous avons également réalisé des observations en spectroscopie qui nous ont permis de mieux comprendre la dynamique de l'atmosphère stellaire pulsante.

Abstract

The goal here is to study the variable and pulsating stars, in particularly classic Cepheids and RR Lyrae. Our sources are scientific documentation and also observations at Observatoire de la Côte d'Azur. We determined some classic Cepheids' light curves by using data from photometric observations at the O.C.A. and from observations in the space thanks to HIPPARCOS and CoRoT. We have also carried out high resolution spectroscopic observations of pulsating stars towards an understanding of dynamics and pulsation mechanisms in the pulsating atmosphere.