

# Les étoiles $\gamma$ Doradus

## Les étoiles pulsantes

Le nombre de classes d'étoiles pulsantes est très important (Fig. 1), et ces classes présentent des caractéristiques physiques très différentes : mécanismes d'excitation, état de la matière, modes excités, amplitudes, etc...

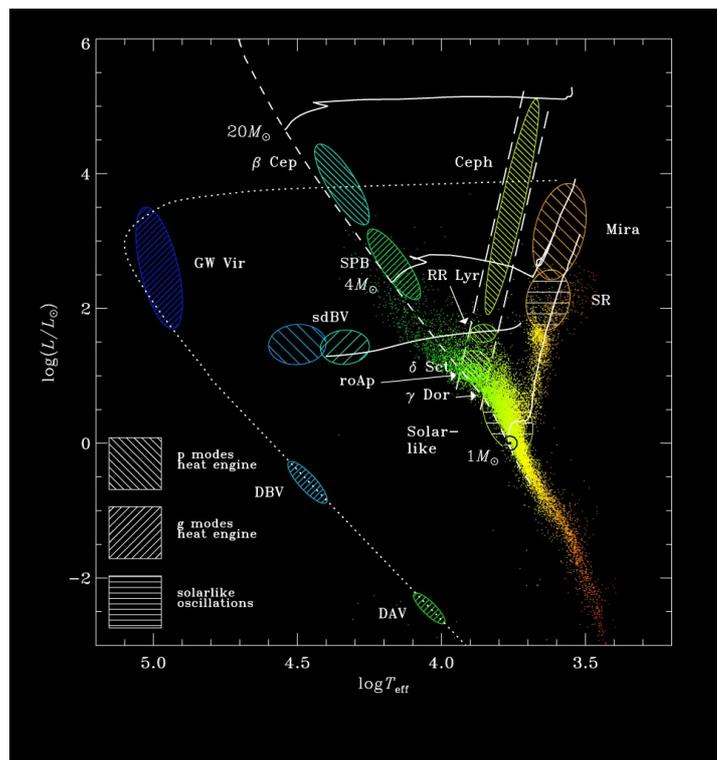


Figure 1: Diagramme HR des principales familles d'étoiles pulsantes

Nous allons nous concentrer ici sur une classe d'étoiles variables pulsantes appelées étoiles  $\gamma$  Doradus.

## Histoire

Le prototype de la classe,  $\gamma$  Doradus (de type spectral F0V), a été découvert comme étoile variable en 1963. Durant les années qui suivirent, d'autres étoiles de classe spectrale similaire furent découvertes comme variables avec des périodicités comparables (typiquement de 0.3 à 3 jours).

Le mécanisme physique permettant d'expliquer cette variabilité est resté longtemps incertain, entre modulation rotationnelles et pulsation/oscillation. Devant le nombre de candidats partageant certaines caractéristiques physiques, c'est cette dernière explication qui l'a finalement emporté, en 1994. Toutefois, le mécanisme à l'origine de la variabilité n'a été approché qu'au début des années 2000, et pose encore maintenant de nombreux problèmes, soit parce que l'on maîtrise mal certains phénomènes physiques, tels que la convection ou la rotation, soit parce que la bande d'instabilité n'est que très imparfaitement décrite par ce mécanisme.

## Caractéristiques physiques des étoiles $\gamma$ Doradus

Les  $\gamma$  Doradus sont des étoiles de masse intermédiaire, soit environ entre 1.2 et 2 masses solaires ( $M_{\odot}$ ), et de types spectraux A et F. Elles se situent à la transition entre les étoiles "froides", dans lesquelles la convection est très efficace, et qui possèdent donc une enveloppe convective profonde, et les étoiles plus chaudes, possédant une enveloppe convective très superficielle et pour lesquelles la quasi-totalité de l'énergie est transportée par radiation dans les régions au-delà du cœur convectif. Entre les deux, la taille de l'enveloppe convective varie très rapidement à mesure que l'on considère des étoiles plus chaudes. Elles se situent également dans une région du diagramme HR où les étoiles présentent de fortes variations de structure interne en fonction essentiellement de leurs masses. Notamment, dans les étoiles de plus faibles masses ( $M \approx 1.2 - 1.3 M_{\odot}$ ) l'énergie nucléaire est essentiellement générée par la chaîne de réaction pp, alors que le cycle de combustion CNO domine dans les étoiles plus massives. Ce phénomène a une influence considérable sur la structure centrale des étoiles en séquence principale, puisque celles de plus faibles masses ont un cœur totalement radiatif alors que le cœur des étoiles de masse supérieure à  $1.2 M_{\odot}$  est convectif. L'évolution de ce cœur convectif engendre l'apparition d'un important gradient de poids moléculaire moyen à sa frontière. Enfin, la transition entre les étoiles F et les étoiles A marque généralement la frontière entre les étoiles en rotation modérée (étoiles F, rotation  $\sim 100 \text{ km.s}^{-1}$ ) et les rotateurs plus rapides (étoiles A, pouvant atteindre des vitesses de rotation de  $300 \text{ km.s}^{-1}$ ).

Les  $\gamma$  Doradus présentent une variabilité due à des modes de gravité sondant les régions les plus internes de ces étoiles. Ces modes ont des périodes allant typiquement de 0.3 à 3 jours et on pense qu'ils sont excités par la modulation du flux radiatif à la limite de l'enveloppe convective. Ainsi, ces modes sondent les régions centrales de ces étoiles, très sensibles à l'évolution du cœur et leur stabilité est très fortement liée à la profondeur de la base de l'enveloppe convective. Qui plus est, leurs périodes d'oscillation sont comparables aux périodes de rotation de ces étoiles, ce qui laisse envisager une influence considérable de la rotation sur leurs propriétés sismiques.

## Astérosismologie

La matière stellaire est opaque au rayonnement électromagnétique, sauf au-dessus de la photosphère. Par conséquent, ce que l'on observe des étoiles en général, ne provient que de leurs couches superficielles, photosphère et atmosphère (voire aussi les éventuelles couches au-dessus : chromosphère, enveloppe circumstellaire, etc...).

Il est toutefois possible d'utiliser des lois universelles de la physique et, plus particulièrement, de celles de l'hydrodynamique, qui régissent la stabilité stellaire, afin de comprendre la structure interne des étoiles. Mais toute théorie demande à être éprouvée et la recherche d'opportunités permettant de tester, vérifier et contraindre une théorie reste néanmoins un besoin récurrent de l'astrophysique stellaire.

Une telle opportunité réside dans l'étude des étoiles variables pulsantes. Cette discipline appelée astérosismologie - ou héliosismologie lorsque appliquée au Soleil - est analogue dans son principe à la sismologie terrestre. Ces astres sont le berceau de phénomènes énergétiques vibratoires, des « tremblements d'étoile », qui permettent à quiconque capable d'interpréter ces variations d'avoir une idée de la structure interne.

L'analogie avec la musique est évidente. Un son émis par un instrument de musique est caractéristique à la fois de la manière de générer cette onde et de la cavité dans laquelle elle se propage. Un violoniste, si bon soit il, ne pourra jamais jouer le son si caractéristique d'un piano ou d'une trompette avec un violon, et inversement. Qui plus est, une oreille avertie différenciera la note

"do" jouée sur un Stradivarius ou un violon d'école, sur un piano à queue ou un piano droit ; il en va de même pour les étoiles. Les caractéristiques sismiques d'une étoile massive ne seront jamais identiques à celles d'une étoile naine blanche. D'autre part, une étoile particulière ne montrera jamais exactement les mêmes fréquences d'oscillation qu'une étoile semblable, mais de structure légèrement différente. Chaque mode d'oscillation a une fréquence bien précise, sonde une partie différente de la structure stellaire et représente ainsi un outil unique permettant de caractériser une région donnée de l'étoile. Il existe de nombreuses applications de l'astérosismologie, donnant de très beaux résultats, tels que la découverte d'oscillations solaires dans des étoiles très différentes du Soleil (géantes rouges, étoiles B, etc.), la caractérisation d'étoiles hôtes de planètes, la prédiction de pulsations dans les étoiles SdB quelques années avant leur découverte observationnelle, etc...

L'étude sismique du cas particulier qu'est notre Soleil, commencée lors de la découverte d'oscillations de périodes d'environ 5 minutes en 1962, a été couronnée de très nombreux succès et une image détaillée de la structure de notre étoile fut possible grâce à l'héliosismologie. Elle permit en particulier de contraindre les profils de vitesse du son et de densité, le taux de rotation interne et la détermination exacte de la profondeur de l'enveloppe convective. Cette dernière découverte eut une influence majeure sur la physique stellaire en mettant en évidence la nécessité de tenir compte de la diffusion microscopique dans les modèles.

Suite aux succès de l'héliosismologie et à l'observation préalable d'autres types d'étoiles pulsantes telles que, par exemple, les Céphéides ou les  $\delta$  Scuti, d'importants efforts ont été fournis afin de détecter dans d'autres étoiles une telle variabilité spectroscopique et/ou photométrique, assimilable à des oscillations. Plusieurs classes d'étoiles pulsantes aux propriétés physiques très diverses, de masses et d'état évolutifs variés, ont ainsi été répertoriées.

Ces dernières années, l'astérosismologie est entrée dans une nouvelle ère avec l'avènement de la photométrie spatiale dédiée à l'étude des oscillations stellaires, permettant l'observation ininterrompue de cibles particulières durant plusieurs mois. Les satellites MOST, CoRoT et Kepler permettent la détection de fréquences de modes d'oscillation avec une précision jamais égalée. Cependant, alors que ces récentes avancées de l'astérosismologie observationnelle nous permettent une détermination très précise des fréquences d'oscillation de nombreuses étoiles, un nouveau challenge apparaît, commun à toute expérience scientifique : la confrontation précise entre théorie et observations. Peut-on espérer un jour contraindre la structure interne des étoiles avec autant de précision et de réussite que celle de notre Soleil ? S'il existe des facteurs limitatifs évidents nous empêchant généralement d'atteindre un tel objectif, l'astérosismologie ne doit pas pour autant être déconsidérée car elle présente deux arguments de poids :

- Les différentes classes d'étoiles pulsantes échantillonnent remarquablement l'ensemble du diagramme HR (voir Fig. 1), démontrant de la sorte que ce phénomène est loin d'être marginal. Cet échantillonnage permet de sonder les régions internes d'astres représentatifs des grandes phases évolutives des étoiles.

- Les modes de pulsations excités au sein de ces étoiles sont de natures très variées. En plus des modes de pression d'ordres radiaux élevés observés dans les couches externes des étoiles de type solaire, d'autres types de modes nous permettent de sonder des régions différentes : les modes de pression d'ordres radiaux faibles, les modes de gravité dont la force de rappel est la poussée d'Archimède, et des modes présentant un caractère mixte pression-gravité. Si les modes de pression se propagent généralement dans les régions externes des étoiles, les modes de gravité sondent les régions centrales et permettent une étude détaillée de la structure du cœur des étoiles.

## Qu'observer sur ces étoiles ?

Dans les étoiles  $\gamma$  Doradus, l'amplitude des mouvements de vibration est très faible (de l'ordre du 1/100 en photométrie, du  $\text{km.s}^{-1}$  en spectroscopie), et l'on peut ainsi simplifier (linéariser) et obtenir une solution des équations de l'hydrodynamique.

On peut montrer que les mouvements de matière stellaire sont décrits par des fonctions de type « harmoniques sphériques » et que 3 nombres sont représentatifs du mode considéré :

- $n$  : ordre radial du mode : nombre de nœuds (hors extrémités) entre le centre et la surface. Ce paramètre est largement contenu dans la fréquence de pulsation du mode observé.  $n$  est un nombre entier ; par convention,  $n < 0$  pour les modes de gravité,  $n > 0$  pour les modes de pression,  $n = 0$  représentant le mode fondamental (pression).
- $l$  : degré du mode : nombre de lignes nodales à la surface.  $l$  est un nombre entier positif,  $l = 0$  correspondant au mode radial.
- $m$  : nombre azimuthal : nombre de noeuds des lignes nodales qui passent par les poles.  $m$  est un nombre entier, qui ne peut prendre que des valeurs entre  $-l$  et  $+l$ .

Ces 3 nombres d'onde caractérisent le mode de pulsation, et la géométrie du champ de déformation (température, vitesse, rayon, etc...) à la surface de l'étoile en particulier (voir Fig. 2), et induisent des signatures dans les courbes photométriques (dans différents filtres, sachant que  $m$  ne laisse aucune signature en photométrie) et dans les variations spectroscopiques des profils de raie.

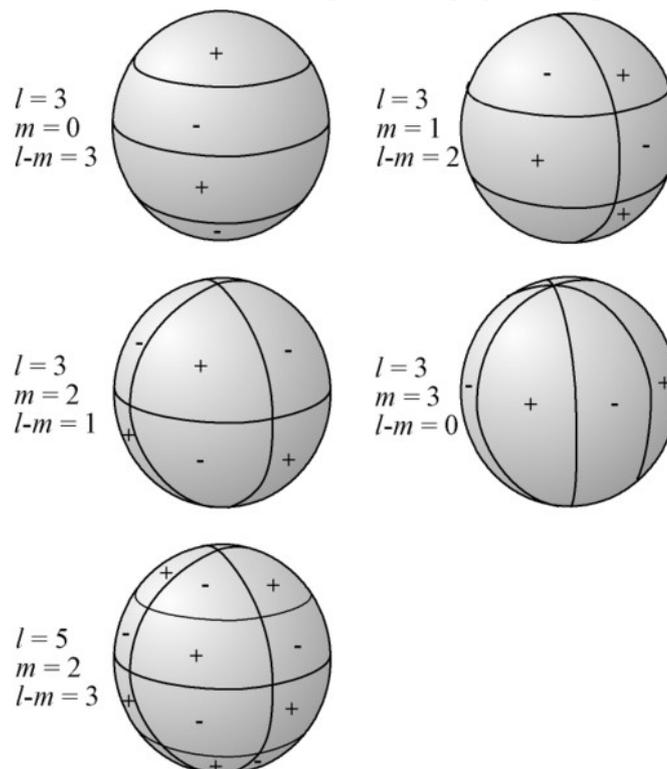


Figure 2: Surface stellaire divisée suivant les modes  $(l,m)$  considérés

En résumé, les premiers renseignements fondamentaux à acquérir sur les étoiles pulsantes sont la fréquence et les nombres d'onde  $(l,m)$  du chaque mode excité. Il est essentiel de mesurer les étoiles sur de longues séries temporelles, échantillonnant correctement le signal. Cela signifie que ces objets doivent être suivis durant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, ces étoiles étant le plus souvent multipériodiques. De plus, il est nécessaire de bien cerner tous les phénomènes physiques qui affectent ces étoiles, en premier lieu la rotation et, éventuellement, la binarité.