

# Pulsations stellaires

*Astrophysicienne liégeoise, Maryline Briquet est tombée sous le charme de la musique cosmique en étudiant les vibrations des étoiles. L'analyse précise de ces oscillations stellaires offre un moyen unique de sonder l'intérieur des étoiles. Cette nouvelle branche de l'astrophysique est appelée astérosismologie*

Les étoiles vibrent comme de gigantesques instruments de musique. Leurs vibrations se manifestent, entre autres, par de légères variations de la luminosité au cours du temps. Ces périodes s'étendent de quelques secondes à plusieurs années selon le type de l'étoile. Pendant longtemps, les astronomes se sont interrogés sur l'origine de ce phénomène mais ils savent aujourd'hui que ces variations de lumière sont le résultat d'oscillations stellaires. En effet, ces boules de gaz subissent des mouvements périodiques de contraction et de dilatation, à la manière d'un ballon qui se gonfle et se dégonfle régulièrement mais avec des amplitudes très faibles.

Au cours de ces toutes dernières années, grâce aux observations réalisées au moyen de télescopes puissants et de satellites artificiels, les astrophysiciens ont confirmé que ce phénomène de vibration des étoiles n'est pas rare. Ainsi notre Soleil lui-même vibre et cette découverte a donné naissance, il y a une vingtaine d'années, à une nouvelle et fructueuse discipline,

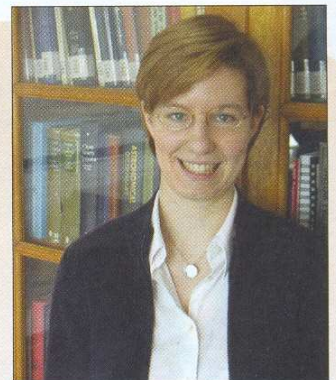
l'héliosismologie. L'étude de ces vibrations solaires aux amplitudes très faibles - il a fallu attendre la technologie du XX<sup>e</sup> siècle pour les détecter - mais très rapides - période principale de l'ordre de cinq minutes - a fourni des informations inestimables sur l'intérieur du Soleil.

Bien que les étoiles animées de vibrations similaires à celles du Soleil sont beaucoup plus difficiles à observer en raison de leur éloignement, les astrophysiciens se sont cependant mis en tête de les découvrir et de les mesurer; c'est ainsi qu'est née une nouvelle discipline, l'astérosismologie ou sismologie des étoiles (ne pas confondre *astéro* avec *astro* qui signifie «astre» dans un sens plus large). L'enjeu de cette étude est de taille car on en attend une révolution dans la compréhension de la structure de l'intérieur des étoiles.

Jusqu'à présent, la plupart de nos connaissances provenaient de l'étude du rayonnement qu'émettent les étoiles dans toutes les longueurs d'onde mais ce rayonnement émis de la surface ne nous

## Un pur produit de Liège

Maryline Briquet est née à Liège il y a 27 ans. Elle a fait toutes ses études dans la Cité Ardente, a fréquenté l'Université où elle a obtenu sa licence en sciences mathématiques en 1998. Elle y a défendu sa thèse de doctorat en mars 2003, au service du professeur Arlette Noels, et habite toujours à Liège bien que ses travaux de recherche l'ont amenée depuis peu à travailler à la Katholieke Universiteit Leuven. Mariée, elle partage ses loisirs entre des voyages, le tennis et la marche, aime cuisiner, faire des photos et des jeux mathématiques (!) ou lire des revues scientifiques. Depuis le 1<sup>er</sup> octobre 2003, Maryline Briquet est chargée de recherches au *Fonds de la recherche scientifique F.W.O.-Vlaanderen* pour une période de trois ans. Elle espère bien obtenir un nouveau contrat de recherche en Belgique en 2006.



Adresse de contact: Instituut voor Sterrenkunde, Katholieke Universiteit Leuven, Celestijnenlaan 200 B, 3001 Leuven  
ou par courriel à l'adresse suivante: [maryline@ster.kuleuven.ac.be](mailto:maryline@ster.kuleuven.ac.be)

### Des sondes parmi les étoiles

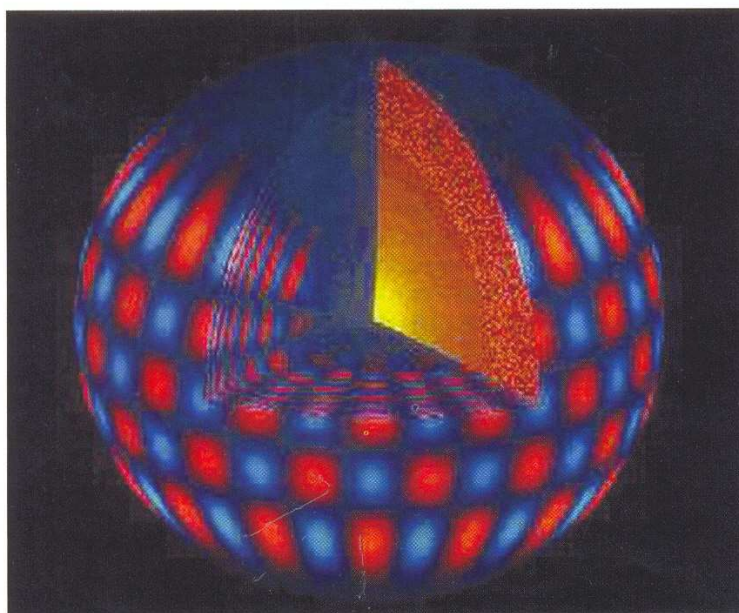
Parmi les principales sondes destinées à l'étude des étoiles, il faut d'abord retenir *Hipparcos*, satellite européen d'astrométrie qui fut lancé le 8 août 1989 et qui a fonctionné jusqu'au 24 juin 1993.

Il a permis la publication en 1997 d'un catalogue reprenant les coordonnées célestes et les composantes du mouvement de quelque 118 000 étoiles avec une précision de 10 à 100 fois supérieure à celle figurant dans les catalogues antérieurs, établis à l'aide d'instruments au sol. Il a également découvert près de 10 000 nouveaux systèmes binaires (étoiles doubles) et mesuré avec précision les variations de luminosité de plusieurs centaines de milliers d'étoiles.

*Soho*, satellite destiné à l'étude du Soleil, est le résultat d'une collaboration *Nasa/Agence spatiale européenne*. Lancé le 2 décembre 1995 et stabilisé à 1,5 million de km de la Terre, il a permis des avancées importantes dans la connaissance du Soleil. Il est toujours en opération.

*COROT*, prévu pour être lancé en 2006, est un programme français en coopération avec des partenaires européens - dont la Belgique - dédié à la photométrie stellaire de très grande précision avec deux objectifs prioritaires: l'étude de la structure et de la dynamique interne des étoiles par l'observation des modes propres d'oscillation et la recherche d'exoplanètes.

*L'étude des pulsations d'une étoile permet, explique Maryline Briquet, de se faufiler jusqu'à son cœur.*



renseigne que sur l'état physique de la mince couche superficielle qui forme l'atmosphère stellaire. En revanche, l'étude des vibrations stellaires qui parcourent toute la structure de l'astre nous fournit un moyen unique de sonder l'intérieur des étoiles en nous renseignant sur les régions internes invisibles par l'observation directe. De même que les sismologues peuvent reconstituer la composition et la structure de la Terre en étudiant la propagation des ondes sismiques à la surface terrestre, les astrophysiciens espèrent décrire la structure des étoiles avec une grande précision en étudiant leurs oscillations.

### Etoiles pulsantes

L'astérosismologie, explique Maryline Briquet, une jeune astrophysicienne liégeoise, a pour but de contraindre les modèles stellaires et d'améliorer notre connaissance de l'intérieur des étoiles à partir de l'observation des oscillations périodiques des étoiles pulsantes. Si l'on a obtenu des résultats significatifs sur le Soleil grâce aux observations réalisées à partir du sol mais aussi par le satellite *Soho*, des moyens similaires permettront d'améliorer la connaissance de la structure interne d'autres types d'étoiles de différents âge, masse et composition chimique, et ce dans le but de tester la théorie de l'évolution stellaire.

Dans ce domaine, explique la jeune chercheuse, je m'intéresse principalement à un type particulier d'étoiles, les étoiles pulsantes de type B de la séquence principale. Il faut savoir que les astronomes Ejnar Hertzsprung et Henry Russell ont eu l'idée d'inscrire les étoiles proches du Soleil dont la distance est connue dans un diagramme où sont portées, en abscisse, leur température effective (c'est-à-dire la température de surface) et, en ordonnée, la luminosité intrinsèque. Surprise, ils ont constaté que les étoiles se concentrent dans certaines régions assez bien délimitées et qu'une grande diagonale, appelée séquence principale, accueille environ 90 pour cent des étoiles, dont le Soleil.

Les étoiles de type B correspondent à un domaine de température de surface bien déterminé allant de 10 000 K à 30 000 K. Ces étoiles bleues sont bien différentes de notre Soleil. En effet, elles sont de 4 à 18 fois plus massives que celui-ci, de 30 à 500 fois plus volumineuses, de 100 à 50 000 fois plus lumineuses et leur température de surface est de 2 à 5 fois plus élevée. Parmi ces étoiles de type B, je me consacre plus précisément à deux «sous-types» d'étoiles pulsantes: les étoiles de type *SPB* (pour *Slowly Pulsating B stars*) et les étoiles de type  $\beta$  *Cephei*, du nom du prototype de ce groupe. Les premières sont particulièrement

Représentation schématique de différentes classes d'étoiles pulsantes dans le diagramme Hertzsprung-Russell. Nous pouvons y distinguer les classes des étoiles de type SPB et de type  $\beta$  Cephei. Les points représentent des étoiles pour lesquelles le satellite Hipparcos a déterminé précisément les distances. La ligne en pointillé indique la séquence principale sur laquelle se trouvent nonante pour cent des étoiles. Ces dernières puisent leur énergie de la combustion centrale de l'hydrogène.

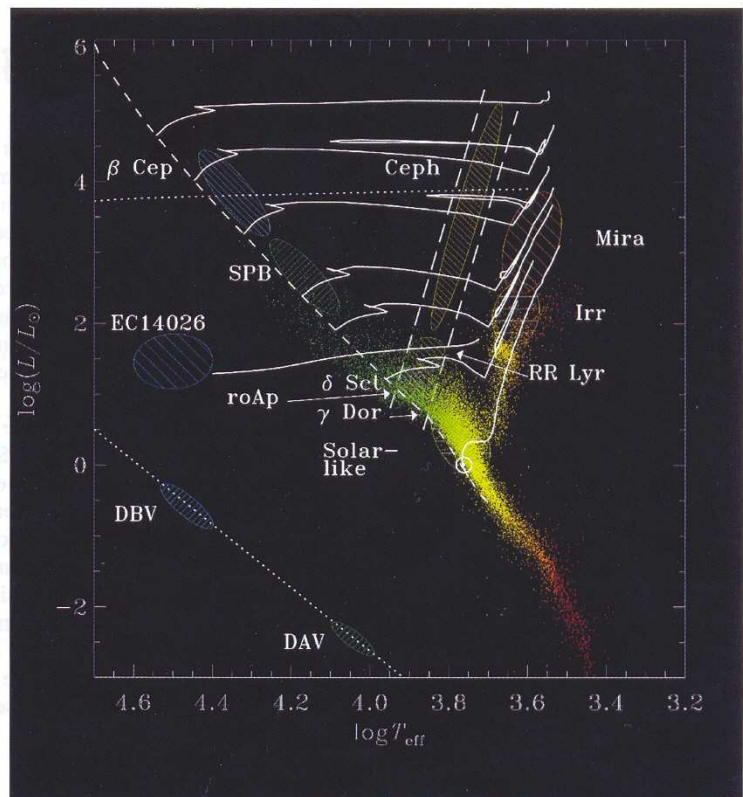
intéressantes parce que leurs périodes correspondent à des modes de gravité qui sont dominés par des mouvements transversaux à la surface de l'étoile. Ceux-ci pénètrent profondément à l'intérieur, ce qui permet d'y sonder les couches très enfouies, pratiquement jusqu'à son centre. Les étoiles massives de type  $\beta$  Cephei, quant à elles, sont également très intéressantes parce qu'elles deviendront à la fin de leur vie des supernovæ qui enrichiront chimiquement leur environnement.

Dans le cadre de la préparation de ma thèse de doctorat, ajoute Maryline Briquet, je travaillais à l'Université de Liège avec des chercheurs qui se penchaient sur l'étude théorique des pulsations stellaires et j'ai eu la chance de collaborer avec un groupe de la Katholieke Universiteit Leuven, spécialisé dans l'observation et l'interprétation des données récoltées. C'est ainsi qu'en partant des données observationnelles, j'ai pu franchir différentes étapes pour aboutir à la confrontation avec les modèles théoriques. Cette collaboration entre des chercheurs des deux universités ainsi que ceux de l'Observatoire royal de Belgique s'est encore étendue, il y a quelques années, suite à la création, par le professeur Conny Aerts, de la KULeuven, du *Belgian Asteroseismology Group (BAG)*. Grâce à cette organisation, les chercheurs possédant différentes expertises dans l'observation ou la théorie peuvent travailler de manière très efficace.

À ce propos, voir le site:

[www.asteroseismology.be](http://www.asteroseismology.be).

Les étoiles de type SPB que j'étudie, poursuit Maryline Briquet, ont été découvertes il y a un peu plus d'une dizaine d'années par des chercheurs de la Katholieke Universiteit Leuven. La mission *Hipparcos* (voir l'encadré, p. 500) a permis la découverte d'une centaine de nouvelles candidates qui sont également étudiées à la KULeuven. Une vingtaine d'entre elles ont été sélectionnées pour de nouvelles campagnes



d'observations photométriques et spectroscopiques. Pour les étoiles dites du nord, examinées à partir de l'hémisphère Nord, ces observations sont effectuées à La Palma, une des îles Canaries (Espagne) et à l'observatoire de Haute-Provence, dans le sud de la France; pour les étoiles dites du sud, toutes ces observations sont effectuées à La Silla, à l'observatoire européen de l'hémisphère Sud, au Chili.

Les données obtenues consistent en des séries de mesures de la luminosité et de la vitesse de surface de l'étoile étudiée. Ces grandeurs varient au cours du temps de manière périodique suite aux oscillations que subit l'étoile pulsante. À partir de ces variations de luminosité et de vitesse, nous pouvons déduire les fréquences et les modes de pulsation de l'étoile.

Pour effectuer ce travail, les chercheurs ont développé différentes techniques très particulières et c'est dans ce cadre que, pour ma thèse de doctorat, j'ai amélioré une des méthodes de détermination des modes de pulsation à partir de la spectroscopie à haute résolution. J'ai, en outre, optimisé cette méthode pour l'étude d'étoiles multipériodiques, comme le sont les étoiles de type SPB et de type  $\beta$  Cephei. Lorsque les quantités observables caractérisant la pulsation d'une étoile ont été déterminées, les chercheurs peuvent s'attaquer à la modélisation

# Quand l'hydrogène s'épuise

Les étoiles naissent de la contraction de vastes nuages de matière interstellaire, les nébuleuses. Cette contraction s'accompagne d'une élévation de température. Lorsque la température devient suffisante (environ 10 millions de degrés), des réactions thermonucléaires s'amorcent dans les régions centrales des étoiles et leur permettent de rayonner.

L'évolution des étoiles comporte une succession de périodes durant lesquelles elles se contractent sous l'effet de la gravitation: la matière qui les constitue subit ainsi un échauffement de plus en plus intense qui autorise le déclenchement de réactions nucléaires des éléments de plus en plus lourds. Pendant la majeure partie de leur vie, les étoiles tirent leur énergie de la transformation d'hydrogène en hélium - c'est le cas du Soleil actuel. Aussi observe-t-on de nombreuses étoiles à ce stade de leur évolution.

Plus une étoile est massive, plus son hydrogène sera brûlé rapidement, cette phase pouvant durer de quelques millions à plus de 10 milliards d'années. En revanche, il

existe des étoiles de faible masse, appelées naines brunes, où la combustion de l'hydrogène ne parvient jamais à s'amorcer. Lorsque l'hydrogène s'épuise au cœur de l'étoile, celui-ci se contracte, permettant ainsi à l'hydrogène de brûler sur des couches moins profondes pendant que l'enveloppe stellaire se dilate: c'est la phase dite de géante rouge. Le Soleil atteindra ce stade dans quelque cinq milliards d'années: son rayon aura alors centuplé et la Terre sera devenue une fournaise.

Si l'étoile est peu massive (de masse inférieure à 1,4 fois celle du Soleil), elle subit une ultime contraction qui la transforme en ce qu'on appelle une naine blanche. Celle-ci s'éteint ensuite lentement. Si l'étoile est massive, elle explose complètement et devient 10 à 100 millions de fois plus brillante (supernova) avant de décliner inexorablement. Seul subsiste son cœur très dense, qui se contracte ensuite pour donner, selon sa masse, une étoile à neutrons ou un trou noir. La matière de l'étoile éjectée lors de l'explosion forme une nébuleuse en expansion - reste de supernova - qui se disperse progressivement dans l'espace.

théorique proprement dite. En effet, les fréquences et les modes d'oscillation observés d'une étoile sont directement liés à des caractéristiques internes telles que la densité, la vitesse du son, la vitesse de rotation, etc., du centre de l'étoile jusqu'à sa surface. En ce qui concerne les étoiles de type *SPB* étudiées en collaboration entre Leuven et Liège, nous avons, sur une période de plusieurs années, réuni et analysé un grand nombre d'observations, déterminé les périodes de pulsation et nous sommes actuellement occupés à identifier les modes de pulsation. Le travail suivant consistera à sélectionner certaines étoiles en vue d'une modélisation astérosismique approfondie. En particulier, l'astérosismologie permettra de décrire précisément la rotation des couches internes de ces étoiles ainsi que la limite exacte de leur cœur convectif.

On peut se demander quel est le but d'une telle recherche. Nous voulons améliorer la modélisation des étoiles, un des constituants principaux de l'Univers, et tester la théorie de l'évolution stellaire qui décrit la vie d'une étoile depuis sa naissance jusqu'à sa mort. Actuellement, la théorie de l'évolution stellaire est connue de manière très globale mais n'est pas suffisamment contrainte par des grandeurs observables classiques telles que la température effective et la luminosité. Or cette théorie sert de base à beaucoup d'autres domaines de l'astrophysique. Par exemple, la théorie de l'évolution

stellaire permet de connaître l'âge des amas globulaires qui nous donne une indication sur l'âge de l'Univers. Elle permet également de calibrer les estimateurs de distance. Elle explique aussi l'origine des éléments chimiques puisque c'est dans le cœur des étoiles que se forment quasiment tous les éléments qui constituent l'Univers.

Les méconnaissances actuelles dans la théorie de l'évolution des étoiles se traduisent, dès lors, par de grandes incertitudes dans tous les domaines de l'astrophysique qui utilisent ses résultats. Autrement dit, précise encore la jeune chercheuse, les travaux des sismologues doivent contribuer à améliorer la théorie de l'évolution stellaire de manière à modifier et à contraindre certains éléments de celle-ci afin qu'elle corresponde mieux aux observations de plus en plus précises, ce qui nous aidera à lever les incertitudes concernant notre connaissance de l'Univers, son âge, sa taille, son origine, etc. Dans ce contexte, les missions spatiales telles que celle appelée *COROT*, pour *Convection ROTation and planetary Transits* (voir l'encadré, p. 500) permettront des percées particulièrement importantes dans le domaine grâce à des mesures d'une précision sans précédent.

Paul DEVUYST  
paul.devuyst@village.uunet.be

[http://www.ster.kuleuven.ac.be/research/asteroseism/index\\_en.html](http://www.ster.kuleuven.ac.be/research/asteroseism/index_en.html)

<http://smc.cnes.fr/COROT/Fr/index.htm>