

régions et apportent ainsi des informations localisées sur l'intérieur stellaire. L'amplitude et la durée de ces modes propres découlent pour leur part des mécanismes d'excitation des oscillations et des énergies mises en jeu. Nous y reviendrons.

En théorie, il suffit ainsi de mesurer les oscillations d'une étoile, d'isoler par une analyse du signal les différents modes propres dans le spectre de fréquences obtenu, puis d'« inverser le problème » pour remonter à la structure interne de l'astre.

Plus facile à dire qu'à faire. Il faut déjà mesurer ces oscillations avec une précision suffisante. On comprend depuis le début du XX^e siècle comment les étoiles peuvent vibrer, et donc se contracter et se dilater localement. Ces fluctuations entraînent des variations de luminosité. En effet, les régions qui se contractent deviennent plus chaudes et plus brillantes, tandis que les régions qui se dilatent s'assombrissent en refroidissant.

En 1953, l'astronome russe Sergei Zhevakin proposa un mécanisme pour expli-

quer l'origine des vibrations stellaires : une petite oscillation fait varier localement la pression et la température du gaz, modifiant ainsi sa capacité à bloquer le flux lumineux (son opacité). Cette variation permet le transfert de l'énergie radiative à l'oscillation, qui ainsi va gagner en énergie et en amplitude au fil des cycles. Ce mécanisme dit d'opacité explique aujourd'hui un grand nombre d'étoiles pulsantes connues.

Au cœur du Soleil

Et le Soleil ? Ce n'est qu'en 1962 que ses oscillations ont été mises en évidence. Et pour cause : la variation de luminosité correspondante, de l'ordre d'un millionième, est 10 000 fois plus faible que celle des étoiles pulsantes observées à l'époque. La période caractéristique des oscillations solaires est de l'ordre de cinq minutes.

On s'est vite rendu compte que les oscillations solaires ne résultent pas d'un mécanisme d'opacité, mais de la convec-

tion. Les mouvements du gaz dans la couche convective engendrent un bruit de fond acoustique qui couvre une large gamme de fréquences. Ces oscillations aléatoires (ou stochastiques) interfèrent de façon tantôt constructive, tantôt destructive, et ont dans l'ensemble un effet nul, excepté celles dont la fréquence est proche de celle d'un mode propre, qui entrent alors en résonance. L'oscillation puise alors de l'énergie dans la convection pour gagner en amplitude.

Depuis lors, des milliers de modes propres du Soleil ont été mesurés (notamment par le satellite SOHO). Ils ont dévoilé des détails insoupçonnés de sa structure interne. On a par exemple pu établir la vitesse de rotation en fonction de la profondeur et de la latitude, ce qui a mis en évidence que la rotation différentielle visible en surface – la période de rotation est de 24 jours à l'équateur et de 31 jours à 75 degrés de latitude – se poursuit en profondeur jusqu'à la base de la zone convective, où elle laisse brutalement place à une

COMMENT LES ÉTOILES VIBRENT

Comme une corde de violon ou la surface d'un tambour, les étoiles peuvent vibrer selon toute une gamme d'oscillations élémentaires, ou modes propres.

Chaque mode est caractérisé par une fréquence et un type de déformation. Dans le cas d'une étoile, qui est un objet sphérique, la déformation la plus simple est le mode radial fondamental : toute l'étoile se dilate puis se contracte de façon périodique (seul le centre reste fixe). À une fréquence supérieure, il existe un second mode radial : le cœur se contracte pendant que l'enveloppe se dilate et inversement. Plus « l'ordre radial » d'un mode est élevé, plus le nombre de couches qui se dilatent et se contractent alternativement est élevé. L'étoile peut également vibrer suivant des modes non radiaux,

qui ne respectent pas la symétrie sphérique. Par exemple, les pôles peuvent se dilater tandis que l'équateur se contracte.

Plus le degré d'un mode est élevé, plus la surface se décompose en zones qui se dilatent et se contractent alternativement, séparées par des lignes qui restent immobiles, les « lignes nodales ».

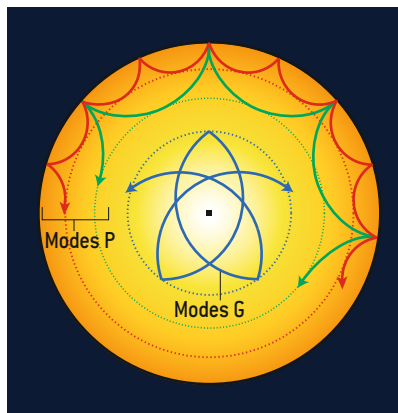
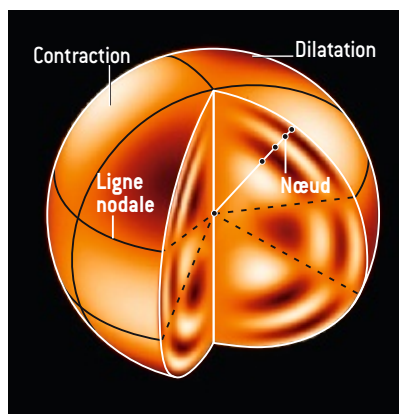
Un mode propre général est ainsi déterminé par un motif spécifique de déformation en trois dimensions, qui combine une déformation radiale et une déformation non radiale. Il est caractérisé par trois nombres : l'ordre radial n , l'ordre azimutal m et le degré l (voir ci-dessous).

Pour un mode de degré élevé, les déformations se compensent d'une région à l'autre de la surface (l'une se contracte pendant que

l'autre se dilate), de sorte que la variation de luminosité globale résultante est faible. De fait, dans des étoiles autres que le Soleil, seuls les modes de degré inférieur à quatre ont été mis en évidence.

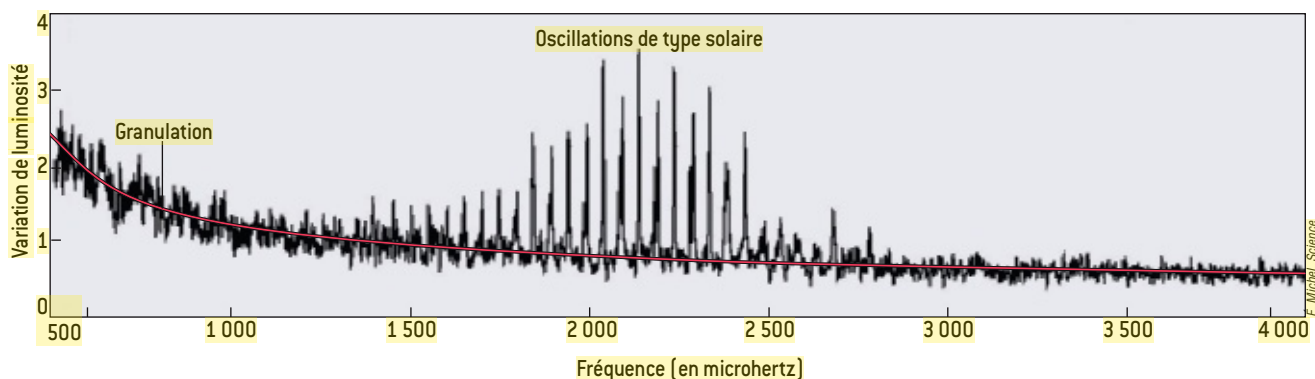
Les modes que peut exprimer une étoile ne dépendent que de sa structure interne et de sa géométrie, et non du mécanisme d'excitation initial de l'oscillation. Ce dernier n'influe que sur l'amplitude des modes effectivement exprimés.

Différents modes sont sensibles à différentes régions de l'étoile. Les modes de pression de haut degré sont par exemple confinés près de la surface de l'étoile, tandis que les modes de bas degré se propagent à travers presque toute l'étoile. Les modes de gravité, quant à eux, sont plus sensibles au cœur de l'étoile.



À gauche, une représentation du mode de vibration $l = 4, m = 2, n = 5$. Les différentes régions de l'étoile se dilatent (*en foncé*) et se contractent (*en clair*) alternativement. Le degré l est le nombre de méridiens et parallèles laissés fixes par l'oscillation, ou lignes nodales (*en noir*). L'ordre azimutal m est le nombre de méridiens nodaux. Enfin, l'ordre radial n indique le nombre de nœuds le long d'un rayon (*points noirs*). À droite, les trajectoires des ondes associées aux modes de pression (*mode P en rouge et en vert*), qui mettent en jeu la surface et l'enveloppe de l'étoile jusqu'à des profondeurs variables, et des modes de gravité (*mode G en bleu*), plus sensibles aux régions centrales.

Éric Michel/PLS



2. LE SPECTRE DE FRÉQUENCE DE L'ÉTOILE PULSANTE de type solaire HD 52265 (1,2 masse solaire) observée avec CoRoT. On distingue la structure en peigne caractéristique des oscillations de type solaire. L'espa-

cement caractéristique, nommé grande séparation, est proportionnel à la densité moyenne de l'étoile. On visualise également la composante associée à la granulation (la courbe rouge).

rotation d'ensemble au-delà d'une couche très mince, nommée depuis tachoclyne.

Le profil de température du Soleil en fonction de la profondeur a aussi été déterminé (la température varie de 5800 kelvins en surface à près de 15 millions de kelvins dans le cœur). Ce résultat a joué un rôle fondamental dans la physique des neutrinos, ces particules presque dénuées de masse émises lors des réactions nucléaires. Au début des années 1990, on mesurait moins de neutrinos d'origine solaire que prévu. Selon l'une des explications avancées, la température au centre du Soleil était surestimée par les modèles. La détermination de la température par sismologie a écarté cette hypothèse, et conduit à établir que les neutrinos peuvent « osciller », c'est-à-dire changer périodiquement de type (on en connaît trois).

100 000 étoiles en un coup d'œil

La sismologie a donc fait la preuve de son efficacité pour explorer l'intérieur du Soleil et tester des hypothèses de physique fondamentale. Qu'en est-il des autres étoiles ? Après la découverte des oscillations solaires, une chasse aux oscillations dans les étoiles de masse voisine, supposées avoir une couche convective assez épaisse pour engendrer des oscillations similaires, s'est enclenchée. Il a cependant fallu attendre 1999 pour qu'une équipe du Service d'aéronomie et de l'Observatoire de Paris détecte de façon indiscutable des oscillations de type solaire dans une autre étoile, Procyon.

Ce résultat a été obtenu par la mesure spectroscopique des « vitesses radiales ». Sous l'effet des oscillations, la surface de l'étoile s'avance et s'éloigne légèrement de

l'observateur, ce qui entraîne, par effet Doppler, un décalage des raies caractéristiques du spectre lumineux de l'étoile. Cette méthode, également bien connue des chasseurs d'exoplanètes, a permis de détecter des oscillations de type solaire dans une dizaine d'étoiles. Elle est néanmoins limitée aux étoiles très brillantes et souffre du manque de continuité et de la durée limitée des observations au sol.

La sismologie stellaire devait donc se tourner vers l'espace. C'est pourquoi le projet CoRoT, conduit par le CNES (Centre national d'études spatiales), a été imaginé. CoRoT s'appuie sur la mesure ultraprécise de la luminosité des étoiles, ou photométrie. Il s'agit de mesurer les variations de luminosité, qui découlent de l'oscillation de leur surface *via* des variations de température.

Lancé en 2006, CoRoT a déjà mesuré les variations de luminosité de 125 étoiles assez brillantes avec une précision de l'ordre d'une partie par million et une résolution temporelle de l'ordre de la seconde. Dans le même temps, plus de 130 000 étoiles plus faibles ont été observées avec une précision et une résolution temporelle moindres. Toutes ces étoiles ont été observées de façon continue pendant un à cinq mois.

En mars 2009, le télescope spatial américain *Kepler* est à son tour entré en service. Initialement dédié à la recherche d'exoplanètes par photométrie, *Kepler* s'est révélé être un formidable outil pour l'astérosismologie : il va observer plus de 100 000 étoiles durant au moins cinq ans.

Les résultats déjà obtenus par CoRoT et *Kepler* dépassent toutes les espérances. En réduisant le bruit de deux à trois ordres de grandeur par rapport aux observations existantes, CoRoT et *Kepler* permettent d'étudier pour la première fois des phé-

nomènes très faibles regroupés sous le terme de « microvariabilité », telles les oscillations de type solaire, les taches stellaires ou la granulation. Les observations sont encore en cours, mais les premiers résultats sont déjà exceptionnels.

Les géantes rouges mises à nu

L'un des premiers succès de l'astérosismologie spatiale concerne les géantes rouges, des étoiles de type solaire qui ont épuisé l'hydrogène disponible dans leur cœur, et qui voient leur enveloppe se dilater et se refroidir jusqu'à occuper un rayon pouvant atteindre une centaine de fois celui du Soleil.

On connaissait moins d'une dizaine de cas d'oscillations dans les géantes rouges. Dès la première séquence d'observation de cinq mois, CoRoT en a découvert plus de 700. Un bond quantitatif accompagné d'un saut qualitatif en termes de précision, de durée et de continuité des observations. CoRoT, puis *Kepler*, ont depuis mesuré les spectres d'oscillations de milliers de géantes rouges.

Comme l'ont montré Joris de Ridder, de l'Université catholique de Louvain en Belgique, et Benoît Mosser, de l'Observatoire de Paris, et leurs collègues, ces spectres se révèlent dominés par les modes de pression. Ceux-ci suivent une répartition selon leur fréquence très similaire à celle des modes solaires, mais à des fréquences plus basses (quelques microhertz à quelques centaines de microhertz). Comme pour le Soleil, la structure du spectre caractérise l'enveloppe de l'étoile, dominée par une profonde zone convective. En combinant cette information à la température de surface, Thomas Kallinger, de

l'Université de Vienne, et ses collègues ont réussi à estimer pour la première fois le rayon d'étoiles géantes rouges, mais aussi leur masse, avec une précision de quelques pour cent.

Comme l'ont montré Andréa Miglio, de l'Université de Liège, en Belgique, et ses collègues, cette caractérisation sismique des géantes rouges permet de comparer la distribution en masse et rayon d'une population d'étoiles observée avec celle attendue théoriquement. Les premiers résultats montrent que la distribution de l'échantillon observé par CoRoT est davantage compatible avec une formation régulière d'étoiles dans la région ciblée qu'avec des épisodes récents de flambée de formation stellaire.

Au-delà des modes de pression, les spectres d'oscillation des géantes rouges ont aussi confirmé l'existence, non démontrée jusqu'alors, de modes mixtes dans ces objets. La régularité avec laquelle ces modes sont distribués selon leur période, mise en évidence dans les

données de *Kepler* par Paul Beck, de l'Université catholique de Louvain, en Belgique, et ses collègues, caractérise le cœur et l'état évolutif des géantes rouges.

Les cœurs mélangés

Il était jusqu'ici très difficile de distinguer une étoile géante rouge, brûlant de l'hydrogène « en couche » à la périphérie du cœur désormais composé d'hélium, d'une étoile plus évoluée, où la fusion de l'hélium s'est amorcée (phase appelée « branche horizontale des géantes »). Ces deux types d'étoiles peuvent en effet paraître identiques en termes de température de surface, de rayon ou de luminosité.

Tim Bedding, de l'Université de Sydney, en Australie, et ses collègues ont montré que dans les étoiles présentant un espacement régulier de 50 à 60 secondes entre les périodes des modes mixtes successifs, l'hydrogène en couche est en phase de fusion, tandis que dans celles montrant des périodes espacées

de 100 à 300 secondes, c'est l'hélium qui est en fusion.

En utilisant cette signature sismique, A. Miglio et ses collègues ont pu estimer la perte de masse qui accompagne l'allumage des réactions de fusion de l'hélium dans les géantes rouges. Leurs résultats penchent pour une perte modérée, et ils nous renseignent sur l'enrichissement du milieu interstellaire.

Autre question ouverte sur laquelle l'astérosismologie a jeté un éclairage nouveau, celle de l'« extension des cœurs mélangés ». Toutes les étoiles de la séquence principale plus massives que le Soleil ont un cœur convectif, où le mélange est rapide. La taille de ce cœur mélangé détermine la quantité d'hydrogène disponible pour les réactions nucléaires.

Or l'incertitude sur la localisation de cette limite dans les modèles fondés sur les observables de surface classiques entraîne une incertitude de plus de 20 pour cent sur la quantité d'hydrogène disponible et sur l'estimation de l'âge de ces étoiles.

COROT : SCRUTER LES VARIATIONS D'ÉCLAT DES ÉTOILES

Également connu comme chasseur d'exoplanètes, le satellite CoRoT (pour *Convection, Rotation, Transit*), conçu et mis en œuvre par le CNES (Centre national d'études spatiales), en collaboration avec l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Autriche, la Belgique, le Brésil, l'Allemagne et l'Espagne, est destiné à l'étude des oscillations stellaires par photométrie (mesure des variations de luminosité). Il a été lancé le 26 décembre 2006.

CoRoT a été conçu autour de trois contraintes : stabilité, durée et conti-

nuité des observations. La surface collectrice du télescope, de 27 centimètres de diamètre, est protégée de la lumière réfléchie par la Terre grâce à un cache très performant (moins d'un photon sur 10^{12} le franchit). La température des instruments est contrôlée au centième de degré près, et le pointage est si précis que les images des étoiles sur les capteurs ne bougent pas de plus d'un dixième de pixel (soit 0,2 seconde d'arc).

La moitié des capteurs (soit un champ de quatre degrés carrés sur le ciel) a été conçue pour observer

en détail dix étoiles assez brillantes (magnitudes 5,4 à 9,5) avec une résolution temporelle de une seconde. Ce champ est optimisé pour l'observation d'oscillations stellaires de très faible amplitude. Le bruit de fond obtenu au terme de cinq jours d'observations cumulées atteint 0,6 partie par million.

L'autre moitié des capteurs est optimisée pour la recherche de transits planétaires. Ce champ a été conçu pour observer jusqu'à 12 000 étoiles faibles, avec un échantillonnage de 512 secondes, ou 32 secondes pour 1 000 d'entre elles. Les courbes de lumière obtenues, avec un bruit de fond de l'ordre de dix parties par million, permettent de détecter des oscillations stellaires de grande amplitude sur de vastes échantillons.

Au printemps 2009, l'impact d'une particule cosmique de haute énergie a endommagé partiellement l'ordinateur de bord et a divisé par deux le nombre d'étoiles observées dans chaque champ.

L'orbite polaire à 896 kilomètres d'altitude a été choisie pour permettre à CoRoT d'observer la même région du ciel « en tour-

nant le dos » au Soleil pendant presque six mois. Une manœuvre de retournement est ensuite effectuée pour observer la direction opposée.

Cette continuité est cruciale, car les interruptions dans l'observation engendrent des artefacts dans les spectres de fréquences. CoRoT peut ainsi atteindre une précision en fréquence de l'ordre de 0,1 microhertz, hors de portée des observations au sol.

En 2009, le satellite *Kepler* de la NASA s'est ajouté à CoRoT pour la traque d'exoplanètes en transit et l'observation des oscillations stellaires. Avec un miroir primaire de 95 centimètres, il observe un champ de 105 degrés carrés dans la constellation du Cygne et de la Lyre.

À la différence de CoRoT, *Kepler* est placé sur une orbite héliocentrique voisine de l'orbite terrestre, ce qui lui permet, en pointant dans une direction perpendiculaire au plan de son orbite, d'observer les mêmes étoiles pendant plusieurs années sans être gêné ni par le Soleil ni par la Terre. *Kepler* observe ainsi simultanément environ 100 000 étoiles dont les magnitudes sont comprises entre 9 et 15.



© CNES-Mai 2004/illus. D. Duron