

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.

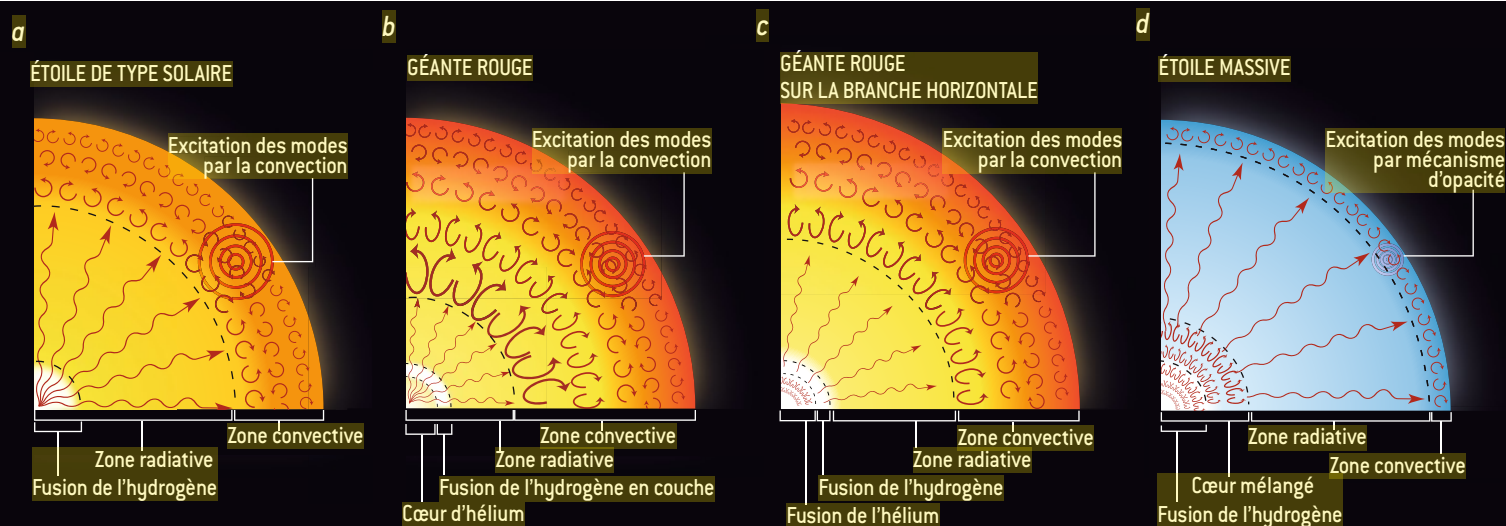
Cette continuité est cruciale, car les interruptions dans l'observation engendrent des artefacts dans les spectres de fréquences. CoRoT peut ainsi atteindre une précision en fréquence de l'ordre de 0,1 microhertz, hors de portée des observations au sol.

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



3. SELON LEUR MASSE ET LEUR STADE ÉVOLUTIF, les étoiles ont des structures différentes. Sur la « séquence principale », les étoiles plus massives que le Soleil (*d*) sont pour l'essentiel radiatives, avec un cœur convectif. Les étoiles semblables au Soleil (*a*) sont convectives en surface

et radiatives au cœur. Une fois épuisé l'hydrogène de ce dernier, elles se dilatent et refroidissent, devenant des géantes rouges (*b*), largement convectives. Lorsque la fusion de l'hélium prend le relais (*c*), l'étoile connaît une nouvelle phase de stabilité, la « branche horizontale des géantes ».

Peter Degroote, de l'Université catholique de Leuven, aux Pays-Bas, et ses collègues ont mis en évidence des modes de gravité dans le spectre de l'étoile de sept masses solaires HD50230, observée par CoRoT. La distribution de leurs périodes révèle un très léger décalage autour d'un espacement régulier. Ce décalage est caractéristique d'une zone de variation rapide de la densité en fonction du rayon (cette variation modifie la vitesse de propagation des ondes). Il permet notamment de localiser avec précision la limite du cœur mélangé, où la composition varie de façon brusque. Ces données ont ainsi mis en évidence que le cœur mélangé de HD50230 est au moins 25 pour cent plus massif que la valeur prédite par les modèles usuels. Elles suggèrent aussi une variation relativement douce de la composition en bordure de celui-ci.

Cette valeur élevée, au moins égale au maximum envisagé jusqu'à présent, se traduit, pour une étoile de sept masses solaires telle HD50230, par une durée de vie dans la séquence principale au moins 20 pour cent plus longue qu'attendu (supérieure à 44 millions d'années au lieu de 37).

La modélisation d'autres étoiles pulsantes de 1,2 à 4 masses solaires par d'autres équipes suggère également une forte extension du cœur mélangé. En revanche, la modélisation par Sébastien Deheuvels, de l'Observatoire de Paris, d'une étoile de 1,3 masse solaire commençant à brûler de

l'hydrogène en couche suggère une extension modérée ou très faible du cœur mélangé. Ces résultats ne sont pas nécessairement contradictoires. L'extension du cœur mélangé nécessite sans doute une description plus élaborée, qui dépend de la masse de l'étoile, de son âge et peut-être de sa vitesse de rotation. Les résultats sismiques obtenus pour un nombre croissant d'étoiles permettront de préciser cette question.

La zone convective sous tous les angles

Le transport d'énergie par la convection est un autre sujet central de la physique stellaire. L'épaisseur de la zone convective est considérable dans les étoiles froides : elle représente près d'un tiers du rayon du Soleil, et la quasi-totalité de celui des géantes rouges. Plus petite dans les étoiles chaudes, elle reste néanmoins le lieu où les divers types d'oscillations puisent leur énergie et où est engendré le champ magnétique. Or le transport de la chaleur dans la zone convective est mal décrit, surtout dans les régions peu denses proches de la surface. Même dans le cas du Soleil, cette région reste en fait l'une des plus mal connues. Les observations de CoRoT et *Kepler* permettent d'aborder la question sous plusieurs angles.

Comme évoqué précédemment, le décalage dans la distribution en fréquence

des modes permet de localiser directement des motifs structuraux. Anwesh Mazumdar, du Centre *Homi Bhabha* à Bombay, en Inde, et l'un d'entre nous (Éric Michel) ont appliqué cette technique à l'étoile HD49933, observée par CoRoT. Ils ont estimé la profondeur de la « zone de seconde ionisation de l'hélium » (la région où, sous l'effet de la température, l'hélium voit ses deux électrons arrachés) avec une incertitude d'à peine dix pour cent (cette profondeur correspond à 1,7 pour cent du rayon).

La même analyse a aussi livré la profondeur de la base de la zone convective, mais ce dernier résultat semble à la limite de la précision des observations. De façon similaire, la zone de seconde ionisation de l'hélium a été localisée à sept pour cent près dans l'étoile géante rouge HR7349 par A. Miglio et des collègues. C'est la première fois qu'une telle analyse est faite sur des étoiles autres que le Soleil. L'astérosismologie apporte ainsi des mesures directes de ces interfaces, qui jouent un rôle essentiel dans les modèles stellaires.

La zone convective a également été étudiée *via* le profil des modes propres de type solaire. Si la fréquence des modes découle de la structure de l'étoile, leur amplitude et leur durée de vie dépendent des phénomènes énergétiques. La durée de vie d'un mode de type solaire est ainsi dictée par le couplage entre la convection et l'oscillation, tandis que son