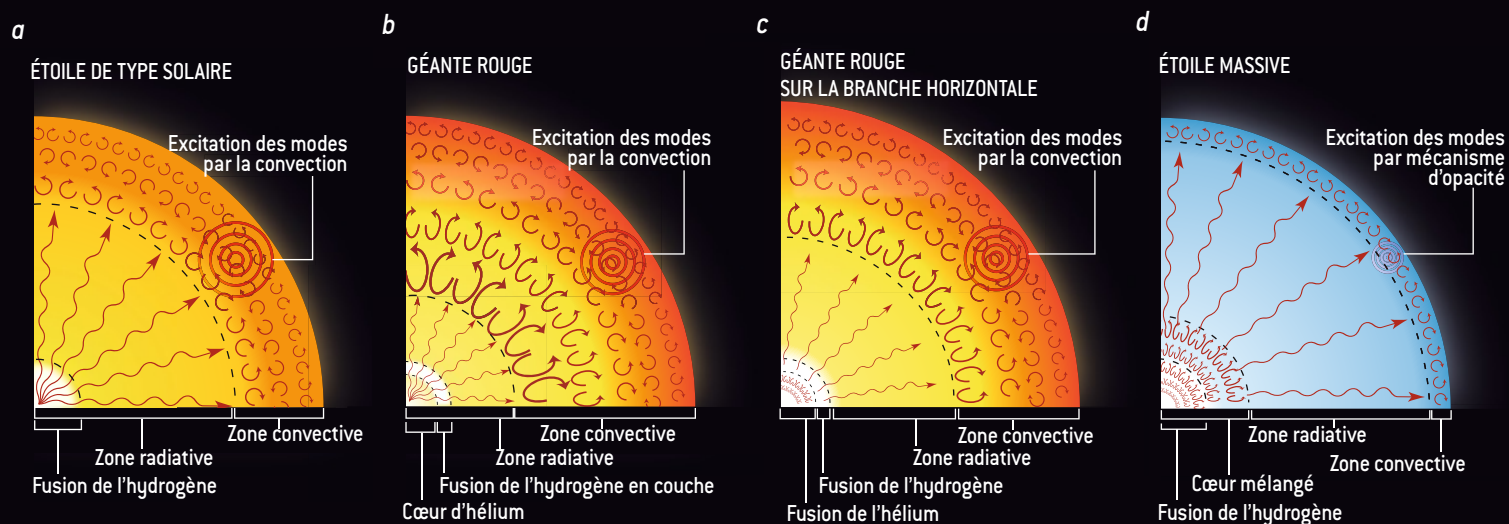




3. SELON LEUR MASSE ET LEUR STADE ÉVOLUTIF, les étoiles ont des structures différentes. Sur la « séquence principale », les étoiles plus massives que le Soleil (*d*) sont pour l'essentiel radiatives, avec un cœur convectif. Les étoiles semblables au Soleil (*a*) sont convectives en surface

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.

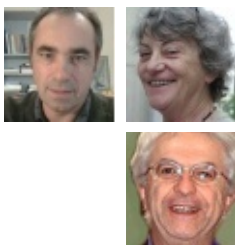
Comme évoqué précédemment, le décalage dans la distribution en fréquence

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

LES AUTEURS



Éric MICHEL est astronome au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (LESIA) de l'Observatoire de Paris, et responsable du programme de sismologie stellaire du projet CoRoT.

Annie BAGLIN est directrice de recherche du CNRS au LESIA et responsable scientifique principal du projet CoRoT.

Michel AUVERGNE est directeur de recherche du CNRS au LESIA et responsable scientifique de l'instrumentation du projet CoRoT.

BIBLIOGRAPHIE

S. Deheuvels *et al.*, Constraints on the structure of the core of subgiants via mixed modes : the case of HD49385, *Astronomy & Astrophysics*, à paraître.

T. Bedding *et al.*, Gravity modes as a way to distinguish between hydrogen- and helium-burning red giant stars, *Nature*, vol. 471, pp. 608-611, 2011.

B. Mosser *et al.*, The universal red-giant oscillation pattern, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 525, L9, 2011.

P. Degroote *et al.*, Deviations from a uniform period spacing of gravity modes in a massive star, *Nature*, vol. 464, pp. 259-261, 2010.

R. Samadi *et al.*, The CoRoT target HD 49933. II. Comparison of theoretical mode amplitudes with observations, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 509, L16, 2010.

R. A. Garcia *et al.*, CoRoT reveals a magnetic activity cycle in a Sun-like star, *Science*, vol. 329, p. 1032, 2010.

A. Miglio *et al.*, Probing populations of red giants in the galactic disk with CoRoT, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 503, L21, 2009.

amplitude résulte du bilan énergétique entre l'amortissement et l'excitation par la pression de convection.

Les premières mesures effectuées sur les étoiles HD49933, HD181420 et HD181906, plus chaudes que le Soleil (6300 à 6800 kelvins en surface), ont confirmé que l'amplitude des modes augmente avec la température. Elle est environ 1,5 fois supérieure à celle observée pour le Soleil, soit 25 pour cent de moins que ne le préoyaient les modèles.

Cette différence peut être en partie expliquée par la teneur en éléments plus lourds que l'hélium (la « métallicité ») de ces étoiles. Par ailleurs, la largeur des modes – inversement proportionnelle à leur durée de vie – est trois fois plus grande que celle estimée, écart qui reste à expliquer. Ces résultats nous renseignent sur la distribution des vitesses caractéristiques de la convection et apportent des tests pour les modélisations numériques en trois dimensions.

L'activité magnétique dévoilée par sismologie

Ce travail est actuellement étendu aux étoiles géantes rouges. Les modélisations les plus avancées sous-estiment l'amplitude des modes observés d'un facteur trois, comme le montrent les travaux de Reza Samadi, de l'Observatoire de Paris, et ses collègues. C'est le signe que les échanges d'énergie entre les oscillations et les couches superficielles de l'étoile doivent encore être précisés.

Les petites cellules brillantes séparées par des parois plus sombres qui tapissent la surface du Soleil, ou granules, sont une autre manifestation de la convection. Les dimensions et la durée de vie des granules sont liées à des grandeurs caractéristiques du processus convectif. Les données de CoRoT nous ont permis, avec nos collègues, de mesurer pour la première fois le spectre de la granulation dans différentes étoiles. Pour les étoiles de classe F, plus chaudes que le Soleil, les granules se révèlent être trois fois plus grands que ceux du Soleil, et leur durée de vie 30 pour cent plus élevée. Les simulations, qui reproduisent bien ces phénomènes dans le cas du Soleil, échouent pour l'instant à reproduire la granulation de ces étoiles.

L'astérosismologie apporte également un regard neuf sur l'activité magnétique des étoiles. Le champ magnétique est un ingrédient encore très mal connu de la physique stellaire. Depuis quelques années, une nouvelle génération de spectromètres (ou spectropolarimètres) permet d'établir des cartographies de plus en plus précises du champ magnétique à la surface des étoiles. Les données de CoRoT ont pour leur part mis en évidence pour la première fois en 2010 les variations de fréquence et d'amplitude des oscillations induites par un cycle d'activité magnétique dans une autre étoile de type solaire, HD49933. Raphael Garcia, du Service d'astrophysique du CEA, à Saclay, et ses collègues ont constaté en particulier que l'amplitude des modes décroît lorsque leur fréquence augmente, de la même façon que pour le Soleil au cours de son cycle magnétique. Ces variations résulteraient de l'évolution de l'activité magnétique de l'étoile, qui modifie sa structure. Le cycle magnétique de cette étoile 20 pour cent plus massive que le Soleil serait ainsi de 120 jours, contre 11 ans pour le Soleil. La rotation, huit fois plus rapide que celle du Soleil, pourrait être à l'origine de cette différence.

Alors que la mission CoRoT a été prolongée jusqu'en 2013, l'échantillon d'étoiles observé couvre une large gamme de masses et de stades évolutifs, des étoiles comparables au Soleil jusqu'à d'autres 40 fois plus massives, et des étoiles de moins de un million d'années à plus de dix milliards d'années, comme certaines géantes rouges. Les données livrées par *Kepler* depuis 2009 sont en train d'élargir cet échantillon de façon spectaculaire et donneront accès à des durées d'observation de plusieurs années, hors de portée de CoRoT.

D'autres projets sont en préparation, tel BRITTE, une flottille de nanosatellites dédiée à la photométrie des étoiles les plus brillantes (le lancement des deux premiers est prévu en 2012), ou PLATO, en cours d'évaluation par l'Agence spatiale européenne, qui propose d'étudier les systèmes stellaires dans leur ensemble, en réalisant l'étude sismique des étoiles autour desquelles il aura détecté des planètes.

La moisson de résultats récents confirme d'ores et déjà que l'astérosismologie apporte bien le regard nouveau sur la physique stellaire que les astrophysiciens attendaient. Gageons que les années à venir seront tout aussi riches en découvertes, sinon plus!