

## Sonder les étoiles

Jérôme Ballot, astrophysicien

à l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (Toulouse)

*La principale, pour ne pas dire l'unique, information qu'on reçoit des étoiles provient de la lumière qu'elles émettent. Ces photons sont émis dans une mince couche à leur surface appelée la photosphère. En effet, un peu plus profondément, la matière est trop opaque pour que les photons puissent circuler librement. Malgré cela, nous avons une bonne connaissance de ce qui se passe à l'intérieur des étoiles. Nous en connaissons la structure, et nous en comprenons de mieux en mieux la dynamique interne.*

### La structure des étoiles

Modéliser la structure interne des étoiles est un des grands succès de l'*astrophysique* du XX<sup>e</sup> siècle. En effet, à partir de nos connaissances en physique fondamentale, nous sommes capables de calculer la structure des étoiles et leur évolution : pour cela, il suffit de prendre en compte les lois de la mécanique, de la gravitation, nos connaissances sur les propriétés de la matière (en particulier les interactions entre lumière et matière d'une part et les réactions nucléaires d'autre part). Nous pouvons donc par exemple calculer la structure du Soleil aujourd'hui : en son cœur, la température atteint 15 millions de degrés et plus de la moitié de l'hydrogène y a été transformé en hélium par fusion nucléaire. Bien que la matière soit très opaque, l'énergie est évacuée grâce aux photons depuis le centre vers la surface jusqu'à 71 % du rayon (on parle de région « radiative ») ; au-delà, la matière devient trop opaque au rayonnement et l'énergie est transportée par la convection, c'est-à-dire par de grands mouvements ascendants et descendants de matière (on parle de région « convective »). Les étoiles naines de masse semblable au Soleil ont toutes une structure similaire.

Pour tester, valider, mettre en défaut et améliorer les modèles, il faut pouvoir sonder les intérieurs stellaires. C'est ce que permet la sismologie stellaire, ou *astérosismologie* (lorsqu'on s'intéresse spécifiquement au Soleil, on parle alors d'*héliosismologie*).

On connaît depuis des siècles des étoiles variables, c'est-à-dire des étoiles dont la luminosité varie au cours du temps. L'origine de ces fluctuations peut être extrinsèque, ce qui est le cas par exemple d'une binaire à éclipse (c'est-à-dire une étoile qui possède un compagnon stellaire qui l'occulte partiellement à chaque révolution), ou intrinsèque. Dans ce second cas, la variabilité peut être due à des oscillations de l'étoile. En effet, la plupart des étoiles oscillent. On

serait même tenté de dire que presque toutes les étoiles oscillent : à chaque fois que la sensibilité de nos instruments s'améliore de nouvelles classes d'étoiles pulsantes sont découvertes.

Certaines présentent des oscillations avec de grandes amplitudes, telles les céphéides dont la luminosité peut varier du simple au double, d'autres ont des oscillations de très faibles amplitudes, comme le Soleil où elles n'excèdent pas quelques parties par million (ppm). Il existe également une grande diversité dans les périodes des oscillations : par exemple, les oscillations du Soleil ont des périodes voisines de 5 minutes alors qu'elles peuvent atteindre la centaine de jours pour les céphéides.

### Comprendre les oscillations

L'étude des oscillations stellaires nous permet littéralement d'ausculter un grand nombre d'étoiles. Pour comprendre les principes de la sismologie, nous pouvons nous ramener à d'autres objets oscillants qui nous entourent : les instruments de musique. Par exemple, prenons pour simplifier les vibrations d'une corde. On considère une corde tendue, fixée à ses deux extrémités. Si on frappe la corde, celle-ci va osciller autour de sa position d'équilibre sous l'effet des forces de tension qui s'exercent dessus. On dit alors que la tension est la *force de rappel*. La corde ne va pas osciller n'importe comment, mais selon ses *modes*. Certains de ces modes sont représentés sur la figure 1a.

Chaque mode est caractérisé de façon univoque par un nombre  $n$  de nœuds qui sont des points qui restent immobiles lorsque la corde vibre selon ce mode précis. À l'inverse, on appelle ventres les endroits où l'amplitude de l'oscillation est maximale. Sur la figure 1a, sont représentés le mode appelé fondamental, sans nœud ( $n = 0$ ), le premier harmonique qui possède un nœud ( $n = 1$ ) et le second harmonique ( $n = 2$ ). On pourrait continuer ainsi pour des  $n$  de plus en plus grands. Lorsqu'une

corde oscille, elle le fait selon une superposition de ses différents modes.

Chaque mode est associé à une fréquence d'oscillation spécifique qu'on note  $f_n$ . La fréquence de chaque mode suit la relation suivante  $f_n = D \times (n + 1)$  où  $D$  est une constante qui dépend de la corde. La fréquence du fondamental est donc  $f_0 = D$ , celle du premier harmonique  $f_1 = 2D$ , celle du second,  $f_2 = 3D$ , etc. La constante  $D$  s'exprime à partir de la vitesse  $v$  de propagation des vibrations dans la corde (elle est d'autant plus élevée que la corde est tendue et/ou fine) et de la longueur  $L$  de la corde à travers la formule  $D = v/(2L)$ . Ainsi, lorsqu'on augmente la tension de la corde – et donc  $v$  –, on augmente la fréquence du fondamental et de ses harmoniques. Si cette corde est une corde de piano par exemple, le son produit sera donc plus aigu. En revanche, si on a une corde plus longue, les fréquences sont plus petites et le son produit est plus grave. Ainsi même sans voir la corde, en identifiant ses fréquences de vibration, nous sommes capable de trouver  $D$  et donc certaines des caractéristiques de la corde.

De façon très similaire, si on considère maintenant un tuyau (par exemple d'orgue), l'air qu'il contient va pouvoir vibrer sous l'effet des forces de pression : il s'agit d'onde acoustique. De la même manière, ces oscillations vont se faire selon les modes du tuyau, encore une fois caractérisés par le nombre de nœuds  $n$ . Sur la figure 1b, on a représenté les trois premiers modes acoustiques ( $n = 0, 1$  et  $2$ ) d'un tuyau fermé à une extrémité et ouvert à l'autre : les zones blanches sont des nœuds de pression (la pression n'y varie pas), les zones rouges et bleues sont des ventres, alternativement comprimés et dilatés. Par rapport à l'exemple précédent, la force à l'origine de l'oscillation change, mais le principe reste le même. Les fréquences d'oscillation des modes s'expriment alors sous la forme  $f_n = D (n + 1/2)$  avec  $D = c/(2L)$  où  $L$  est la longueur du tube et  $c$  la vitesse du son dans l'air. Cette fois encore, en identifiant les fréquences

de vibration du tuyau, on est capable de remonter à la quantité  $D$ .

## Les oscillations des étoiles

Le principe est exactement le même lorsqu'on étudie les oscillations des étoiles. On va distinguer deux types de mode d'oscillation selon la force de rappel en œuvre. Nous avons tout d'abord les modes acoustiques ou de pression (ou *modes p*) dont la force de rappel est la force de pression : il s'agit du même genre d'ondes que celles que nous venons de voir dans un tuyau. Nous avons ensuite les modes de gravité (ou *modes g*) dont la force de rappel est la combinaison des forces d'Archimède et de gravité. La nature de ces ondes est très proche de celles à l'origine des ronds se propageant à la surface de l'eau.

Les modes, aussi bien  $p$  que  $g$ , vont aussi être caractérisés par leur nombre de nœuds. À la différence de la corde ou du tube qui peuvent être considérés comme des objets à une dimension, les étoiles sont des objets à trois dimensions et il va falloir trois entiers pour caractériser un mode : l'ordre radial  $n$ , le degré  $l$ , et l'ordre azimutal  $m$ . Le premier,  $n$ , compte le nombre de nœuds le long d'un rayon, le second,  $l$ , compte le nombre de lignes de nœuds à la surface et  $m$  le nombre de ces lignes qui passent par les pôles. Pour illustrer cela, un mode  $p$  du Soleil est représenté à la figure 1c : il s'agit du mode caractérisé par le triplet d'entiers ( $n = 14, l = 20, m = 16$ ). En effet, on compte 14 nœuds du centre à la surface ( $n = 14$ ), 20 lignes de nœuds à la surface ( $l = 20$ ) dont 16 sont des méridiens ( $m = 16$ ) et 4 sont des parallèles. Les lignes de nœuds parallèles à l'équateur sont fixes, en revanche les lignes de nœuds méridiennes se déplacent : un mode peut se propager dans le même sens que la rotation, ou dans le sens inverse ; dans le premier cas on donnera par convention un signe négatif à  $m$ , et un signe positif dans le second cas. Ainsi l'ordre azimutal  $m$  est un entier compris entre  $-l$  et  $l$ .

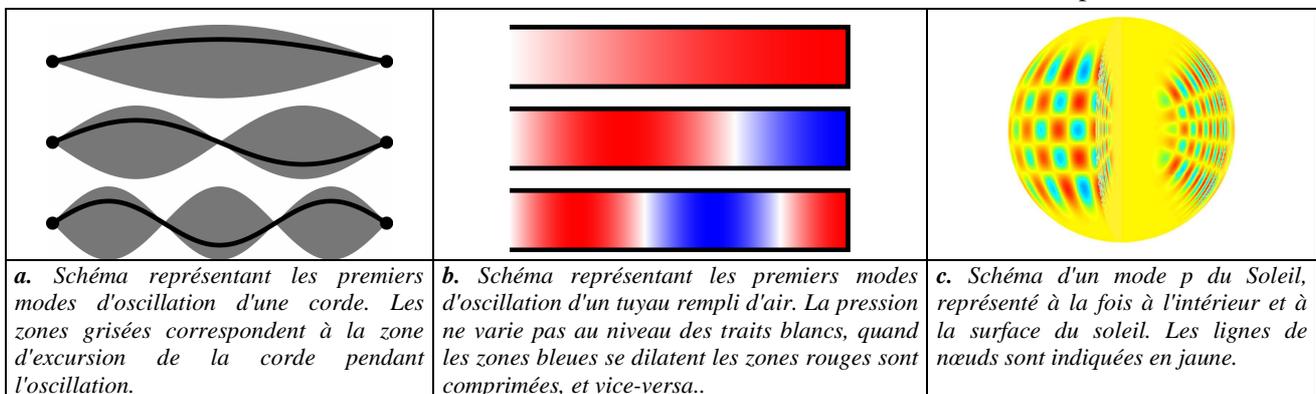


Fig.1. Quelques modes d'oscillation d'une corde, d'un tuyau et du Soleil

On peut faire un calcul approché des fréquences des modes d'une étoile. On obtient alors des relations très similaires à celles trouvées pour la corde et le tuyau. Pour un mode  $p$ , la fréquence d'un mode dépend de  $l$  et  $n$  et vaut  $f_{n,l} \approx \Delta (n + l/2 + \varepsilon)$  où  $\varepsilon$  est une constante voisine de l'unité et  $\Delta$ , appelé *grande séparation*, dépend du rayon de l'étoile et la vitesse du son à l'intérieur de celle-ci (encore une fois, notons l'analogie forte avec les instruments de musique). Il est important de noter que la vitesse du son, dépendant de la température, varie fortement dans l'étoile entre le cœur et la surface. On peut montrer que  $\Delta$  varie comme la racine carrée de la masse volumique moyenne de l'étoile,  $\rho$ . Mesurer  $\Delta$  permet donc de mesurer  $\rho$  !

Pour les modes  $g$ , il existe une relation similaire, mais elles concernent les périodes, et non les fréquences. Les modes  $g$  ont donc un espacement quasiment constant en période,  $P_0$ , qui dépend de la structure des zones radiatives. Nous en reparlerons à la fin de cet article.

On remarque que ces relations ne font pas intervenir  $m$ . Ainsi tous les modes ayant les mêmes valeurs pour  $n$  et  $l$ , mais des valeurs pour  $m$  différentes ont la même fréquence  $f_{n,l}$ . Ceci serait vrai si les étoiles ne tournaient pas. Sous l'effet de la rotation, les fréquences des modes vont être très légèrement modifiées d'autant plus que  $|m|$  est grand et que la rotation est rapide. Cette propriété des modes nous permet de mesurer la rotation interne des étoiles.

Les approximations pour les fréquences données précédemment sont très utiles pour avoir une vision globale d'une étoile, mais on va beaucoup apprendre sur sa structure interne en calculant précisément les fréquences de ses modes.

On remarque sur la figure c que pour un mode donné, certaines régions de l'étoile n'oscillent quasiment pas. Par exemple, pour le mode  $p$  ( $n = 14$ ,  $l = 20$ ,  $m = 16$ ) montré, la région la plus interne n'oscille pas (ou peu). On parle de *cavité* pour décrire la zone où un mode se propage. Ainsi, pour les modes  $p$ , plus le degré  $l$  est faible, plus le mode rentre profondément dans l'étoile. Les modes de plus bas degré, les modes  $l = 0$ , dits modes *radiaux*, pénètrent jusqu'au cœur de l'étoile ; à l'inverse, les modes de haut degré, ne vont explorer que les régions les plus superficielles des étoiles. Les modes  $g$ , eux, ont la particularité de ne pas se propager dans les régions convectives. Ainsi, dans le Soleil (ou toute autre étoile similaire), les modes  $g$  sont

confinés dans la région radiative et ont des amplitudes extrêmement faibles en surface (on dit qu'ils sont *évanescents*). Du fait de ces faibles amplitudes, la détection des modes  $g$  solaires reste aujourd'hui un sujet controversé.

Chaque mode est ainsi sensible à ce qui se passe dans la cavité qu'il explore et sa fréquence en dépend directement. Un des buts de la sismologie va être de comparer les fréquences observées des modes à des prédictions théoriques et d'interpréter les écarts. En effet, puisque chaque mode possède une cavité légèrement différente, on va être capable de localiser l'origine de ces écarts en constatant qu'un mode est plus affecté qu'un autre.

## Pourquoi les étoiles oscillent-elles ?

Dans la section précédente, nous avons décrit comment les étoiles oscillent, il nous reste à comprendre pourquoi. On peut distinguer deux catégories d'étoiles. La première catégorie est celle des étoiles pulsantes. Dans ce cas, l'étoile se met naturellement à osciller selon certains modes spécifiques qui sont instables et les oscillations s'auto-entretiennent. C'est le cas par exemple des céphéides et de nombreuses classes d'étoiles pulsantes comme les  $\delta$  Scuti, ou les  $\beta$  Cephei. Dans des étoiles comme le Soleil, tous les modes sont stables et les oscillations devraient s'amortir très rapidement. Ces étoiles sont comme d'immenses tambours : sans musicien, ils ne peuvent vibrer. Or, on observe des oscillations. Pour expliquer cela, il faut trouver un mécanisme qui joue le rôle de musicien et excite en permanence les modes. Le coupable est la convection. En effet, le Soleil a une zone convective externe. Les grands mouvements de matière qui l'agitent agissent comme la pluie qui tombe sur la peau d'un tambour.

Ce mécanisme est à l'œuvre dans toutes les étoiles avec une enveloppe convective, c'est-à-dire les étoiles assez « froides » comme le Soleil, qu'elles soient naines ou géantes. On parle alors d'*oscillations de type solaire*.

Ce phénomène excite tous les modes qui ont une fréquence proche d'une fréquence  $f_{\max}$  qui dépend des propriétés de la convection. On peut montrer que  $f_{\max}$  dépend de l'intensité de la gravité  $g$  à la surface de l'étoile.

En mesurant à la fois  $f_{\max}$  et la grande séparation  $\Delta$  on peut déterminer  $\rho$  et  $g$  et, en les combinant, on mesure la masse et le rayon d'une étoile très précisément (à quelques pourcents).

## Observer les oscillations

Nous pouvons observer les oscillations des étoiles de deux manières. On peut tout d'abord mesurer les vitesses des déplacements induits par les oscillations à la surface des étoiles en utilisant l'effet Doppler-Fizeau. On peut également mesurer les oscillations en observant la luminosité des étoiles. En effet, lorsqu'une région à la surface se comprime, elle se réchauffe et devient plus lumineuse, et lorsqu'elle se dilate, elle se refroidit et sa luminosité baisse.

À ce stade, il nous faut mentionner une différence notable entre le Soleil et les autres étoiles : on peut résoudre la surface du Soleil et donc en faire des images, alors que la surface des autres étoiles est réduite à un seul point dans lequel est moyennée toute leur surface<sup>1</sup>. Cela a pour conséquence de rendre invisibles les modes de degré  $l$  trop élevé. Si le mode est radial ( $l = 0$ ), toute la surface devient plus lumineuse ou plus sombre en même temps, l'oscillation est parfaitement visible. Si le mode possède une seule ligne de nœud à la surface ( $l = 1$ ), à chaque moment, une partie de la surface visible de l'étoile devient plus lumineuse et l'autre plus sombre, mais, sauf configuration particulière, les deux parties ne recouvrent pas la même proportion du disque visible, et il y a un résidu à la somme des contributions. En revanche, si un mode a beaucoup de lignes de nœuds en surface, les régions visibles qui contribuent à augmenter la luminosité de l'étoile vont être compensées par celles qui, au contraire, diminuent la luminosité. En pratique, on n'observe que des modes de degré  $l = 0, 1, 2$  et parfois  $3$ .

Pour mener des études sismiques, il faut être capable de mesurer des oscillations souvent de très faibles amplitudes et pouvoir déterminer très précisément les fréquences d'oscillation. Pour obtenir une précision suffisante sur les fréquences, il faut observer longtemps et continûment les étoiles : idéalement des semaines, des mois ou des années. Pour s'affranchir de l'alternance jour/nuit qui détériore grandement les observations il existe 3 possibilités : observer depuis l'Antarctique pendant l'hiver austral (cela a été fait pour le Soleil pendant l'été austral 1979), installer autour du globe un réseau d'instruments qui se relaient en continu, ou effectuer les observations depuis l'espace.

<sup>1</sup> Il existe en fait des techniques de spectroimagerie qui dépassent de loin le cadre de cet article.

## La révolution CoRoT et Kepler

La force des diagnostics sismiques ayant été prouvée sur le Soleil, on a naturellement cherché à sonder d'autres étoiles. Faute de pouvoir être exhaustif sur les observations des diverses classes d'étoiles oscillantes, nous allons nous concentrer sur l'étude des oscillations de type solaire qui ont fourni des résultats marquants ces dernières années. Les premières observations non controversées d'oscillations de type solaire – hormis celles du Soleil – ont été faites en 2000, depuis le sol, sur l'étoile  $\alpha$  Centauri A. Mais la véritable révolution est arrivée avec les satellites européen CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires) et américain Kepler, lancés respectivement en 2006 et 2009. Ces deux instruments ont permis d'observer très précisément les fluctuations de luminosité de dizaines de milliers d'étoiles, pendant plusieurs mois consécutifs, voire plusieurs années pour Kepler.

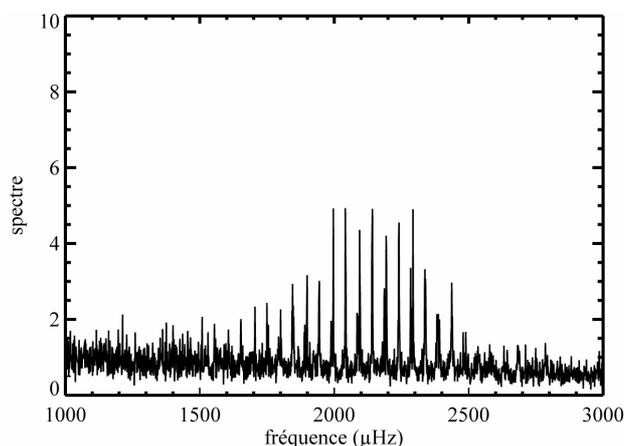
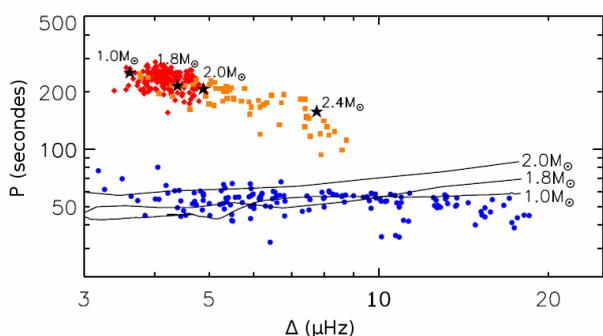


Fig.2. Spectre d'une étoile de type solaire observé par CoRoT.

Une étoile observée par CoRoT est représentée figure 2. Il s'agit de l'analyse spectrale des fluctuations de luminosité mesurées pendant 120 jours. Les pics correspondent à des modes. On voit alternativement des modes  $p$   $l = 0$  et  $l = 1$  (les modes  $l = 2$  sont très proches des modes  $l = 0$ , et ne sont pas discernables à cette échelle). On reconnaît une structure en peigne due à la formule  $f_{n,l} \approx \Delta (n + l/2 + \varepsilon)$ . L'écart moyen entre les pics vaut donc  $\Delta/2$ . Sur cet exemple, on mesure une grande séparation  $\Delta = 98 \mu\text{Hz}$ . On constate également que les modes visibles ont des fréquences autour de  $f_{\text{max}} = 2090 \mu\text{Hz}$ . À l'aide de quelques relations simples, nous en déduisons que cette étoile est 20 % plus massive que le Soleil pour un rayon 30 % plus grand. Outre ces quantités, l'étude détaillée des fréquences – même limitée à celles de modes de bas degrés – nous permet de déterminer la profondeur de l'enveloppe convective,

l'abondance en hélium et la vitesse de rotation interne moyenne. La sismologie nous permet également de voir si une étoile possède un cœur convectif ou non. En effet, les modèles nous montrent que pour les étoiles un peu plus massives que le Soleil, un cœur convectif se développe. La sismologie permet d'affiner les modèles en mesurant la taille du cœur convectif quand il existe.

Pour terminer, il nous faut évoquer un des plus grands succès de la sismologie moderne et une des plus grandes surprises : la sismologie des géantes rouges. Lorsque les étoiles ont épuisé leur réserve d'hydrogène dans leur cœur, elles évoluent pour devenir des géantes rouges : leur cœur se contracte et leur enveloppe, qui est ou devient convective, se dilate. Ces étoiles présentent donc des oscillations de type solaire. Mais il existe une petite différence. Dans une étoile naine comme le Soleil, nous l'avons déjà mentionné, les modes p ont des périodes de quelques minutes. En revanche, les modes g, piégés dans la région radiative, invisibles à la surface, ont des périodes de plusieurs heures. Quand une étoile évolue pour devenir géante rouge, les fréquences des modes p diminuent de plus en plus alors que celles des modes g augmentent. Ainsi, dans les géantes, les modes p et g ne sont pas dans des régimes séparés mais cohabitent aux mêmes fréquences. Cela a une conséquence notable : certains modes d'oscillation ne sont plus de simples modes p ou g mais sont des modes *mixtes* présentant des caractéristiques des deux familles de modes. Ils sont donc visibles en surface (comme les modes p) et très sensibles à l'intérieur radiatif (comme les modes g).



**Fig.3.** Espacement en période des modes g en fonction de la grande séparation des modes p pour des étoiles géantes rouges. On distingue nettement deux types de géantes (points bleus et points rouges/oranges). Les lignes et étoiles noires sont des modèles (d'après T. Bedding).

En étudiant les modes des géantes rouges avec Kepler, il a été possible en 2011 de mesurer à la fois les grandes séparations  $\Delta$  des modes p et les

espacements en période  $P_0$  des modes g. La figure montre les résultats pour une centaine d'étoiles. Deux familles de géantes apparaissent : un groupe d'étoiles avec  $P_0 \approx 50$  s et un second pour lesquelles  $P_0 \approx 200$  s. Le premier correspond aux géantes dont le cœur d'hélium continue à s'effondrer sur lui-même. Le second groupe correspond à des géantes plus évoluées dans lesquelles le cœur d'hélium est devenu suffisamment chaud et dense pour que la fusion de l'hélium en éléments plus lourds soit possible.

Ces mesures sismiques permettent donc clairement de voir si la fusion de l'hélium a commencé dans une géante, chose impossible avec les observations usuelles.

L'étude des modes mixtes dans les étoiles géantes permet également de mesurer la rotation de leur cœur. Puisque le cœur se contracte, par conservation du moment cinétique, il accélère (comme le patineur qui accélère sa rotation en rapprochant les bras de son corps), alors que l'enveloppe, se dilatant, ralentit. Des études sismiques récentes (en 2012 et 2013) ont donné des résultats surprenants. En effet, le cœur des géantes tourne plus vite que leur enveloppe ; mais il tourne beaucoup plus lentement que prévu, des centaines de fois plus lentement que toutes les théories actuelles ne le prédisent ! On se doutait que les théories pour décrire l'évolution de la rotation interne des étoiles étaient incomplètes, preuve en est faite. Les théoriciens cherchent donc aujourd'hui les mécanismes qui pourraient être capables d'extraire et évacuer efficacement une partie du moment cinétique depuis le cœur vers l'extérieur.

Cette question est devenue une question clé pour comprendre l'évolution des étoiles. En effet, la rotation peut induire du mélange dans les étoiles et ainsi transporter des éléments (hydrogène, hélium...) d'une région où ils ne fusionnent pas à une zone où ils peuvent fusionner, ce qui peut modifier notablement l'évolution des étoiles.

L'astérosismologie a connu un véritable essor avec l'avènement de CoRoT puis de Kepler. Les résultats obtenus sur les géantes rouges apportent des contraintes observationnelles qui font progresser notre compréhension de l'évolution stellaire. Dans les années 20, Sir Arthur Eddington se demandait quel instrument allait permettre de voir l'intérieur des étoiles. Cet instrument, nous l'avons aujourd'hui : c'est la sismologie. Pour lever le voile, il suffit de regarder la musique des étoiles. ■