

A l'écoute des étoiles

Pascal Lambert

Service d'Astrophysique, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette.

pascal_lambert@hotmail.fr

Notre vision du Soleil a été révolutionnée lors des 30 dernières années grâce à un nouvel outil : la sismologie solaire (ou héliosismologie). Basée sur l'observation des oscillations agitant la surface de notre étoile, cette technique nous a révélé les secrets de sa structure et la complexité de sa dynamique interne. Un nouveau défi est aujourd'hui proposé aux chercheurs, la sismologie des autres étoiles.

Pascal Lambert est doctorant au Service d'Astrophysique du CEA. Son sujet de thèse porte sur la « Sismologie solaire et stellaire ».

Les termes suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire.

Mais que cache le Soleil sous sa surface ? Pour dévoiler et mettre à nu notre étoile... il suffit de rester à son écoute. En effet, sous son apparente (et trompeuse) tranquillité, le Soleil est secoué par des vibrations provoquées par la propagation d'ondes sonores internes. Leur « écoute » constitue le seul et unique outil des astrophysiciens pour explorer le Soleil (et les étoiles) de la surface au cœur.

Avant de décrire plus en détail cette jeune science qu'est la sismologie des étoiles, arrêtons-nous un instant pour répondre à une question très simple et pourtant essentielle : pourquoi explorer et comprendre le Soleil ? Le Soleil est l'étoile la plus proche de nous. C'est la seule que l'on peut observer en détail. Elle constitue notre « pierre de Rosette » et joue un rôle clé dans notre connaissance de l'évolution stellaire. D'autre part, le Soleil est un laboratoire unique pour étudier et tester des processus physiques dans des conditions irréalisables sur Terre. On comprend donc que son étude soit fondamentale.

Être à l'écoute

Quelle information a-t-on sur l'intérieur du Soleil en l'observant ? On peut mesurer sa température de surface, sa luminosité, et son spectre d'absorption nous renseigne sur sa composition chimique. Mais ces informations ne portent que sur sa surface... Seuls les neutrinos détectés, produits au cœur du Soleil, transportent une information sur les conditions régnant en son centre. Notre vision du Soleil est donc très vite limitée. Le seul outil nous permettant de le sonder en profondeur, en l'épluchant comme un oignon, consiste à utiliser les propriétés de ses modes propres d'oscillations pour obtenir une information sur sa structure et sa dynamique internes. Ces propriétés donnent un accès direct aux grandeurs fondamentales

que sont la masse et le rayon de l'étoile, ainsi que l'inclinaison de son axe de rotation par rapport à l'observateur.

Au début des années 1960, une équipe d'astronomes solaires s'est intéressée à la convection dans la photosphère, par mesure de vitesse Doppler. Ces observations mirent en évidence la présence d'oscillations de la surface solaire, de faible amplitude (quelques cm/s), avec une période d'environ 5 minutes pour le maximum d'amplitude. Il faudra attendre la décennie suivante pour comprendre théoriquement ce phénomène comme la manifestation de la propagation d'ondes sonores dans le Soleil (fig. 1). D'autres observations, d'abord par des télescopes au sol, puis grâce à l'avènement de missions spatiales spécifiques, vinrent confirmer ultérieurement à la fois cette découverte et la théorie *via* la vérification de ses prédictions. Les propriétés des oscillations d'une étoile dépendant des variations des conditions physiques et de ses mouvements internes, la sismologie stellaire offre la possibilité de sonder une étoile de la même manière que les séismes renseignent les géophysiciens sur la structure du globe terrestre.

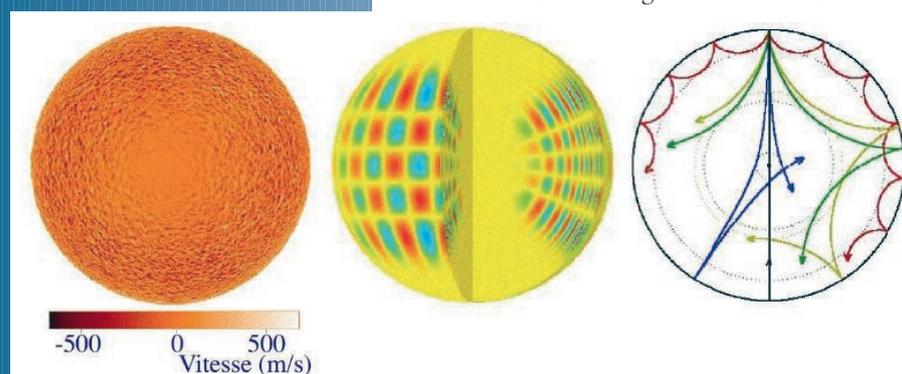
Pourquoi le Soleil oscille-t-il ? Parce que, comme toute autre étoile, il peut être assimilé à une cavité résonnante. Sous l'action d'un mécanisme d'excitation, des ondes γ sont générées et s'y propagent. Pour le Soleil, il s'agit

Figure 1. Vibrations solaires.

Gauche : image Doppler du Soleil prise par l'instrument MDI* à bord de la sonde SoHO*. Cette image a été corrigée de la rotation solaire et de mouvements à grande échelle et permet ainsi de mettre en évidence la granulation agitant la surface solaire et excitant de manière stochastique (aléatoire) les modes acoustiques (de pression).

Centre : simulation en 3 dimensions d'un mode acoustique. Les régions bleues et rouges se déplacent dans des directions opposées ; les régions jaunes correspondent aux zones nodales, où l'amplitude est nulle ou trop faible pour être détectée. L'oscillation associée à un mode propre est caractérisée par 3 nombres entiers : n , l , m . Le degré l et l'ordre azimutal m sont reliés au nombre de lignes nodales à la surface, l étant le nombre total de lignes et m le nombre de lignes passant par les pôles. L'ordre radial n représente le nombre de nœuds le long du rayon. L'oscillation représentée ici correspond à $l = 20$, $m = 16$ et $n = 14$.

Droite : trajectoires de modes acoustiques dans l'intérieur solaire pour différents degrés l . En rouge il s'agit d'une oscillation de degré $l = 15$, en vert $l = 4$, en bleu $l = 3$. On voit bien que les modes de bas degré sont ceux qui pénètrent le plus profondément dans l'étoile, les modes de haut degré visitant les régions les plus extérieures de la zone convective. La mesure des fréquences des oscillations de différents degrés permet ainsi de remonter, par inversion, aux caractéristiques du plasma aux différentes profondeurs.



Ayant un diamètre de 1,4 millions de km, le Soleil « sonne » à des fréquences très basses, autour de 3 mHz, plusieurs dizaines d'octaves en dessous du seuil accessible à l'oreille humaine (environ 15 Hz). Le domaine des modes de gravité, non encore détectés sans ambiguïté, se situe à des fréquences encore plus basses, entre 50 et 500 μHz , ce qui correspond à des périodes supérieures à 40 minutes.

essentiellement de modes acoustiques (de pression). C'est comme pour un instrument de musique, une batterie, par exemple, composée de caisses de différents diamètres. Frappée, chacune va résonner à une fréquence différente en fonction de son diamètre, la grosse caisse sonnait plus grave que la caisse claire. C'est la même chose pour une étoile, sauf que ce sont des milliers d'ondes sonores à autant de fréquences différentes qui sont excitées simultanément.

Il existe différents mécanismes d'excitation des oscillations stellaires, liés soit aux mouvements convectifs à la surface de l'étoile, soit à des sauts du profil d'opacité¹ influençant le transport de l'énergie. Ainsi, différents types d'ondes peuvent être excités et se propager dans une étoile et à sa surface ; ce sont :

- les modes acoustiques, oscillations dont la force de rappel est la pression du gaz. Dans le cas du Soleil (et des étoiles semblables), ces ondes sont générées par de violents mouvements de convection, à l'œuvre dans les couches superficielles, et se traduisent par la granulation observée à la surface (cf. image à gauche de la fig. 1). Ces modes se propagent à travers toute l'étoile, de la surface au cœur, et leur trajectoire est déterminée par les variations de la vitesse du son ;

- les modes de gravité : oscillations dont la force de rappel est la poussée d'Archimède. Très certainement excités par des mouvements à la base de la zone convective, ils sont confinés dans la zone radiative, mais sont évanescents dans la zone convective, ce qui rend leur détection très difficile à la surface où ils atteignent une très faible amplitude (quelques mm/s), noyée dans le bruit solaire. Ceci explique qu'ils ne soient pas encore détectés sans ambiguïté. Leur étude est indispensable pour pouvoir explorer en détail la structure et la dynamique dans le cœur du Soleil, où l'utilisation des modes acoustiques atteint ses limites ;

- les modes « f » : ce sont des modes présentant les mêmes caractéristiques qu'une onde de gravité de surface (comme des vagues). Ils sont utilisés pour sonder les régions les plus superficielles du Soleil.

Les étoiles de type solaire, présentant des oscillations de très faibles amplitudes, nécessitent des observations continues et de longue durée pour sortir un spectre de bonne qualité, avec une résolution et une précision suffisantes.

Au cœur du Soleil

Une fois les fréquences des oscillations solaires mesurées, l'étape suivante consiste à en extraire au mieux l'information contenue sur la structure et la dynamique solaires (fig. 2). Pour

ce faire, il existe différentes techniques, consistant à comparer les fréquences mesurées avec des modèles, puis à corriger ceux-ci pour améliorer l'accord avec les observations.

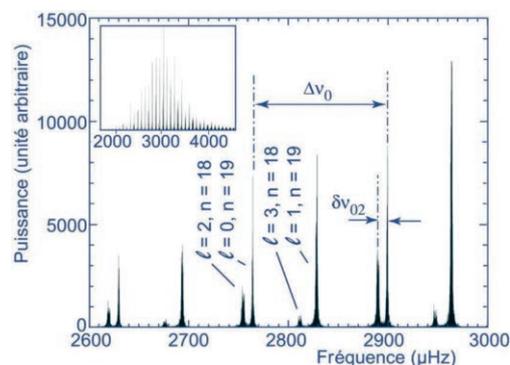


Figure 2. Spectre de puissance des oscillations solaires. Cette figure montre une partie de ce spectre, obtenu en effectuant la transformée de Fourier des variations temporelles de la vitesse Doppler, mesurée sur le disque solaire par l'instrument GOLF* à bord de la sonde SoHO*. Ce spectre n'est constitué que de modes acoustiques de bas degré ($l = 0, 1, 2, 3$). On y aperçoit une structure répétitive, et les intervalles entre les différents pics dépendent des caractéristiques de l'étoile. C'est à partir de ce spectre qu'il est possible de remonter à la structure de l'étoile ainsi qu'à sa dynamique, en particulier sa rotation interne. On peut définir deux grandeurs fort utiles : la grande séparation Δv_0 , différence de fréquence entre deux modes successifs de degré $l = 0$, et la petite séparation δv_{02} , différence de fréquence entre deux modes successifs de degrés $l = 0$ et $l = 2$. La détermination de ces deux grandeurs permet d'obtenir des informations sur les propriétés globales de l'étoile. En effet, la grande séparation est reliée à la vitesse du son dans l'étoile ainsi qu'à sa masse et à son rayon ; la petite séparation informe sur les conditions au cœur de l'étoile, où se produisent les réactions nucléaires et donc où est consommé l'hydrogène, amenant notamment des contraintes sur l'âge de l'étoile. L'encart montre le spectre de puissance étendu du Soleil. La puissance est maximale autour de 3 mHz, c'est-à-dire une période d'environ 5 minutes.

À l'instar de la physique des particules et de la cosmologie, l'évolution stellaire a aussi son modèle standard. Celui-ci offre une description simplifiée (et loin d'être simpliste) de la vie des étoiles, des processus à l'œuvre en leur sein (diffusion chimique, transport de l'énergie), et nécessite l'introduction d'ingrédients physiques (réactions nucléaires, composition chimique). La confrontation avec les observations sismiques a permis d'améliorer les modèles utilisés et leurs prédictions, et de grandement progresser dans notre compréhension du Soleil et des étoiles.

La première contribution de l'héliosismologie a été la détermination de la stratification interne du Soleil (fig. 3). Une des caractéristiques ainsi déterminées fut le profil de vitesse du son (pouvant atteindre plusieurs centaines de km/s) en fonction de la profondeur. Cette quantité dépend fortement des variations des paramètres physiques (température, densité, pression). On a ainsi pu identifier les transitions entre les différentes régions du Soleil, en

1. L'opacité d'un milieu, qui définit sa capacité à absorber le rayonnement, dépend fortement de la composition chimique de ce milieu.

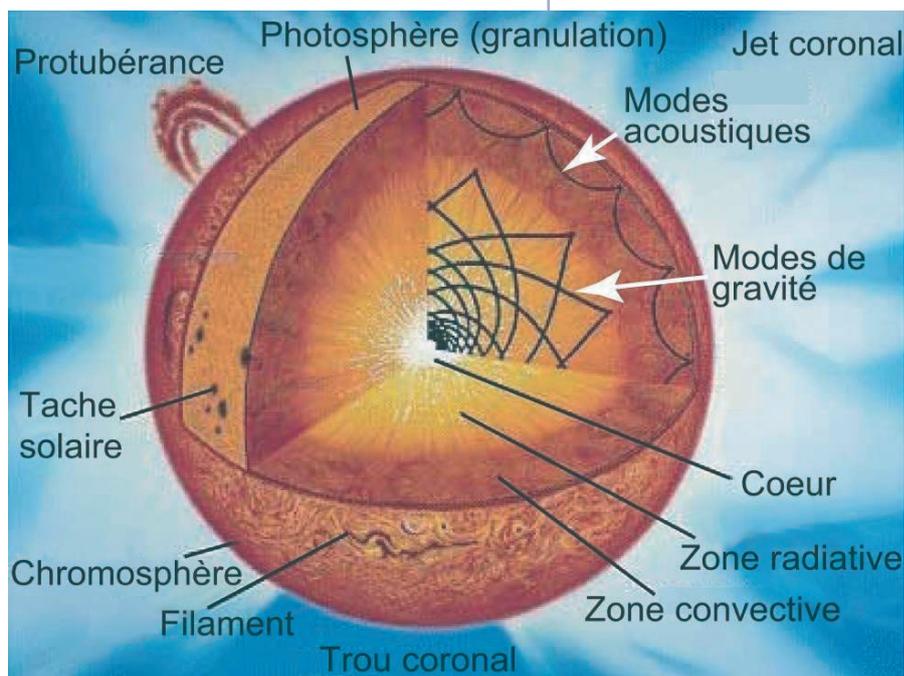
particulier la base de la zone convective, délimitant la région où s'effectue le mélange et l'homogénéisation de la composition chimique (observée à la surface solaire).

Une autre contribution majeure concerne le problème du déficit des neutrinos solaires. Les neutrinos sont particulièrement délicats à détecter, mais l'amélioration des performances des détecteurs terrestres a permis la mesure du flux de neutrinos captés sur Terre. Or ce flux était toujours dramatiquement bas par rapport aux prédictions théoriques du modèle standard du Soleil. L'héliosismologie apporte des contraintes importantes sur les conditions dans le cœur nucléaire du Soleil, auxquelles le flux émis est très sensible (il est proportionnel à la puissance 24 de la température dans le cœur !) et de le prédire. Le déficit observé a été expliqué en découvrant l'existence de l'oscillation entre les trois différents types de neutrinos (l'électronique, le muonique et le tau), auxquels les détecteurs ne sont pas tous sensibles. Cette découverte a mis en évidence la robustesse du modèle solaire et est un excellent test pour l'héliosismologie.

D'autres propriétés du plasma solaire ont pu être testées en détail. Ses propriétés thermodynamiques variant dans les couches externes, l'étude de ces variations a permis de déterminer l'équation d'état et la composition chimique du plasma, notamment l'abondance de l'hélium dans la zone convective (cette abondance ne pouvant être mesurée dans le spectre d'absorption du Soleil). La valeur trouvée était bien plus faible que celle attendue, correspondant à l'abondance lors de la formation du Soleil. Ce déficit a été compris comme résultant d'un processus de sédimentation de l'hélium et des éléments plus lourds au sein de la zone convective vers la zone radiative, à l'œuvre depuis l'apparition du Soleil. Ce mécanisme a pu être introduit dans les modèles d'évolution stellaire et améliorer leurs prédictions. Ainsi, l'âge du Soleil a été contraint très précisément à $4,57 \pm 0,11$ milliards d'années, apportant de fortes indications sur l'âge d'autres étoiles.

Pas si calme que ça

L'héliosismologie a aussi révélé la complexité de la dynamique interne du Soleil, jusqu'alors invisible et inconnue. L'observation de la surface solaire montre qu'il tourne plus vite à l'équateur (en 25 jours) qu'aux hautes latitudes (35 jours), sans que l'on sache comment cette rotation s'établit et évolue avec la profondeur. La sismologie globale (l'utilisation des modes propres de bas degré dont ceux qui se propagent jusqu'au cœur) a permis de répondre à cette question et de déduire le profil de rotation solaire (fig. 4).



Dans la zone convective, la rotation varie principalement en latitude : elle est plus rapide à l'équateur qu'aux pôles, concordant avec la rotation de surface mesurée. Aux moyennes et faibles latitudes, a été découverte une couche superficielle où prend place un cisaillement dû à la rotation différentielle, proposée pour expliquer la migration des taches solaires des latitudes moyennes vers l'équateur. Au contraire, la zone radiative connaît une dynamique toute différente, puisqu'elle présente une rotation *solide* : elle tourne d'un seul bloc. La transition entre ces deux régions se fait près de la base de la zone convective au travers d'une couche de fort cisaillement, la « tachocline ». Cette zone est supposée jouer un rôle important dans le mécanisme de production du champ magnétique solaire *via* l'effet dynamo, dont la compréhension est un des défis actuels de la physique stellaire.

Enfin, malgré ces découvertes, on n'a pas encore accès à la dynamique du cœur solaire, pour laquelle seule l'utilisation des modes de gravité, non encore découverts sans ambiguïté, est nécessaire.

La sismologie globale a offert la possibilité de découvrir les larges mouvements au sein du Soleil comme jamais, mais ne donne pas accès aux mouvements locaux, à plus petite échelle. Il faut alors employer la sismologie locale, technique récente utilisant les modes de hauts degrés, les plus superficiels. Elle a permis de mettre en évidence la présence de nouveaux mouvements entre l'équateur et les pôles (la circulation méridienne). Elle a aussi permis la cartographie en 3D des écoulements locaux dans les couches les plus externes de la zone convective, ou encore de révéler la dynamique sous les taches solaires (fig. 4).

Figure 3. Le Soleil mis à nu. Au centre du Soleil, se trouve le cœur nucléaire qui concentre 50% de sa masse et s'étend sur 0,25 rayon solaire (R_S). Les conditions y sont extrêmes : 15 millions de Kelvin et 150 g/cm^3 ! Elles permettent le déclenchement de réactions de fusion nucléaire libérant l'énergie alimentant l'étoile. L'énergie libérée dans le cœur est transportée jusqu'à la surface. Ce transfert se fait d'abord par rayonnement : c'est la zone radiative, s'étendant jusqu'à $0,7R_S$. Les photons sont absorbés puis réémis par le plasma. Ainsi un photon produit au cœur du Soleil mettra 1 million d'années pour traverser cette région (alors qu'il ne faut que 2 secondes libérée aux neutrinos pour traverser le Soleil). Un gradient de température et de densité très important existe entre le cœur ($1,5 \cdot 10^6 \text{ K}$) et la surface de l'étoile (5800 K). Le profil de composition du plasma solaire est tel qu'à une certaine profondeur les éléments lourds (carbone, oxygène ou azote par exemple) contribuent de manière importante à l'opacité. Celle-ci augmente alors fortement, entraînant une forte augmentation de la chaleur emmagasinée. Pour l'évacuer plus efficacement, un autre moyen de transport entre en œuvre : la convection. La chaleur est alors transférée par des mouvements macroscopiques de matière dans la zone convective. Ces mouvements de convection contribuent à mélanger et à homogénéiser la composition solaire, et se manifestent en surface par la granulation, ce bouillonnement violent et continu qui excite les ondes sonores. C'est grâce à l'héliosismologie que l'on a accès à ces régions inaccessibles de visu.

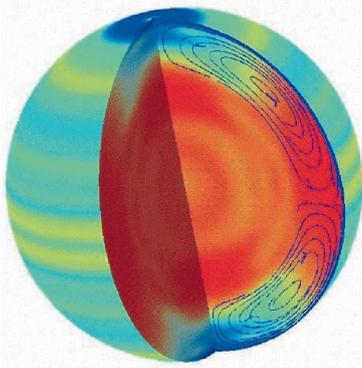
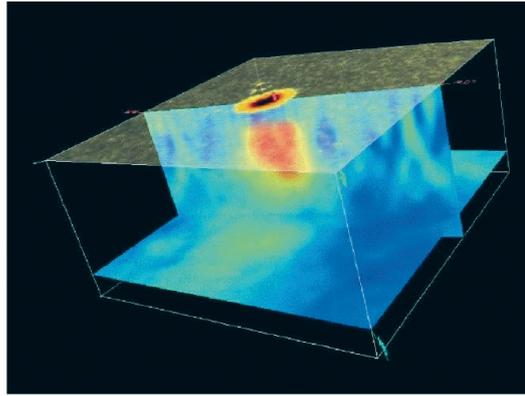


Figure 4. Un Soleil dynamique.

Gauche : la rotation solaire et la circulation méridienne déduites des observations de l'instrument MDI*, mesurant les variations de luminosité solaire à haute résolution, à bord de SoHO*. Les couleurs représentent l'écart avec la rotation moyenne dans le Soleil. Les zones les plus rapides sont en rouge, les plus lentes, en bleu. Les trajectoires bleues fléchées représentent les flots observés se dirigeant vers les pôles dans les couches externes et vers l'équateur au niveau de la base de la zone convective, à la manière d'un tapis roulant et permettant le transport de la matière et du champ magnétique. Cette dynamique est supposée jouer un rôle dans les variations de l'activité magnétique du Soleil.

Droite : cette image illustre les capacités de sondage de l'héliosismologie locale. Elle montre les variations de la vitesse du son sous une tache solaire. Cette cartographie des « dessous » d'une tache atteint une profondeur de 22000 km pour une région recouvrant une surface de 15000 x 15000 km². (Crédits : Kosovichev, MDI/SoHO)



Pas de jalouses

Alors que la sismologie du Soleil connaît son âge d'or, la sismologie stellaire (ou astérosismologie) est encore bien jeune. Bien que la découverte de la pulsation des étoiles remonte à la fin du 18^e siècle (les fameuses « Céphéides », utilisées pour calibrer les mesures de distances galactiques), ce n'est que très récemment, en 2000, que fut confirmée la détection d'oscillations semblables à celles du Soleil dans une autre étoile. Suite aux nombreux succès de la sismologie pour sonder l'intérieur solaire, l'astérosismologie connaît un développement important, avec notamment les missions spatiales MOST*, CoRoT*, ou encore le projet de réseau de télescopes au sol SONG*.

De nombreuses étoiles, couvrant un large spectre de masses, d'âges, de stades d'évolution, sont maintenant connues pour présenter des oscillations. Le défi est de pouvoir mesurer leur spectre d'oscillations avec suffisamment de précision et de résolution pour en déduire la meilleure information sur leur structure et les processus physiques qui les habitent. Une meilleure connaissance de l'évolution stellaire passe nécessairement par le sondage et l'exploration des différents types d'étoiles dans leurs différents stades d'évolution. Cela revient à balayer les populations d'étoiles dans le diagramme HR (fig. 5), puisque la vie et les processus physiques au sein des étoiles diffèrent en fonction de leur position sur ce diagramme.

L'astérosismologie permet et permettra, à n'en pas douter, de faire de nouvelles avancées dans notre compréhension de la vie des étoiles et par conséquent de notre univers. Mais la qualité de l'information obtenue possède des limites et des contraintes assez fortes. En effet, on ne peut pas observer les étoiles comme on observe le Soleil, c'est-à-dire sur de longues durées (de quelques mois à quelques années), en continu et en détail. Leur observation est limitée à la fois en résolution spatiale (on n'a accès qu'aux modes globaux) et en résolution

fréquentielle (on ne peut atteindre la précision obtenue pour le Soleil).

À titre d'exemple, pour mesurer les modes d'oscillations d'une étoile de type solaire, il est demandé au satellite CoRoT d'observer cette étoile pendant 150 jours, avec un seuil de 0,6 ppm en photométrie. La mission Kepler de la NASA, prévue pour 2008, pourra observer un même champ pendant 4 ans, ce qui permettra d'atteindre une résolution « presque solaire ». Les réseaux de télescopes fonctionnant depuis le sol, utilisant les mesures Doppler, devraient pouvoir atteindre une très bonne résolution, leur gros inconvénient étant leur faible cycle utile, à moins d'effectuer les observations en Antarctique (projet en discussion).

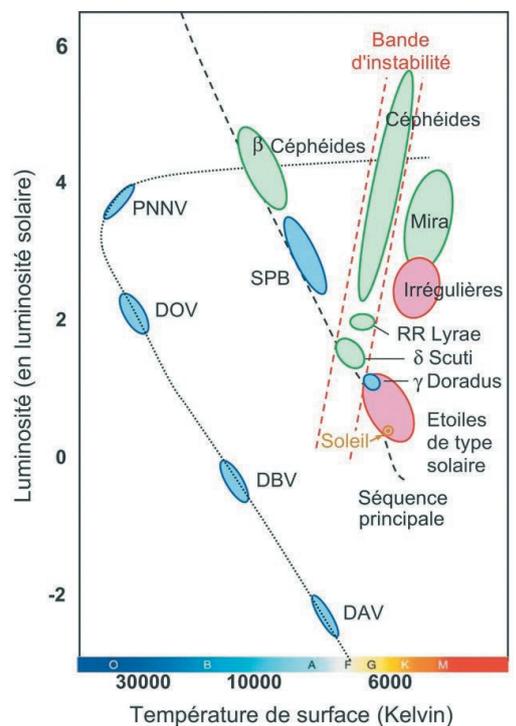


Figure 5. Diagramme de Hertzsprung - Russel (HR) des étoiles oscillantes.

Le diagramme HR classe les étoiles en fonction de deux paramètres observables, leur température de surface et leur luminosité. La position des différents types d'étoiles oscillantes y est illustrée. Les couleurs représentent les différents types d'oscillations attendues : en bleu et en vert, ce sont des modes, respectivement acoustiques et de gravité, déclenchés par un mécanisme de piston (« mécanisme kappa ») lié à un saut du profil de l'opacité qui influence le transfert de l'énergie ; en rouge, ce sont les modes acoustiques excités par les mouvements turbulents de convection à la surface, comme pour le Soleil. La bande d'instabilité est une région où des oscillations de grande amplitude sont entretenues par le mécanisme kappa. La ligne en tirets représente la « séquence principale », phase durant laquelle les étoiles consomment l'hydrogène de leur noyau, le transformant en hélium. Les étoiles y sont dans un état stable et leur structure change à cause de la lente modification de leur composition chimique. Les étoiles passent ainsi la plus grande partie de leur vie sur la séquence principale. En dehors de celle-ci, les étoiles sont au début ou à la fin de leur vie. La région des Mira correspond à la branche des « géantes rouges ». La ligne pointillée représente l'évolution des « naines blanches » lors de leur refroidissement. (D'après Christensen-Dalsgaard).

Et maintenant...

L'exploration sismique du Soleil nous a révélé la complexité de son intérieur, et notre vision en a été révolutionnée. De nouvelles questions se posent aux astrophysiciens pour comprendre la dynamique stellaire. Les nombreuses missions programmées pour la prochaine décennie (SDO* (2008–2013), Picard* (2008–2011), CoRoT* (2006–2009), DynaMICS*...) permettront de s'attaquer à de nouveaux défis et objectifs : suivre l'évolution de la dynamique interne du Soleil, comprendre l'origine de l'activité solaire (et stellaire) et son

impact sur la Terre et son environnement... En bref, atteindre une vision complète et dynamique du Soleil, du cœur aux taches solaires. L'astérosismologie, quant à elle, constitue une nouvelle étape nécessaire pour comprendre la vie mouvementée des étoiles. Il est certain que les années à venir nous réservent bien des surprises et de nouvelles interrogations. Restez à l'écoute ! ■

Remerciements

L'auteur remercie Rafael A. García, Roland Lehoucq et Sylvaine Turck-Chièze pour leurs commentaires.

Glossaire

- **CoRoT** : mission spatiale du CNES d'observation des oscillations stellaires et de détection d'exoplanètes. Fruit de la collaboration de laboratoires français, européens et brésiliens, son lancement est prévu pour décembre 2006.
- **DynaMICS** : projet spatial international et dédié à l'étude de l'évolution à long terme des propriétés globales et dynamiques (rotation, magnétisme) du Soleil.
- **GOLF** : à bord de SoHO, instrument d'observation des oscillations globales (intégrées sur le disque solaire) en mesurant la vitesse Doppler de la raie du sodium.
- **MDI** : mesure la vitesse et le champ magnétique dans la photosphère pour étudier la zone convective.
- **MOST** : microsatellite canadien d'astérosismologie. En service depuis 2003, il est la première mission réussie dédiée à l'observation des oscillations stellaires.
- **Picard** : mission menée par le CNES de mesure du diamètre, de la forme, de la radiance du Soleil, et de leur variabilité.
- **SoHO** : fruit de la collaboration entre les agences spatiales européenne (ESA) et américaine (NASA), SoHO vient de fêter ses 10 ans de services exceptionnels par la richesse et la variété de ses observations du Soleil et de son environnement proche.
- **SONG** : projet de réseau de télescopes au sol pour effectuer des observations d'astérosismologie.

Webographie

- *Le Soleil et la sismologie au Service d'Astrophysique du CEA* : <http://www-dapnia.cea.fr/Sap/Activites/Science/Soleil/index.html>
- *Le Soleil à l'Observatoire de Paris* : <http://www.lesia.obspm.fr/soleire/sciences/sciences.html>
- *La mission CoRoT* : <http://smc.cnes.fr/COROT/Fr/>
- *Le Soleil vu par SoHO* : <http://soho.nascom.nasa.gov/>
- *Le cours de J. Christensen-Dalsgaard sur la sismologie des étoiles* (en anglais) : <http://astro.phys.au.dk/~jcd/oscilnotes/>
- *Le cours de B. Mosser sur la sismologie et la structure des étoiles* (en français) : <http://media4.obspm.fr/public/DEA/supports/supports.html>
- *Une revue sur la sismologie locale* : <http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2005-6/>
- Voir aussi : *L'acoustique du Soleil*, par R.A. García et S. Couvidat, dans *Le monde des sons*, 2001, Dossier n°32 de *Pour la Science*.