

# L'héliosismologie

Le Soleil est un gigantesque instrument de musique, à l'intérieur duquel des ondes acoustiques se propagent dans toutes les directions. Ces ondes, piégées dans le volume de la sphère solaire, entrent en résonance pour former des modes propres comme le fait le son dans un tuyau d'orgue. Leur partie visible (optiquement) à la surface constitue une mine d'informations sur les diverses parties du volume dans lequel elles ont voyagé, y compris la région la plus centrale, le coeur nucléaire. C'est l'étude détaillée de ces ondes acoustiques à la surface visible du Soleil qui permet d'en sonder l'intérieur, et ce d'autant plus finement qu'elles ne mettent qu'une heure à franchir la distance entre le coeur et la surface alors que les photons issus du coeur, absorbés et ré-émis une multitude de fois, ont besoin de centaines de milliers d'années pour parvenir à la surface.

Le Soleil est une étoile assez banale, comme il en existe des milliards d'autres dans notre Galaxie. Mais situé presque un million de fois plus près de nous que les quelques étoiles les plus voisines parmi ces milliards d'autres, il représente un laboratoire privilégié pour l'étude détaillée de la structure et de l'évolution des étoiles en général. Pourtant il a fallu attendre la fin du  $xx^e$  siècle et l'avènement de l'héliosismologie, en parallèle avec les mesures des neutrinos issus de son coeur thermonucléaire, pour que la connaissance que l'on a aujourd'hui de sa structure interne repose sur des observations « in situ » et pas uniquement sur une modélisation à partir de ce que l'on peut en voir à la surface. Episode très récent donc de l'histoire de la physique solaire, l'héliosismologie s'est développée de façon fulgurante il y a une vingtaine d'années. En fait, elle s'apparente plus à l'écoute de la musique qu'à notre perception habituelle de la sismologie comme liée à des séismes plus ou moins dévastateurs. Il n'y a en effet pas de séismes dans le Soleil, mais un bouillonnement permanent d'une partie de son volume, juste sous la surface, qui fait suffisamment de bruit pour faire entrer en résonance un grand nombre de modes propres de cette sphère presque parfaite, un peu comme le ferait du vent avec les tuyaux des grandes orgues de Notre Dame de Paris si on les sortait sur le parvis.

Poussons un peu plus loin le parallélisme musical. Supposez que vous écoutiez sans le voir un orchestre symphonique. Songez à la richesse d'information pratique que vous pouvez retirer de cette écoute, concernant l'orchestre lui-même, ses divers instruments et musiciens, leur nombre, leur distribution sur l'estrade, leurs éventuels petits défauts, leur accord plus ou moins parfait, et concernant la musique jouée, son compositeur, l'œuvre elle-même, en si bémol mineur ou en fa majeur, allegro, andante ou autre, etc. Vraiment beaucoup d'information en trois minutes d'écoute. Remplacez maintenant l'orchestre par le Soleil, vos oreilles

par un « héliosismomètre », et votre culture musicale par un peu de connaissance de la transformation de Fourier et de la physique des étoiles. La comparaison devient quasiment parfaite point par point. Il existe néanmoins une différence majeure, hormis le piètre talent de compositeur de notre étoile favorite. C'est la fréquence moyenne de la musique solaire, environ 100 000 fois plus « grave » que celle de vos musiques favorites. Comme si vous passiez un vieux disque vynile 33 tours à vitesse très réduite, d'un tour à l'heure seulement. La quantité et le niveau de détail des informations que vous allez en déduire sur tout l'intérieur de « l'orchestre Soleil » sont en tous points comparables à celles acquises sur l'orchestre lui-même. Mais votre disque passé à un tour à l'heure est si lent que son écoute va vous prendre beaucoup de temps, plusieurs mois au lieu de quelques minutes !

Voilà, vous avez la problématique de l'héliosismologie : la très longue durée des mesures nécessitée par la lenteur de l'instrument Soleil, elle-même due à ses dimensions colossales.

Bien entendu, ces mesures doivent être ininterrompues. Si vous ne mesurez que le jour pour dormir la nuit, l'équivalent musical consiste à éteindre votre amplificateur chaque seconde pendant une demi seconde. Essayez...

Pourquoi parler de sismologie puisque les ondes exploitées sont de nature musicale et qu'il n'est pas question de séismes ? Simplement parce que le bénéfice, tout comme en sismologie terrestre, est une meilleure connaissance des couches internes invisibles du Soleil, et aussi parce que les méthodes mathématiques utilisées dans ce but ont été largement empruntées aux sismologues géophysiciens. Mais il existe aussi une autre raison, les ondes acoustiques qui justifient la comparaison musicale (et dont la force de rappel est la pression, raison pour laquelle les modes propres s'appellent des modes  $p$ ) ne sont pas les seules à pouvoir se propager et entrer en résonance dans l'intérieur du Soleil. Il

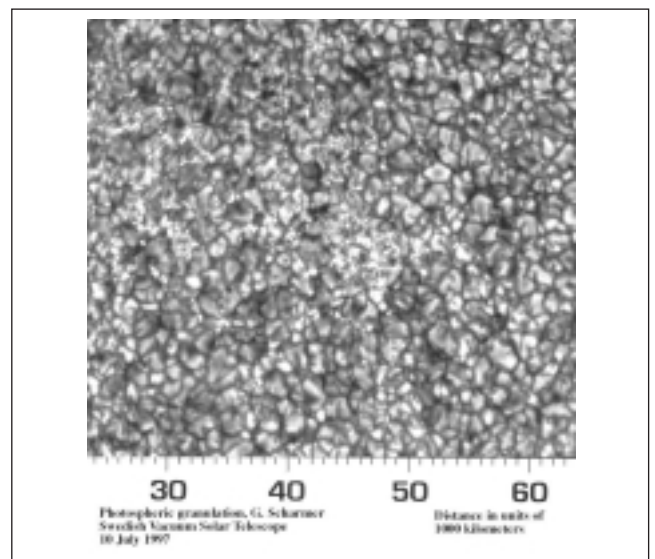


**Figure 1** - Premier instrument astronomique à avoir fonctionné avec succès au Pôle Sud géographique en Décembre 1979, cet héliosismomètre, qui ne portait pas encore ce nom, alimenté par un petit télescope ayant l'originalité d'être à la fois équatorial et azimutal, a pour la première fois permis l'identification de fréquences individuelles des modes propres du Soleil. Équipé d'une cellule à résonance optique de sodium, il est l'ancêtre des futurs instruments du réseau IRIS et de l'instrument spatial GOLF.

doit aussi exister des ondes de gravité, fournissant par résonance des modes  $g$ , dont la force de rappel est la poussée d'Archimède. Plus lentes et plus profondes, elles sont aujourd'hui non encore détectées car d'amplitude beaucoup plus faible en surface. Mais elles sont activement traquées par les instruments modernes car elles fourniraient sur l'extrême cœur solaire, là où les ondes de pression perdent une partie de leur pouvoir de diagnostic, une précision d'information encore inaccessible et donc fort précieuse. D'ailleurs les oscillations détectées à la surface du Soleil n'ont pas immédiatement été identifiées comme des ondes sonores. Quand elles ont commencé à l'être, c'est leur pouvoir d'investigation des couches convectives situées sous la surface qui a naturellement forcé le parallélisme avec la sismologie.

Le Soleil, en effet, est un instrument de musique assez particulier. Non seulement par ses dimensions, mais aussi par ses conditions physiques. Sa température centrale est de l'ordre de 15 millions de degrés, elle est entretenue par la fusion nucléaire qui transforme lentement l'hydrogène en hélium. A la surface, elle n'est plus que de 5 700 degrés environ, traduisant simplement un équilibre entre la chaleur qui vient de l'intérieur profond et celle qui s'évacue vers l'extérieur sous forme de rayonnement visible. Dans le

cœur thermonucléaire (25 pourcent du rayon, environ 50 pourcent de la masse) la température chute de 15 à 7 millions de degrés en s'éloignant du centre. Elle continue à baisser ensuite jusque vers 2 millions dans une couche stable, dite radiative car la chaleur ne fait que s'y propager de l'intérieur vers l'extérieur sous forme de rayons gamma et X. Vers 70 pourcent du rayon, la température a suffisamment baissé pour que certains noyaux d'atomes soient devenus capables de garder un ou quelques électrons, ce qui rend la matière beaucoup plus opaque. L'opacité freine le transfert radiatif, et l'accumulation de chaleur qui en résulte localement déstabilise le plasma, la chaleur s'évacuant alors par convection dans les derniers 30 pourcent. Notons que cette convection ne se contente pas de transporter la chaleur vers la surface. Puisqu'elle concerne un plasma de l'ordre du million de degrés, elle est également source des champs magnétiques qui donnent naissance, en émergeant à la surface, aux tâches solaires bien connues et dominant tout le comportement du plasma dans l'atmosphère solaire. Vue en lumière blanche, la surface montre clairement le dernier étage de la cascade de cellules convectives, ces granules ayant une dimension de l'ordre du millier de kilomètres (figure 2).



**Figure 2** - Ces cellules convectives visibles à la surface du Soleil sont bryantes comme l'eau qui bout dans une casserole. Elles sont la source d'énergie principale des ondes sonores qui forment les modes propres chers aux héliosismologues. Echelle en milliers de kms, le rayon du soleil faisant environ 700 000 km.

C'est au début des années 60 que Bob Leighton, en Californie, avait découvert l'existence d'oscillations de faible amplitude à la surface du Soleil, qui ressemblaient à s'y méprendre à des vagues sur la mer, avec leur régularité et aussi leurs irrégularités. Les vagues sur la mer étant dues à la poussée d'Archimède et non à la compressibilité de l'eau, cette ressemblance a eu pour conséquences un délai assez long entre la découverte et l'identification du phénomène. Ce n'est qu'une dizaine d'années plus tard que Roger Ulrich d'un côté, Bob Stein et John Leibacher de l'autre, suggèrent que l'on pourrait ne voir que la partie émergée d'un ice-

### Que mesurent les héliosismomètres

Les ondes acoustiques solaires sont imperceptibles à nos oreilles pour deux raisons : leur fréquence infiniment trop grave et leur incapacité à se propager dans le quasi vide interplanétaire. C'est donc optiquement que les héliosismologues « écoutent » la musique solaire. Ils ont pour cela deux méthodes.



Figure 1 - Exemple d'harmonique sphérique déformant la surface du Soleil, l'échelle des déformations étant ici amplifiée par un facteur de l'ordre de 10 millions.

Les ondes sonores qui viennent de l'intérieur se réfléchir à la surface y provoquent des mouvements du gaz pratiquement verticaux (voir leurs trajectoires figure 2) qui sont détectables au moyen de leur effet Doppler sur les raies spectrales de la lumière solaire. Les bosses et les creux de la figure 1 s'inversent toutes les deux ou trois minutes, et c'est ce mouvement qui est détecté par imagerie sensible à l'effet Doppler. Les amplitudes sont infimes, mesurées en cm/s pour chaque mode propre indétectable, mais cependant détectables au moyen de spectrophotomètres spécialisés. Ce sont surtout des instruments à

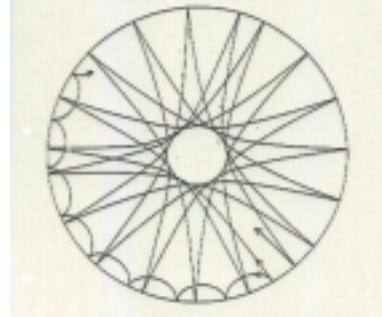


Figure 2 - Les trajectoires des ondes sonores piégées dans le Soleil dépendent du degré du mode, qui représente le nombre de réflexions à la surface. Les modes de très bas degré sont ceux qui pénètrent le plus profondément, jusque dans le cœur thermonucléaire.

résonance optique (à vapeur de sodium ou de potassium) qui ont été utilisés pour les mesures intégrées sur tout le Soleil (figure 5) alors que les mesures détaillées sur des images de la surface utilisent plutôt des instruments de type interférométrique, spectromètres à transformation de Fourier.

D'autre part, les ondes de pression étant par nature des oscillations entre compression et dilatation locale, ces oscillations engendrent des variations de température (le gaz comprimé s'échauffe alors qu'il se refroidit en se dilatant), qui sont détectables sous forme de variations de luminosité. Les amplitudes sont tout aussi infimes que celles de la vitesse et se mesurent en ppm (parties par million). Ces mesures photométriques sont généralement réservées aux instruments spatiaux qui s'affranchissent des fluctuations atmosphériques, et aux étoiles autres que le Soleil sur lesquelles la spectroscopie est inefficace faute de lumière suffisante.

berg qui serait constitué de modes propres non radiaux d'ondes acoustiques qui effectueraient l'essentiel de leur trajet à l'intérieur, dans les couches convectives et invisibles sous la surface. Cette idée apparut fort séduisante en raison justement de l'opacité du plasma solaire, qui rend invisible tout son intérieur, quelle que soit la longueur d'onde optique envisagée. La connaissance du modèle solaire dans la zone convective (et même dans tout le volume intérieur) reposait uniquement sur des bases théoriques. La théorie de la convection est extrêmement difficile et généralement très simplifiée, souvent ramenée à un seul paramètre vertical, la « longueur de mélange » locale. De plus ces couches de l'intérieur solaire étant sujettes à une rotation différentielle bien visible en surface mais inconnue en profondeur et intimement liée au phénomène de convection, le modèle solaire était suspect d'imprécision dans cette région. L'idée qu'un accès de type sismologique puisse être fourni par les ondes de surface a très vite mobilisé une partie grandissante de la communauté des physiciens solaires.

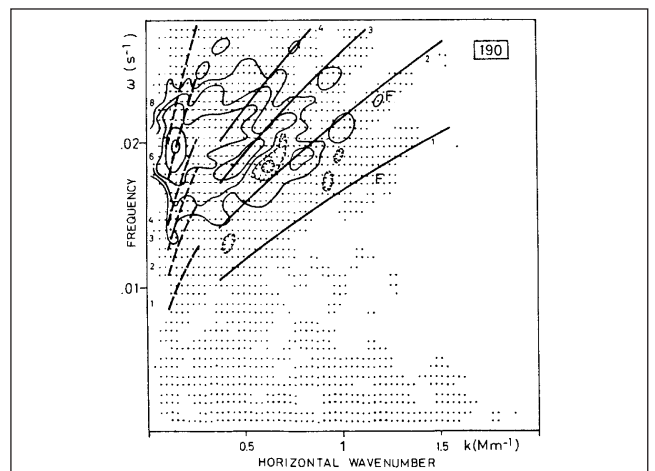
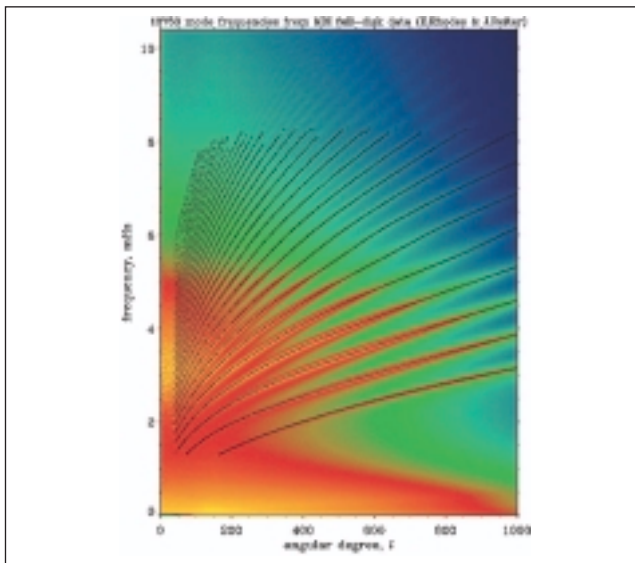


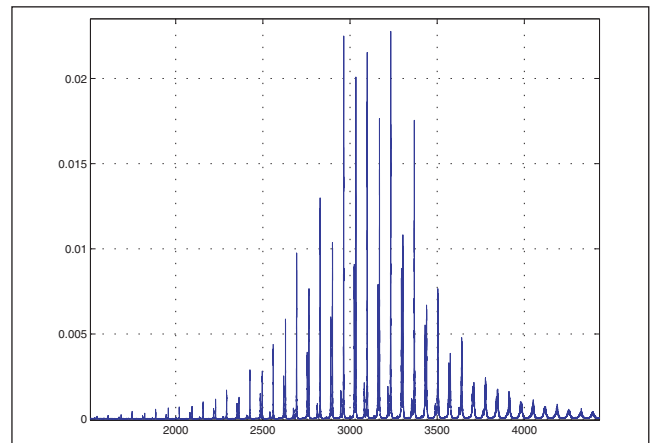
Figure 3 - Publiée en 1975 par Deubner, cette figure historique est une densité spectrale spatiotemporelle des oscillations de la surface solaire. Elle mettait pour la première fois en évidence la structure discrète de la distribution d'énergie, apportant la preuve de l'existence de modes propres non radiaux. La fréquence temporelle était à l'époque exprimée en fréquence circulaire  $\omega = 2\pi\nu$ , où  $\nu$  est la fréquence des autres figures, en mHz.



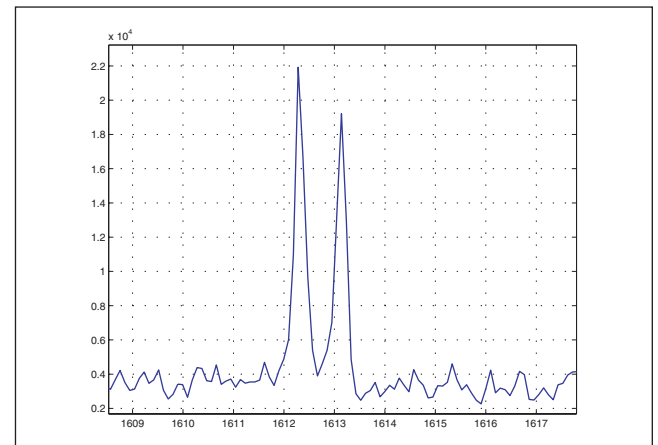
**Figure 4** - 25 ans après la publication de la figure 3, cette densité spectrale bidimensionnelle, désormais affichée en terme de degré des modes propres et non plus en terme de fréquence spatiale, a été obtenue au moyen de plusieurs années de données spatiales, celles de l'instrument M.D.I. à bord de la sonde SOHO. La résolution obtenue dans les deux directions permet non seulement de mieux résoudre les lignes discrètes de distribution d'énergie, mais également les modes individuels à l'intérieur de chacune des lignes. Ces modes se comptent en millions et leur inversion permet d'atteindre une précision auparavant inimaginable sur le modèle d'intérieur solaire.

Des mesures d'oscillations sur le Soleil tout entier, traité comme une étoile sans résolution, avaient déjà été couronnées de succès deux ans plus tôt à Nice par Fossat et Ricort. Il fallut pourtant attendre quelques années de plus pour comprendre que les modes propres détectés par Deubner n'étaient qu'une partie d'un spectre beaucoup plus large. L'orchestre Soleil semblait en fait remplir tout le volume disponible, et pas seulement des cavités limitées sous la surface. En termes plus scientifiques, les harmoniques sphériques détectables semblaient comprendre aussi les très faibles degrés, peut-être même les modes radiaux eux-mêmes, donnant alors un accès sismologique à des couches bien plus profondes qu'initialement envisagé après les mesures de Deubner. Il fallait, pour pouvoir les détecter et les identifier, non seulement mesurer la plus grande partie possible de la surface solaire, mais la mesurer le plus longtemps possible, les 12 heures d'une journée d'été étant nettement insuffisantes.

Il se trouve que cette époque coïncidait avec celle de l'augmentation de précision des mesures du flux des neutrinos, ces particules fantomatiques directement issues du cœur thermonucléaire du Soleil. Le déficit du flux mesuré par rapport au flux prédit par les physiciens à partir du « modèle standard » du Soleil jetait la suspicion sur ce modèle. Dans ce contexte, l'espoir de voir l'héliosismologie apporter de l'information non seulement sur les couches convectives proches de la surface, mais également sur le cœur lui-même, allait jouer un grand rôle dans le développement rapide de nombreux projets d'observation héliosismique, au sol et dans l'espace, au début des années 80.



**Figure 5** - A bord de la sonde spatiale SOHO, l'instrument GOLF, au moyen de 7 ans de données très semblables à celles de son ancêtre du Pôle sud, a permis d'obtenir cette densité spectrale à très haute résolution et très faible



**Figure 6** - Ce détail de l'un des petits pics visible tout à fait à gauche de la figure 5 montre la décomposition rotationnelle en un doublet de la fréquence d'un mode dipolaire (degré 1). Les amplitudes de chaque composante sont de l'ordre de 6 mm/s, et la mesure de leur écartement fournit une intégrale de la vitesse de rotation entre la surface et l'intérieur du cœur, jusqu'à une distance d'environ 0.15R du centre du Soleil. La limite de détection fiable des pics individuels est de l'ordre de 2.5 mm/s et se situe entre 1.1 et 1.2 mHz.

### Si le soleil est instrument et interprète, qui compose ?

Il n'y a pas de séismes dans le Soleil comme on les connaît sur Terre, et la musique solaire y est présente en continu et non pas de façon spasmodique. Les ondes acoustiques semblent y être excitées en permanence. Deux mécanismes d'excitation possibles sont longtemps restés en compétition, et c'est finalement l'excitation par la turbulence convective qui s'est avérée être l'effet dominant. Il n'en reste pas moins qu'une petite contribution du Kappa mécanisme existe bel et bien. Les deux mécanismes sont en effet susceptibles de fournir de l'énergie acoustique dans le bon domaine de fréquences, spatiales et temporelles. Le Kappa mécanisme est un « amortissement négatif » engendré par

## Avalanche de projets dans les années 80

*Le développement de programmes d'observation ayant abouti à la naissance de l'héliosismologie est un processus continu démarré en 1960. Grâce à l'énigme du déficit du flux de neutrinos, l'engouement pour cette science naissante s'est développé très rapidement. Les missions au Pôle Sud allaient, par leur médiatisation facile, aider ce développement, en fournissant rapidement des résultats à la hauteur des espérances concernant les modes de faible degré et même au delà des espérances concernant la rotation interne. Les trois principaux projets de réseaux réussissaient alors à trouver un financement. GONG, l'américain, était consacré aux mesures en imagerie alors que les deux européens, IRIS et BiSON, effectuaient des mesures en Soleil intégré et se préoccupaient plus particulièrement de la structure interne profonde. En parallèle des instruments spatiaux étaient rapidement proposés pour s'affranchir*

*plus efficacement de toutes les limitations terrestres. Lancé fin 1995, l'observatoire solaire SoHO, pierre angulaire de l'ESA, entrainé en fonction au printemps 1996 avec ses deux instruments européens non imagés (GOLF en vitesse et VIRGO en intensité), LOI en imagerie partielle et l'instrument américain MDI en imagerie à haute résolution. Perdu en 1998 sur une erreur de manoeuvre, SoHO était récupéré au point de Lagrange L2 quelques mois plus tard, exploit technique remarquable des ingénieurs de la NASA. Ses instruments continuent de fonctionner aujourd'hui avec des performances qui ne se dégradent qu'assez lentement pour justifier le prolongement de la mission. Si la base de données des réseaux reste plus longue que celle de SoHO, la qualité des données des instruments spatiaux est évidemment supérieure et c'est essentiellement sur ces dernières que reposent désormais toutes les analyses.*

un gradient local important d'opacité, par exemple à la température d'ionisation de l'Hélium. Dans cette région assez proche de la surface, ce mécanisme est localement actif et contribue un peu, bien que discrètement, à la musique observable de l'extérieur. Le bouillonnement convectif des granules est néanmoins le mécanisme d'excitation principal : il a, au voisinage de la surface, un temps caractéristique de quelques minutes et une dimension de l'ordre de 1 500 kilomètres (figure 2) dans toutes les directions, qui correspond à une demi longueur d'onde pour des périodes de l'ordre de 5 minutes sachant que la vitesse du son à la surface solaire est de l'ordre de 7 à 8 km/s. L'interaction turbulence-convection joue en fait simultanément le rôle d'excitation et un rôle d'amortissement des modes propres. Elle explique globalement assez bien la distribution des amplitudes et des largeurs des pics sur tout le spectre de Fourier.

## Résultats d'inversions : le modèle solaire

25 ans d'efforts de la communauté internationale ont fourni une précision dans la connaissance de la structure interne du Soleil qui ne semblait pas imaginable au début des années 80. Le premier résultat spectaculaire a été le gain d'environ deux ordres de grandeur sur la localisation du fond de la zone de convection. Évalué à 10 pourcent près il y a 30 ans, le rayon de sa base est aujourd'hui connu avec 3 décimales : 0.713. Cette contrainte sismique sur les modèles physiques est très sévère, puisqu'elle exige une précision meilleure que 0.5 pourcent sur l'opacité du gaz dans la région radiative sous-jacente. Une telle précision sur le calcul de l'opacité d'un plasma à des millions de degré est exigeante. C'est l'incertitude sur l'abondance des éléments lourds qui limite la précision sur l'opacité, et il a fallu imaginer cette abondance stratifiée, par une lente sédimentation allégeant les couches les plus hautes, pour améliorer l'accord.

Plus profondément dans l'intérieur du cœur lui-même, le temps très limité que les ondes sonores passent à le traverser entraîne une faible contribution de sa structure à leur fréquences. Il a fallu beaucoup de patience, jusqu'à obtenir par l'amélioration statistique une très grande précision dans la mesure de ces fréquences, pour contraindre le modèle dans cette région. Mais la patience a été récompensée par la résolution définitive de l'énigme des neutrinos. La précision atteinte est maintenant telle qu'elle a permis d'exclure les éventuels processus de diffusion qui auraient pu réconcilier le flux de neutrinos mesuré et le flux calculé en diminuant un peu la température centrale du modèle. La réconciliation est aujourd'hui hors des barres d'incertitude, et seule l'oscillation des neutrinos entre plusieurs états de saveur leptonique pendant leur trajet de 8 minutes du Soleil à la Terre permet d'expliquer la différence. Le rôle de l'héliosismologie dans cette solution a été essentiel, et il est parfois utile de le rappeler à certains non sismologues.

L'accord entre Soleil sismique et modèle est maintenant excellent (figure de l'encadré 3). Il était de quelques pourcent quand les premiers modèles sismiques exploitables sont apparus il y a une quinzaine d'années. Il ne reste aujourd'hui que deux couches qui résistent à ce bon accord. Ce sont la couche de transition radiation-convection, baptisée tachocline, et les tout derniers pour-cent du rayon sous la surface. Il se trouve que ce sont les deux régions où le champ magnétique joue certainement un rôle important, et qui sont donc les plus imprécises dans les modèles puisqu'il n'existe pas encore de théorie totalement satisfaisante de l'effet dynamo.

Sous la surface, l'héliosismologie en imagerie à haute résolution (M.D.I.) a permis de développer de nouvelles méthodes d'investigation, encore une fois tirées de l'expérience des géophysiciens, qu'on appelle temps-distance, et qui s'apparentent à l'échographie. L'imagerie sismique directe des couches comprises entre la surface et environ 2 pourcent du rayon à l'intérieur est devenue possible, et des

## Encadré 3

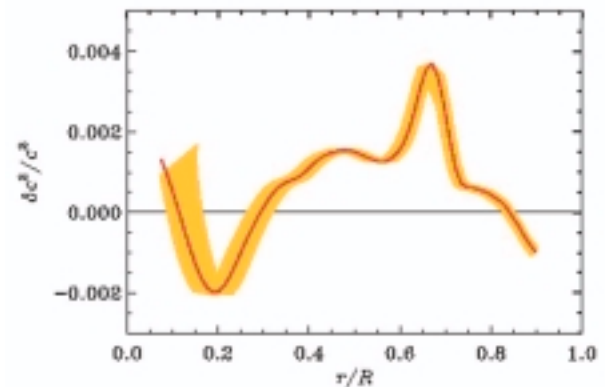
## Outils mathématiques

En amont, du côté des observateurs, l'outil de base est tout d'abord la classique transformation de Fourier. Son utilisation est relativement simple dans les cas des données spatiales, continues et homogènes. Elle l'est moins avec les données des réseaux, qui comportent des interruptions et des variations de qualité en « sautant » d'un instrument à l'autre.

Ensuite il y a les ajustements de profils dans les densités spectrales pour estimer les paramètres physiques des modes propres : fréquence, amplitude, temps caractéristiques d'amortissement, et structure fine produite par la rotation. L'extrême précision requise ne permet pas de se tromper, même un tout petit peu, sur les formulations analytiques des profils, ni sur les méthodes de maximum de vraisemblance utilisées pour les ajustements. Il y a des choix à effectuer, par exemple dans la modélisation de la physique de l'excitation et de l'amortissement des modes. En retour, on obtient des informations sur ces processus physiques.

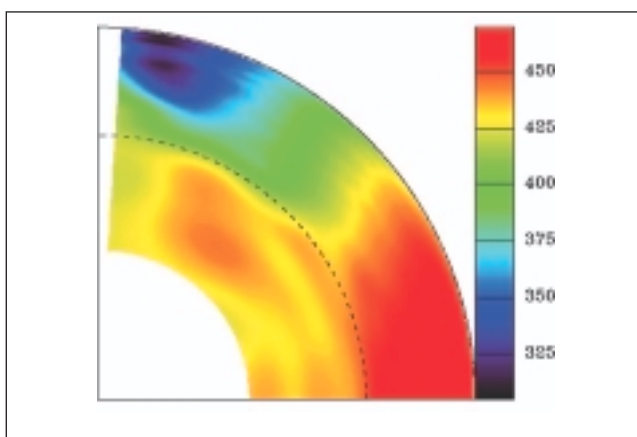
En aval, du côté des modélisateurs, il y a la méthode dite directe et les méthodes d'inversion. Dans la méthode directe, on compare les fréquences mesurées avec celles que l'on calcule dans le modèle solaire, et on essaie de modifier ce modèle, dans la fourchette des possibilités permises par tout ce qui est déjà acquis par ailleurs, pour améliorer la comparaison. Dans les méthodes d'inversion, on exploite le fait que chaque fréquence est une intégrale de la vitesse du son sur une partie du modèle solaire (la cavité résonante du mode correspondant). Deux fréquences de modes aux géométries voisines représentent alors une sorte de différentielle. Au moyen de méthodes initialement empruntées aux géophysiciens, on utilise alors les millions de fréquences disponibles pour obtenir, par inversion, un modèle

sismique, qui se présente d'abord sous forme de la vitesse du son en fonction du rayon. On compare ensuite ce modèle aux modèles physiques, et la suite du jeu reste la même.



**Figure** - Exemple d'écart relatif du carré de la vitesse du son entre soleil sismique et modèle, en fonction du rayon. L'accord est dans une fourchette de  $\pm 2 \cdot 10^{-3}$  avec les restrictions de la région de la tachocline ( $= 0.7$ ), de la partie centrale du cœur, et des toutes dernières couches sous la surface.

En réalité, c'est plus fin que cela puisque les nombreux harmoniques disponibles dans la décomposition tessérale permettent d'avoir une certaine résolution en latitude et les inversions se font alors en trois dimensions, aussi bien pour le modèle que pour sa rotation.



**Figure 7** - Cette coupe d'un demi-hémisphère solaire (le nord est en haut) montre la rotation différentielle, entre environ 475 nHz à l'équateur et seulement 325 aux hautes latitudes. Sous la zone convective (ligne pointillée), cette rotation devient rigide, autour de 430-435 nHz. La transition entre les deux est très mince, elle est à la base de la zone convective et nommée la tachocline. Cette couche, sujette à de forts gradients de vitesse « horizontale », doit jouer un rôle clef dans la génération des champs magnétiques qui gouvernent le cycle d'activité solaire quand ils sont ensuite transportés vers la surface par la convection.

progrès importants sont donc encore attendus dans la modélisation de cette région où la turbulence convective est la plus forte, et où les champs magnétiques prennent progressivement plus d'importance dans la dynamique du plasma en remontant vers la surface.

### Résultats d'inversions : la rotation interne

La précision avec laquelle il a été possible d'accéder à la mesure de la rotation interne, à trois dimensions dans une grande partie du volume de la sphère, a fait partie des divines surprises de la méthode sismologique. Plusieurs résultats inattendus en ont résulté : la rotation différentielle presque inchangée dans toute l'épaisseur de la zone convective ; la tachocline, transition très mince entre cette rotation différentielle et la rotation rigide qui était prévue dans la région radiative ; mais surprise de la rotation uniforme jusqu'au centre, qui était attendu en rotation fossile rapide. Les hydrodynamiciens prévoient plutôt une rotation constante sur des cylindres, donc décroissante vers l'intérieur dans la zone convective, puis plus rapide dans le cœur lui-même,

avec une transition s'étant étalée au cours de l'évolution sur des milliards d'années là où on trouve la tachocline. L'incertitude persiste au fond, qui reste inaccessible aux modes non radiaux en dessous d'environ 15 % en rayon. La difficulté de la mesure précise de la rotation dans le cœur est encore plus grande que celle du modèle moyen, les modes radiaux n'apportant aucune information. De plus, le splitting (équivalent du spin) est très peu sensible aux régions les plus centrales. Songez que la vitesse oscillatoire dans ces régions très denses se mesure en microns par seconde, dans un plasma à 10 millions de degrés. C'est cette vibration homéopathique, propagée jusqu'à la surface, qui nous fournit la seule information disponible sur la rotation du cœur !

## Le futur ?

Les résultats fournis par 25 ans d'écoute musicale de notre Soleil sont à la hauteur des espérances initiales, et vont même bien au-delà dans le cas de la rotation. Peut-on alors envisager de clore le sujet ?

Non, bien sûr. La spectroscopie optique ne s'est pas arrêtée après l'identification et la mesure de longueur d'onde des raies spectrales. Plusieurs améliorations sont encore possibles dans les mesures de fréquences corrigées de l'activité magnétique. Et ce champ magnétique, considéré jusqu'ici surtout comme une source d'imprécision, devient progressivement lui-même le centre d'intérêt. Probablement généré dans la tachocline et transporté par la convection jusqu'à la surface, il y fournit nombre de manifestations spectaculaires, et même bien au delà, jusque chez nous (aurores boréales par exemple). L'activité magnétique du Soleil évolue suivant un cycle de 11/22 ans (22 en tenant compte d'une inversion de polarité d'un cycle de 11 ans au suivant), connu depuis plusieurs siècles, et dont l'origine reste encore mystérieuse aujourd'hui, malgré les succès de l'héliosismologie. La musique du Soleil est pourtant bien sensible à son activité magnétique. Quand sa surface se tache, la pureté de

la sphère et de ses sonorités s'en ressent, comme celle d'un verre de cristal ébréché. Les pics dans l'espace de Fourier sont un peu élargis par la moins bonne qualité de la résonance. Leurs fréquences varient également, en raison des modifications de volume des cavités résonnantes. Ceci est mesuré le long du cycle de 11/22 ans, bien que l'amplitude des variations soit minime, encore une fois de l'ordre de grandeur des largeurs naturelles. Mais les fréquences varient également à d'autres échelles temporelles, plus courtes, et on perçoit le démarrage d'une véritable sismologie des champs magnétiques, qui ne sont pas uniquement confinés dans les couches superficielles.

Existe-t-il aussi du champ magnétique dans le cœur? Seuls les modes de gravité pourront le dire, quand ils seront détectés.

L'héliosismologie de 2<sup>ème</sup> génération est en émergence. Elle exige la détection des modes  $g$ , et de plus en plus de raffinement dans l'exploitation des propriétés des modes  $p$ . Du côté de la modélisation, c'est d'une meilleure prise en compte des champs magnétiques et des modèles à deux et trois dimensions que les progrès sont attendus. Tout un programme !

Si les réseaux d'observatoires au sol ont joué un rôle historique, les progrès attendus aujourd'hui, essentiellement des modes  $g$ , ne semblent pouvoir venir que d'observatoires spatiaux. SoHO est programmé pour une fin de mission en 2007. La prochaine génération de missions spatiales à vocation héliosismique inclut le projet américain SDO avec l'instrument HMI (Helioseismic Michelson Imager), programmé pour 2008, le microsatellite français PICARD la même année, et le projet GOLF-NG (pour New Generation), récemment sélectionné pour une mission microsatellite. En parallèle, des mesures comparables à celles de GOLF mais en photométrie vont démarrer sur d'autres étoiles grâce à la mission COROT (2006). Mais ceci est le début d'une autre histoire musicale, qui nous entraînerait bien trop loin.

## Pour en savoir plus

On trouve d'excellents sites web au mot héliosismologie, en français et surtout en anglais. Sur le cœur et les neutrinos, lire TURCK-CHIÈZE *et al.* Ap.J., 2001, p. 555-569.