

L'héliosismologie

Roland LEHOUCQ et Sylvaine TURCK-CHIEZE
Service d'Astrophysique du centre d'étude de Saclay, CEA, Gif sur Yvette

Le Soleil vibre comme un tuyau d'orgue. L'enregistrement de ses vibrations nous renseigne sur les conditions physiques régnant en son sein. Avec le lancement du satellite SOHO l'automne dernier, l'héliosismologie dispose maintenant d'un outil très puissant.

En 1960, R. Leighton de l'Université de Caltech observa des mouvements de la surface du Soleil, réguliers et de faible amplitude. Il mesura une période d'environ cinq minutes et une vitesse des couches gazeuses de quelques mètres par seconde. Dix ans plus tard, des travaux théoriques d'Ulrich de l'UCLA aux Etats Unis montrèrent que ces mouvements ne sont pas que superficiels. Ils sont aussi le reflet de mouvements globaux qui affectent l'ensemble du Soleil. Ces oscillations sont la manifestation d'interférences constructives d'ondes sonores pénétrant plus ou moins profondément dans le Soleil. Les paramètres mesurés de ces ondes (fréquence, amplitude) dépendent étroitement des conditions physiques (densité, température, composition chimique) régnant dans les couches qu'elles traversent. De même que les ébranlements sismiques permettent d'étudier les couches profondes de la croûte terrestre, les oscillations solaires, observées en permanence, sont devenues une sonde fondamentale dans l'étude de la structure interne du Soleil. Ce nouveau mode d'observation du Soleil constitue désormais une discipline à part entière : l'héliosismologie.

La physique du phénomène

Le Soleil peut vibrer sous l'effet de deux forces de rappel : la force d'Archimède et la force de pression. A chacune de ces forces correspond un type d'onde traversant l'intérieur solaire. Le premier type regroupe les modes de gravité, de basse fréquence, qui trouvent leur origine dans la force d'Archimède. Ils sont confinés dans la zone radiative interne car leur passage à travers la zone convective diminue fortement leur amplitude. Seuls les modes de gravité de bas degré peuvent atteindre la surface du Soleil. De plus, aux fréquences prévues, il existe un bruit solaire important dû aux super-granules présentes à la surface du Soleil. Ces inconvénients les rendent donc très difficiles à observer et aucune détection sûre n'en a encore été faite.

Le deuxième type trouve son origine dans la force de pression et est constitué par les ondes sonores. On les appelle aussi modes de pression. Ils se propagent sous la surface du Soleil dans une coquille sphérique jouant le rôle d'un guide d'onde. Les limites de ce guide dépendent des fréquences spatiale et temporelle de l'onde. Dirigée vers la surface, elle est réfléchiée juste en-dessous de la photosphère, lorsque l'échelle de variation de la densité est comparable à sa longueur d'onde. Dirigée vers le centre de l'étoile, elle est réfractée et détournée vers la surface quand la composante horizontale de sa vitesse est égale à la vitesse du son. Ainsi, une onde effectue une série de rebonds entre le fond de la cavité et la surface du Soleil.

Seules les ondes retombant sur leurs traces après avoir effectué le tour complet de la circonférence solaire peuvent exister. En effet, une telle onde interfère avec elle même et forme une onde stationnaire. Le nombre des rebonds qu'elle effectue est alors entier et est appelé degré de l'onde, noté l . La profondeur de pénétration de l'onde dépend essentiellement de son degré (voir figure 1). Les modes $l=0$ correspondent à une vibration globale du Soleil et pénètrent jusqu'à son coeur. Les modes de degré croissant sont confinés dans des couches de plus en plus superficielles. Pour chaque degré, à l'intérieur de la cavité résonante, il existe une infinité de

modes de vibration de périodes décroissantes correspondant au mode fondamental et à ses harmoniques. Un deuxième nombre servira à classer ces harmoniques. Il s'agit de l'ordre, noté n , qui correspond au nombre de noeuds du mode le long du rayon solaire.

La fréquence d'une onde piégée dans un guide dépend de la variation de la vitesse du son avec la profondeur. Cette dernière détermine à la fois la position de la limite inférieure de la cavité dans laquelle l'onde peut se propager et le temps nécessaire à l'onde pour traverser cette cavité. En considérant les fréquences d'une suite de modes pénétrant de plus en plus profondément il est possible de déterminer comment varie la vitesse du son avec la profondeur.

Enseignements et perspectives

Le succès de l'héliosismologie a vraiment commencé dans les années 1985-1988 avec la confirmation éclatante que l'on pouvait identifier les milliers de modes observés à la surface du Soleil. C'était la démonstration que les hypothèses de la modélisation solaire couplées à la notion de cavité résonante permettaient de définir précisément le niveau de pénétration des modes mesurés. Ce fut le point de départ de l'extraction de la vitesse du son à partir des observations (figure 2), qui a montré un accord avec la prédiction théorique meilleur que 1 à 2% dans toute la région comprise entre le coeur nucléaire et la photosphère. La finesse de ce sondage a transformé le Soleil en un véritable laboratoire de physique des plasmas chauds. Cela a permis de reconsidérer certains ingrédients physiques des modèles comme le calcul des interactions photons-matière solaire, l'effet des électrons libres autour des ions, et le rôle, parfois fondamental, des éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium, même si leur nombre est comparativement très faible. La qualité des mesures a aussi conduit à s'intéresser à la dérivée de la vitesse du son, qui renseigne sur la façon dont s'effectue le transport d'énergie dans l'étoile. On sait que l'énergie thermique est d'abord transportée par rayonnement puis par convection (voir encadré). Ces observations ont permis de situer la transition entre ces deux régimes un peu plus profondément que la théorie ne le prévoyait à $0.287 \pm 0.003 R_{\odot}$ sous la photosphère. Cette estimation a eu des conséquences immédiates sur les prédictions d'abondance de certains éléments comme le lithium et le bore, qui brûlent à des températures relativement basses comprises entre 2.4 et 3.5 millions de degrés.

L'hélium est un élément important en astrophysique car en abondance il est second après l'hydrogène. Le Soleil étant l'astre le mieux connu, il est intéressant de savoir si ce que l'on sait de cet élément est en accord avec ce que l'on croit connaître de l'hélium primordial et de l'évolution chimique des galaxies. Malheureusement, contrairement à la plupart des éléments, son observation directe dans les longueurs d'onde visibles n'est pas possible à cause de l'absence de raies d'origine photosphérique. L'abondance initiale d'hélium est donc une inconnue de la modélisation solaire (voir encadré), que l'on ajuste pour que le soleil numérique ait la luminosité et le rayon présents à l'âge de 4.5 milliards d'années. Si le calcul est correct, on obtient ainsi l'abondance de l'hélium au moment de la formation du Soleil. Sur ce point, l'héliosismologie a apporté une contrainte supplémentaire, donnée par la vitesse du son ou le déphasage des ondes de surface, à la traversée des régions où l'hélium passe de l'état neutre à l'état une fois ionisé, puis deux fois ionisé. L'étude des ondes acoustiques a donc permis d'obtenir indirectement une valeur de la composition photosphérique de l'hélium. La comparaison de la valeur obtenue (0.245-0.250 en fraction de masse) avec celle calculée (0.27-0.28) a permis de mieux tenir compte d'un raffinement supplémentaire du calcul consistant à introduire l'influence gravitationnelle lente des éléments les uns par rapport aux autres au cours de la vie du Soleil.

L'héliosismologie apporte aussi des informations précieuses sur la rotation interne du Soleil. En surface, le Soleil tourne plus vite à l'équateur (25 jours) qu'aux pôles (36 jours). Il a été montré que cette rotation différentielle disparaît à la base de la zone convective mais pour l'instant il n'y a pas vraiment de consensus sur la distribution radiale de la vitesse dans la région centrale du Soleil.

La région nucléaire est effectivement encore mal connue car seuls les modes de bas degré y pénètrent et la vitesse du son y est beaucoup plus grande qu'à la surface. Par exemple, le temps que le mode $l=0$ passe dans la région nucléaire ne vaut que 10% du temps mis pour parcourir la cavité. Ainsi, la mesure de la vitesse du son dans les régions les plus internes est entachée d'erreurs plus importantes. Il suffit d'un écart de $0.5 \mu\text{Hz}$ pour changer le profil de la vitesse du son au centre. C'est justement l'ordre de grandeur des variations observées de la fréquence de ces modes au cours du cycle solaire. Pour mieux connaître cette région il faut donc atteindre des mesures plus complètes et plus précises. Celles-ci devraient être obtenues grâce aux observations du satellite SOHO, lancé au début du mois de décembre. Avec cette mission, un nouvel espoir se dessine, celui de détecter les modes de gravité ; créés dans le coeur solaire, ils sont bien sûr beaucoup plus sensibles aux manifestations solaires profondes, mais leur composante de vitesse à la surface du Soleil est certainement très affaiblie par la traversée de la région convective externe. Le calme de l'espace est aujourd'hui indispensable pour espérer les identifier s'ils sont mesurables.

Aujourd'hui, on attend beaucoup de ces futures mesures, car la connaissance approfondie de la région centrale nous révélera le rythme d'évolution des étoiles. Le Soleil ne brille pas à cause des réactions nucléaires, mais sa longévité est due à la production de l'énergie nucléaire. Il est donc précieux de connaître en détail les conditions thermodynamiques centrales du Soleil. Dans l'incapacité d'aller les mesurer in situ, la mesure des neutrinos émis lors des réactions de transformation de l'hydrogène en hélium a pendant longtemps été considérée comme un test de base des mécanismes internes du Soleil. Des expériences récentes sur le gallium ont confirmé que, dans le principe, les hypothèses de base des modèles d'évolution solaire étaient vérifiées. Toutefois, les prédictions restent plus élevées que la détection et ce résultat peut être révélateur d'une imprécision de la détection des neutrinos (à cause de la faiblesse de leur section efficace d'interaction), ou de propriétés du neutrino encore mal connues ou encore d'une mauvaise compréhension du bilan énergétique du Soleil. C'est dans l'idée de cette troisième éventualité, que des mesures héliosismologiques, faisant intervenir des ondes présentes au coeur du Soleil, pourraient aider à conclure.

Techniques d'observations

Les éléments chimiques présents dans l'atmosphère solaire (Ca, Na, Fe, K, etc.) absorbent certaines longueurs d'onde du rayonnement qui les traversent et produisent dans le spectre solaire des raies sombres caractéristiques de leur présence : le spectre de raies de Fraunhofer. Des mouvements du gaz absorbant peuvent modifier la position de ces raies d'absorption : c'est ce que l'on nomme l'effet Doppler-Fizeau. La mesure de ces déplacements fournit directement la vitesse des couches solaires. Pour mesurer précisément des vitesses allant de quelques mètres à quelques centimètres par seconde il faut éliminer les effets parasites comme ceux dus à la rotation solaire, au mouvement de la Terre autour du Soleil, à l'atmosphère terrestre et aux défauts des instruments.

On peut aussi utiliser les fluctuations de la magnitude solaire de l'ordre de quelques millièmes de magnitude induite par ces oscillations. Cette voie reste très difficile à mettre en oeuvre sur Terre à cause des fluctuations de luminosité dues à l'atmosphère mais elle a déjà été utilisée dans l'espace (expérience IPHIR) et le sera encore prochainement à bord du satellite SOHO avec l'expérience internationale VIRGO, construite sous la responsabilité d'un laboratoire suisse de Davos.

Lors d'une mesure héliosismologique, un grand nombre de fréquences sont détectées simultanément. En particulier, la coexistence de nombreuses fréquences voisines rend leur séparation et leur interprétation difficiles. Il faut alors mesurer très précisément les battements entre ces fréquences. Ayant des périodes se comptant en jours voire en semaines, leur mesure nécessite des temps d'observation très longs. Malheureusement, l'alternance jour-nuit

interrompt régulièrement l'acquisition des données. C'est pour éliminer ce phénomène que le groupe de l'observatoire de Nice a placé, pour la première fois, ses instruments au pôle sud en 1980. Mais alors, le mauvais temps a montré que les périodes d'observations se restreignaient à typiquement 5 jours une fois ou deux dans l'année. Maintenant, on pallie cet inconvénient soit en installant des réseaux de stations d'observation autour de la Terre, mais se pose alors le problème du raccord des données, soit en observant depuis l'espace.

L'observation terrestre

E. Fossat et G. Grec, astrophysiciens de l'université de Nice, ont mis en place l'un des premiers réseaux terrestres : le réseau IRIS (acronyme de International Research in the Interior of the Sun). Il est constitué de six sites, correspondant au meilleur compromis entre latitude, pureté de l'air et accessibilité : Kumbel en Ouzbékistan, Oukaimeden au Maroc, Stanford en Californie, La Silla au Chili, Tenerife aux Canaries et plus récemment Culgoora en Australie. Ce réseau d'observatoires observe les oscillations globales du Soleil en regardant la variabilité du décalage Doppler-Fizeau de la raie du sodium. Le réseau anglais BISON (acronyme de Birmingham Solar Oscillation Network), est aussi opérationnel. Il utilise le même principe qu'IRIS mais en observant la raie du potassium. Ces deux dernières années, d'autres réseaux se sont mis en place pour étudier les ondes acoustiques de degré plus élevé en faisant des images de la surface du Soleil. Ils ont ainsi accès, chaque minute, à environ 60000 mesures de vitesse. Pour cela, le réseau américain GONG (acronyme de Global Oscillations Network group) analyse le décalage Doppler-Fizeau de la raie du nickel à l'aide d'un interféromètre Michelson.

L'avantage des réseaux est de pouvoir suivre les oscillations solaires pendant des périodes très longues de l'ordre de plusieurs cycles solaires. Mais la difficulté est le maintien simultané de plusieurs instruments, couplé au raccordement des mesures et à la non garantie du beau temps. C'est une des raisons pour laquelle, en parallèle, le projet spatial SOHO a été définitivement décidé en 1988.

L'observation depuis l'espace : le satellite SOHO

Le satellite SOHO (acronyme de Solar and Heliospheric Observatory), a été lancé le 2 Décembre 1995 depuis le centre spatial Kennedy en Floride. C'est un projet conjoint de l'Agence Spatiale Européenne, qui construit le satellite, et de la NASA, qui fournit le lanceur, une fusée Atlas 2AS. SOHO a été présenté par Patrick Boumier dans le numéro 110 de L'Astronomie). A son bord, en plus de huit expériences destinées à observer l'atmosphère solaire, trois expériences d'héliosismologie sont embarquées. L'expérience GOLF (acronyme de Global Oscillations at Low Frequencies) est le fruit d'une collaboration franco-espagnole. Dirigée par A. Gabriel, de l'Institut d'Astrophysique Spatial d'Orsay, cette expérience a été réalisée par une centaine de personnes de cet Institut, du Service d'Astrophysique du Centre d'Etudes de Saclay, de l'Université de Bordeaux et de l'Institut d'Astrophysique des Canaries sous la responsabilité respective de S. Turck-Chièze, J.M. Robillot et T. Roca Cortes. De plus l'Observatoire de Nice, en la personne de G. Grec, apporte son grande expertise scientifique.

Cette expérience mesure la vitesse de décalage Doppler-Fizeau des deux raies du sodium. Associée à l'expérience VIRGO (précédemment citée) de variabilité de luminosité et à l'expérience américaine MDI (acronyme de Michelson Doppler Imager) qui mesure localement le décalage Doppler-Fizeau de la raie du nickel, les héliosismologues s'attendent à une bien meilleure connaissance de la rotation (figure 3) et des manifestations du champ magnétique à l'intérieur du Soleil.

Perspectives : l'astérosismologie

Avec le satellite SOHO, nous avons de grands espoirs de progresser dans la compréhension de la dynamique du centre du Soleil et de l'origine du cycle solaire. Ces études fines ont conduit les "astéro-sismologues" à s'interroger sur l'extension de ce type de méthodes à d'autres étoiles moins bien connues que le Soleil. Dans ce cas, il n'est bien sûr pas envisageable aujourd'hui de résoudre l'étoile mais la mesure de la variabilité de la luminosité ou l'étude des fluctuations de la largeur de certaines raies d'absorption sont prometteuses. Il semblerait qu'une première observation de l'étoile η du Bouvier ait été réalisée. D'autre part, une sonde russe, lancée en direction de Mars, emportera à la fin de cette année l'expérience EVRIS. D'autres projets sont à l'étude au CNES et à l'agence spatiale européenne : COROT et STARS. Les perspectives théoriques sont importantes : mesurer l'abondance d'hélium dans les amas, progresser sur la convection stellaire, mieux comprendre l'évolution du moment angulaire au cours de la vie d'une étoile...

Encadré : le modèle standard du Soleil

Le Soleil est un astre soumis à sa propre gravité. Sa stabilité résulte d'un équilibre entre la force de gravitation, qui tend à le faire imploser, et la force de pression qui tend à le faire exploser. Pour assurer la stabilité de cet équilibre il faut que la pression et la densité augmentent lorsque l'on s'enfonce à l'intérieur du Soleil. En conséquence, la température est elle aussi plus élevée dans les régions centrales que vers la surface. Les modèles numériques actuels prédisent qu'une température d'environ 15 millions de degrés règne en son cœur. La surface n'est, quant à elle, soumise qu'à une température de 5500 degrés environ. De ce contraste thermique résulte un transport d'énergie du centre vers le bord : le Soleil rayonne cette énergie sous forme de lumière. Pour permettre au Soleil de durer, cette hémorragie énergétique doit être compensée. Au centre de l'étoile les conditions thermodynamiques sont favorables à l'allumage et l'entretien de réactions de fusion nucléaires. L'énergie qu'elles produisent est d'abord transportée sous forme de rayonnement. Au fur et à mesure que l'on progresse vers la surface, la température diminue et l'on rencontre des espèces de moins en moins ionisées. L'interaction entre rayonnement et matière devient alors très efficace ce qui augmente fortement l'opacité de la matière. Dès lors, la lumière ne suffit plus à transporter l'énergie. Le milieu est soumis à de grands mouvements d'ensemble appelés mouvements convectifs. Finalement, l'énergie transportée émerge à la surface du Soleil et s'en échappe sous forme de photons.

Le calcul d'un modèle de la structure interne du Soleil nécessite de faire des hypothèses raisonnables sur la composition chimique, les taux de réactions nucléaires, les opacités, le mécanisme de transport par convection et l'équation d'état de la matière dans les conditions prévalant au sein d'une étoile. L'évolution solaire est calculée en supposant que la composition initiale est homogène. Le mélange de la matière solaire est supposé ne se produire que dans la zone convective. Ainsi, pendant la phase séquence principale, les cendres des réactions nucléaires s'accumulent dans la région où elles sont produites. L'abondance relative des éléments lourds comme le carbone ou l'oxygène est prise égale à celle observée dans l'atmosphère solaire. L'absence d'une théorie rigoureuse de la convection turbulente, impose au calcul de la structure de l'enveloppe convective d'utiliser une théorie semi-empirique dite de la longueur de mélange. Cette méthode nécessite l'introduction d'un paramètre libre α égal au rapport entre l'épaisseur de la zone convective et la longueur caractéristique de variation de la pression. Ce paramètre sert donc à quantifier l'efficacité de la convection.

En faisant varier deux paramètres, α et la quantité initiale d'hélium, il est possible de calculer un modèle du Soleil reproduisant, à son âge actuel, son rayon et sa luminosité.

Légende des figures

Figure 1 : Vision schématique de la pénétration des ondes acoustiques. Plus le degré l du mode est élevé moins il pénètre dans le Soleil. La réflexion des modes dépend bien sûr de la variabilité de l'indice du milieu. La région nucléaire, représentée par un double sigle nucléaire, est en fait explorée par les modes $l < 5$. La limite convective à environ $0.7 R_{\odot}$ correspond à des modes de degré compris entre 30 et 40. Le degré atteint l'ordre de 1000 pour les ondes les plus superficielles (flèches enroulées).

Figure 2 : Différence relative entre le carré de la vitesse du son extraite de l'observation des modes acoustiques et celle extraite des prédictions théoriques. L'accord est déjà remarquable mais les petites différences peuvent révéler des processus physiques encore non maîtrisés.

Figure 3 : L'extraction de la vitesse de rotation des couches internes du Soleil par la mesure des modes acoustiques révèle que la rotation différentielle observée en surface disparaît vers l'intérieur et que, pour l'instant, on ne connaît pas avec certitude la façon dont se manifestent les mouvements à l'intérieur du cœur solaire.