

La vitesse de chaque onde sonore dépend de la température et de la composition des régions solaires qu'elle traverse. Les scientifiques de la mission SOHO prédisent la vitesse du son à l'aide d'un modèle numérique. Ils utilisent les petites différences entre la vitesse du son calculée et celle qui est mesurée pour affiner le modèle et établir la variation radiale de température, de densité et de composition du Soleil.

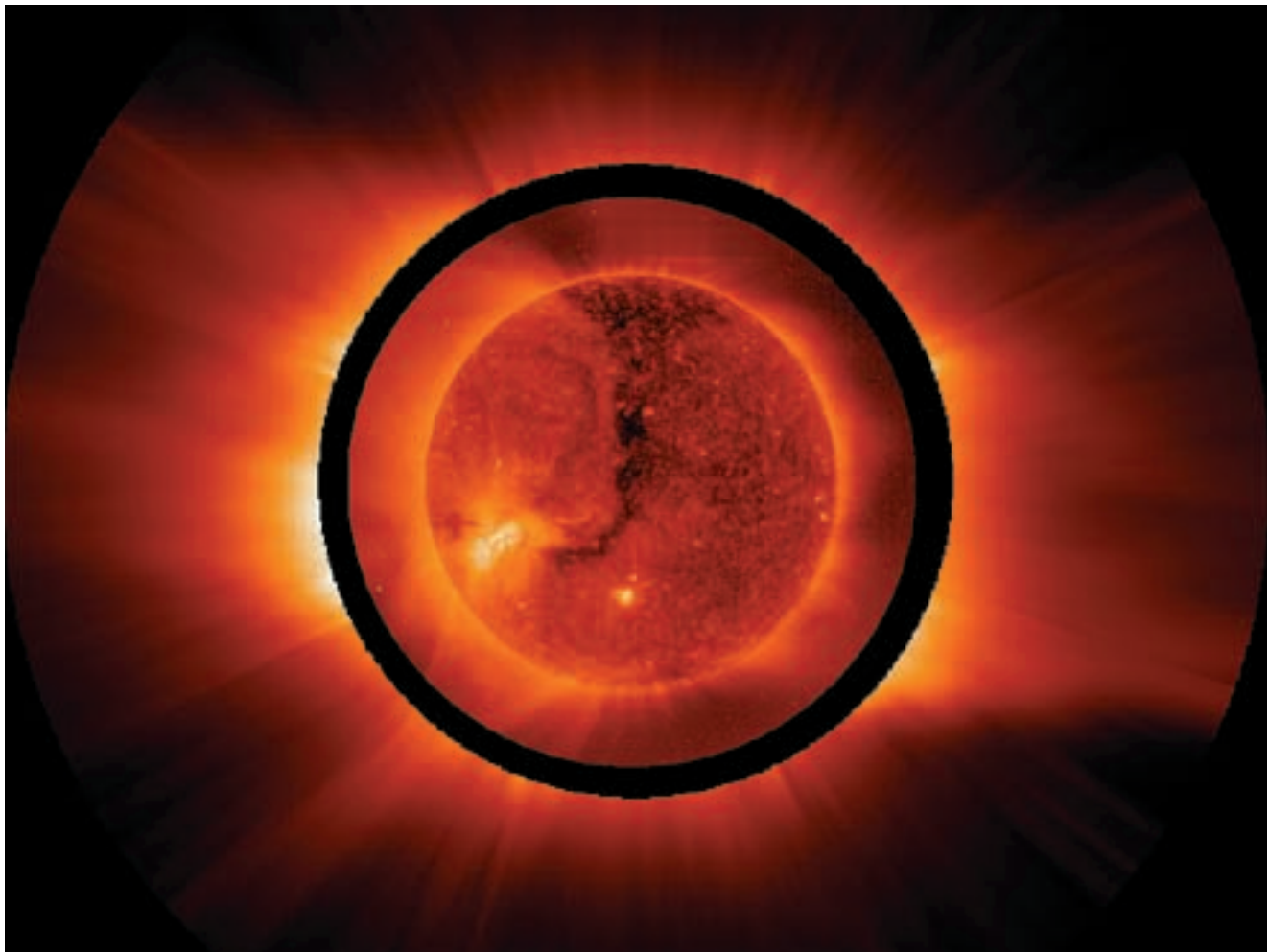
Après plus d'un an de fonctionnement, GOLF est l'instrument le plus performant pour sonder le cœur du Soleil, siège des réactions nucléaires. Il a déjà détecté plus de 100 types d'ondes acoustiques pénétrant dans les 20 pour cent les plus centraux du Soleil. À l'aide de ces mesures, on déduit la vitesse du son dans la partie centrale avec une précision relative meilleure que un pour dix mille, et on pourra ainsi calculer les profils de densité et de rotation dans le cœur nucléaire.

Avec le télescope MDI, les différences entre les prévisions théoriques et les observations sont inférieures à 0,2 pour cent, mais les zones où l'on observe ces différences sont importantes : à la frontière du cœur producteur d'énergie et sous la zone convective. Dans ces zones, un mélange de matière expliquerait les différences.

Depuis plus de trois siècles, l'observation des taches solaires montre aux astronomes que la photosphère tourne plus vite à l'équateur, la vitesse décroissant régulièrement vers chaque pôle. Les données de SOHO montrent que cette répartition des vitesses de rotation persiste dans la zone convective. En revanche, la vitesse de rotation est identique pour tous les points situés à moins d'un tiers du rayon. La vitesse de rotation change donc brusquement à la base de la zone convective. Là, les zones périphériques de l'intérieur radiatif,

qui tournent à une vitesse constante, rencontrent la zone convective, qui tourne plus vite à l'équateur. Le cisaillement à l'interface serait la source du magnétisme solaire.

Le télescope MDI a également sondé les couches externes du Soleil. Affranchi des perturbations atmosphériques qui gênent les télescopes terrestres, ce télescope suit en direct des détails invisibles du sol. Il s'est révélé particulièrement efficace en héliosismologie spatio-temporelle, une technique de mesure des mouvements gazeux dans les couches situées juste au-dessous de la photosphère. La méthode est simple : avec le télescope, chaque minute, on mesure les faibles variations périodiques de la longueur d'onde de la lumière émise en des millions de points du Soleil, dus au décalage Doppler (la longueur d'onde du rayonnement émis par une source augmente ou diminue, respective-



SOHO est un Consortium et Soho UICs Consortium

1. DEUX INSTRUMENTS DU SATELLITE SOHO ont enregistré les données à partir desquelles on a créé cette image de l'atmosphère externe du Soleil, de la base de la couronne jusqu'à des millions de kilomètres au-dessus de la surface solaire. À l'extérieur de l'anneau

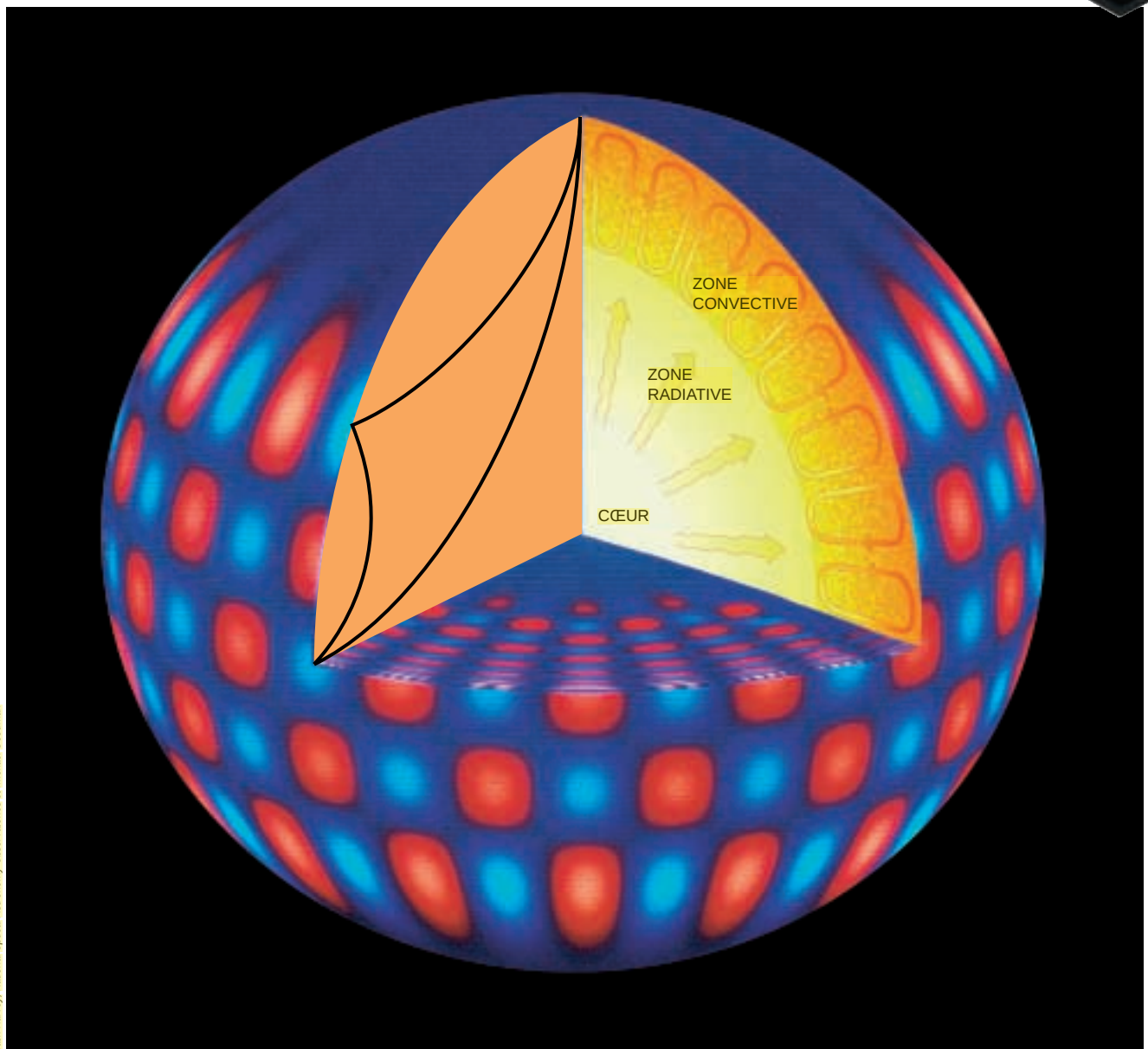
noir, le vent solaire est visible grâce aux ultraviolets émis par les ions oxygène. Le vent solaire est plus rapide quand il provient des trous coronaux qui apparaissent comme des régions sombres au pôle Nord (en haut) et au centre du disque solaire.

ment, selon que la source s'éloigne ou se rapproche de l'observateur). En comparant les répartitions successives de variation, on détecte la propagation des ondes sonores et l'on détermine leur vitesse à travers les couches externes du Soleil. Ce temps de propagation renseigne sur la température et l'écoulement de gaz le long d'un chemin interne reliant deux points de la surface visible du Soleil, car les ondes sonores se propagent d'autant plus vite que la température locale est élevée ; en outre, elles sont plus rapides quand elles se propagent dans la même direction que leur milieu de propagation.

Après avoir observé des myriades de points à la surface du Soleil, le télescope MDI a fourni des temps de propagation pour des sons parcourant des milliers de chemins. Les scientifiques de SOHO ont alors utilisé ces données pour déterminer la structure tridimensionnelle et la dynamique interne du Soleil : à l'aide de programmes analogues à ceux des tomodigraphes médicaux, des superordinateurs ont calculé pendant une semaine pour produire les premières cartes montrant les vitesses de convection au sein d'une étoile. Les écoulements ne sont pas des mouvements d'ensemble, telles les rotations déjà

évoquées, mais plutôt de petits déplacements qui semblent indépendants. Même ainsi, leur vitesse atteint un kilomètre par seconde, supérieure à celle d'un avion supersonique.

Pour déterminer les écoulements dans la zone convective, l'équipe du MDI a calculé les temps de propagation pour des ondes parcourant une distance d'environ 8 000 kilomètres dans le Soleil. Comme prévu, cette région tumultueuse ressemble à une casserole d'eau bouillante : la matière chaude s'élève, et les gaz



Jack Harvey, National Optical Astronomy Observatories et Michael Goodman

**2. LES ONDES SONORES**, représentées ici par des lignes noires dans la section découpée, résonnent à travers le Soleil. Elles sont produites par les turbulences du gaz chaud à la surface de la zone convective, qui surmonte la zone radiative et le cœur du Soleil. Lorsque les ondes

traversent le centre de l'étoile, elles accélèrent et sont réfractées vers l'extérieur. La surface du Soleil, elle, réfléchit les ondes vers l'intérieur. Finalement, l'étoile entière palpite, certaines régions se creusant (*taches rouges*), tandis que d'autres se bombent (*taches bleues*).



## Les instruments de SOHO

**D**es centaines d'astrophysiciens de toutes nationalités étudient le Soleil à l'aide de 12 instruments embarqués sur SOHO. Trois dispositifs sondent l'intérieur du Soleil, six mesurent l'atmosphère solaire, et trois examinent le vent solaire.

plus froids s'enfoncent ; toutefois, de nombreux écoulements sont étonnamment peu profonds. Les astronomes ont également étudié les déplacements horizontaux à une profondeur d'environ 1 400 kilomètres et ils ont superposé les cartes de ces déplacements aux cartes du champ magnétique également obtenues par l'instrument MDI. Ils ont trouvé que le champ magnétique est particulièrement intense dans les régions où convergent les écoulements de gaz, sous la surface. Ainsi, le gaz bouillonnant rassemble probablement les lignes de champ magnétique et les concentre, surmontant la pression magnétique antagoniste qui devrait disperser ces concentrations locales.

SOHO révèle également la structure de l'atmosphère externe du Soleil et, en particulier, de la couronne. La bordure nette du disque solaire est illusoire : elle n'indique que le rayon au-delà duquel le gaz solaire devient transparent. La couronne, invisible, s'étend jusqu'aux planètes et présente l'un des paradoxes les plus intrigants de la physique solaire : bien que la température de la photosphère ne soit égale qu'à 5 500 °C, la partie de la couronne qui est au-dessus est à une température supérieure à un million de degrés. Comme la chaleur ne peut migrer d'une région froide vers une région plus chaude (le deuxième principe de la thermodynamique serait violé, ainsi que le bon sens), un mécanisme inconnu doit transporter de l'énergie de la photosphère, ou d'une région inférieure, jusqu'à la couronne. Quelle forme d'énergie ? L'énergie cinétique et l'énergie magnétique peuvent passer d'une zone froide à une zone chaude : des volutes de gaz et des mouvements du champ magnétique pourraient transporter cette énergie.

Pour étudier la couronne et identifier son mystérieux mécanisme de chauffage, les physiciens observent

| INSTRUMENT     | EXPÉRIENCE                                                                                                                                                                              | RESPONSABLE PRINCIPAL                                                                                 |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>GOLF</b>    | Le dispositif pour la mesure des oscillations globales de basses fréquences mesure la vitesse des oscillations globales au sein du Soleil                                               | Alan Gabriel, Institut d'astrophysique spatiale, France                                               |
| <b>VIRGO</b>   | L'instrument pour l'étude de la variabilité de la luminosité solaire et des oscillations de gravité mesure les fluctuations de l'éclat du Soleil, ainsi que la quantité d'énergie émise | Claus Fröhlich, Observatoire physico-météorologique de Davos et Centre mondial du rayonnement, Suisse |
| <b>SOI/MDI</b> | La caméra Doppler-Michelson pour l'étude des oscillations mesure la vitesse des oscillations produites par les sons piégés dans le Soleil                                               | Philip Scherrer, Université Stanford, États-Unis                                                      |
| <b>SUMER</b>   | L'instrument de mesure du rayonnement ultraviolet émis par le Soleil fournit des données sur la température, la densité et la vitesse de divers gaz dans la chromosphère et la couronne | Klaus Wilhelm, Institut d'aéronomie Max Planck, Allemagne                                             |
| <b>CDS</b>     | Le spectromètre de diagnostic coronal mesure la température et la densité des gaz dans la couronne                                                                                      | Richard Harrison, Laboratoire Rutherford Appleton, Royaume-Uni                                        |
| <b>EIT</b>     | Le télescope à imagerie en ultraviolet lointain donne des images du disque complet de la chromosphère et de la couronne                                                                 | Jean-Pierre Delaboudinière, Institut d'astrophysique spatiale, France                                 |
| <b>UVCS</b>    | Le spectromètre à coronographe ultraviolet mesure la température et la vitesse des atomes d'hydrogène, d'oxygène et d'autres ions dans la couronne                                      | John Kohl, Observatoire d'astrophysique Smithsonian, États-Unis                                       |
| <b>LASCO</b>   | Le coronographe spectroscopique à grande ouverture fournit des images qui révèlent l'activité, la masse, la quantité de mouvement et l'énergie de la couronne                           | Guenter Brueckner, Laboratoire de recherches de la marine, États-Unis                                 |
| <b>SWAN</b>    | Grâce à l'expérience de mesure des anisotropies du vent solaire, on étudie les variations spatiale et temporelle du vent solaire                                                        | Jean-Loup Bertaux, Service d'aéronomie du CNRS, France                                                |
| <b>CELIAS</b>  | Le système d'analyse des charges, éléments et isotopes quantifie la masse, la charge, la composition et la distribution d'énergie des particules du vent solaire                        | Peter Bochsler, Université de Berne, Suisse                                                           |
| <b>COSTEP</b>  | L'analyseur de particules suprathermiques et énergiques détermine la répartition d'énergie des protons, des ions hélium et des électrons                                                | Horst Kunow, Université de Kiel, Allemagne                                                            |
| <b>ERNE</b>    | L'expérience «noyaux et électrons de haute énergie et relativistes» mesure la répartition d'énergie et la composition isotopique des protons, d'autres ions et des électrons            | Jarmo Torsti, Université de Turku, Finlande                                                           |