

En permettant de s'affranchir de l'absorption atmosphérique, l'avènement de l'ère spatiale a permis l'émergence de nouvelles branches de l'astronomie dans le domaine des rayons X, de l'ultraviolet et de l'infrarouge. Les physiciens solaires ont immédiatement vu l'avantage des observations spatiales car de nombreuses raies spectrales d'émission se situent dans l'extrême ultraviolet et sont donc inobservables depuis le sol. Même en lumière visible, et toujours à cause de l'atmosphère, la couronne ne peut pas être observée depuis le sol à de grandes distances du bord solaire. De plus, les observations effectuées depuis l'espace sont exemptes de distorsions atmosphériques (turbulence, diffraction) et peuvent, selon l'orbite choisie, être ininterrompues pendant de longues périodes de temps. Voici donc une revue (non exhaustive) des missions qui ont fait et qui feront l'histoire de la physique solaire spatiale (voir aussi *l'Astronomie* mai 2001 et *Observation & Travaux* n°53).

Les Observations du Soleil depuis l'espace

par **Frédéric Auchère**, et **Thierry Appourchaux**
Institut d'Astrophysique Spatiale

Les précurseurs

Les premières observations du Soleil depuis l'espace ont été effectuées dans les années 1960 par des instruments embarqués à bord de fusées sondes effectuant des vols balistiques avec au sommet de la parabole quelques minutes d'observation utilisables durant lesquelles l'absorption atmosphérique est suffisamment réduite. Des images du disque solaire à Lyman α (1216 Å) et des profils spectraux de cette raie ont ainsi pu être obtenus. Des spectres solaires ont aussi été enregistrés dans l'extrême ultraviolet (EUV) vers 100 Å. Les premières images obtenues depuis l'espace avec de simples caméras à sténopé souffraient du manque de stabilisation des premières fusées sondes, le pointage étant généralement maintenu sur le Soleil sans avoir de stabilisation en roulis. Cependant, on pouvait déjà discerner sur ces images la présence de régions actives très contrastées par rapport au reste du disque, caractéristique confirmée par les images fournies les années suivantes par des fusées stabilisées en rotation. Si les fusées sondes ont fourni les premiers aperçus de ce à quoi le Soleil ressemble en rayons X et en EUV, les satellites ont vite pris le relais car ils permettaient des observations de longue durée. Les fusées sondes sont cependant toujours utilisées de nos jours pour observer le Soleil, essentiellement pour tester à moindre coût des prototypes d'instruments nouveaux destinés à voler ensuite sur des missions de plus grande envergure (figure 1).

Les progrès rapides de la physique solaire spatiale

Après ces premiers pas dans l'espace, la physique solaire spatiale a progressé rapidement avec les observations recueillies par les premiers satellites. Le 7 mars 1962 était lancé le premier satellite d'observation du Soleil : OSO (Orbiting Solar Observatory), qui amorçait une période d'exploration d'un domaine totalement nouveau durant laquelle les découvertes se succédèrent rapidement. Au total, huit satellites de la série OSO furent lancés avec succès de 1962 à 1975. Puis vinrent les instruments embarqués à bord de la station spatiale américaine Skylab, habitée par trois équipages différents entre le 25



Fig. 1. – Lancement d'une fusée Terrier/Black Brant au White Sands Missile Range (Nouveau Mexique), le 5 décembre 2003. Cette fusée, similaire à celles utilisées pour effectuer les premières observations spatiales du Soleil, emportait CalRoc II, un double de l'instrument EIT volant actuellement à bord de la sonde SOHO.

mai 1973 et le 8 février 1974 (figure 2). Les données Skylab ont permis pour la première fois de mettre en évidence les boucles magnétiques de la couronne et les évolutions rapides des structures coronales. Les structures coronales bien connues aujourd'hui ont déjà pratiquement toutes été observées et étudiées avec Skylab : boucles, trous coronaux, plumes polaires, points brillants, et surtout les éjections coronales de

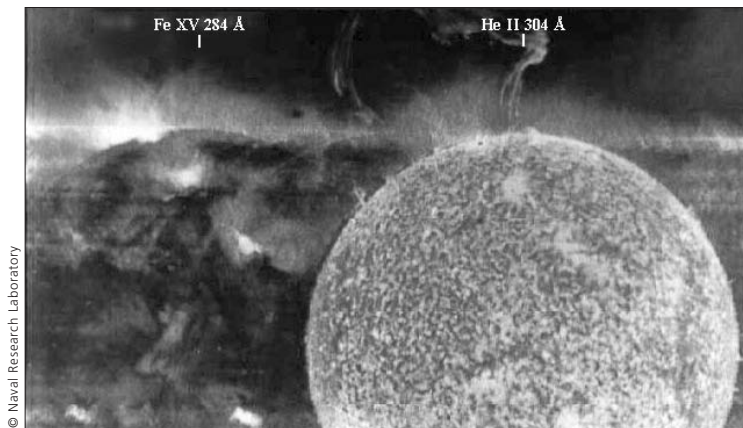
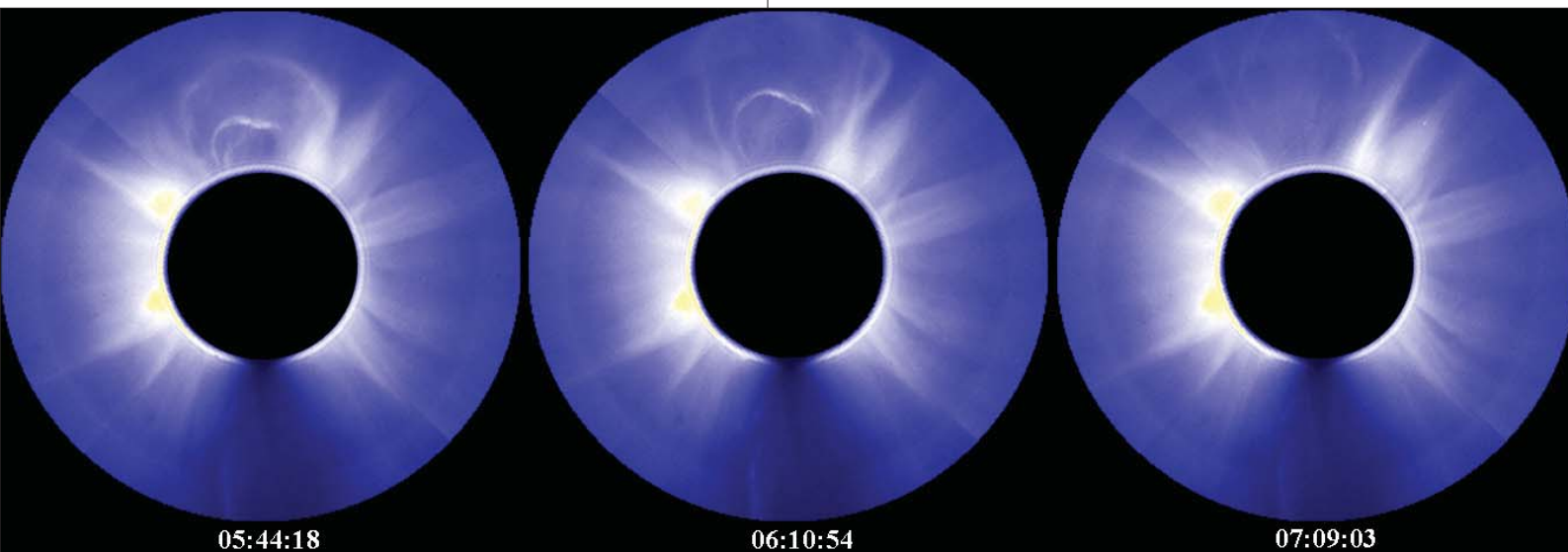


Fig. 2. – Image obtenue le 1^{er} janvier 1974 durant la mission Skylab 4 avec le spectrohéliographe S082A. Ce spectrographe sans fente produisait des images monochromatiques du Soleil décalées (et partiellement superposées) de gauche à droite suivant la longueur d'onde des raies d'émission correspondantes. On a indiqué les positions des deux raies dominantes dans cette image (FeXV 284 Å et HeII 304 Å). On remarque une grande éruption de protubérance sur l'image à 304 Å.

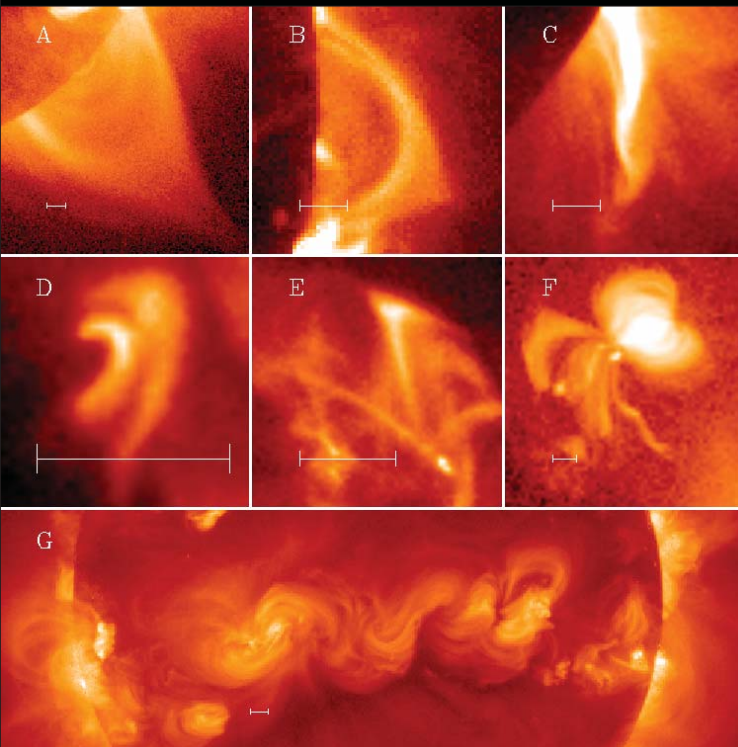
Dans les années 1980, ces événements ont pu être suivis plusieurs années durant par le coronographe de la mission SMM (figure 3). Lancé en février 1980, ce satellite avait pour objectif d'étudier le maximum d'activité solaire. Une défaillance du satellite en janvier 1981 a interrompu la mission, mais SMM a pu être réparé en orbite avec la navette Challenger en avril 1984. Il a ensuite continué de collecter des données jusqu'au 24 novembre 1989 avant sa rentrée dans l'atmosphère le 2 décembre suivant. Cette mission emportait aussi un spectrographe UV, ainsi que des spectromètres X et Gamma.

matière (CME, de l'anglais Coronal Mass Ejection). Les CME sont aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches de par leur impact possible sur l'environnement terrestre. Bien que ces éjections aient été découvertes auparavant, Skylab a été le premier à pouvoir enregistrer un tel événement dans son intégralité.



© High Altitude Observatory

Fig. 3. – L'évolution d'une éjection coronale de matière (CME) observée le 14 avril 1980 par le Coronographe/Polarimètre de la mission SMM.

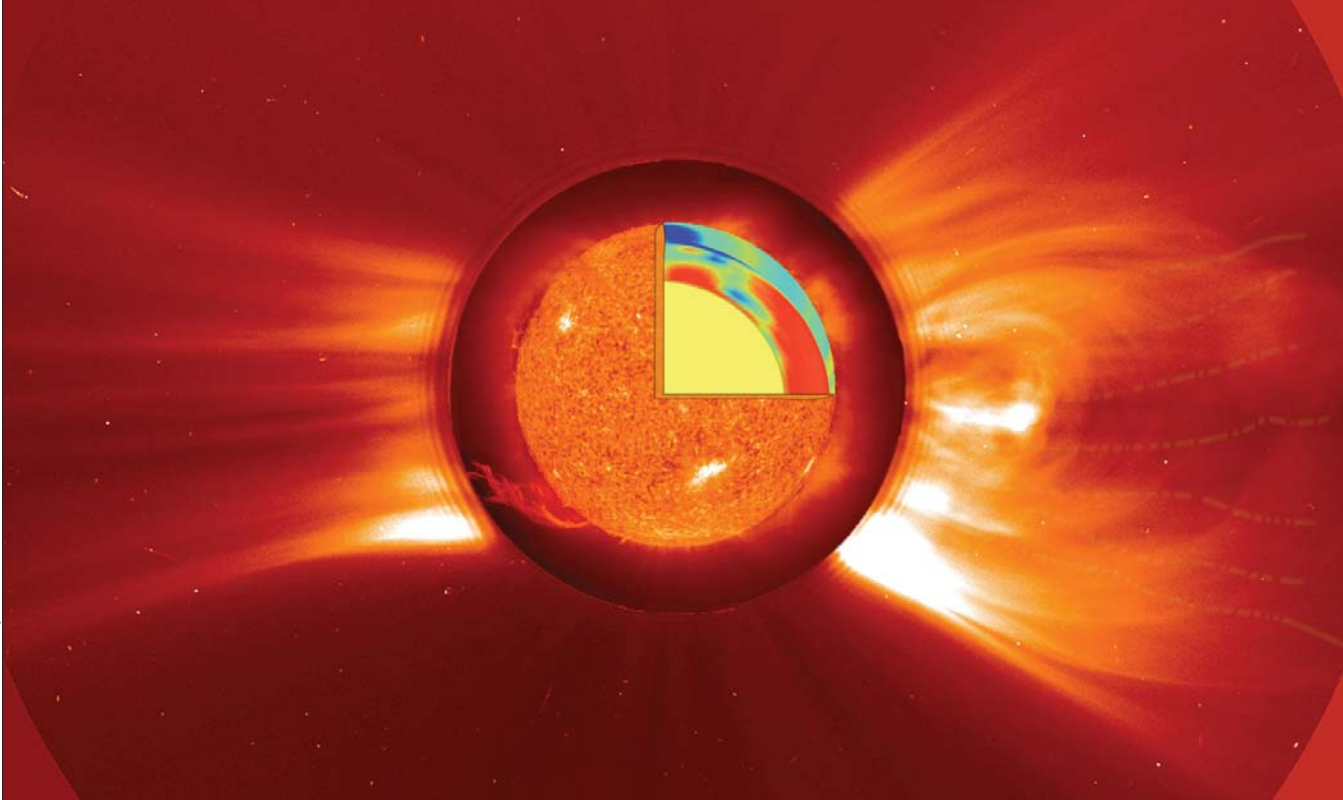


© Lockheed/NAO/Univ. Tokyo

Fig. 4. – Ces images, obtenues entre le 3 octobre 1991 et le 25 janvier 1992 par le télescope SXT du satellite Yohkoh, montrent plusieurs exemples de boucles coronales observées dans la gamme de longueurs d'onde des rayons X mous. A: large structure en "casque". **B:** boucles vues au-dessus du bord solaire **C:** Boucles éruptives croissant à environ 30km/s. **D:** Petite boucle éruptive. **E:** Couple de boucles pointues dont le sommet de celle située au nord semble être chauffée. **F:** Jet éjecté vers le sud-est à 200 km/s **G :** Connexions de régions actives par des boucles magnétiques.

L'ère moderne

Lancé le 30 août 1991 depuis le centre spatial Kagoshima au Japon, le satellite Yohkoh, issu d'une collaboration américano-japonaise, a observé le Soleil en rayons X pendant plus de 9 ans, ce qui a permis de suivre en continu l'activité du Soleil en rayons X durant un cycle solaire. Yohkoh, qui s'est aussi illustré par sa contribution à l'étude des événements éruptifs (figure 4), a malheureusement été perdu en 2003. Depuis, la mission majeure d'observation du Soleil depuis l'espace est la sonde SOHO, lancée depuis Kennedy Space Center le 2 décembre 1995. SOHO a été construit sous maîtrise d'oeuvre de l'Agence Spatiale Européenne,



avec des instruments fournis par des équipes internationales. Le lancement par une fusée Atlas II ainsi que le centre d'opérations ont été financés par la NASA. Placé en orbite autour du point de Lagrange L1 (point d'équilibre gravitationnel entre le Soleil et la Terre), il a permis pour la première fois d'observer le Soleil en continu, ce qui est particulièrement intéressant pour la surveillance de l'activité et pour les expériences d'hélioséismologie. Les XII instruments de SOHO ont été choisis de façon à pouvoir étudier la structure interne du Soleil, comprendre les mécanismes responsables du chauffage de la couronne et identifier les origines du vent solaire (figure 5). Les observations de SOHO sont complétées depuis avril 1998 par celles du satellite TRACE. Celui-ci emporte un télescope de 40 centimètres de diamètre similaire dans son concept au télescope EIT de SOHO, mais ayant une résolution spatiale plus élevée (0.5 secondes d'arc) dans un champ réduit. Si SOHO et TRACE, en observant la constante restructuration du champ magnétique matérialisé par les boucles coronales (figure 6), ont permis d'identifier des possibles

© ESA/NASA)

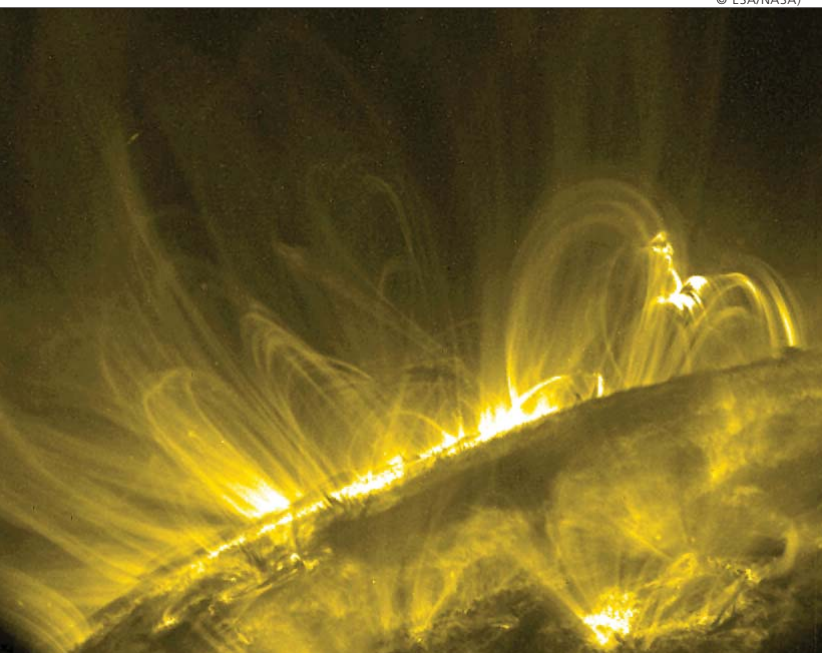


Fig. 5. – Cette image composite illustre l'étendue exceptionnelle des recherches effectuées avec SOHO, depuis l'intérieur jusqu'à la couronne et au vent solaire. Les couches internes sont sondées via les techniques d'hélioséismologie par les instruments MDI, GOLF et VIRGO. L'image du disque a été obtenue par le télescope EIT dans la raie à 304 Å de l'hélium une fois ionisé. Les spectres des structures observées sur ces images sont obtenus par les spectrographes SUMER et CDS (dont les données ne sont pas représentées sur cette image). La couronne solaire est observée dans le domaine visible avec les trois coronographes LASCO (ici une image de LASCO C2 montrant une large CME), et dans l'ultraviolet par le coronographe UVCS. Trois instruments de mesure *in situ* (CELIAS, COSTEP, ERNE) permettant l'analyse de la composition du vent solaire sont aussi embarqués à bord de SOHO.

mécanismes de chauffage de la couronne solaire, le débat est en fait loin d'être clos et constitue toujours un des objectifs des missions futures.

Le futur

Le télescope EIT et les coronographes LASCO de SOHO permettent à l'heure actuelle une réelle surveillance de l'activité solaire en détectant pratiquement toutes les CME. Cette activité de veille, combinée avec les recherches effectuées sur la cause de ces événements, forment ce que l'on appelle aujourd'hui la météorologie de l'espace. Mais la couronne solaire est un milieu transparent, et tout comme celles de ses prédécesseurs, les observations de SOHO ne donnent pas accès à la structure tridimensionnelle des objets observés. La mission STEREO, qui sera lancée début 2006, a pour but, comme son nom l'indique, de fournir cette information manquante en observant le Soleil avec deux satellites identiques dérivant sur des orbites proches de celle de la Terre, l'un en avance, l'autre en retard. On pourra ainsi reconstituer la structure en volume des boucles coronales, des protubérances et des CME, en étant capable de déterminer lesquelles vont perturber l'environnement terrestre. Dans ce but, les deux sondes de STEREO emporteront une panoplie

Fig.6 – Boucles coronales observées par le satellite TRACE à 171 Å

d'instruments qui surveilleront la ligne Soleil-Terre depuis la surface du Soleil jusqu'à notre planète. L'instrument SMEI (Solar Mass Ejection Imager) qui observe le ciel entier en utilisant la rotation du satellite Coriolis sur lequel il est embarqué a déjà démontré qu'il est effectivement possible d'observer la propagation des CMEs dans le milieu interplanétaire (figure 7).

SOHO a peut-être trouvé son successeur avec la mission SDO (lancement prévu en 2008). Cette mission reprend certains des instruments de SOHO (magnétographe et imageurs EUV) en améliorant résolution spatiale (0,5 secondes d'arc) et cadence d'observation (10 secondes environ). Placé en orbite géosynchrone, SDO fournira une énorme quantité de données à plus de 100 Megabits par seconde. Les objectifs de cette mission sont multiples : compréhension des processus de chauffage, origine du cycle d'activité, mais surtout météorologie de l'espace.

Si les missions passées ont permis des avancées extraordinaires dans la compréhension de notre étoile, il reste de

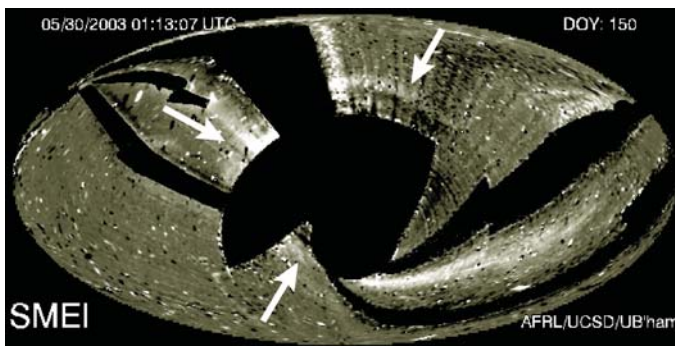


Fig. 7. – Une éjection coronale de matière (CME) dite "en halo", observée par l'instrument SMEI. Le front de la CME est marqué par les flèches blanches. De tels événements sont susceptibles d'affecter l'environnement terrestre.

nombreux terrains d'exploration pour le futur. La position dans le plan de l'écliptique de toutes les missions n'a pas encore permis une bonne observation des trous coronaux polaires. Et toutes les mesures faites jusqu'à présent sont fournies par l'analyse de la lumière émise par le plasma solaire, aucune mesure *in situ* n'ayant été effectuée directement dans le plasma coronal. La mission Solar Orbiter, dont le lancement est prévu pour 2013, sera la première mission spatiale d'exploration du Soleil dont l'orbite sortira du plan de l'écliptique, offrant ainsi une vision directe des pôles du Soleil. Son orbite elliptique aura un périhélie à 1/5 d'UA, ce qui permettra aussi d'obtenir des images de très haute résolution (5 fois plus qu'avec des instruments équivalents en orbite terrestre). Mais à cette distance, le flux solaire sera 25 fois supérieur à ce qu'il est au niveau de la Terre, ce qui porte de fortes contraintes sur la conception des instruments et de la sonde elle-même. Mais les contraintes thermiques de Solar Orbiter ne sont rien en comparaison des conditions que rencontrerait Solar Probe. Cette mission à l'avenir encore incertain pourrait être la première à effectuer des mesures *in situ* dans la couronne solaire en effectuant un passage à seulement 3 millions de kilomètres du Soleil, soit environ 4 rayons solaires. Il faudra cependant attendre au moins jusqu'à 2015 avant de savoir si cette ambitieuse sonde sera capable de survivre à son plongeon dans l'atmosphère de notre étoile. ■

Voir l'intérieur du Soleil

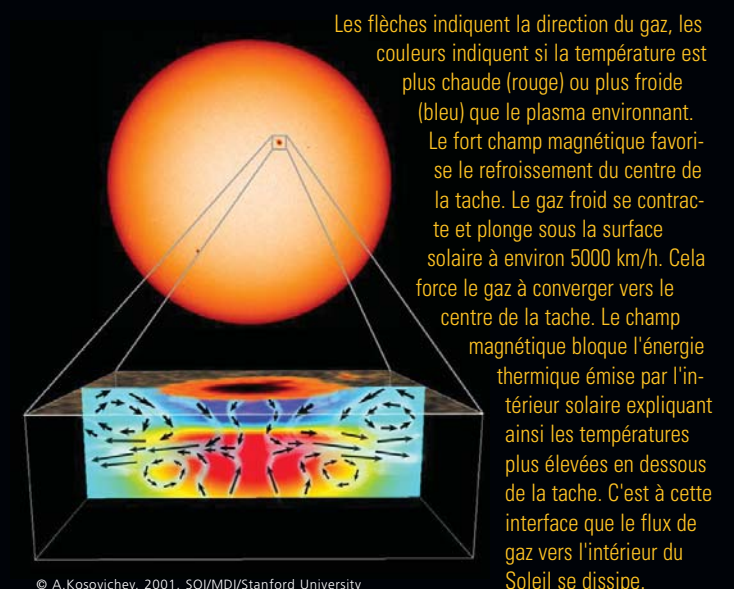
La téléchronosismologie

L'héliosismologie classique se propose de mesurer les mouvements de la surface du Soleil et de décomposer ces mouvements à différentes échelles spatiales et temporelles. L'héliosismologie s'est inspirée de la géophysique non plus pour comprendre le Soleil dans son ensemble mais pour étudier localement la structure sous-jacente du Soleil. La technique utilise directement l'observation de la propagation d'ondes acoustiques entre 2 points de la surface du Soleil. Les ondes sont réfractées dans l'intérieur du Soleil parce que la densité (et la température) augmente. La capacité d'une onde à pénétrer dans le Soleil est principalement imposée par son degré ou échelle spatiale. Plus le degré est élevé moins on pénètre profondément dans le Soleil. On voit donc immédiatement l'intérêt d'étudier la propagation des modes entre 2 points de la surface du Soleil: on accède à la structure locale du Soleil échantillonnée entre ces 2 points. En fait ce n'est pas un seul mode qui se propage d'un point à un autre mais plutôt un paquet d'ondes ayant un diagramme de propagation similaire. La figure time-distance.jpg montre le temps de propagation des ces paquets d'ondes en fonction de l'écartement angulaire de deux points situés à la surface du Soleil. L'étude des variations des temps de propagation le long d'un rayon permet, en première approximation d'avoir accès à la structure du Soleil le long de ce rayon.

Les apports scientifiques de la téléchronosismologie

Il est aussi possible de voir sous la surface d'une région active, et de comprendre la dynamique et les variations de température sous cette région. Il est apparu que les taches solaires étaient peu profondes. Les conditions thermiques passent du plus froid au plus chaud en quelques 5000 kms.

La future mission spatiale de la NASA, Solar Dynamics Observatory, emportera un instrument dont un des objectifs scientifiques est de voir sous la surface du Soleil. ■



Les flèches indiquent la direction du gaz, les couleurs indiquent si la température est plus chaude (rouge) ou plus froide (bleu) que le plasma environnant.

Le fort champ magnétique favorise le refroidissement du centre de la tache. Le gaz froid se contracte et plonge sous la surface solaire à environ 5000 km/h. Cela force le gaz à converger vers le centre de la tache. Le champ magnétique bloque l'énergie thermique émise par l'intérieur solaire expliquant ainsi les températures plus élevées en dessous de la tache. C'est à cette interface que le flux de gaz vers l'intérieur du Soleil se dissipe.

© A. Kosovichev, 2001, SOI/MDI/Stanford University

Pour en savoir plus sur les missions évoquées

- OSO** <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/oso7/oso7.html>
<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/oso8/oso8.html>
- Skylab** <http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/skylab.htm>
- SMM** <http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/smm.htm>
<http://umbra.nascom.nasa.gov/smm/>
- Yohkoh** <http://www.lmsal.com/SXT/>
- SOHO** <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>
- TRACE** <http://vestige.lmsal.com/TRACE/>
- SMEI** http://cassfos02.ucsd.edu/solar/smei_new/smei.html
<http://smei.nso.edu/>
- STEREO** <http://stp.gsfc.nasa.gov/missions/stereo/stereo.htm>
<http://sd-www.jhuapl.edu/STEREO/>
- SDO** <http://sdo.gsfc.nasa.gov>
- Solar Orbiter** : <http://sci.esa.int/solarorbiter/>
- Solar Probe** : <http://solarprobe.gsfc.nasa.gov/>