



Scruter le Soleil avec GOLF-NG

Voilà quatre siècles au moins que le Soleil manifeste une activité fortement variable montrant, de manière récurrente, des taches sombres à sa surface. Les incidences de cette variabilité sur l'atmosphère terrestre restent encore mal comprises des chercheurs malgré des corrélations surprenantes avec le climat du passé. L'invention de techniques innovantes permettra seule de maîtriser les processus générant cette variabilité et de prédire l'activité solaire du prochain siècle.

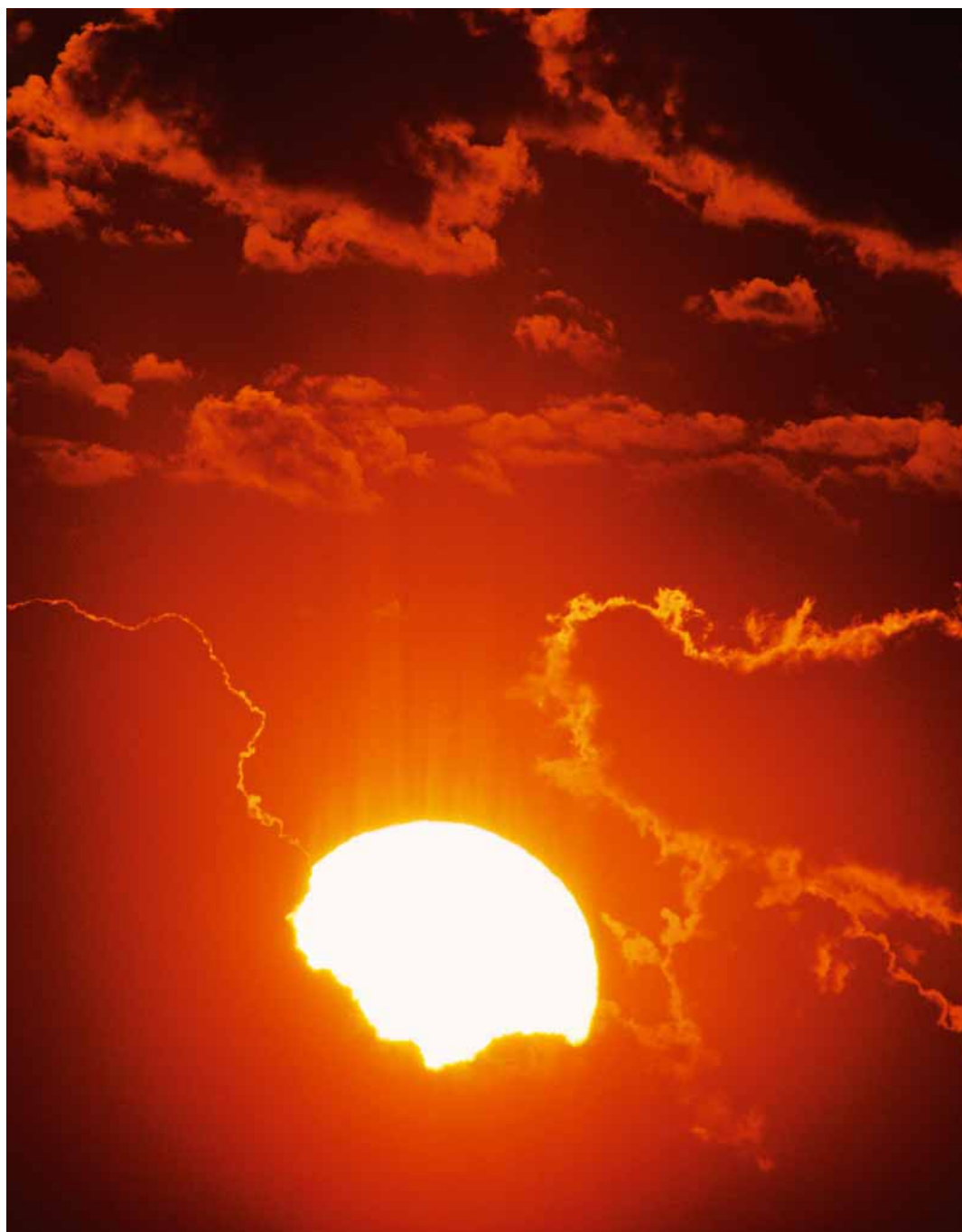


Photo Link

Le CEA, impliqué dans les problématiques d'environnement terrestre, construit un deuxième **spectromètre à résonance** multicanal appelé GOLF-NG (pour *Global Oscillations at Low Frequency* et *New Generation*). Pour cet instrument, il s'agira d'éclaircir les rôles respectifs joués par le cœur solaire et la région de transition entre la

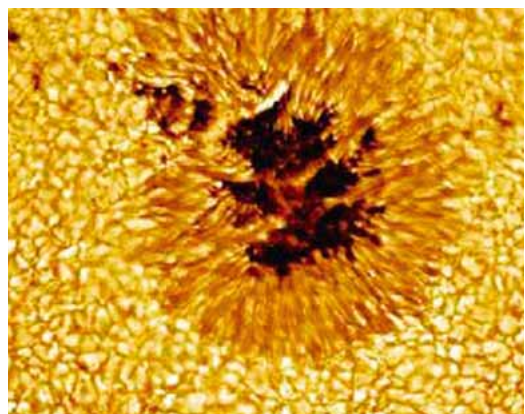
photosphère et la chromosphère d'où émergent des régions plus sombres appelées « taches solaires » ou plus brillantes appelées « facules » (figure 1). Depuis plus d'une dizaine d'années, le satellite SoHO (pour *Solar and Heliospheric Observatory*) scrute le Soleil interne et externe, en continu, grâce à une dizaine d'instruments capables d'enregistrer

toutes les manifestations de son activité – une collaboration entre l'ESA et la NASA. Ainsi SoHO suit, en permanence, les éjections de matière coronale, l'émission de particules appelée « vent solaire » ou encore des taches sombres apparaissant régulièrement à la surface du Soleil et migrant, au cours du temps, des hautes latitudes vers l'équateur. Les astrophysiciens connaissent bien la source de ce phénomène occasionné par une température locale plus froide associée à une augmentation du champ magnétique. Le mérite revient à ce satellite d'avoir révélé l'origine interne de cette activité magnétique grâce à la mesure d'ondes stationnaires permanentes excitées par la convection. Il suit donc de nouveaux indicateurs d'activité depuis déjà plus de 15 ans.

Le principe des mesures sismiques solaires

La meilleure façon de connaître les ondes internes pénétrant jusqu'au cœur du Soleil consiste à mesurer la variation temporelle de la « vitesse Doppler » du Soleil par rapport à l'observateur et d'en extraire le spectre de fréquence des modes internes. Cette vitesse, d'environ 1 km/s, s'apprécie en fonction du décalage en longueurs d'onde de raies bien connues comme le sodium ou le nickel. Ces raies d'absorption se forment dans l'atmosphère solaire agitée par la turbulence. La raie de sodium est utilisée par GOLF et le nickel par MDI (pour *Michelson Doppler Imager*), deux instruments embarqués sur le satellite d'observation SoHO. C'est l'analyse de la lumière provenant des raies d'absorption de ces éléments dans l'atmosphère solaire qui donne ces vitesses.

L'instrument GOLF offre aux astrophysiciens un concept de spectromètre à résonance extrêmement performant. Il opère par étapes. La première consiste à filtrer les photons solaires dans une gamme de longueurs d'onde correspondant à la raie du sodium. Ensuite, les photons ainsi absorbés sont capturés dans une cellule contenant un gaz pur de sodium, puis réémis dans un mince pinceau de longueur d'onde, sur chaque flanc de raie. Par sa référence atomique, il s'agit d'une méthode de précision unique. Elle permet notamment de mesurer l'interférence constructive des modes générant un signal stochastique dont la vitesse est de l'ordre du



Un zoom sur une tache solaire montre comment la granulation de surface fait place à une matière dominée par le champ magnétique.

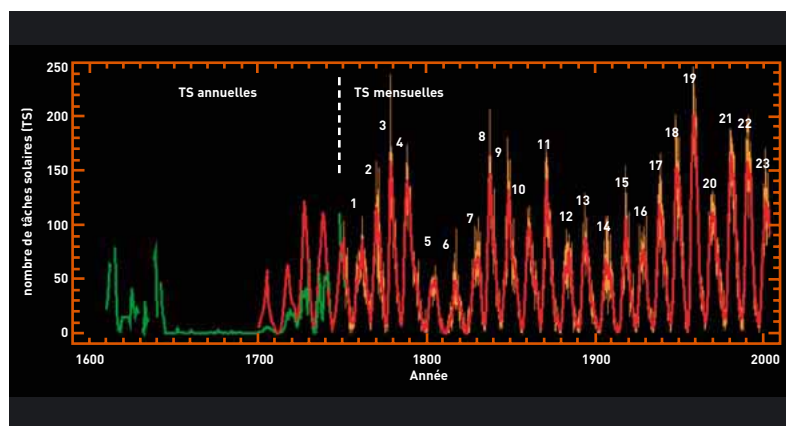


Figure 1. Depuis les premières observations de Galilée, le nombre de taches a varié sur la surface du Soleil, rythmé par un cycle de 11 ans, mais avec une amplitude encore inexpliquée.

m/s. Ce signal se surimposant à la vitesse globale du déplacement du soleil, sa mesure temporelle donne le spectre fréquentiel des modes. Pour améliorer la qualité de détection de signaux individuels très faibles, GOLF-NG va extraire le signal à huit hauteurs dans la raie du sodium NaD1 (figure 2).

Les signaux extrêmement faibles d'un Soleil bien turbulent

Depuis plus de dix ans, les sondes spatiales se succèdent : après SoHO viennent les satellites PICARD⁽¹⁾ (microsatellite du Cnes) et SDO (pour *Solar Dynamics observatory*) dont les lancements sont prévus pour fin 2009. Grâce à ces instruments, les

(1) Du nom de l'astronome français Jean Picard (1620-1682) qui fit les premières mesures de précision du diamètre solaire au XVII^e siècle.

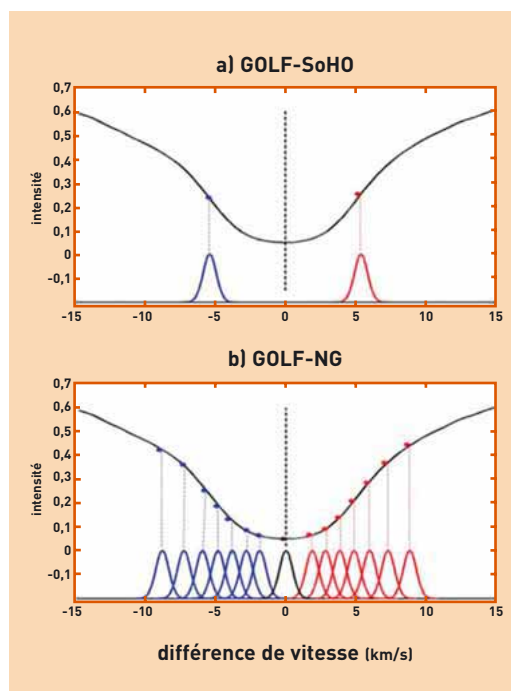


Figure 2. Principe de mesure du spectromètre à résonance multicanal : les huit mesures bleues sont simultanées car la cellule, remplie de gaz de sodium, est placée dans un aimant à champ variable ; l'alternance de mesures bleues et rouges est garantie par un polarisateur à cristaux liquides.



S. Turck-Chièze/CEA

Le satellite SoHo (lors des derniers tests d'intégration) a été lancé par une fusée Atlas-Centaure et scrute le Soleil à 1,5 million de km de la Terre. Ce satellite, lancé en 1995, est toujours en observation avec des instruments qui étudient le Soleil, du cœur à la couronne. L'instrument GOLF est visible à gauche de l'image.

connaissances vont progresser sans pour autant que toutes les problématiques soient résolues. En effet, il faut savoir que les modes acoustiques déplacent les couches atmosphériques selon une vitesse individuelle maximale de 20 cm/s avec une périodicité de quelques minutes. Les **modes de gravité**, sondes indispensables pour atteindre la dynamique du cœur solaire, se manifestent par des signaux périodiques de quelques heures et des vitesses n'excédant pas 1 mm/s, soit des déplacements d'environ 18 mètres à la surface d'un soleil bien turbulent. Ce défi, l'instrument GOLF l'a déjà partiellement relevé en réalisant des mesures à 400 kilomètres au-dessus de la **photosphère solaire**, région plus calme et transparente et en détectant les premières manifestations des modes de gravité. Avec lui les équipes du CEA écrivaient la grande épopée dont GOLF NG contribuera à tourner l'ultime page.

GOLF-NG un spectromètre à résonance multicanal

Avec ce nouvel instrument entièrement réalisé à l'Irfu, il sera notamment possible de mesurer simultanément le spectre des modes d'oscillation solaires à huit hauteurs dans l'atmosphère (figure 3) entre 200 et 800 kilomètres au-dessus de la **photosphère**. Pour les astrophysiciens, ce spectromètre particulier présente une série d'avantages. D'abord, il offre une meilleure détection des signaux acoustiques en raison de leur amplitude croissant exponentiellement, avec la hauteur, dans l'atmosphère. Ensuite, il perfectionne la détection des modes de gravité résultant de la réduction des **effets granulaires**. Enfin GOLF-NG mesure en continu l'évolution du comportement global de l'atmosphère, entre la photosphère et la **chromosphère**, région d'émergence du flux magnétique.

Le champ magnétique, nécessaire pour réaliser l'échantillonnage en huit points de la raie D1 du sodium, n'est autre qu'un champ axial linéairement variable de 0 à 12 **KGauss**. Il s'obtient à l'aide d'un aimant permanent construit avec des aimants en néodyme-fer-bore et des pièces polaires en fer-cobalt de petite taille (20 x 15 x 10 cm³). L'homogénéité transverse du champ, en tout point de sa variation le long de son axe, est meilleure de 2 % dans un volume cylindrique de 10 mm de diamètre. Cette propriété garantit l'uniformité de la réponse en longueur d'onde pour l'ensemble du volume de résonance de la cellule de gaz. Réalisée en pyrex haute température, celle-ci comporte deux parties indispensables au déroulement de l'opération : le

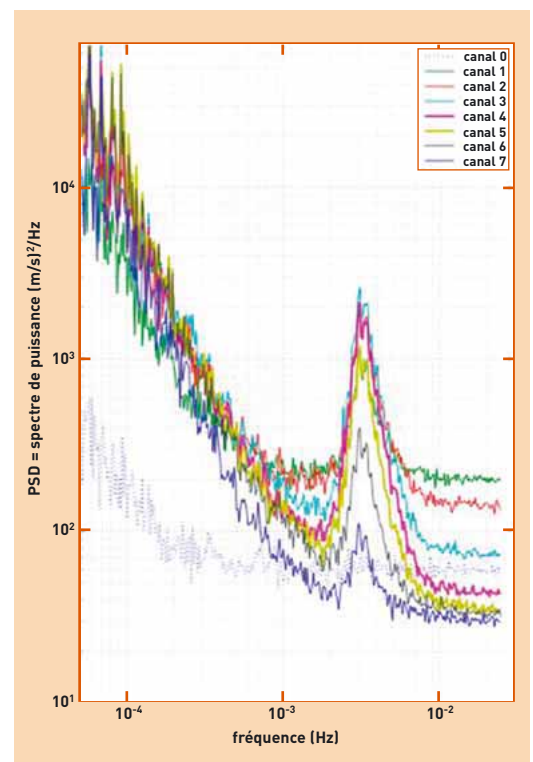


Figure 3. Première lumière d'un prototype du spectromètre à résonance multicanal GOLF-GN. Sur cette figure apparaît le spectre des modes acoustiques, mesuré simultanément à huit hauteurs dans l'atmosphère. L'étape suivante consistera à améliorer la détection à basse fréquence pour affiner la détection des modes de gravité solaires.

sodium pur se trouve à l'état solide dans sa partie inférieure nommée queue lors que la cellule est froide; lors du chauffage, celui-ci monte dans l'ampoule supérieure placée dans l'axe du champ magnétique croissant, lieu des processus de résonance (figure 4). L'ampoule de verre laisse libres 31 ouvertures pour les photons réémis, bien qu'habillée d'un masque optique et d'éléments chauffants. Les températures de fonctionnement atteignent 190 °C dans la partie supérieure et 175 °C dans la partie inférieure afin d'éviter toute condensation sur ces fenêtres. La puissance électrique nécessaire pour chauffer la cellule jusqu'aux températures indiquées ne dépasse pas les 2 watts. Aucun dispositif de régulation n'y a été installé – l'objectif étant d'éviter tout bruit périodique, d'ordre thermique ou électrique, dans la gamme de fréquence des ondes à détecter (jusqu'à 50 microhertz environ). La stabilité du dispositif, son homogénéité thermique et sa faible consommation résultent de deux éléments : d'abord, d'isolations thermiques à base d'écrans cylindriques en aluminium placés autour de la cellule; ensuite, de la fabrication des pièces de suspension en chrome-cobalt, matériaux à très faible conductivité thermique.

L'ensemble s'intègre dans une pièce mécanique de haute précision, réalisée en inox amagnétique, placée dans l'entrefer de l'aimant et sans contact direct. Cette pièce assure également le placement et le maintien des éléments optiques composant les 31 voies de mesures des 8 canaux du spectrophotomètre. Constitués de lentilles sphériques traitées antireflet, ces éléments optiques ont été dimensionnés de manière à pouvoir travailler avec des températures atteignant les 80 °C. Ces lentilles captent un maximum de lumière de résonance de l'intérieur de la cellule et, par couplage à une fibre optique en silice, la guident vers la matrice de photodétecteurs. En amont de l'aimant, un sous-ensemble compact assure trois missions : traiter le faisceau solaire incident, garantir un éclairage uniforme dans la cellule et le changement d'état de la **polarisation**. Cette dernière étape nécessite l'utilisation d'un cube séparateur de grande pureté et d'un retardateur de phase pourvu d'une lame à cristaux liquides. C'est le changement de phase qui induit le changement de polarisation circulaire du faisceau, à un rythme pouvant passer sous la seconde pour des durées de commutation inférieures à la dizaine de millisecondes. Ce dispositif à cristaux liquides, développé par des chercheurs de

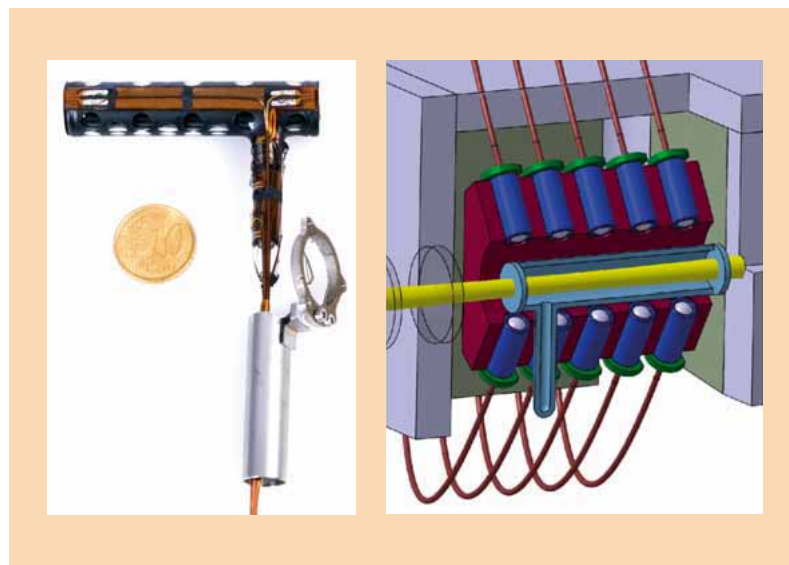
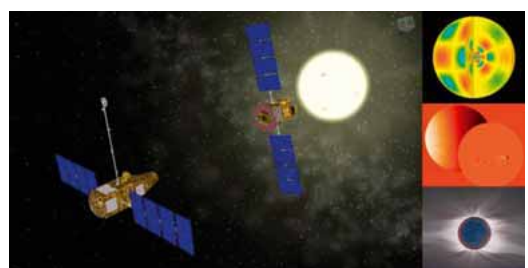


Figure 4. Cellule et coupe en trois dimensions du schéma d'implantation dans l'aimant.

l'Institut d'astrophysique des Canaries, autorise une pureté de polarisation allant jusqu'à 99,99 %. Fonctionnel depuis janvier 2008, GOLF-NG reste l'unique spectromètre solaire capable d'acquérir, de façon simultanée et rapide, la vitesse Doppler à huit hauteurs dans l'atmosphère solaire. Son optimisation devrait permettre aux chercheurs d'atteindre les performances requises par les missions spatiales et de garantir la fiabilité de l'instrument. Une première campagne d'observations s'est déjà déroulée, en été 2008, à Tenerife (Espagne) qui a permis de qualifier le principe de ce nouveau spectromètre.

Pour les astrophysiciens, GOLF-NG figure déjà comme l'instrument indispensable à la compréhension des manifestations internes de l'activité solaire en région **radiative**. Il suivra d'abord l'activité solaire au sol mais a vocation, à terme, d'intégrer une future mission solaire spatiale. Un grand projet spatial a également été étudié avec l'industriel **Thalès**, pour les prochaines missions de l'ESA. Ce projet ambitionne l'observation globale et locale de l'activité solaire ainsi qu'une étude de la basse couronne. Surveiller la dynamique solaire à court et moyen terme (de l'ordre de la dizaine ou de la centaine d'années) et suivre son impact sur l'atmosphère terrestre, voilà le grand défi des prochaines décades.



Pour succéder à l'observatoire solaire conçu entre l'Agence spatiale européenne (ESA) et la NASA, une mission de vol en formation est proposée pour décrire complètement et continuellement l'impact de l'activité solaire sur l'environnement de la Terre.

> Sylvaine Turck-Chièze

Service d'astrophysique (SAp)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles
(CEA-Université de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Pierre-Henri Carton

Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay