

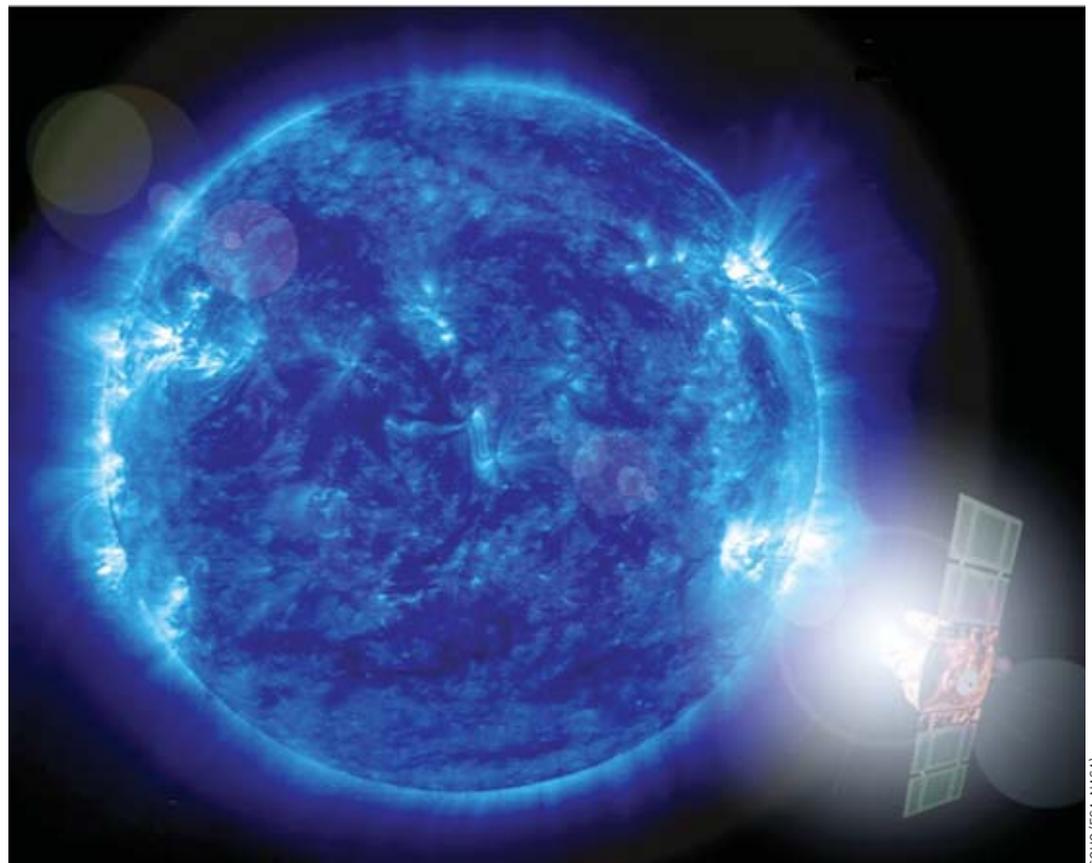


Grâce aux nouvelles techniques d'observations astronomiques, notre vision de l'intérieur du Soleil est en pleine évolution. D'un statut d'astre chaud, stable et fidèle, le Soleil est devenu un véritable laboratoire de physique présentant des conditions de température et de densité inaccessibles sur Terre. Ceci a permis de repousser les frontières des connaissances de la matière dans le domaine des plasmas et de la physique des particules. La compréhension des étoiles amène le développement de nouveaux champs d'investigation auprès des réacteurs nucléaires et des lasers de puissance. Sont aujourd'hui en discussion la connexion entre les différentes échelles temporelles et de nouveaux questionnements sur le rôle de la rotation et du champ magnétique ainsi que leurs implications dans l'interaction du Soleil avec la Terre.

Vision statique et dynamique de l'intérieur solaire

L'apport décisif de l'héliosismologie à la connaissance de l'astre

Plusieurs disciplines ont fait progresser de façon décisive, ces dernières années, la compréhension de notre étoile. Parmi elles, l'étude des "tremblements de Soleil" a joué un rôle majeur en donnant une nouvelle consistance aux modèles de l'astre du jour.



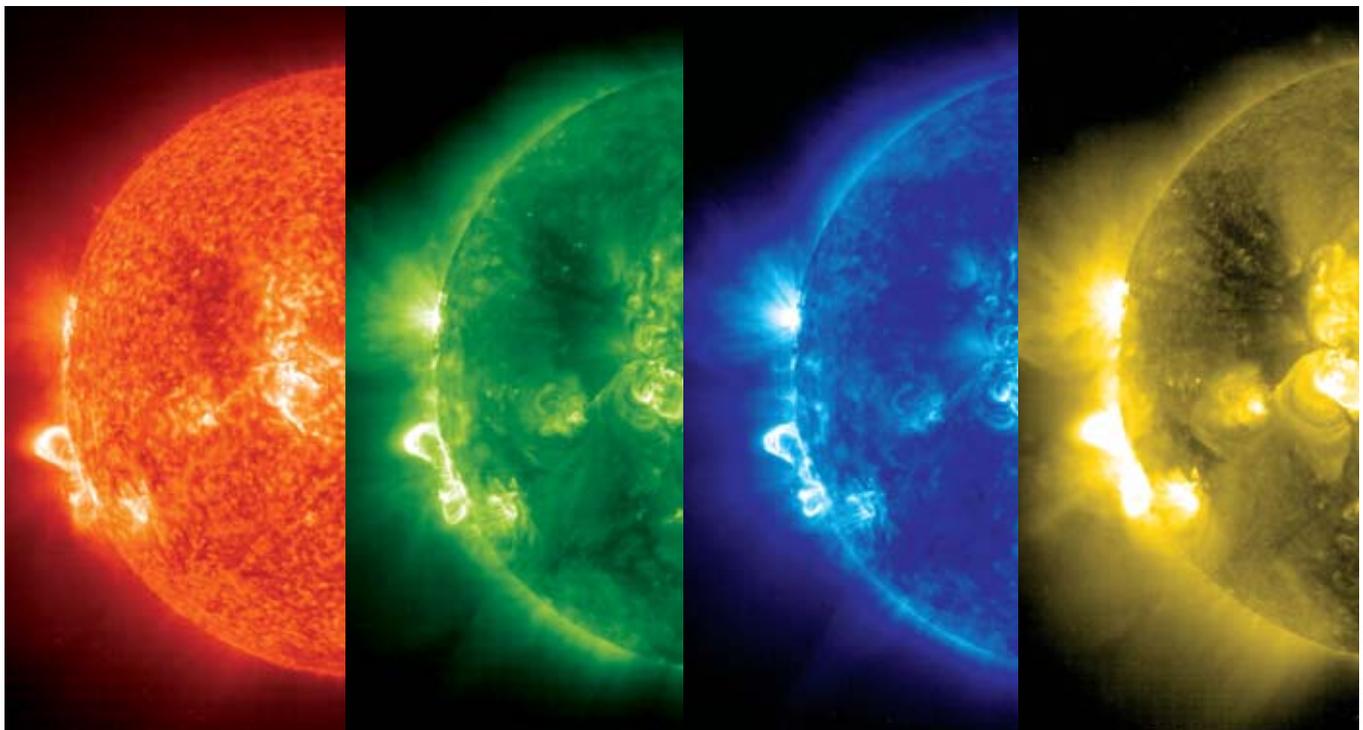
Le satellite SOHO, avec ses douze instruments embarqués, scrute sans relâche le Soleil.

Il y a souvent un grand pas entre comprendre comment fonctionne un objet céleste et pouvoir le décrire avec suffisamment de précision pour que lui-même devienne un laboratoire pour étendre notre connaissance en physique fondamentale.

Le Soleil, une référence en astrophysique

Ce pas a été franchi en ce qui concerne le Soleil. L'astrophysicien complète l'astronome qui observe, en interprétant ses observations. Son rôle, dans un premier temps, est de chercher les processus dominants puis d'en ajouter d'autres, secondaires, jusqu'à reproduire les observations. Pendant longtemps, compte tenu de la limitation des observations au **spectre visible**, l'astrophysique est apparue aux autres

entièrement dédié à l'observation du Soleil. Sa supériorité est de réunir à son bord douze instruments qui regardent le Soleil à des **longueurs d'onde** différentes. Cinq instruments sont consacrés à l'étude de l'**atmosphère solaire**, testant ainsi la **couronne**, la **chromosphère** et la **photosphère** situées à des températures différentes et présentant donc des aspects de **plasmas** différents (encadré A, *Toute la lumière sur le Soleil*, p. 13). Quatre autres sont destinés à l'étude du **vent solaire**. Trois instruments de sismologie solaire permettent de sonder l'intérieur de l'**étoile**, occasion unique d'en bâtir enfin une vision complète. Les équipes du CEA ont participé activement à la conception, à la réalisation de l'instrument de sismologie solaire GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*; voir *Les mesures sismiques solaires*,



Le Soleil vu sous différentes longueurs d'onde par l'instrument EIT (*Extreme ultraviolet Imaging Telescope*) embarqué à bord de SOHO. L'observation de plusieurs raies d'absorption permet de sonder les températures de la granuleuse photosphère (5800 K) à gauche jusqu'à la couronne où le plasma est de nouveau chauffé à des millions de degrés (à droite), en passant par la chromosphère située près du minimum de température. Il est ainsi possible de suivre les manifestations d'activité du Soleil, dont l'origine se trouve sous la photosphère.

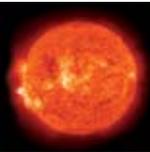
domaines de la physique comme une science approximative ou d'ordre de grandeur. Ce fut pourtant une étape clé et décisive dans la compréhension de l'Univers, car le nombre de processus mis en jeu est très important et la cohérence d'ensemble redoutable, ce qui signifie que la palette de l'astrophysicien doit être très riche. Il doit être capable de ne pas s'égarer à travers tous les possibles.

Aujourd'hui, l'ensemble du **spectre électromagnétique** est accessible grâce à la mise sur orbite d'instruments spatiaux et au développement de détecteurs spécifiques. Dans le cas du Soleil, cela permet de mettre en évidence les éjections de particules, les vents, les **rayons X** et **ultraviolets**... Lancé en 1995, le satellite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), collaboration internationale entre l'Agence spatiale européenne (ESA) et la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA),

encadré), ainsi qu'à son interprétation. Ceci donne du Soleil des images bien étonnantes et révèle la richesse de nos visions solaires (encadré B, *Des spectres qui en disent long*, p. 17).

Une étoile passée au crible de la sismologie

La résolution des équations de structure (voir *Soleil nucléaire*, encadré 3) nécessite d'introduire une physique riche et complexe qui décrit les conditions thermodynamiques de l'étoile que l'on souhaite modéliser. Entre 1960 et 1985, une rapide revue de l'ensemble des conditions stellaires a été faite, et les étoiles ont pris vie avec des chemins évolutifs fort différents (voir *Soleil nucléaire*, figure 1). Un pas a été de nouveau franchi, ces vingt dernières années, grâce au développement de



l'**héliosismologie** qui a vraiment fait passer cette science du qualitatif au quantitatif.

Cette technique, empruntée aux géophysiciens, est caractérisée par la richesse de son information. En effet, l'astrophysicien est doublement chanceux. D'une part, le Soleil est un gaz, assimilable à une sphère, et la propagation des ondes est ainsi relativement facile à décrire. D'autre part, le phénomène d'excitation des modes est permanent et produit par le Soleil lui-même (voir *Les mesures sismiques solaires*). Il n'y a par conséquent aucune source supplémentaire à décrire, pas d'interaction perturbatrice et un signal continu. Toute l'information portée par ces ondes concerne donc directement le plasma solaire.

Deux types d'ondes se propagent dans le Soleil. Les *ondes acoustiques* sont engendrées par les fluctuations de pression induites par la **granulation** de surface. Les *ondes de gravité* proviennent principalement de l'interface entre la **convection** et la **radiation** et sont régies par la **gravité** (figure 1). Seuls les modes acoustiques ont fourni une information exploitable actuellement. Leur richesse vient de la possibilité unique de **résoudre** le Soleil en un grand nombre de pixels, 1024×1024 pour l'instrument MDI (*Michelson Doppler Imager*)

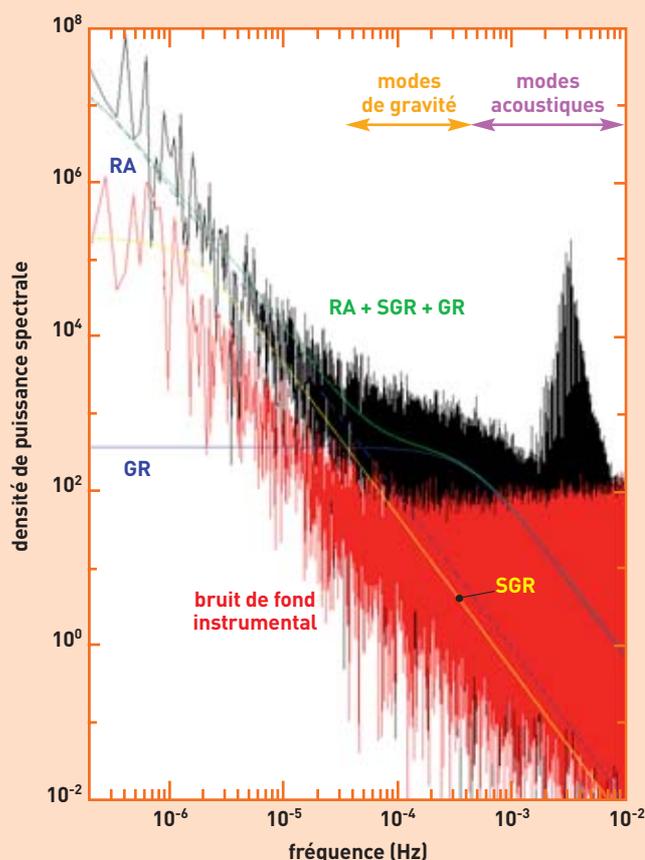
embarqué à bord de SOHO, qui mesure les ondes les plus superficielles, ou de le regarder globalement comme le fait GOLF, qui détecte les modes pénétrant jusqu'au **cœur**. L'ensemble des modes acoustiques existants, en fait des millions, est accessible à l'observation. Ceci permet de reconstruire les propriétés du plasma solaire de la surface jusqu'à une fraction du cœur nucléaire, en s'appuyant sur deux quantités : la vitesse du son et la décomposition des modes en composantes liées à la rotation et au champ magnétique des couches traversées.

Armés de tels outils de confrontation, il devient possible de résoudre les équations de structure et passer ainsi d'une vision purement théorique à une vision numérique, quantitative et vérifiable. Cette stimulation intellectuelle entre théoriciens, numériques et observateurs a permis de répondre à des questions concrètes comme : quels sont les véritables flux de **neutrinos** émis par le Soleil ? Quelle est la température centrale ? Quel est l'âge des étoiles les plus anciennes ?...

Un laboratoire riche de physique complexe : l'état de la matière

La composition du Soleil provient du nuage dans lequel il est né. Celui-ci a fixé la quantité d'**hydrogène** disponible dans le cœur nucléaire. Le profil radial de la vitesse du son reflète l'état thermodynamique de la matière et ses brusques changements. Il est possible d'identifier des régions où les **éléments** importants changent d'état (encadré 1) : position où l'**hélium** devient partiellement **ionisé**, position où le transport ne se fait plus par radiation mais par convection grâce en particulier au changement d'état d'ionisation de l'oxygène (encadré 2). Dans la partie centrale, le profil de la vitesse du son est aussi très sensible à la réaction principale pp (**proton + proton**) et donc à sa **section efficace** d'interaction, ainsi qu'aux autres réactions importantes de **fusion**.

L'extraction précise de la vitesse du son, aujourd'hui obtenue à quelques 10^{-4} , offre la possibilité d'observer le plasma solaire *in situ*. Ainsi, l'héliosismologie a permis d'évaluer la quantité d'hélium photosphérique, inaccessible à la mesure directe, et donc indirectement celle de l'hydrogène. Le fait que l'hélium représente le quart de la masse à la photosphère a beaucoup surpris. C'est une valeur quasiment **primordiale** alors que le Soleil est né environ 8 milliards d'années après la formation de notre **galaxie**. Ce résultat met en évidence la nécessité d'introduire la lente migration **gravitationnelle** relative à l'hydrogène de l'ensemble des éléments et d'en quantifier l'effet : en 4,6 milliards d'années, la composition relative d'hélium par rapport à l'hydrogène est réduite de 8 à 9 % en **fraction de masse** par rapport à la valeur initiale, celle des éléments plus lourds comme le carbone, l'azote et l'oxygène d'environ 10 %. Un détail, en apparence, mais avec un fort impact sur l'âge des plus vieilles étoiles, qui s'en sont trouvées rajeunies de plusieurs milliards d'années. Puis le profil de la vitesse du son a mis en évidence ce brutal mais ténu changement de pente qui est le signe d'une modification de transport d'énergie entre la convection et la radiation, avec un comportement très particulier sur une extension de quelques pour-cent en rayon (voir la figure 3).



R. Garcia / CEA

Figure 1.

Domaine fréquentiel des deux types de modes. Les modes acoustiques apparaissent au-dessus de 0,5 mHz, le domaine des modes de gravité est situé entre 50 μ Hz et 0,5 mHz. Sont surimposés sur les observations de GOLF, le bruit instrumental et les bruits solaires associés à la granulation (GR), aux régions actives (RA) et à la supergranulation (SGR). La vitesse du son dans le milieu se déduit de la mesure du temps acoustique de propagation d'un mode, à condition de disposer d'un modèle proche pour définir la taille de la cavité traversée. Elle est directement reliée aux quantités thermodynamiques par la relation $c^2 = \gamma P / \rho$, où γ , P et ρ désignent respectivement l'indice **adiabatique** du gaz, la pression et la densité. Par l'étude de ces modes, il est aussi possible d'accéder à la rotation interne et à des effets de champ magnétique.

B Des spectres qui en disent long

Les différents rayonnements se distribuent le long du **spectre électromagnétique** en fonction de leurs longueurs d'onde, des plus courtes et des plus énergétiques (**rayonnement gamma**) aux plus longues (les ondes radio), en passant par la lumière visible. Le spectre de ce dernier domaine, par exemple, est obtenu en faisant passer la lumière par un prisme qui la décompose en ses différentes composantes, du rouge au violet (figure a). Un arc-en-ciel donne aussi un spectre de la lumière visible émanant du Soleil, par réfraction et réflexion dans et sur des gouttes d'eau.

Ce même principe s'applique à l'ensemble des **rayonnements électromagnétiques** en utilisant des **spectrographes**, qui analysent la répartition spectrale de l'énergie de ces rayonnements et des **spectromètres** qui enregistrent les spectres élément par élément à l'aide de détecteurs photo-électriques et mesurent l'intensité des rayonnements en fonction de leur **longueur d'onde**.

En astrophysique, la **spectroscopie** consiste à étudier les corps à distance à partir des rayonnements qu'ils émettent ou des transformations que font subir à ces derniers d'autres corps situés sur leur trajet. Les spectres font apparaître, entre de larges bandes continues (dont chacune porte le nom de continuum spectral), des raies correspondant chacune à une longueur d'onde particulière et, finalement, à l'énergie d'un atome ou d'une molécule du corps observé. Ces **raies spec-**

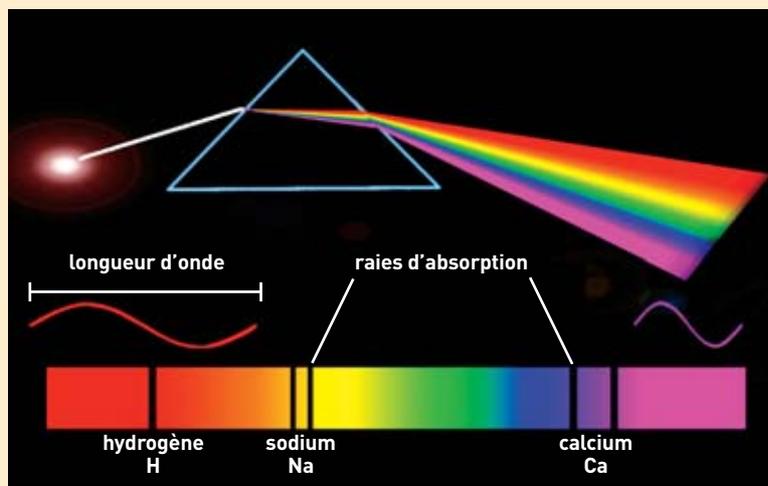


Figure a.

trales sont de deux types, les raies d'émission et les raies d'absorption.

Les **raies d'émission**, claires, correspondent à des rayonnements émis directement par un corps porté à très haute température. Le **spectre d'émission** permet donc de détecter la présence d'atomes ou de molécules dans l'objet émetteur.

Les **raies d'absorption**, sombres, correspondent également à une longueur d'onde précise, mais en vertu du processus par lequel l'intensité d'un rayonnement décroît quand il traverse un milieu matériel auquel il transfère tout ou partie de son énergie. C'est ainsi que l'on peut analyser la composition d'une source chaude radiative comme le Soleil à partir de l'absorption par son atmosphère d'une partie des rayonne-

ments électromagnétiques qu'il émet (**spectre d'absorption**).

Ce n'est pas tout : l'analyse du décalage spectral permet d'évaluer le mouvement relatif du corps émetteur, grâce à l'**effet Doppler-Fizeau**⁽¹⁾, selon le même principe qui rend de plus en plus aigu le bruit d'un véhicule qui s'approche d'un observateur et de plus en plus grave celui de l'engin qui s'en éloigne. La variation apparente de **fréquence** (d'autant plus élevée que la longueur d'onde est plus courte) est ainsi proportionnelle à la vitesse relative entre l'observateur et la source.

Pour une source lumineuse, cet effet indique que les raies du spectre de cette source sont décalées vers le bleu (**blueshift**), autrement dit des longueurs d'onde plus courtes, quand elle s'approche ou vers le rouge (**redshift**) pour des longueurs d'onde plus longues quand elle s'éloigne (figure b).

L'effet Doppler est notamment utilisé en astrophysique pour connaître la vitesse radiale des étoiles ou des galaxies car leur mouvement, selon la perspective, provoque un déplacement des raies émises par rapport à leur valeur nominale ou aux mêmes raies émises par une source terrestre.

Enfin, la division de raies spectrales en réponse à un champ magnétique (**effet Zeeman**) est utilisée pour mesurer la puissance des champs magnétiques d'objets astronomiques, en particulier du Soleil.

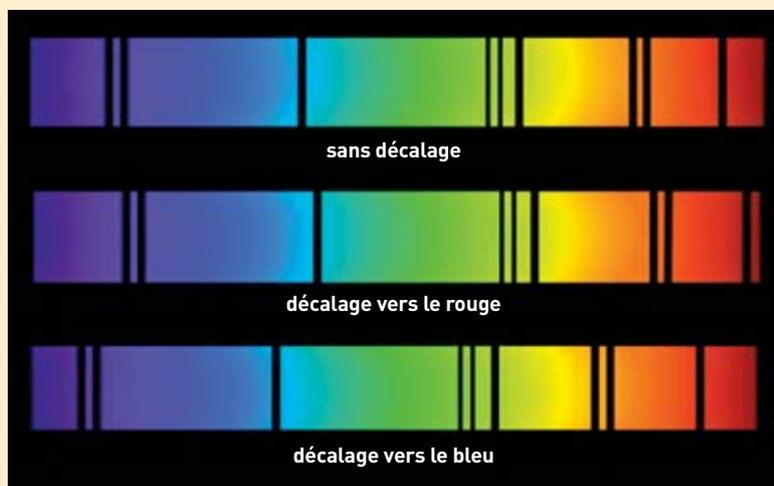
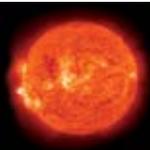


Figure b.

(1) Découvert par le physicien autrichien Christian Doppler pour les ondes sonores, cet effet a été étendu à l'optique par le Français Hippolyte Fizeau.



Les caractéristiques du plasma solaire

1

Le gaz est sous forme d'un **plasma** dans tout l'intérieur solaire. Est appelé plasma l'état d'un gaz où les **électrons** se trouvent dissociés des **protons**. Ainsi, alors qu'un **atome** est neutre (autant de protons de charge positive que d'électrons de charge négative), un plasma est une assemblée de constituants chargés. Un **élément** peut être totalement ou partiellement **ionisé**, cet état dépend de la température et de la densité. Plus elles sont élevées, plus le plasma est ionisé.

Prenons l'exemple de l'oxygène. À l'état d'atome, il est constitué d'un **noyau**, comportant 8 protons et 8 **neutrons**, et d'électrons périphériques qui restent liés au noyau. Au centre du Soleil, où la température et la densité atteignent respectivement $15 \cdot 10^6$ K et 150 g/cm^3 , l'oxygène est complètement ionisé, se présentant sous la forme d'un noyau 8 fois chargé positivement et de 8 **électrons libres** qui se promènent au rythme de l'agitation thermique. L'oxygène est dans cet état de plasma dans toute la **région radiative**, mais plus la température et la densité vont décroître, moins les électrons vont se détacher de l'influence du noyau. Vers quelques millions de degrés, un électron restera lié au noyau oxygène, puis deux, puis trois jusqu'à ce que l'oxygène apparaisse sous l'aspect atomique à la surface du Soleil.

Dans un plasma, les mouvements des différents constituants sont liés à l'agitation thermique, mais aussi aux mouvements d'ensemble imposés par la rotation du gaz. La présence de particules chargées positivement et d'autres négativement va créer des courants et éventuellement des **champs magnétiques**.

Dans la région radiative, la prise en compte de la composition détaillée et des sections efficaces d'interaction des **photons** a permis de mieux évaluer la température centrale et donc les taux de réactions thermonucléaires. Il a fallu plus de dix ans aux différentes équipes travaillant aux États-Unis et en France sur l'interaction photon-matière pour introduire tous les processus et tous les éléments qui contribuent à définir le cheminement des photons du centre du Soleil à la surface (**encadré 2**). Il n'est possible de sonder le cœur nucléaire que si les scientifiques maîtrisent correctement les régions plus externes. Ceci nécessite

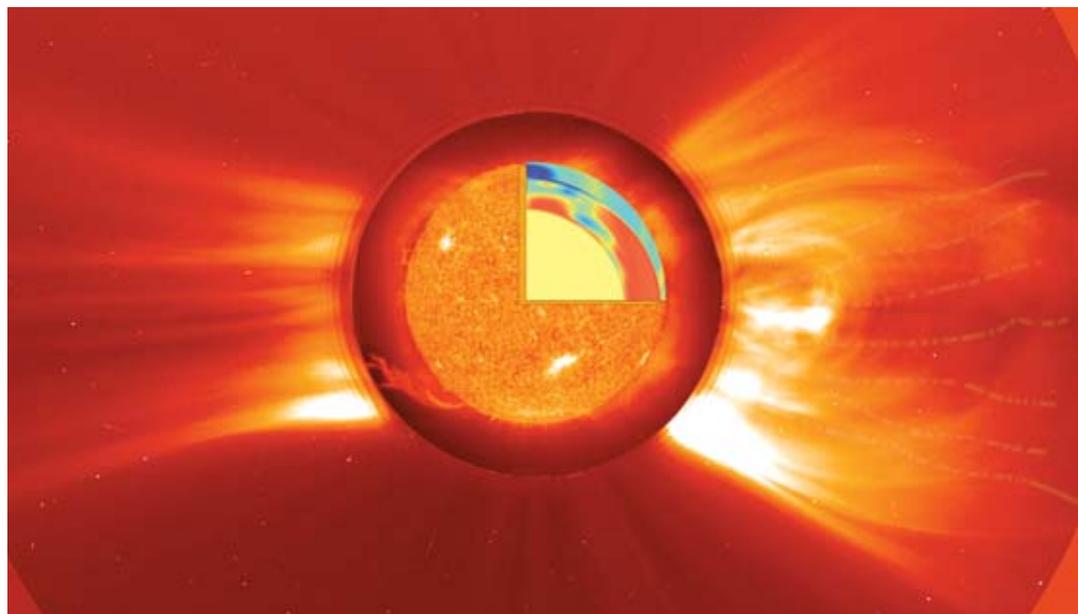
un effort dans la qualité d'extraction des fréquences des modes et aussi dans la modélisation théorique, car la compréhension du Soleil repose sur l'adéquation entre les représentations théorique et sismique.

Un cœur nucléaire en partie maîtrisé

Il ne suffit pas de connaître les réactions nucléaires impliquées dans l'évolution des étoiles pour décrire correctement le cœur nucléaire à cause de la très forte dépendance en température de la plupart d'entre elles. Le Soleil est l'unique plasma disponible à ce jour pour tester l'**interaction faible**, la production de neutrinos (**encadré 3**) et les spécificités du plasma. Beaucoup de physique est nécessaire pour décrire les 25% les plus internes en rayon, qui renferment plus de la moitié de la masse du Soleil. Celui-ci doit sa longévité au fait que l'interaction entre deux protons, qui est la réaction de départ du processus de fusion, est une interaction faible, laquelle n'est pas accessible au laboratoire. Cette interaction est directement liée au temps de vie du **neutron**, estimé en l'occurrence à 8 minutes, un proton s'étant transformé en neutron : elle a donc un caractère fondamental. Par ailleurs, la réaction pp, régie par l'interaction faible, est la principale source de neutrinos émis par le Soleil. Bien comprendre le plasma solaire est aussi crucial pour caractériser les plasmas que les physiciens cherchent à fabriquer dans le futur pour l'énergie de fusion, car les conditions thermodynamiques du plasma sont similaires même si les réactants sont différents (**voir le chapitre II**).

Des mesures en laboratoire complexes

Pour définir à quel rythme les protons se transforment en hélium à travers les réactions définies dans l'**encadré 1 de l'article Soleil nucléaire**, les sections efficaces des différentes chaînes ppI, ppII, ppIII et du **cycle CNO** doivent être connues. Seules celles gouvernées par l'**interaction forte** sont accessibles à l'expérimentation et de nombreux laboratoires de physique nucléaire ont entrepris ces mesures. L'astrophysicien américain



Le satellite SOHO teste le Soleil de sa partie intime jusqu'à la couronne où les éruptions peuvent être violentes emportant des centaines de tonnes du plasma solaire. L'asymétrie de ces éjections est clairement visible et importante pour comprendre la vie magnétique d'une étoile comme le Soleil.

William Alfred Fowler a compilé l'ensemble des résultats obtenus et a reçu le prix Nobel de physique en 1983 pour cet effort considérable. Toutefois, les conditions de laboratoire ne sont pas celles des étoiles. Les expériences sont en général effectuées à énergie plus haute que celle rencontrée dans le plasma solaire, car la **barrière coulombienne** exclut souvent ce domaine, qui varie de 1,5 keV pour l'interaction pp à quelques dizaines de keV pour les réactions du cycle CNO (variation en $Z_1 Z_2$ où Z est le nombre de protons des réactants). De plus, la plupart des mesures en laboratoire se font entre **atomes** et non entre ions. Il faut donc extrapoler les mesures en laboratoire aux basses énergies correspondant aux conditions solaires, corriger les expériences en laboratoire des effets coulombiens rencontrés et réintroduire les effets coulombiens des ions considérés du plasma solaire. Enfin,

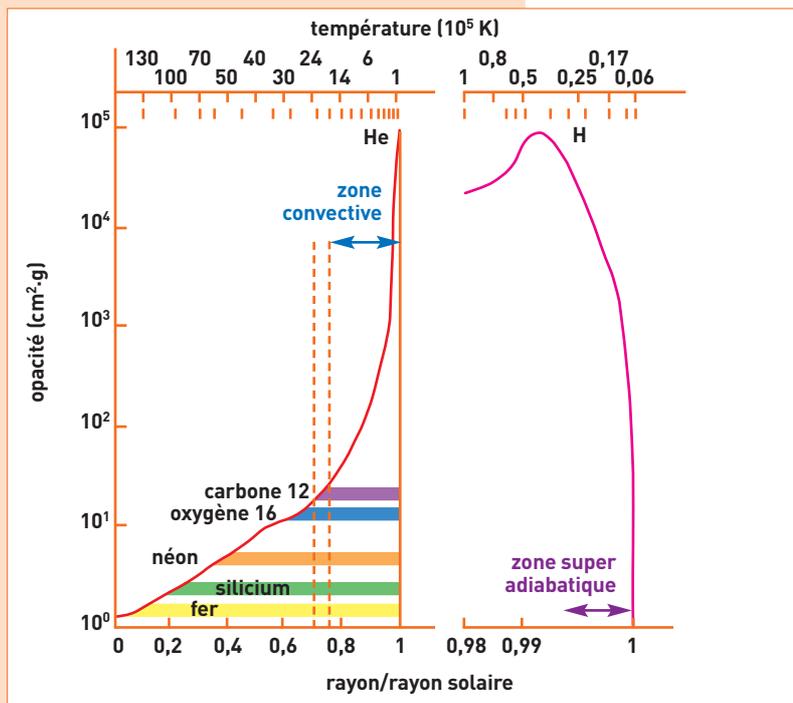
il est nécessaire d'introduire théoriquement l'effet d'accélération des interactions nucléaires dû aux **électrons libres** et aux ions spectateurs. C'est à cause de cette complexité que les mesures en laboratoire se sont étalées sur une trentaine d'années, avec encore récemment de très jolis résultats destinés à relever certains des challenges précités. Ainsi, la mesure ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{He}$ a fait intervenir des ions et représente le cas unique réalisé aux conditions d'énergie stellaire. D'autre part, la section efficace de la réaction ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$, très difficile à mesurer et qui est déterminante pour prédire les neutrinos détectés par les expériences Super-Kamiokande et SNO, a été contrôlée par différentes méthodes et en particulier par l'équipe française du CSNSM⁽¹⁾ d'Orsay.

(1) Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse (CNRS - IN2P3 - Université Paris-sud).

Le transport de l'énergie : l'interaction photon-matière

2

À chaque réaction nucléaire, de l'énergie est évacuée sous forme de **photons**. Typiquement, la transformation de 4 protons en **hélium** libère 27 MeV. L'énergie produite va équilibrer l'étoile, en compensant celle émise à la surface. De l'émission dans le **cœur nucléaire** jusqu'à 0,71 rayon solaire, cette énergie est transmise par les photons : c'est ce qui est appelé le rayonnement radiatif. Les photons sont des messagers, dont le cheminement est erratique et complexe, allant de la simple diffusion, dite *diffusion Thomson*⁽¹⁾, sur les **électrons libres** à des interactions avec les **électrons liés**, soit en les faisant changer de niveau électronique, soit en libérant l'électron. Au cours de ces interactions, les photons perdent de l'énergie et se séparent en photons de plus en plus basse énergie. Ces multiples interactions sont définies par des **sections efficaces** d'interaction et dépendent de l'état du **plasma** pour chaque espèce présente. Les sections efficaces diffèrent fortement selon les processus considérés. Certaines sont proportionnelles à Z (nombre de protons du **noyau**), d'autres à Z^2 , d'autres enfin à Z^4 . Cela conduit à donner un rôle à chaque espèce. En effet, comparer un **ion hydrogène** et un ion fer revient, quand l'interaction est du type électron lié-électron lié, à comparer $Z^4 = 1$ à $Z^4 = 457\,000$. Ceci montre immédiatement que pour faire un calcul correct du transfert d'énergie, il faudra connaître la composition détaillée du Soleil. Même si l'hydrogène et l'hélium à eux seuls représentent plus de 99 % des ions présents initialement dans le Soleil, les quelques pour mille restants vont jouer un rôle considérable dans ce transfert, limitant ainsi la montée rapide en température du cœur et donc jouant directement sur la longévité du Soleil. Aujourd'hui, seul le fer est partiellement **ionisé**, c'est-à-dire qu'il possède encore plusieurs électrons périphériques, dans le plasma solaire central (figure). En se déplaçant du centre vers l'extérieur, de plus en plus d'espèces telles que le nickel, le sodium, l'oxygène... se retrouvent partiellement ionisées et en interaction avec les photons qui voyagent. Vers 0,71 rayon solaire, l'oxygène, **élément** le plus abondant après



S. Turck-Chièze / CEA

l'hydrogène et l'hélium, devient partiellement ionisé. Les photons se retrouvent pratiquement bloqués par leurs interactions multiples et l'énergie n'arrive presque plus à être transportée. La température continue de décroître, le carbone et l'azote deviennent à leur tour partiellement ionisés. La **convection** prend alors le relais, évacuant plus facilement l'énergie vers la surface, tout en homogénéisant la composition de l'étoile. Les photons continueront bien sûr à évacuer de l'énergie mais avec une efficacité très faible. Ensuite c'est le tour de l'hélium puis de l'hydrogène de récupérer leurs électrons, augmentant encore l'**opacité**. Les photons, en approchant de la surface, rencontrent enfin des espèces neutres, voire moléculaires. La section efficace d'interaction photon-matière redevient de nouveau faible et finalement les photons d'énergie correspondant au **spectre visible** s'échappent de la **photosphère**.

Section efficace d'interaction des photons avec le plasma stellaire en fonction du rayon solaire.

(1) Diffusion Thomson : diffusion élastique à haute énergie sans modification de la **longueur d'onde**.



température centrale	$T_c = 15,71 \cdot 10^6$ K
densité centrale	$\rho_c = 153,13$ g/cm ³
composition en hydrogène au centre	$X_c = 0,3385$ en fraction de masse
température de surface	$T_{\text{eff}} = 5800$ K
abondance d'hélium en surface	0,251 en fraction de masse
abondance d'hélium initial	0,272 en fraction de masse

Tableau 1.
Les caractéristiques du modèle sismique.

Le rôle déterminant de l'héliosismologie

Dans cette problématique complexe, certains éléments du calcul nucléaire pouvaient échapper à la sagacité du physicien. Aussi, l'approche théorique couplée à l'héliosismologie a été précieuse. En extrayant très précisément le profil de la vitesse du son avec GOLF et MDI, jusqu'à 6 % en rayon du centre du Soleil, les astrophysiciens du CEA ont pu caractériser le plasma solaire. En particulier, la section efficace $p + p$, qui n'était connue que théoriquement, est maintenant déterminée à 1 % près.

Mais quelles sont ces propriétés mystérieuses du plasma stellaire ? Comment vaincre la barrière coulombienne entre deux protons chargés positivement ? Les particules le font naturellement grâce à leur vitesse initiale et à l'**effet tunnel**. L'énergie de l'interaction n'est pas l'énergie thermique, mais une énergie nettement plus élevée. Cet effet, qui a été compris par l'astrophysicien américain d'origine russe George Anthony Gamow, réduit le nombre de protons concernés par ces réactions nucléaires. Si tel n'était pas le cas, le Soleil brûlerait son combustible en quelques millions d'années ! En effet, tous les protons ne se déplacent pas à la vitesse thermique du gaz. Ils se répartissent selon une distribution maxwellienne⁽²⁾ de la vitesse. Cette propriété est déterminante pour compter le nombre d'interactions et définir l'énergie de l'interaction,

(2) Distribution maxwellienne : dans le gaz, les protons n'ont pas tous la même vitesse mais des vitesses réparties aléatoirement autour d'une moyenne. La vitesse moyenne est égale à $(8/\pi k_B T/m)^{1/2}$ où m représente la masse du proton, T la température du gaz et k_B la constante de Boltzmann qui vaut $1,38 \cdot 10^{-23}$ joules/degré K.

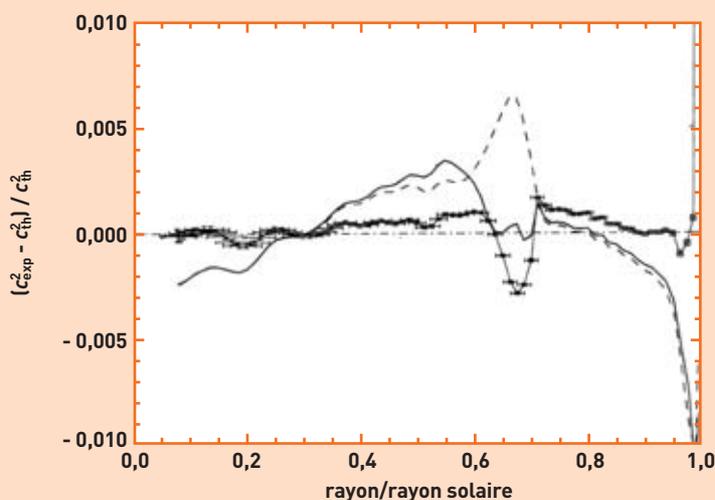
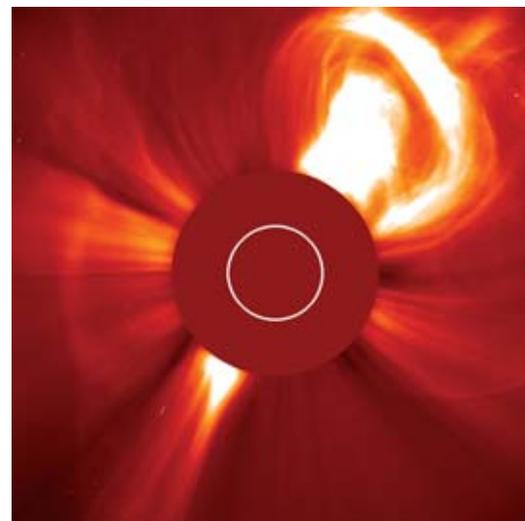


Figure 2.
Différence entre le carré de la vitesse du son extraite des ondes acoustiques observées par GOLF et MDI et le carré de celle de modèles solaires, pour un modèle purement théorique sans effets macroscopiques (pointillés), pour un modèle incluant le mélange lié au traitement de la région de transition radiation-convection (trait plein) et pour un modèle sismique ajustant certaines quantités physiques, dans la limite des incertitudes, pour reproduire au mieux l'observation dans la région radiative.



Éjection de masse coronale observée par l'instrument LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph), embarqué à bord de SOHO. Des particules de haute énergie sont brusquement libérées à des vitesses de 300 km/s en moyenne dans le milieu interplanétaire et peuvent interagir avec l'atmosphère terrestre.

surtout pour l'interaction forte, qui est si dépendante de cette énergie (ou température). De plus, les électrons libres jouent le rôle d'accélérateurs de l'interaction. Pendant de nombreuses années, des doutes ont plané sur la justesse de la distribution en vitesse et sur les phénomènes dits "d'écrantage". Pouvait-elle être perturbée par le plasma lui-même ou par la présence d'autres espèces ? Là encore, l'héliosismologie a apporté des réponses déterminantes. Si la distribution de vitesse n'est pas totalement maxwellienne, cela a un impact important sur les interactions mises en jeu pour des éléments dont le nombre de protons est supérieur à 3 et la vitesse du son en est directement affectée dans sa partie centrale. Aucune signature de tels phénomènes n'a été identifiée par les mesures sismiques.

Des modèles qui convergent

Au fur et à mesure des améliorations théoriques et des progrès de la sismique, la qualité des modèles solaires s'est imposée et la physique introduite aujourd'hui est d'une grande richesse. Au cours des années, les différences entre vitesse du son extraite des modes acoustiques et vitesse du son des modèles solaires se sont réduites (figure 2). Après vingt ans de travail, le modèle sismique est devenu un modèle représentatif du Soleil dans la partie radiative. Ses caractéristiques sont présentées dans le **tableau 1** et les informations obtenues pour les 2 000 couches peuvent être consultées sur les pages web du Service d'Astrophysique du CEA⁽³⁾.

(3) Voir le site www.dapnia.cea.fr/Phys/Sap/Documents/soleil/solarmodel.html

La production d'énergie par **interaction faible** entre deux **protons** s'accompagne de la transformation d'un proton en **neutron** avec émission de **neutrino**. Réaction fondamentale dans le processus de **fusion**, le nombre de neutrinos ainsi engendrés se déduit directement de la luminosité totale et de l'énergie libérée lors de la transformation de 4 protons en **hélium**. 65 milliards/cm²/s de neutrinos arrivent sur Terre en permanence. Dès les années soixante, le physicien d'origine italienne Bruno Pontecorvo a immédiatement perçu l'intérêt de détecter ces particules mystérieuses. Malheureusement, leur énergie est faible, inférieure à 0,4 MeV, et leur détection ne peut être aujourd'hui que partielle. Dans les détecteurs au gallium, ils représentent 60 % des neutrinos accessibles. Heureusement, d'autres réactions produisent des neutrinos plus énergétiques. Les plus faciles à détecter, car leur énergie peut atteindre 14 MeV, sont les neutrinos émis par la réaction ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \nu_e$ [voir *Soleil nucléaire*, encadré 1]. Par contre, leur flux est 10 000 fois plus faible et leur dépendance en température est très élevée, T^{24} au centre du Soleil. Leur flux est donc fortement dépendant des conditions centrales du Soleil, car ils sont émis très près du centre de l'**étoile** (figure a). Ainsi, une erreur de 2% sur la température centrale engendre des variations d'un facteur 2 sur le flux de neutrinos associés au ${}^8\text{B}$ mesuré par les expériences Super-Kamiokande au Japon et SNO au Canada. Ces neutrinos sont très intéressants pour mieux comprendre le Soleil et le neutrino lui-même. Pendant près de 40 ans, l'estimation théorique du nombre de neutrinos émis fut supérieure au nombre de neutrinos détectés par les différentes installations, et pour certaines d'un facteur 2 à 3. Ce constat fut très stimulant car le Soleil étant une référence pour l'ensemble des étoiles, il était important de chercher à savoir s'il y avait un problème dans cette estimation. À côté des progrès que ce questionnement a apportés en physique fondamentale, l'**héliosismologie** stimula un calcul quantitatif et valida les différentes hypothèses et ingrédients du calcul. Elle donna les moyens de converger vers une prédiction étayée par les mesures sismiques (figure b). L'héliosismologie a permis aussi

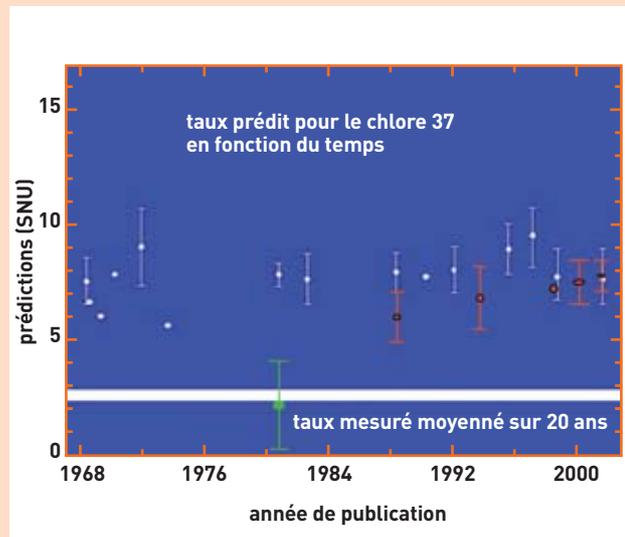


Figure b. Évolution du flux de neutrinos prédit pour le détecteur historique Homestake du chimiste américain Raymond Davis (1 SNU = 10⁻³⁶ captures/atome/s). En blanc, les prédictions du physicien américain John Bahcall et en rouge, celles du CEA utilisant les mesures sismiques pour guider les calculs du modèle solaire. La barre d'erreur verte correspond à l'incertitude de chaque série de mesures. Dans l'interaction avec ce détecteur, les neutrinos du ${}^8\text{B}$ représentent 71 % des neutrinos émis par le Soleil. La prédiction initiale qui a convaincu Raymond Davis d'entreprendre cette étude était de 22 SNU !

d'écarter des hypothèses émises pour réduire significativement la valeur de certains flux, comme un mélange des espèces dû à une **convection** centrale ou la présence de **WIMPs** (particules candidates pour la matière noire) au **cœur** du Soleil... Chaque processus, introduit dans les modèles théoriques, a pu être testé à quelques % près et, finalement, il est possible de déterminer précisément le flux de neutrinos émis par chaque réaction et d'en déduire le flux prédit pour chaque installation (tableau). Récemment, un nouvel ingrédient du modèle a changé : la composition en oxygène s'est trouvée réduite de 30 % et ceci a un impact réel sur la température centrale, mais le flux de neutrinos étant fixé par la sismologie, celui-ci n'a pas été modifié.

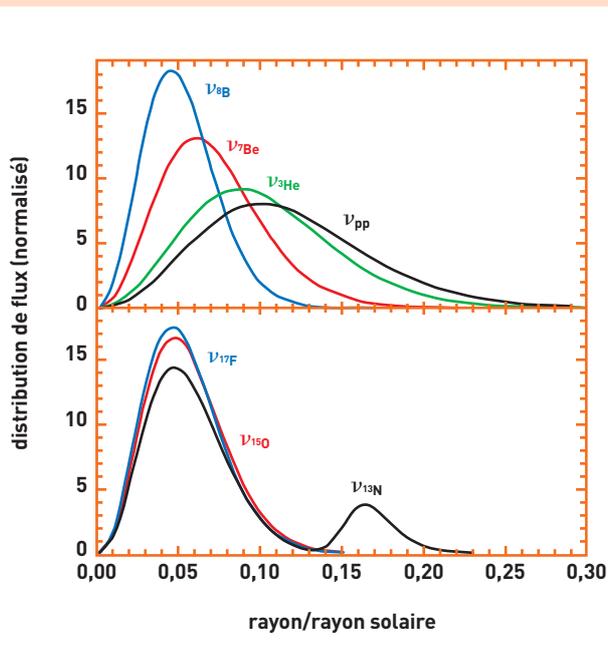
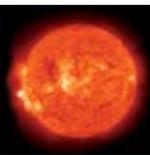


Figure a. Région d'émission des neutrinos associés aux interactions pp, $e^- + {}^7\text{Be}$, $p + {}^7\text{Be}$, ${}^3\text{He} + p$ dans le Soleil. D'autres neutrinos sont émis par le cycle CNO, liés aux éléments ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$ et ${}^{17}\text{F}$. À part ceux de la réaction fondamentale pp, ils sont tous émis très près du centre du Soleil.

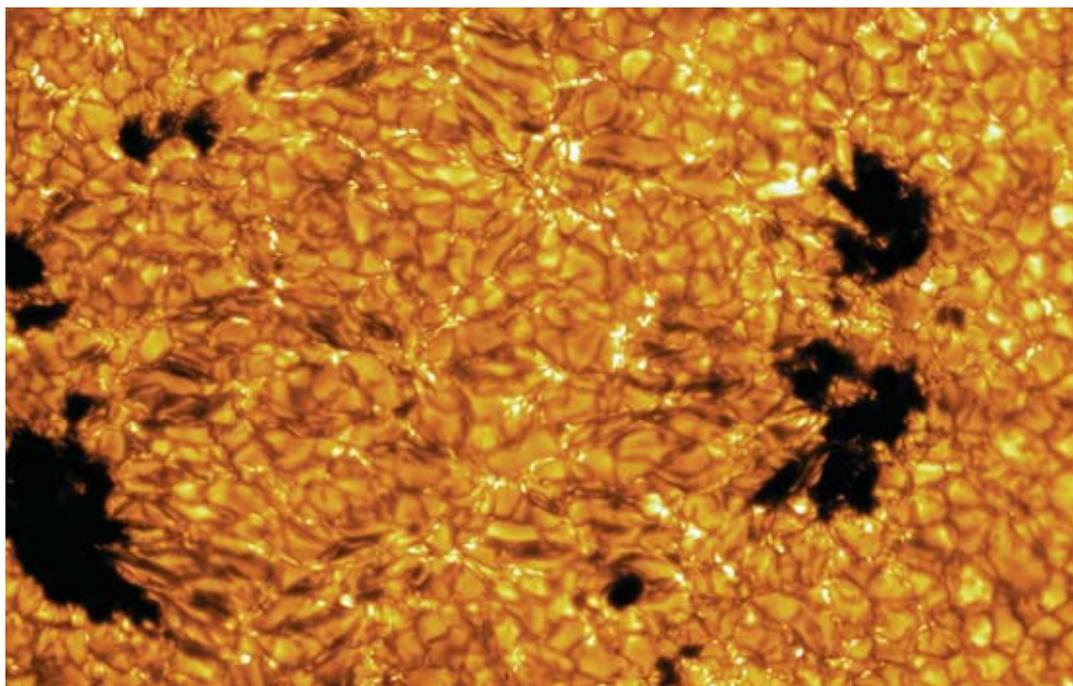
	Gallex/Sage	Homestake	Super-Kamiokande (SK)/SNO
flux prédits par le modèle sismique	127,8 ± 8,6	7,44 ± 0,96	4,95 ± 0,72 ou 5,25 (avec champ magnétique central)
flux détectés	74,7 ± 5	2,56 ± 0,23	2,4 ± 0,08 (SK) 5,09 ± 0,64 (SNO)

Les deux premiers flux s'expriment en SNU, le dernier en 10⁶/cm²/s (1 SNU = 10⁻³⁶ captures/atome/s).

L'accord avec SNO est remarquable. Ce bon accord vient de la capacité unique de ce détecteur à l'**eau lourde** de sommer les trois **savours** de neutrinos et de pouvoir inclure dans la comparaison le fait que le **neutrino électronique** se transforme en une autre saveur. En sommant ces trois saveurs, l'accord entre prédiction et détection est excellent. L'installation japonaise Super-Kamiokande à l'eau légère n'a pas cette capacité et le déficit par rapport à la prédiction est clairement visible [voir *Les neutrinos solaires, une énigme enfin résolue*]. Le Soleil est un véritable laboratoire de physique complexe qui permet aussi de sonder les propriétés du neutrino.



La surface du Soleil présente un aspect granuleux. Des millions de granules de gaz portés à une température de plusieurs milliers de degrés s'agitent et induisent des ondes qui se propagent à l'intérieur du Soleil. Dans cette région apparaissent des taches sombres correspondant à des **régions actives**.



Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory/Tom Berger

En 2001, la précision sur la vitesse du son s'est avérée suffisante pour déduire d'un modèle "sismiquement" représentatif les flux de neutrinos émis par le Soleil pour les différentes réactions impliquées. Quelques mois plus tard, l'expérience SNO montrait, pour la première fois, un flux qui résultait de la somme de différentes espèces de neutrinos en parfait accord avec ces prédictions (encadré 3). La physique stellaire était devenue une science quantitative qui permettait de prédire de façon fiable les flux de neutrinos. La physique des particules a mis en évidence une propriété particulière des neutrinos: ils se transforment d'une espèce en une autre et possèdent donc une masse (voir *Les neutrinos solaires, une énigme enfin résolue*). L'interaction entre ces deux disciplines continue. Elle se concentre aujourd'hui sur le transport des neutrinos dans la matière avec de possibles interactions magnétiques ou sur des processus de résonance de **spin** qui pourraient être associés à de brusques discontinuités de la densité dans différentes régions du Soleil.

Un réseau européen se met en place pour résoudre ces nouvelles questions et aussi les suivantes liées à une autre source de neutrinos: celle des **supernovae**.

D'une vision microscopique à une vision macroscopique du Soleil

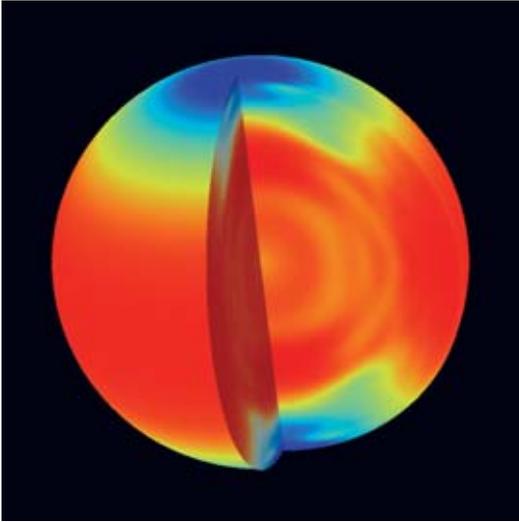
Il a fallu moins d'un siècle pour émettre des hypothèses sur le fonctionnement des étoiles, les mettre en équation, calculer l'ensemble des quantités thermodynamiques internes et les vérifier très précisément dans le cas particulier du Soleil. L'ensemble de ces travaux forme une base stable pour toutes les étoiles. La vision dite "microscopique", celle qui relève de l'infiniment petit ramené aux fantastiques dimensions de l'étoile, est maîtrisée. Dans cette représentation, l'étoile a une vie interne propre, indépendante de la vie externe agitée et **éruptive**, montrant des périodes plus calmes et d'autres plus agitées. La modélisation stellaire a été bâtie à l'économie, en ignorant

deux ingrédients essentiels: la rotation et le **champ magnétique**. En effet, comme le Soleil tourne lentement, un tour complet en 28 jours, les déformations d'asphéricité sont minimes. Cependant, ceci ne permet pas d'avoir une vision unifiée du Soleil ni de bien comprendre les étoiles jeunes et les phases d'explosion pour lesquelles la prise en compte de ces processus est indispensable. De plus, la Terre est soumise aux phénomènes de la surface solaire.

C'est pourquoi il faut dès maintenant s'attaquer à définir la vision "macroscopique" du Soleil, celle qui évolue sur des temps qui ne se chiffrent plus en milliards d'années mais en heures, en jours ou en années. L'héliosismologie va permettre ce pas conceptuel, en allant chercher sous la photosphère l'origine des phénomènes qui sont observés depuis plus de trois siècles à la surface ou au niveau de la couronne. Au XVII^e siècle, l'abbé Jean Picard, astronome et géodésien français, mesurait chaque jour le nombre de **taches** présentes à la surface du Soleil. Aujourd'hui, les scientifiques cherchent à comprendre pourquoi ces régions sombres ont un champ magnétique plus élevé que leur environnement et pourquoi elles migrent des régions polaires vers l'équateur (voir *Les simulations magnétohydrodynamiques du Soleil*). Mais d'abord, il faut mesurer ces mouvements macroscopiques internes.

La rotation de la région convective

Selon que l'onde acoustique se propage dans la direction où le Soleil tourne ou dans la direction opposée, la fréquence d'un mode va être modifiée. Au lieu d'une simple valeur, ce mode apparaîtra sous forme d'un multiplet à plusieurs composantes et la distance entre celles-ci portera l'information non seulement de la rotation de surface mais aussi de la rotation interne que l'onde traverse (voir *Les mesures sismiques solaires*). Grâce au nombre élevé de modes observés et au temps passé par les modes dans les régions les moins denses, il est possible d'extraire le profil de rotation en latitude dans la région convective (figure 3).



SOHO (ESA-NASA) - Stanford University

Image obtenue par l'instrument MDI, embarqué à bord de SOHO, montrant de façon schématique la rotation différentielle de la surface du Soleil. Les vitesses les plus élevées sont représentées en rouge et les plus lentes en bleu foncé. Il apparaît que la bande équatoriale tourne plus rapidement que les pôles.

La rotation différentielle de surface (25 jours à l'équateur et 35 jours aux pôles), clairement identifiable par les taches solaires, se retrouve dans toute la région convective. Cette constatation n'avait pas du tout été prévue théoriquement. Les scientifiques pensaient que la rotation dépendait de la distance au centre et que dans la région convective le flux de matière était laminaire⁽⁴⁾. Ce nouveau résultat, obtenu par l'expérience américaine MDI, apporte par conséquent de fortes contraintes sur l'interaction entre rotation, convection et **turbulence**. De plus, l'héliosismologie a mis en évidence une région, nommée **tachocline**, de brusque changement entre une rotation différentielle convective et une rotation rigide radiative. Cette zone correspond à un cisaillement horizontal qui induit un mélange des éléments. L'introduction de cette instabilité hydrodynamique dans les équa-

tions de structure limite la diffusion principalement gravitationnelle, précédemment décrite, et permet de parfaitement reproduire l'abondance d'hélium photosphérique obtenue grâce aux modes acoustiques, comme il est montré dans le **tableau 1**. Cette région de transition est donc maintenant "visible" de façon macroscopique. Elle semble d'ailleurs avoir un comportement périodique, encore non expliqué, d'un intervalle de temps de un an et quelques mois. C'est une transition, cruciale pour comprendre l'**effet dynamo** dans le Soleil, qui maintient et réorganise le champ magnétique, produisant les phénomènes cycliques et éruptifs observés à la surface du Soleil avec un changement de polarité entre pôles tous les onze ans. L'observation sismique de la rotation interne contribue ainsi à appréhender les processus dynamiques de surface.

La rotation de la région radiative

La dynamique de la région radiative est plus difficile à extraire car le nombre de modes acoustiques pénétrant cette région est plus faible, de même que le nombre de multiplets. De plus, l'excitation stochastique⁽⁵⁾ rend l'extraction de l'information difficile sur des durées d'observation limitées. Toutefois, les observations accumulées depuis vingt ans et les comparaisons instrumentales ont permis d'obtenir de façon incontestée le profil de rotation dans la région radiative. Les cinq années cumulées de données de SOHO ont offert la possibilité de n'utiliser que des modes de basse fréquence faiblement perturbés par l'excitation stochastique et les effets du **cycle solaire**. La conclusion est que la région radiative tourne de façon rigide et uniforme jusqu'au bord du cœur nucléaire avec une période d'environ 27 jours, c'est-à-dire intermédiaire entre la rotation de l'équateur et des pôles (**figure 3**).

(4) Flux laminaire: écoulement dans lequel les couches de fluide glissent les unes sur les autres sans échange de particules entre elles.

(5) Stochastique: qui comporte la présence d'une ou de plusieurs variables aléatoires.

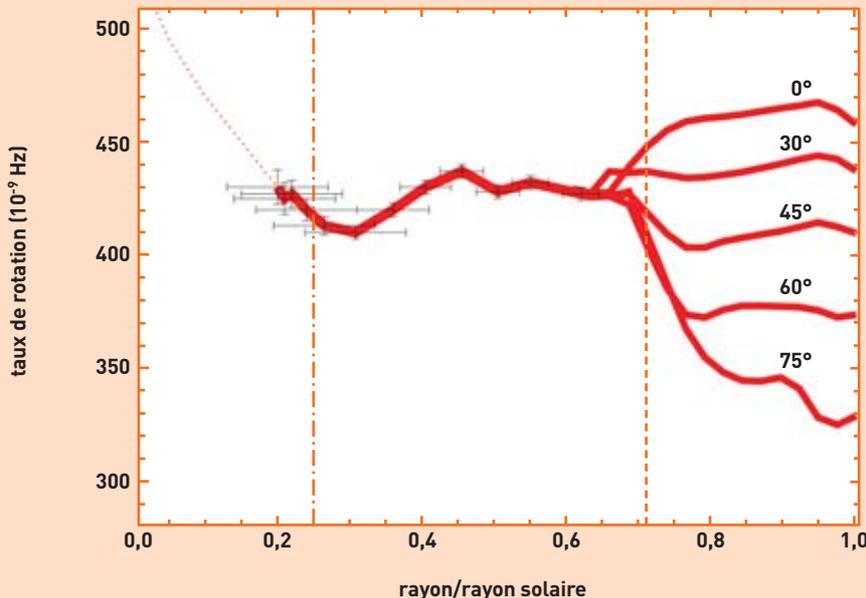
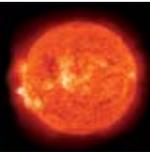


Figure extraite des expériences MDI et GOLF

Figure 3. Vitesse de rotation en fonction du rayon dans le Soleil. Vers l'extérieur, la vitesse de rotation dépend de la latitude, indiquée ici pour chaque courbe. Au-dessous de la tachocline (0,7 rayon solaire), la région radiative tourne de façon rigide et uniforme.



Sachant que les étoiles jeunes tournent beaucoup plus vite que le Soleil actuel, ce profil introduit de fortes contraintes sur la perte de moment angulaire⁽⁶⁾ au cours de la vie du Soleil. Il semble que le principal responsable d'un tel profil soit le champ magnétique. Ceci permet également de fixer une limite supérieure à sa valeur actuelle: pas plus que quelques centaines de mégagauss (MG) au centre de la région radiative.

Dans la région nucléaire, les incertitudes de mesure sont du même ordre de grandeur que l'information provenant de la région concernée. Une image complète de la rotation nécessite donc la détection de modes de gravité qui présentent une très grande sensibilité vis-à-vis de cette région. La mesure des composantes de 2 ou 3 d'entre eux permettrait déjà de répondre à plusieurs questions importantes.

Les modes de gravité

Ces ondes, principalement piégées dans la région radiative, ont un comportement évanescant dans la région convective. Aussi, leur vitesse au niveau de la photosphère est très faible, rendant très difficile leur détection. Les

(6) Moment angulaire: produit de la masse par la vitesse de rotation et par la distance à l'axe de rotation.

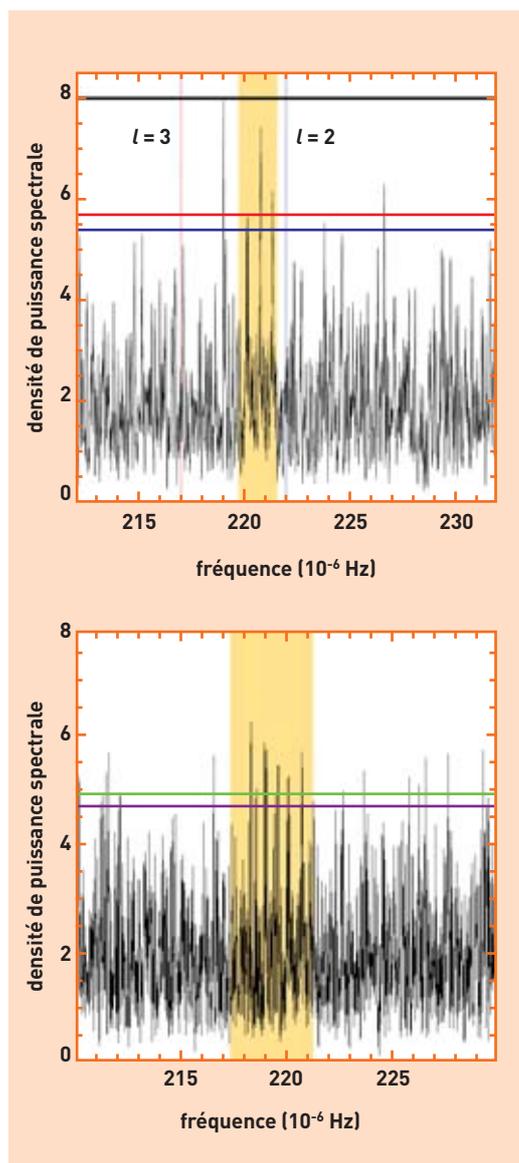


Figure 4. Un des candidats aux modes de gravité détecté à 90 % de confiance comme un triplet après 1 200 jours d'observation (figure du haut, traits orange et bleu) puis comme un quintuplet après 2 000 jours (figure du bas, traits vert et violet). Sur la figure du haut, apparaît en surimposition la position théorique de 2 modes de gravité de degrés $l = 2$ et 3 correspondant au modèle sismique.

efforts entrepris depuis vingt ans avec les réseaux d'instruments au sol se sont avérés infructueux. Le satellite SOHO est donc une opportunité exceptionnelle grâce à sa localisation au **point de Lagrange L1**, où les conditions en température et **radiation** sont très stables, à sa longévité, environ onze ans, et à la présence à son bord des trois instruments sismiques qui observent le Soleil continuellement.

Aucune détection crédible n'a été répertoriée dans la recherche de pics uniques. Celle de multiplets est plus prometteuse car elle baisse le seuil de détection et offre la possibilité d'apporter des informations sur la rotation du cœur. Les travaux actuels ont permis d'identifier, avec plus de 90 % de confiance, des structures candidates pour être des modes de gravité (figure 4). Les vitesses mesurées sont aussi petites que 2 mm/s à la surface du Soleil. Ce niveau de vitesse revient à identifier, de la Terre, une cerise qui oscillerait à la surface de la Lune. Par conséquent, les conditions d'observation pour une telle recherche sont très importantes. En fait, au point de Lagrange, le principal perturbateur est le Soleil lui-même, car la granulation de surface et l'activité solaire perturbent la mesure. C'est pourquoi les astrophysiciens du CEA ont bon espoir de confirmer ou d'infirmer ces potentielles détections en Soleil calme avant l'arrêt de SOHO prévu en 2007, dès que l'activité solaire va décroître (le maximum était en 2001). Les signatures identifiées actuellement correspondent à des signaux présents pendant 5 ans. S'ils étaient avérés, ils révéleraient un cœur central à rotation rapide avec un axe d'inclinaison différent du reste de l'étoile. Ce résultat constituerait une nouvelle page d'histoire solaire car le cœur nucléaire aurait conservé un vestige des conditions initiales. C'est à la fois un champ d'investigation passionnant pour les années à venir et également une opportunité pour tous les ingénieurs et techniciens de transformer l'essai en construisant une nouvelle génération d'instruments encore plus performants pour mesurer la dynamique temporelle du cœur nucléaire...

Vers une modélisation à différentes échelles

Les astrophysiciens du CEA s'orientent aujourd'hui vers une **modélisation** des différentes échelles de l'histoire d'une étoile, à travers les simulations numériques sur de gros **calculateurs massivement parallèles**. Cependant, d'autres projets spatiaux se dessinent, en particulier le programme ILWS (*International Living With a Star*) et le satellite européen Solar Orbiter, où des collaborations américaines et européennes peuvent se nouer. L'ensemble des processus microscopiques et macroscopiques sera alors quantitativement mesuré et mis en équation. Pour des raisons évidentes de connaissance intime du plasma solaire, les équipes du CEA se sont fortement mobilisées au cours des vingt dernières années et resteront des acteurs majeurs de cette page de l'histoire des Sciences.

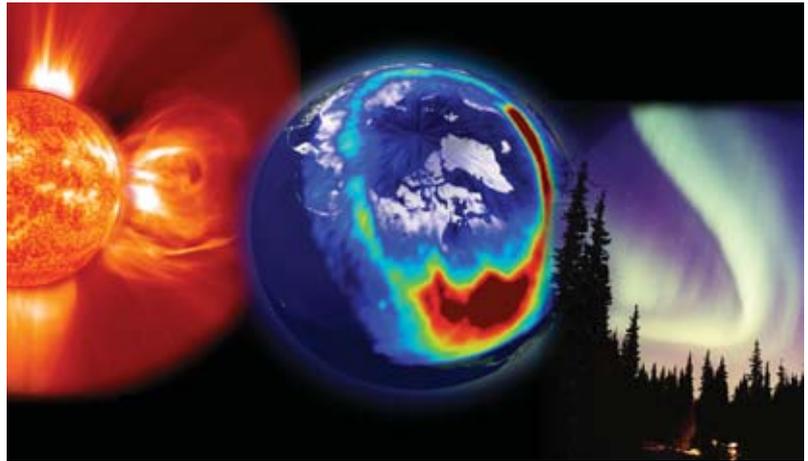
La relation entre le Soleil et la Terre

Le Soleil interagit avec la Terre, et les particules émises lors de fortes **éruptions** peuvent perturber les installations électriques ou les véhicules en orbite. S'il est bien établi que la température moyenne de la Terre, environ 16 à 17 °C, est directement liée à l'énergie émise par le Soleil, le rôle de ce dernier dans le climat actuel est encore mal connu. Sur les 1 365 W/m² émis,

Turck-Chièze et al. in *Astrophysical Journal*, 20 mars 2004.

l'apport au sol est finalement de 242 W/m^2 . Des variations cycliques de la température terrestre ont été constatées dans le passé et sont directement imputées à des effets orbitaux de la Terre autour du Soleil (*voir Le Soleil a rendez-vous avec la Terre*). La question d'actualité est de savoir s'il existe d'autres sources de variation venant du Soleil. Depuis que le Soleil brûle de l'hydrogène, la luminosité solaire a augmenté de 30 % en 4,6 milliards d'années et donc, à l'échelle humaine, les changements attendus sur cent ans sont négligeables. C'est pourquoi les scientifiques parlent de "constante solaire", laquelle depuis plus d'une dizaine d'années est mesurée de façon systématique. Il a été observé une variation d'énergie de l'ordre du watt au cours du cycle de 11 ans. Ce phénomène est en partie dû à une redistribution de l'énergie dans la zone convective, sous forme d'énergie magnétique et d'énergie mécanique, accompagnée de mouvements de matière ainsi qu'à la présence de **facules** près des taches solaires.

Plusieurs questions commencent à être soulevées. Comment la rotation différentielle évolue-t-elle avec le temps? Comment varie l'énergie magnétique qui s'échappe du Soleil? A-t-elle varié d'un facteur 2 en 100 ans, comme semblent le suggérer les mesures actuelles? Cela a-t-il un impact sur le climat? Quelle est la véritable interaction des particules chargées émises lors des **éjections de masse coronale** avec la **magnétosphère** terrestre? Ces particules modifient-elles significativement la composition des nuages en haute atmosphère? Il n'est pas pour le moment possible de répondre à ces questions, mais l'ensemble des techniques utiles pour apporter des éléments de réponse existe. Pourtant, il semble aussi raisonnable de penser qu'une évolution climatique récente est imputable aux émissions terrestres qu'il est donc urgent et important de limiter. Certaines observations cruciales viendront des instruments à bord de SOHO et des quatre satellites Cluster qui étudient la magnétosphère terrestre. La stratégie d'observation est aujourd'hui définie et le support théorique et numérique se met en place (*voir Les simulations magnétohydrodynamiques du Soleil*) pour répondre à ces



SOHO (ESA-NASA)

questions à l'échelle de dix à vingt ans. Une réalité est que le Soleil a un impact important sur les communications et la technologie de plus en plus sensible qui est développée. SOHO est le premier satellite qui renseigne, chaque jour, sur la "météorologie solaire", avec le descriptif de la vitesse de ses vents, ses éjections de matière qui peuvent être associées 2 à 3 jours plus tard sur Terre aux mouvements de notre magnétosphère et aux **aurores boréales**⁽⁷⁾. Les astronautes et les pilotes ne sont certainement pas les seuls à s'en préoccuper...

L'activité solaire, qui perturbe les télécommunications et provoque d'inhabituelles aurores boréales, pourrait avoir des incidences plus importantes sur Terre, comme modifier le climat ou induire des périodes glaciaires.

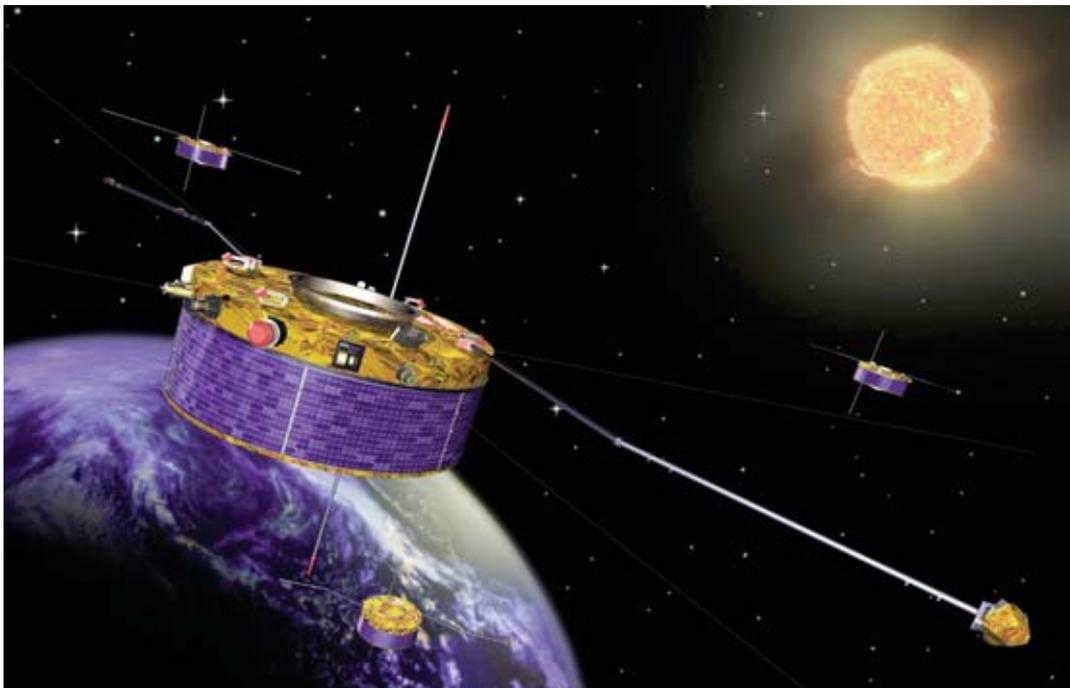
> **Sylvaine Turck-Chièze**

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay

(7) Voir le site <http://sohowww.estec.esa.nl/>

POUR EN SAVOIR PLUS

Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics,
Institute of Physics Publication, 2000 ; Jean-Paul
ZAHN, *The Solar Interior*, p. 2417 ; Sylvaine TURCK-
CHIÈZE, *Solar Interior: Standard Models*, p. 2609.



Les quatre satellites européens Cluster, lancés en 2000, ont pour mission d'étudier la magnétosphère terrestre et les interactions du vent solaire et des éjections de masse coronale avec celle-ci.

A Toute la lumière sur le Soleil

Plus gros objet du système solaire, le Soleil représente environ 99,8% de sa masse totale. Composé initialement de plus de 70% d'**hydrogène** et plus de 25% d'**hélium**, le Soleil est une gigantesque boule de gaz chaud tournant sur elle-même.

La **structure interne du Soleil** est divisée en quatre régions (figure). Le **cœur**, où les conditions de température et de densité sont extrêmes, est le siège de nombreuses réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium. L'énergie libérée se retrouvera sous la forme de **lumière visible** au niveau de la surface.

Dans la **zone radiative**, qui s'étend du cœur à 0,71 rayon solaire, l'énergie est transportée vers la surface du Soleil par l'interaction **photons-matière** (transport radiatif). Les photons sont absorbés et réémis des millions de fois dans de multiples collisions avec les **atomes** rencontrés qui sont très **ionisés**. Il faut plus d'un million d'années pour que les photons atteignent la **tachocline**, fine couche de transition entre la zone radiative et la zone convective et qui joue un rôle essentiel dans le **champ magnétique** solaire.

Dans la **zone convective**, du fait de la diminution de température, le milieu formé d'atomes partiellement ionisés et d'atomes neutres est plus opaque. La progression des photons devient difficile. De plus, la densité y varie d'un facteur un million entre la base et la surface. Ces forts gradients de température et de densité engendrent des mouvements **convectifs** qui sont observables à la surface comme des **granules** (leur durée de vie se chiffre en minutes) ou des **supergranules** dont les dimensions sont respectivement de l'ordre de 1 000 km et 35 000 km.

L'**atmosphère solaire** comporte quatre régions (figure). La surface, ou **photosphère**, épaisse de seulement 400 km et dont la température est proche de 5 800 K, présente donc un aspect granuleux et des zones plus ou moins sombres. Des zones obscures ou **taches solaires**, qui sont isolées ou en groupe, sont à une température de 3 800 K. Elles apparaissent noires du fait de leur différence de température avec les régions avoi-

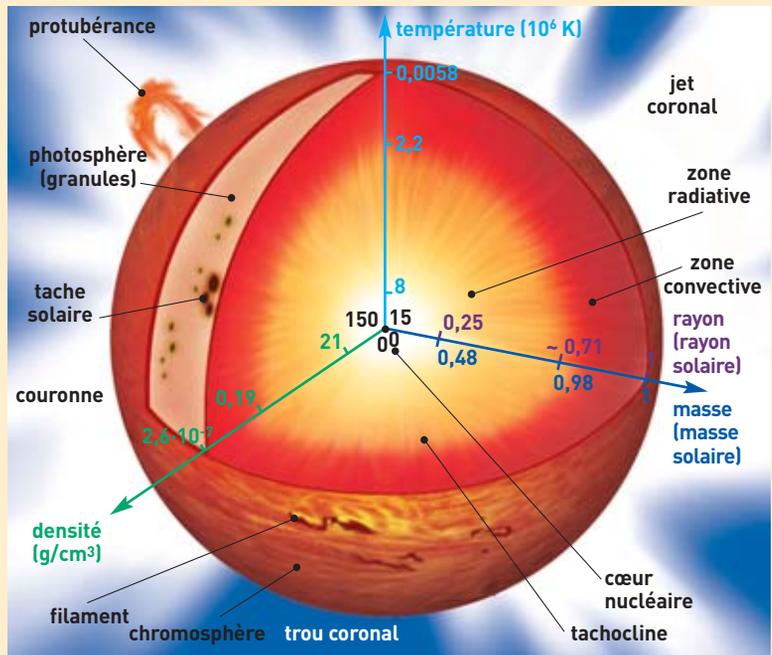


Figure.

sinantes. Elles sont soumises à un **cycle** de 11 ans et sont associées à des régions dont le champ magnétique est beaucoup plus intense (quelques milliers de gauss) que sur l'ensemble du Soleil (1 gauss). Ces taches peuvent atteindre un diamètre de 50 000 km. Leur durée varie de quelques jours à plusieurs mois. Des zones plus claires et plus chaudes ou **facules**, parfois isolées mais généralement situées autour d'un groupe de taches, sont également observées.

Au-delà de la photosphère, s'étendant sur des milliers de kilomètres, se trouve la **chromosphère**, dont la densité continue à décroître rapidement alors que la température atteint 20 000 K. Dans cette zone se trouvent les **plages**, régions brillantes caractérisant les forts champs magnétiques des taches solaires, les **protubérances** ou **filaments** (lorsqu'elles sont vues sur le **disque** solaire), structures magnétiques plus denses et plus froides (10 000 K) que leur environnement, et les **spicules**, petits jets de matière à vie courte (5 à 10 minutes) se dirigeant vers la couronne à une vitesse de près de 20 km/s.

Entre la chromosphère et la couronne se situe la **région de transition**, couche mince et irrégulière dans laquelle la température augmente brutalement.

La **couronne**, peu riche en gaz, s'étend sur des millions de kilomètres et est caractérisée par une température de plus de 1 500 000 K et une densité faible. Elle comporte de nombreuses structures magnétiques ou associées à des structures magnétiques telles que les **boucles coronales**, les **trous coronaux**, les **points brillants**... Dans cette région en perpétuelle évolution apparaissent les protubérances ou filaments, sous la forme de grands **panaches** de gaz chauds, provenant de la chromosphère. L'activité solaire n'est pas constante. Régulièrement, avec une intensité cyclique, des **éruptions** violentes se produisent dans les **régions actives**. Il s'agit de brusques libérations de particules de haute énergie dans le milieu interplanétaire. Ces **éjections de masse coronale** (CME) atteignent parfois 100 000 km de haut et 200 000 km de long. Suivant la direction d'éjection, les particules de haute énergie émises peuvent interagir avec l'atmosphère terrestre.

Le Soleil expulse également un flux permanent de particules chargées, principalement des **protons** et des **électrons** formant un **plasma**, appelé **vent solaire**. Celui-ci se propage hors du système solaire à une vitesse d'environ 450 km/s. Le Soleil perd environ un cent millième de milliardième de sa masse par an.

B Des spectres qui en disent long

Les différents rayonnements se distribuent le long du **spectre électromagnétique** en fonction de leurs longueurs d'onde, des plus courtes et des plus énergétiques (**rayonnement gamma**) aux plus longues (les ondes radio), en passant par la lumière visible. Le spectre de ce dernier domaine, par exemple, est obtenu en faisant passer la lumière par un prisme qui la décompose en ses différentes composantes, du rouge au violet (figure a). Un arc-en-ciel donne aussi un spectre de la lumière visible émanant du Soleil, par réfraction et réflexion dans et sur des gouttes d'eau.

Ce même principe s'applique à l'ensemble des **rayonnements électromagnétiques** en utilisant des **spectrographes**, qui analysent la répartition spectrale de l'énergie de ces rayonnements et des **spectromètres** qui enregistrent les spectres élément par élément à l'aide de détecteurs photoélectriques et mesurent l'intensité des rayonnements en fonction de leur **longueur d'onde**.

En astrophysique, la **spectroscopie** consiste à étudier les corps à distance à partir des rayonnements qu'ils émettent ou des transformations que font subir à ces derniers d'autres corps situés sur leur trajet. Les spectres font apparaître, entre de larges bandes continues (dont chacune porte le nom de continuum spectral), des raies correspondant chacune à une longueur d'onde particulière et, finalement, à l'énergie d'un atome ou d'une molécule du corps observé. Ces **raies spec-**

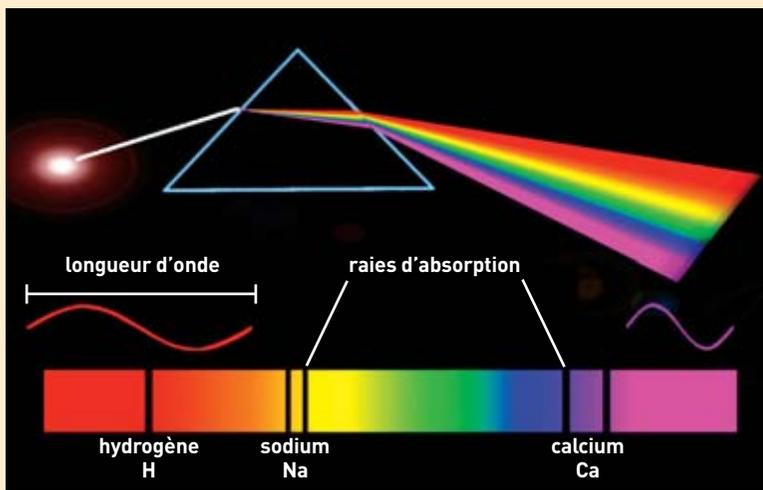


Figure a.

trales sont de deux types, les raies d'émission et les raies d'absorption. Les **raies d'émission**, claires, correspondent à des rayonnements émis directement par un corps porté à très haute température. Le **spectre d'émission** permet donc de détecter la présence d'atomes ou de molécules dans l'objet émetteur.

Les **raies d'absorption**, sombres, correspondent également à une longueur d'onde précise, mais en vertu du processus par lequel l'intensité d'un rayonnement décroît quand il traverse un milieu matériel auquel il transfère tout ou partie de son énergie. C'est ainsi que l'on peut analyser la composition d'une source chaude radiative comme le Soleil à partir de l'absorption par son atmosphère d'une partie des rayonne-

ments électromagnétiques qu'il émet (**spectre d'absorption**).

Ce n'est pas tout : l'analyse du décalage spectral permet d'évaluer le mouvement relatif du corps émetteur, grâce à l'**effet Doppler-Fizeau**⁽¹⁾, selon le même principe qui rend de plus en plus aigu le bruit d'un véhicule qui s'approche d'un observateur et de plus en plus grave celui de l'engin qui s'en éloigne. La variation apparente de **fréquence** (d'autant plus élevée que la longueur d'onde est plus courte) est ainsi proportionnelle à la vitesse relative entre l'observateur et la source.

Pour une source lumineuse, cet effet indique que les raies du spectre de cette source sont décalées vers le bleu (**blueshift**), autrement dit des longueurs d'onde plus courtes, quand elle s'approche ou vers le rouge (**redshift**) pour des longueurs d'onde plus longues quand elle s'éloigne (figure b).

L'effet Doppler est notamment utilisé en astrophysique pour connaître la vitesse radiale des étoiles ou des galaxies car leur mouvement, selon la perspective, provoque un déplacement des raies émises par rapport à leur valeur nominale ou aux mêmes raies émises par une source terrestre.

Enfin, la division de raies spectrales en réponse à un champ magnétique (**effet Zeeman**) est utilisée pour mesurer la puissance des champs magnétiques d'objets astronomiques, en particulier du Soleil.

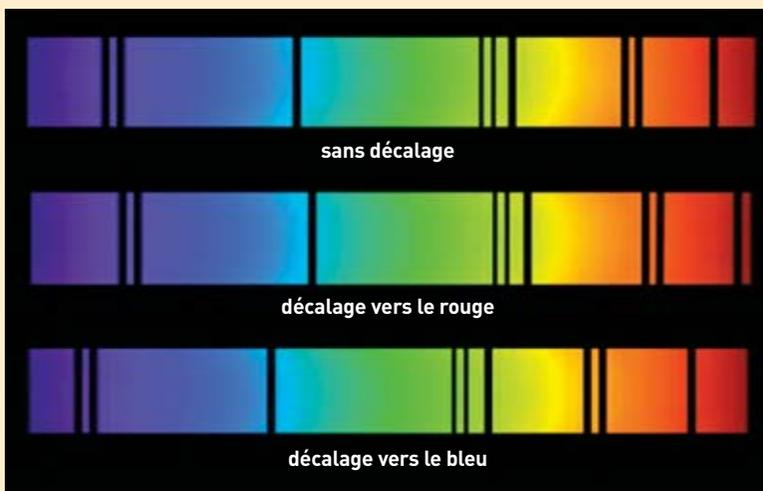


Figure b.

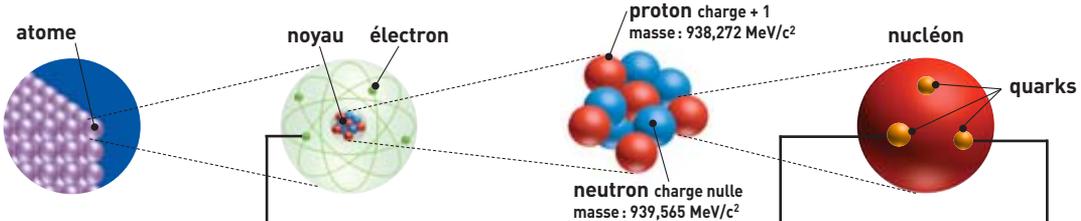
(1) Découvert par le physicien autrichien Christian Doppler pour les ondes sonores, cet effet a été étendu à l'optique par le Français Hippolyte Fizeau.

C Particules élémentaires et interactions fondamentales

Les **neutrinos** sont les plus furtives des particules du **modèle standard de la physique des particules**, cadre théorique qui décrit toutes les **particules élémentaires** connues et les **interactions fondamentales** auxquelles elles participent (tableau).

Les constituants élémentaires de la matière, les **fermions**, se partagent en deux grandes catégories, les **leptons** qui ne répondent pas à l'**interaction forte**, et les **quarks** qui subissent toutes les interactions. Les six quarks forment trois paires (bas/haut, étrange/charmé et beauté/top). Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** (électron e^- , muon μ , tau τ) participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique** ν_e , **neutrino muonique** ν_μ , **neutrino tauique** ν_τ) ne

participent à l'**interaction forte** et à l'**interaction électromagnétique**. Les six quarks forment trois paires (bas/haut, étrange/charmé et beauté/top). Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** (électron e^- , muon μ , tau τ) participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique** ν_e , **neutrino muonique** ν_μ , **neutrino tauique** ν_τ) ne



		leptons peuvent se déplacer librement		quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe. Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le big bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	première famille	électron responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c ²	neutrino électronique sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas	sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 5 - 8,5 MeV/c ²
	deuxième famille	muon un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c ²	neutrino muonique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange	un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 - 155 MeV/c ²
	troisième famille	tau encore plus lourd masse : 1777 MeV/c ²	neutrino tauique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté	encore plus lourd masse : 4 000 - 4 500 MeV/c ²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	photon grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique		gluon porteur de la force forte entre quarks		W[±], Z⁰ porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive
	Boson de Higgs ?  responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"				

Tableau. Constituants élémentaires.

sont assujettis qu'à l'interaction faible. Au sein du modèle standard, les neutrinos sont de masse nulle mais des expériences ont prouvé qu'ils en possèdent une, très faible, dont la valeur exacte reste inconnue à ce jour. La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs nombres quantiques, ou charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur⁽¹⁾...). À chaque constituant de la matière est associée son **antiparticule**, particule de même masse et de charges opposées. La **force gravitationnelle**, qui n'est pas incluse dans le modèle standard, s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse. Le tableau des constituants élémentaires de la matière montre une autre classification, indépendante de leur participation aux interactions fondamentales, en trois générations ou familles. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons chargés de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses. L'électron, le quark haut et le quark bas, qui appartiennent à la première famille, sont les particules massives les plus légères. Stables, elles sont les constituants de la matière ordinaire. Par exemple, le **proton** contient deux quarks haut et un quark bas ; le **neutron** deux quarks bas et un quark haut. Les particules des deux autres familles sont instables et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille. D'après la mécanique quantique, pour qu'il y ait interaction, il faut qu'au moins une particule élémentaire, un

boson, soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le vecteur de l'interaction électromagnétique, les bosons **W⁺**, **W⁻** et **Z⁰** sont les médiateurs de l'interaction faible et les **gluons** les messagers de l'interaction forte. Les quarks et les leptons chargés échangent des photons mais conservent leur charge électrique après l'échange, le photon n'ayant pas de charge électrique. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique. Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés** où les vecteurs de l'interaction sont **W⁺** et **W⁻**, et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est **Z⁰**. Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (80 400 MeV/c² pour **W[±]** et 91 180 MeV/c² pour **Z⁰**), la portée de l'interaction faible est infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ m. Les bosons **W[±]** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent

changent de charge électrique et également de nature (**saveur**). Par contre, le boson **Z⁰** étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changent pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont aussi capables d'échanger un **Z⁰**. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z⁰** avec une autre particule, mais pas un photon. Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluon entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais étant dotés d'une charge de couleur ils peuvent interagir. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10⁻¹⁵ m. Le **graviton**, vecteur de l'interaction gravitationnelle, n'a pas encore été observé. La théorie prédit l'existence d'un autre mécanisme d'interaction fondamentale, responsable de la masse des particules élémentaires, dont le messager est le **boson de Higgs** qui reste à découvrir. Le champ de Higgs permet, selon cette théorie, de donner une masse aux fermions élémentaires interagissant avec lui.

(1) Charge de couleur : nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes. La charge de couleur peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue", ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles. Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

interaction fondamentale	messager	actions
gravitationnelle	graviton ?	fait s'attirer deux masses entre elles et est responsable de la chute des corps
électromagnétique	photon	est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
faible	W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰	à la base de la fusion thermonucléaire dans le Soleil, elle assure sa longévité. La radioactivité β ⁻ et β ⁺ et les réactions impliquant le neutrino sont des interactions faibles
forte	gluons	assure la cohésion du noyau atomique

Tableau. Interactions fondamentales.

L'instrument spatial GOLF : un spectromètre à résonance

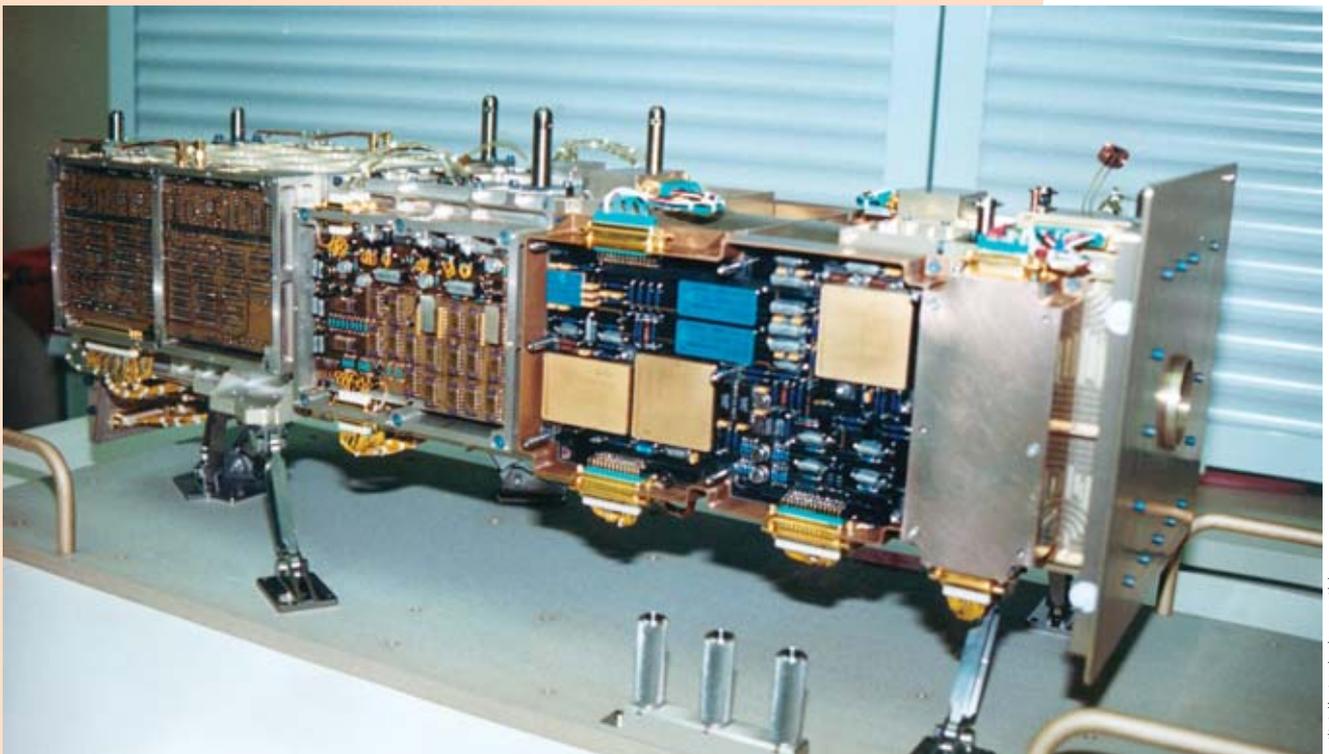
La meilleure façon de connaître les ondes internes pénétrant jusqu'au cœur du Soleil est d'employer un **spectromètre** à résonance. Il enregistre les variations périodiques de la vitesse Doppler (encadré B, **Des spectres qui en disent long**, p. 17). Dans le cas de GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*), installé à bord de la sonde spatiale SOHO (*SOLar and Heliospheric Observatory*), ce sont les vitesses de déplacement des **raies** du sodium formées à environ 500 km au-dessus de la **photosphère** qui sont exploitées. L'interférence de l'ensemble des modes acoustiques est détectée en surimpression de la vitesse de déplacement du Soleil par rapport à l'observateur. Puis, par transformée de Fourier, le spectre de fréquence est obtenu (*voir Vision statique et dynamique de l'intérieur solaire*). Après avoir filtré la lumière solaire autour des **longueurs d'onde** du sodium (589 nm), les détecteurs comptent les **photons** qui ont résonné avec ceux d'une cellule contenant du sodium gazeux à environ 200 °C. Ce phénomène atomique permet de définir un très fin pinceau dans la raie du sodium. En choisissant la **polarisation** d'entrée et en plaçant cette cellule dans un **champ magnétique** de 4 kG, une mesure est effectuée sur le flanc gauche de la raie, puis en changeant de polarisation, sur le flanc droit. De la dissymétrie du comptage est extraite la vitesse Doppler entre le Soleil et l'instrument. Une mesure régulière (toutes les 10 s) offre la possibilité d'étudier les fluctuations de cette vitesse et d'en déduire la fréquence de

chaque mode. Plus la mesure est répétée, plus la précision de la mesure est grande puisqu'elle est donnée par l'inverse du temps d'observation. Il convient donc de suivre continûment le Soleil, soit avec des instruments placés en réseau autour de la Terre (réseau français IRIS), soit en satellisant un instrument comme GOLF et en le plaçant au **point de Lagrange L1**. Après plusieurs années d'observations, la précision sur les fréquences est de quelques 10^{-5} et la vitesse du son est extraite à mieux que 10^{-3} près, ce qui permet de connaître les processus physiques à quelques %.

Un nouvel instrument est en construction au Département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et de l'instrumentation associée (Dapnia) du CEA, entre les services d'astrophysique (SAp), d'électronique, des détecteurs et d'informatique (SEDI) et d'ingénierie des systèmes (SIS), en collaboration avec les observatoires de Bordeaux et de Nice et l'Institut d'astrophysique des Canaries (IAC). Le but est d'améliorer encore d'un facteur 10 la sensibilité de l'instrument afin de mesurer un grand nombre de modes de gravité et leur variation temporelle. L'objectif est d'atteindre des vitesses superficielles de 0,1 mm/s.

> **Sylvaine Turck-Chièze**

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay



L'instrument spatial GOLF a été réalisé par l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay, le Dapnia au CEA, l'Institut d'astrophysique des Canaries (Espagne), et les Observatoires de Bordeaux et de Nice : une cinquantaine de scientifiques, d'ingénieurs et de techniciens y ont participé. Il sert à étudier la structure interne du Soleil en mesurant le spectre des oscillations globales dans le domaine de fréquence s'étendant de 10^{-7} à 10^{-2} Hz.

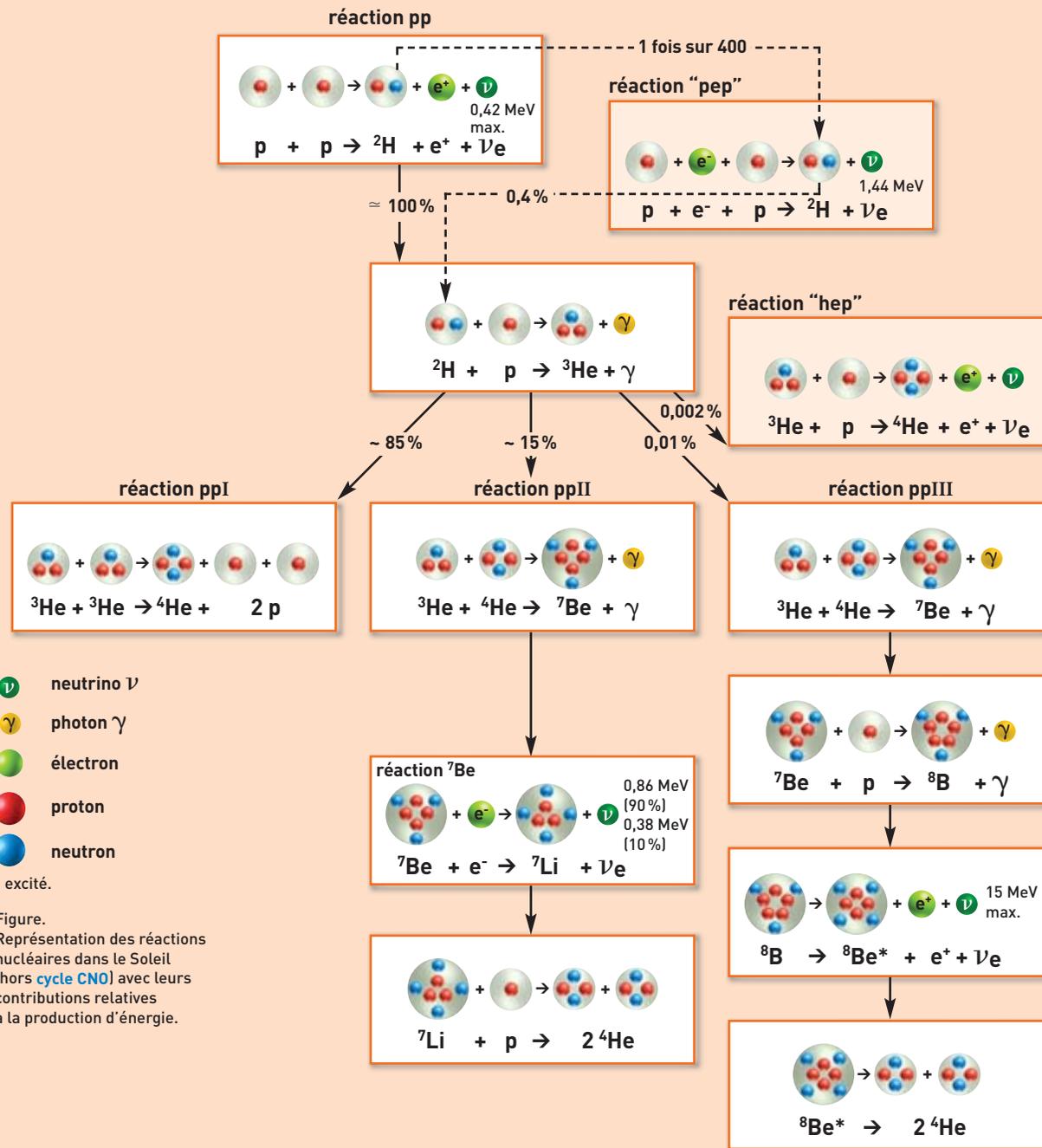


Figure. Représentation des réactions nucléaires dans le Soleil (hors cycle CNO) avec leurs contributions relatives à la production d'énergie.

(1) Il s'agit d'une énergie moyenne.

Les réactions nucléaires débutent par la fusion de deux **protons** et se terminent par la production d'**hélium 4**, l'une *via* l'hélium 3, l'autre *via* le béryllium 7, suivie selon les cas de celle d'autres éléments légers (lithium 7 ou béryllium 8 *via* le bore 8). Ces chaînes de réactions proton-proton portent les noms de ppI, ppII et ppIII (figure).

Dans la première réaction de base, l'un des deux protons se transforme en **neutron** par le biais de l'**interaction faible**. Les deux particules jointes donnent naissance à une variété d'hydrogène, le **deutérium** (D ou ${}^2\text{H}$), formé donc d'un proton et d'un neutron : en même temps un anti-électron ou **positon** et un **neutrino** (électronique) de basse énergie s'envolent.

Le deutérium capture un proton pour former un **noyau** d'hélium 3 et un **photon gamma**. Deux hélium 3 réagissent pour produire un hélium 4 en libérant deux protons, renvoyés en début de chaîne. Dans quelque 85 % des cas, ainsi se termine la **chaîne ppI**. Cette chaîne est riche en neutrinos : 65 milliards d'entre eux traversent chaque cm^2 de notre peau à chaque seconde. Mais ceux-ci, de basse énergie, sont difficiles à mettre en évidence. Il a fallu toute la sensibilité du détecteur Gallex et de ses semblables pour les enregistrer [voir *Les neutrinos solaires, une énigme enfin résolue*].

Dans les 15 % de cas restants, un hélium 3 fusionne avec un hélium 4 pour produire un béryllium 7 et un photon gamma. Soit le béryllium 7 devient lithium 7 par capture d'un électron, ce lithium 7 capturant un proton pour donner deux hélium 4 directement (**ppII**), soit, en capturant un proton, il parvient indirectement au même résultat par le truchement du bore 8, qui se désintègre avec émission d'un neutrino énergétique en béryllium 8, lequel se brise aussitôt en deux hélium 4 (**ppIII**). Au bout de la chaîne ppIII se produit donc la désintégration du bore 8 en béryllium 8, dispensatrice de neutrinos de haute énergie, très prisés des chasseurs de neutrinos solaires.

Les taux de réactions dans le **plasma** solaire doivent être corrigés de l'effet d'écran des **électrons libres** [voir *Vision statique et dynamique de l'intérieur solaire*].

L'énergie engendrée sous forme de **rayons gamma** sert à maintenir chaude la chaudière solaire, ce qui lui évite de s'effondrer, et à la faire briller. L'énergie, sous forme de **photons**, filtre vers la surface. Elle est diffusée, absorbée, réémise par les **ions** et les **électrons**. Seuls les neutrinos traversent en droite ligne le Soleil, en deux secondes environ.

Un soleil, quatre équations

3

Le Soleil est un jeu d'équations, pour l'essentiel au nombre de quatre. Ces équations décrivent l'équilibre de l'**étoile**, la répartition de la masse, la production d'énergie ainsi que son transfert, depuis le **cœur** jusqu'à la surface. Ces équations différentielles couplées sont résolues au moyen de puissants ordinateurs. Les paramètres physiques (essentiellement la composition initiale, les taux de réactions nucléaires et les **opacités**) sont déterminés par des communautés entières d'experts, astronomes et géophysiciens, physiciens nucléaires et physiciens du cortège électronique. La composition chimique, pour sa part, n'est altérée que dans les zones de brûlage : la surface est intacte, au **lithium** près.

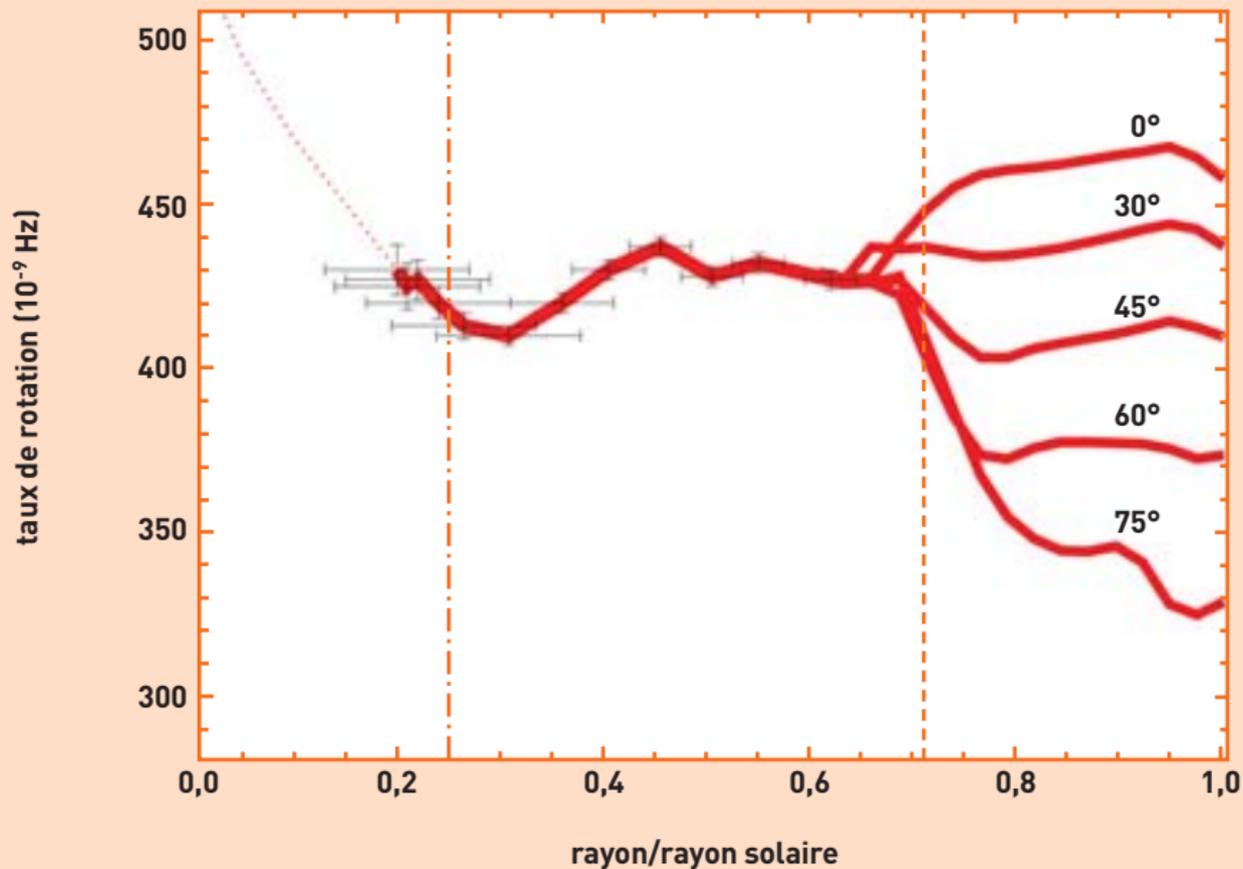


Figure 3.
Vitesse de rotation en fonction du rayon dans le Soleil. Vers l'extérieur, la vitesse de rotation dépend de la latitude, indiquée ici pour chaque courbe. Au-dessous de la tachocline (0,7 rayon solaire), la région radiative tourne de façon rigide et uniforme.

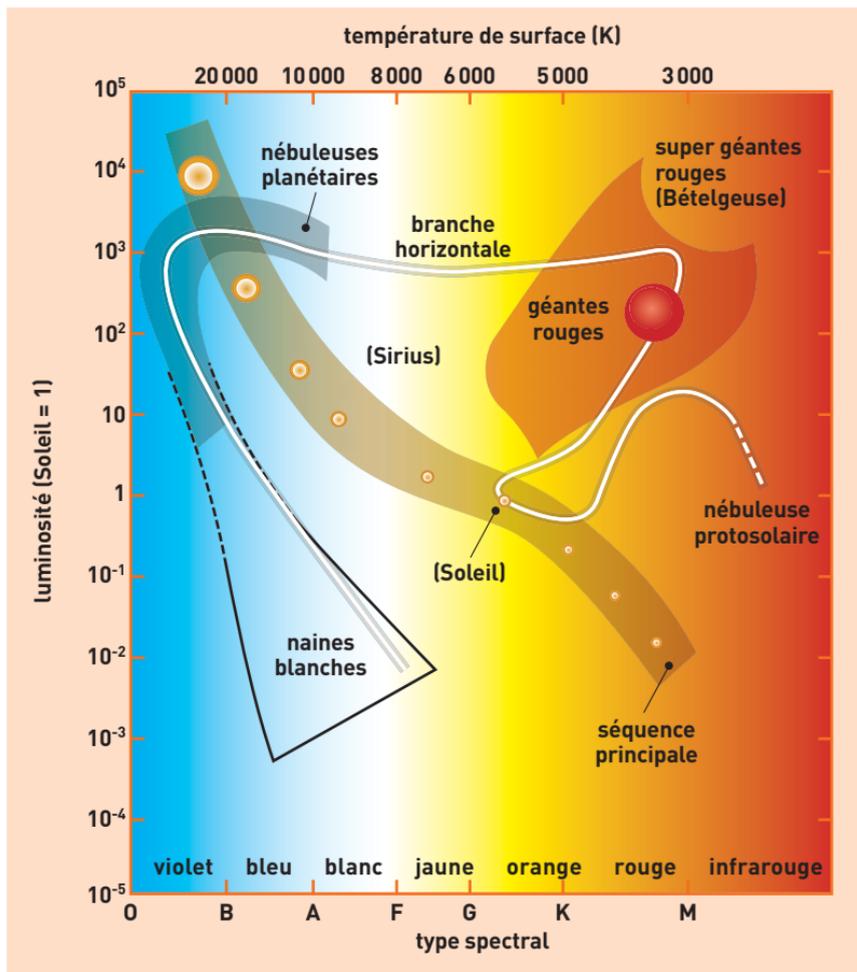


Figure 1.

Le Soleil se situe au cœur de la **séquence principale** du diagramme de Hertzsprung-Russell. Les étoiles sont classées, des plus chaudes aux plus froides, en fonction des **raies spectrales** qui permettent d'estimer la température de leur surface. Leur désignation comporte une lettre (dans la série O, B, A, F, G, K, et M) et un chiffre, qui correspond à une subdivision de la catégorie principale, suivis d'un nombre romain qui désigne sa classe de luminosité. Le Soleil est ainsi de type G2 V, une *naine jaune* d'âge moyen.