



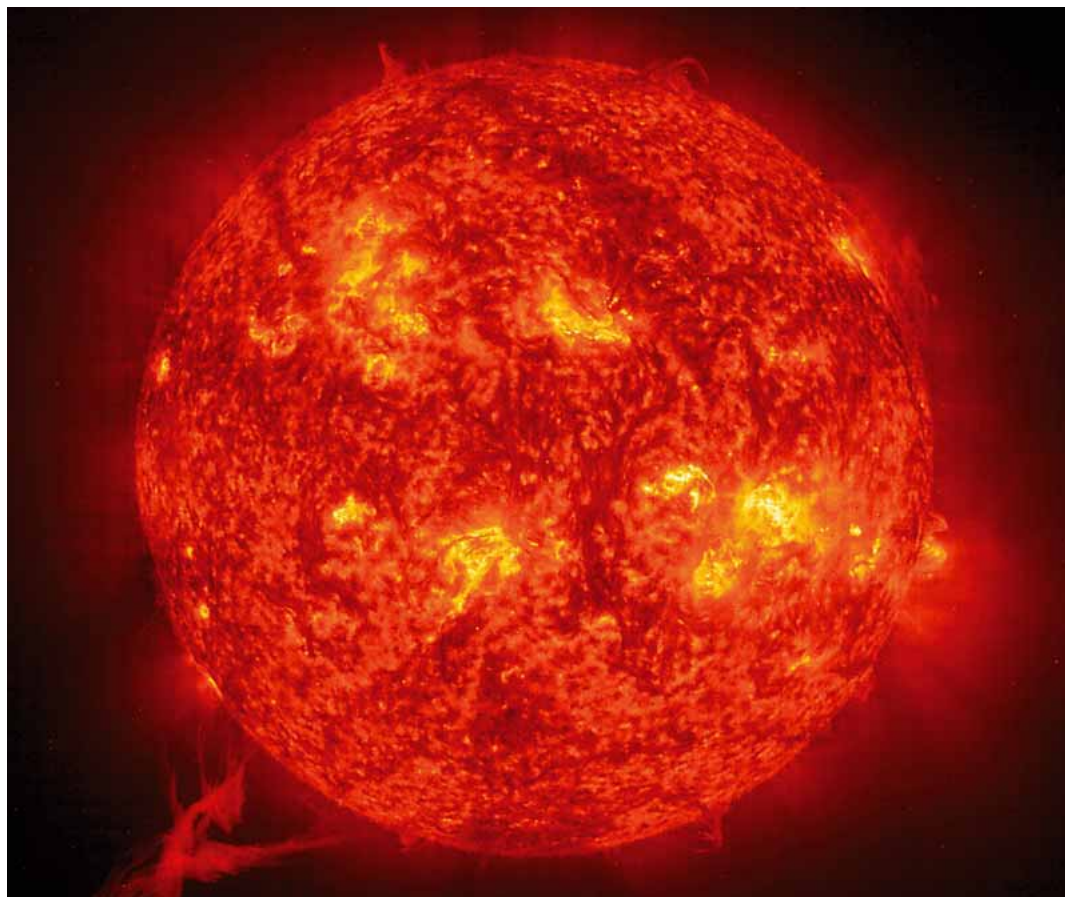
Bien qu'elles nous paraissent éternelles, les étoiles naissent, vivent et meurent.

Dès sa naissance dans les nuages moléculaires interstellaires, la masse du nouvel astre détermine son destin : durée de vie, couleur et devenir final. Durant leur vie « adulte », les étoiles se comportent comme d'immenses réacteurs thermonucléaires « brûlant » de l'hydrogène pour synthétiser des éléments chimiques plus lourds, jusqu'au fer pour les plus massives. Objets en rotation, sièges de courants de convection, arborant pour la plupart une intense activité magnétique, les étoiles mènent une existence agitée. Les étoiles moyennes et petites finissent leur vie comme des naines blanches. Les plus grosses s'effondrent en une gigantesque débauche d'énergie, produisant des supernovae avant de se transformer en étoiles à neutrons ou en trous noirs. Ces explosions disséminent leurs couches extérieures. Paradoxalement, c'est donc lors de leur mort que les étoiles fécondent l'espace interstellaire en éléments nouveaux. Comprendre le scénario de leur naissance et l'origine de leur masse, c'est donc approcher l'origine de la composition de l'Univers.

Les étoiles ensemencent l'Univers

Les enseignements du Soleil

Le Soleil est sans doute une étoile « banale ». Sa proximité lui confère cependant un statut particulier : celui de laboratoire de physique stellaire et de plasmas denses. Il est maintenant étudié comme une étoile magnétique en interaction avec la Terre.



Source de la vie sur Terre, longtemps divinisé, le Soleil est devenu ces dernières années un véritable laboratoire de physique. Les scientifiques l'auscultent pour mieux comprendre l'évolution des étoiles, mais aussi le comportement des plasmas denses.

SOHO (ESA-NASA)

Il y a un siècle, personne ne savait ce qu'était une **étoile**. Étant donné ce qu'ils connaissaient de la **masse** et de la composition du **Soleil**, les scientifiques pensaient que sa température interne atteignait 15 millions de degrés, et sa densité plus de cent fois celle du solide. Des conditions totalement inaccessibles sur Terre. Toutefois la **thermodynamique** des gaz et la **gravité** conduisaient à une durée de vie de quelques millions d'années seulement pour notre étoile, contre quelques milliards d'années pour la Terre ! Ce n'est qu'avec l'avènement de la physique nucléaire – qui s'intéresse aux **noyaux** des **atomes**, à leurs constituants et leurs **interactions** – qu'a été découverte la source d'énergie interne qui compense l'effet inévitable de la gravité.

Le Soleil et l'atome

Très vite, ce domaine fascinant a fait progresser notre compréhension des étoiles. Les réactions nucléaires, qui transforment des **noyaux légers** en **noyaux plus lourds**, constituent donc la source d'énergie manquante. En ce qui concerne le Soleil, il s'agit essentiellement de la **fusion** de noyaux d'**hydrogène** (le plus simple de tous les noyaux puisqu'il ne comprend qu'un **proton**) pour donner de l'**hélium** (le plus petit des autres : deux protons et deux **neutrons**). Le premier à relier ce monde de l'infiniment petit à celui de l'infini grand, en 1920, fut l'astrophysicien anglais Arthur Eddington. En 1929, les physiciens britannique Robert d'Escourt Atkinson et allemand Friedrich Houterman publient un article conjoint, expliquant qu'aux températures régnant au centre des étoiles, les atomes sont généralement dépouillés de tous leurs **électrons**, et donc chargés positivement. Il se forme alors un **plasma**, sorte de « soupe » constituée d'**ions** positifs et d'**électrons libres** négatifs. La température, donc l'agitation, y est telle que deux charges électriques de même signe, au lieu de se repousser comme dans le monde ordinaire, peuvent surmonter la **barrière coulombienne** pour interagir. À la même époque, George Gamow, un physicien d'origine ukrainienne, montre que cette interaction requiert une énergie supérieure à l'énergie thermique. C'est pourquoi seul un petit nombre de protons est concerné. Il ne se produit en fait qu'une réaction par centimètre cube et par an dans le Soleil. Cette « rareté » explique la longévité de l'astre. Il faut en effet environ 10 milliards d'années pour transformer près de la moitié de la masse du Soleil d'hydrogène en hélium. Autre enseignement essentiel : cette interaction, dite *faible*, remet en cause l'idée que le proton et le neutron sont des particules fondamentales puisque l'un se transforme en l'autre. Elle nécessite l'intervention d'une nouvelle particule imaginée par l'Autrichien Wolfgang Pauli en 1930, le **neutrino**, dont la masse n'est toujours pas connue.

Après cette phase de transformation d'hydrogène en hélium, le cœur du Soleil va se contracter et sa température centrale augmenter. Elle sera alors suffisante pour que les noyaux d'hélium surmontent la barrière coulombienne (2,5 fois plus forte que dans le cas de l'hydrogène) et interagissent à leur tour.



University of Colorado

George Gamow, connu pour sa participation à la théorie du **big bang**, a joué un rôle crucial dans la compréhension des réactions nucléaires intervenant dans les étoiles. Il a démontré qu'à cause de la répulsion coulombienne, elles ne peuvent avoir lieu que si les vitesses relatives des réactants sont très élevées. Ainsi la réaction proton-proton, base de la transformation d'hydrogène en hélium ($4p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu_e + 27 \text{ MeV}$), se produit-elle à **5 keV** et non pas à 1,3 keV (correspondant aux 15 millions de degrés régnant au cœur du Soleil). C'est pourquoi elles sont plus rares que prévu, ce qui explique la longévité du Soleil.

De la théorie à l'expérience

Pendant longtemps, ces résultats sont restés purement théoriques car impossibles à tester au laboratoire. Il fallait donc les confronter à la réalité en « sondant » le Soleil lui-même. C'est devenu possible très récemment, avec le lancement en 1995 du satellite SoHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), placé au **point de Lagrange L1**. Il emporte une douzaine d'instruments, dont GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*) et MDI (*Michelson Doppler Imager*), deux appareils de mesures **héliosismiques** – ils observent la propagation des **ondes** acoustiques au sein de l'astre, les « tremblements de Soleil » en quelque sorte. Leurs données, confrontées au CEA avec des **modèles numériques** de l'étoile, ont confirmé des prévisions comme la distribution maxwellienne⁽¹⁾ des vitesses des particules. Elles ont également permis de déterminer avec une précision de 1 % la probabilité d'interaction entre deux protons. Cette valeur était jusque-là estimée théoriquement, en s'appuyant sur la durée de vie du neutron.

(1) Distribution maxwellienne : les particules n'ont pas toutes la même vitesse mais des vitesses réparties aléatoirement autour d'une moyenne.

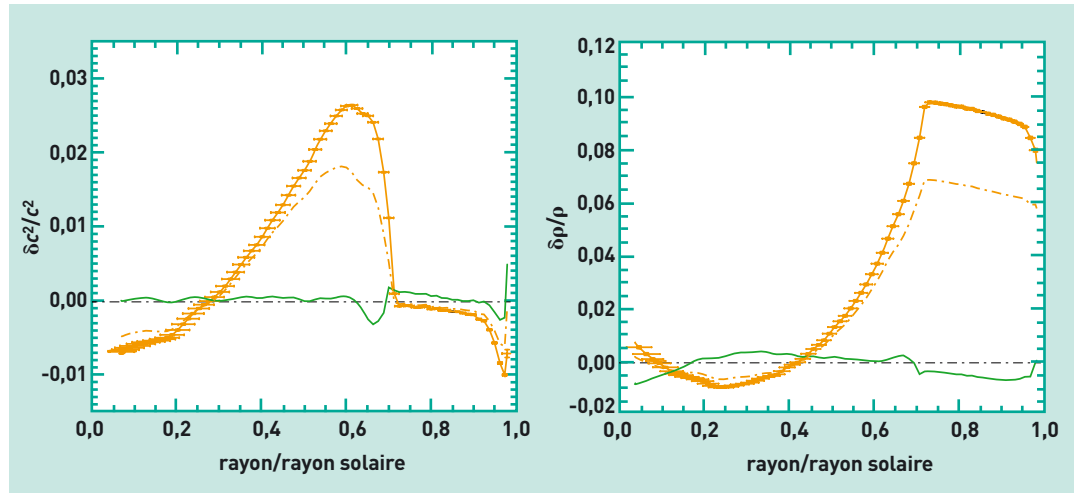


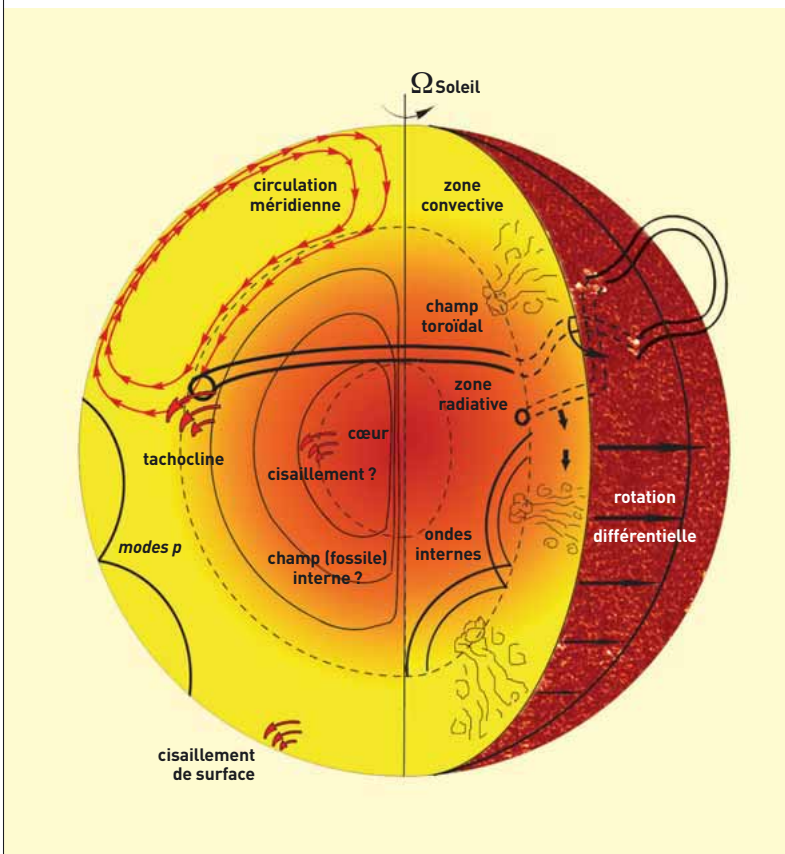
Figure 1. À gauche, différence radiale du carré de la vitesse du son (c) extraite des modes acoustiques détectés par les instruments GOLF et MDI, et celle obtenue avec un modèle sismique du Soleil (en vert) ou avec un modèle classique basé sur les abondances solaires déterminées par les raies d'absorption dans la photosphère (en orange, deux valeurs de composition sont ici montrées). À droite, différence obtenue pour la densité du plasma (ρ) qui varie entre 150 g/cm^3 au cœur et 10^{-7} g/cm^3 dans l'atmosphère solaire.

Les mesures sismiques confirment également des hypothèses générales sur l'évolution des étoiles. En effet les équations qui régissent cette évolution (**équilibre hydrostatique**, transfert d'énergie par rayonnement ou **convection**, conservation de la masse, évolution temporelle des abondances⁽²⁾...)

permettent de calculer le profil actuel de la vitesse du son dans le Soleil et de le comparer à ce qui est extrait de la mesure des nombreux modes acoustiques (figure 1). En introduisant les résultats des mesures sismiques réelles dans ces modèles numériques, les chercheurs prédisent le flux de neutrinos émis par les réactions nucléaires⁽³⁾. Or des installations de détection des neutrinos solaires mesurent ce flux au Japon, au Canada, en Italie et en Russie. L'accord remarquable entre l'héliosismologie et la détection des neutrinos, après 30 ans de recherche, souligne la complémentarité de ces deux disciplines. Les processus régissant les grandes étapes de l'évolution des étoiles de masse comparable au Soleil semblent donc aujourd'hui bien compris.

Dépasser le cadre classique

De nombreuses questions restent cependant sans réponse. Par exemple, des mesures récentes de la composition solaire conduisent à des désaccords très importants entre le modèle classique du Soleil et celui déduit des observations sismiques (figure 1). Des expériences en laboratoire devraient permettre de tester le rôle d'un deuxième ingrédient fondamental de l'évolution stellaire : le transport d'énergie par les **photons**. D'autre part, les phénomènes comme les **taches**, protubérances, courants, ou éruptions solaires ne sont pas décrits dans le cadre conceptuel classique de l'évolution des étoiles. L'origine de cette **activité solaire** reste mystérieuse, et il est impossible de prédire exactement la durée et l'amplitude des **cycles d'activité**. Les équations classiques de l'évolution stellaire négligent en effet des faits essentiels : les étoiles tournent, éjectent de la matière et sont en général actives (voir *Du Soleil aux étoiles*, p. 16). Cette « impasse » est



A. S. Brun/CEA

Figure 2. Vision dynamique de l'intérieur solaire montrant les deux zones classiques : en rouge la région radiative et en jaune la région où le transport d'énergie est dominé par la convection. Se surimposent des circulations méridiennes, des ondes acoustiques (*modes p*) et des ondes internes, ainsi que des champs magnétiques avec des composantes poloidales et toroidales.

(2) Les proportions relatives des différents éléments.
 (3) Il s'agit des réactions proton-proton (dites pp) et du **cycle CNO** (carbone-azote-oxygène).
 (4) D'après l'astronome américain George Ellery Hale (1868-1938).

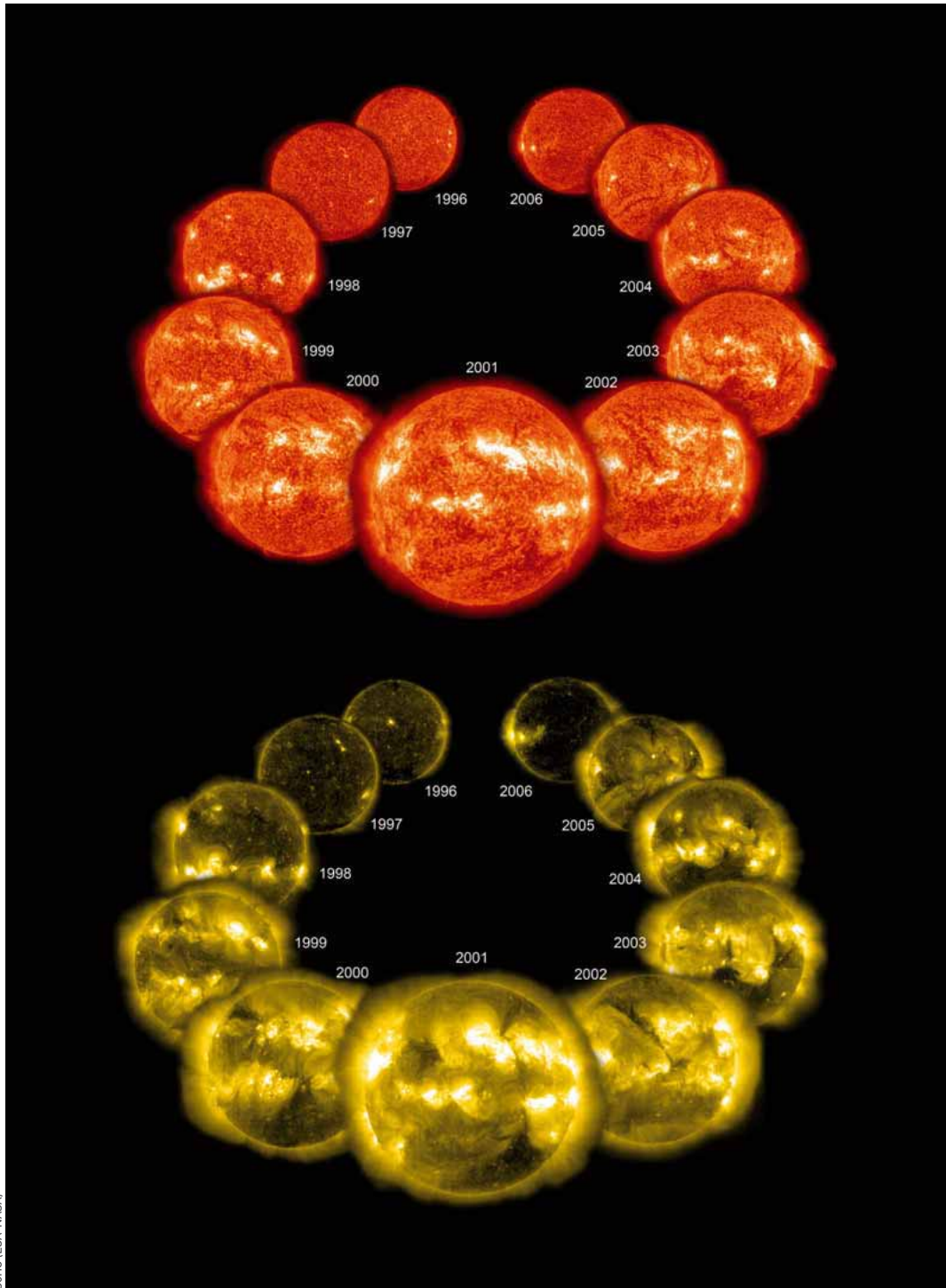


Figure 3. Le satellite SoHO a observé le Soleil à plusieurs hauteurs de l'atmosphère (en haut à 60 000 - 80 000 K et, en bas, à 2 000 000 K) entre la photosphère (la surface visible de l'astre) et la couronne. Ceci permet de suivre l'évolution de son magnétisme entre deux minima (1996-2006). Clairement, les variations du champ magnétique prennent de plus en plus d'importance avec l'éloignement de la photosphère.

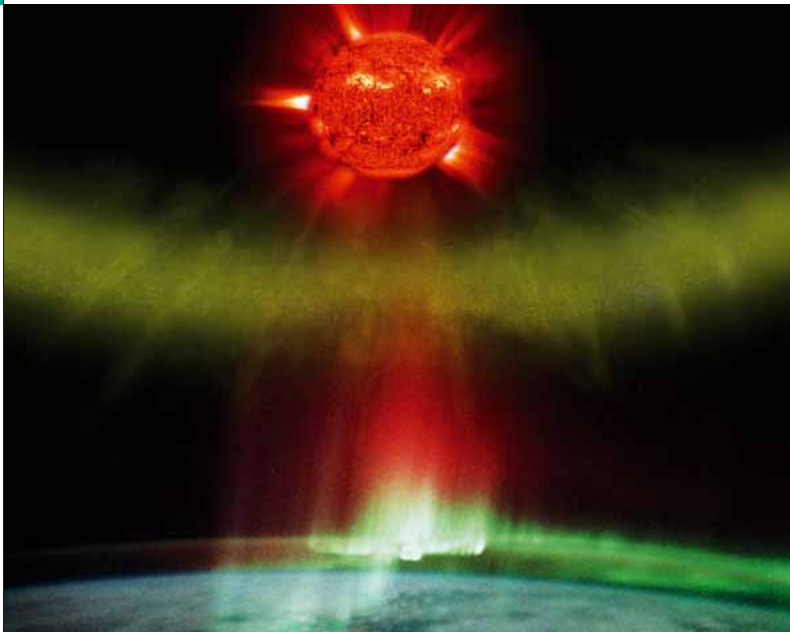
d'ailleurs justifiée car la rotation ou le **champ magnétique** interne n'ont qu'un faible impact sur la structure interne... que veulent précisément décrire ces équations.

Pour dépasser ce cadre conceptuel et aller vers une vision complète et unifiée du Soleil, il faudra là encore exploiter les mesures de SoHO, qui observe toutes les manifestations de la dynamique solaire, qu'elles soient internes ou externes (figure 2). En utilisant les **raies d'absorption** du fer et de l'hélium dans l'atmosphère solaire, le satellite explore des températures très différentes allant de quelques dizaines de milliers de degrés à plusieurs millions de degrés entre la **photosphère** et la **couronne** (figure 3). La longévité de ce satellite permet de

suivre l'évolution de tous les indicateurs au cours du cycle d'activité solaire. D'une durée d'environ onze ans, ce cycle dit *de Hale*⁽⁴⁾ est connu depuis Galilée. Il est caractérisé par la migration des taches solaires d'une latitude de 60° vers l'équateur. Lorsque le champ magnétique dipolaire s'inverse, le nombre de taches s'amenuise ou disparaît, puis un deuxième cycle s'amorce. Le retour aux polarités initiales demande environ 22 ans.

Un astre bien agité

Les astrophysiciens du CEA veulent aujourd'hui comprendre la ou les sources internes d'activité du Soleil, pour mieux en apprécier la variabilité. En effet un Soleil très actif éjecte des particules qui



SOHO (ESA-NASA)

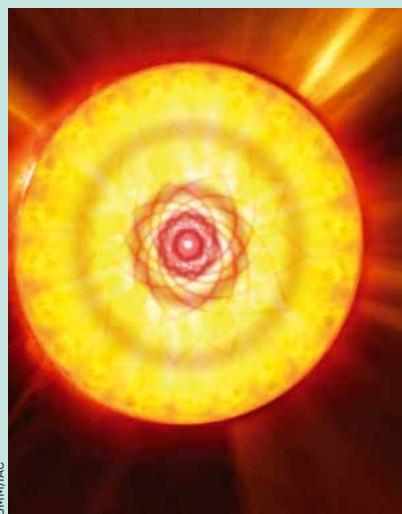
Une aurore boréale. Ce phénomène est dû à la pénétration dans la haute atmosphère terrestre d'un flux de particules en provenance du Soleil.

s'échappent de la couronne solaire. Ces flux de particules réguliers ou épisodiques – pour les phénomènes les plus violents – arrivent jusqu'à la **magnétosphère** qui protège notre planète. Toutefois, une partie de ces particules contourne la Terre et pénètre les hautes couches atmosphériques par les pôles, donnant naissance aux **aurores boréales**. Ce phénomène entraîne parfois des perturbations atmosphériques, et soumet les pilotes ou les astronautes à des flux conséquents de particules. Il a donc été décidé de suivre ces événements de leur création, au niveau de la couronne solaire, à leur arrivée dans l'environnement de la Terre. Selon l'énergie de ces particules, ce trajet dure quelques jours.

En fait, le cycle de Hale n'est pas très régulier. SoHO a clairement montré que les phénomènes dynamiques internes du Soleil déterminent son activité. Un ensemble de processus magnétiques et mécaniques interfèrent de manière complexe. Le phénomène de **dynamo** – la création d'un champ magnétique par la circulation de particules électriquement chargées – régénère cette activité et implique l'ensemble de la **région convective**.

Sonder l'intérieur des étoiles

Jusqu'à la deuxième moitié du 20^e siècle, les astronomes ne disposaient d'aucune donnée expérimentale provenant directement de l'intérieur des **étoiles**. Ils devaient se contenter de paramètres globaux ou de surface : rayon, masse, **luminosité**, **spectre électromagnétique**... La détection des **neutrinos** solaires, porteurs d'une information sur les conditions **thermodynamiques** régnant au centre du **Soleil**, a repoussé quelque peu ces limites. Les astrophysiciens restaient cependant sur leur faim : comment « pénétrer » à l'inté-



SMN/JAC

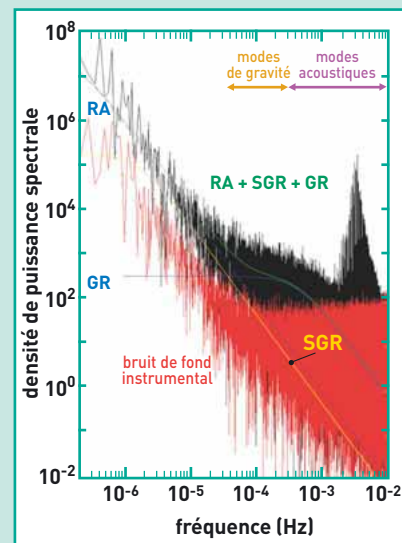
Vue d'artiste de l'intérieur du Soleil montrant les trajectoires des modes de gravité pendant leur propagation dans la **zone radiative**, partie la plus interne du Soleil (70 % en rayon).

rieur du Soleil – et des étoiles – pour connaître les phénomènes physiques se déroulant à toutes les profondeurs ?

Une nouvelle approche expérimentale, l'**astérosismologie**, a apporté une réponse. Elle s'inspire de la sismologie terrestre, qui analyse la propagation souterraine des **ondes** acoustiques générées par les tremblements de terre ou des explosions contrôlées. De la même manière, l'astérosismologie – dite **héliosismologie** lorsqu'elle s'applique au Soleil – étudie la propagation d'**ondes** acoustiques ou de **gravité** (figure 1) à l'intérieur des étoiles, pour en déduire une information sur leur structure et leur dynamique internes. Contrairement à la Terre, le Soleil – ainsi qu'une multitude d'étoiles du même type – « vibre » en permanence sous l'effet des mouvements **convectifs** de la région extérieure. Ces mouvements, similaires à ceux observés dans de l'eau qui bout dans une casserole chauffée par le fond, évacuent l'énorme quantité d'énergie créée par les réactions centrales de **fusion thermonucléaire**.

La musique du Soleil

Les cellules convectives⁽¹⁾ frappent la surface du Soleil et engendrent des ondes sonores qui se propagent ensuite à l'intérieur de l'étoile, de la même manière que des chocs sur la peau d'un tambour créent des ondes dans l'instrument. Le Soleil joue donc le rôle d'une énorme caisse de résonance (figure 2).



R. A. García/CEA - Spécifique

Figure 1. Densité de puissance spectrale du Soleil, obtenue à partir du **déplacement Doppler** mesuré par GOLF (en noir) et du bruit de fond instrumental (en rouge). Pour les ondes acoustiques (fréquence supérieure à $5 \cdot 10^{-6}$ Hz), le spectre solaire présente un maximum autour de $3 \cdot 10^{-3}$ Hz. La forte puissance vers les fréquences basses provient des **turbulences** associées essentiellement aux mouvements granulaires (GR), supergranulaires (SGR) et au passage des régions actives (RA).

(1) Une cellule convective correspond à une « bulle » de matière chaude (moins dense) qui monte, puis se refroidit et donc redescend, pour se réchauffer et remonter.

(2) Une octave correspond à un doublement de fréquence.

La zone de transition entre les **régions radiative** et convective joue aussi un rôle important. C'est en effet une zone très **turbulente**, siège de cisaillements transverses. Cette zone stocke et amplifie la **composante toroïdale** du champ magnétique solaire. Ce dernier crée ainsi des boucles dont certaines s'élèvent jusqu'à la surface, alors que d'autres contribuent à reformer le **champ poloidal**. Par ailleurs la zone équatoriale tourne plus vite que les pôles – la différence, d'environ 30 %, est visible à la surface de l'astre. Cette différence de rotation se propage dans toute l'épaisseur de la région convective, et contribue à la composante toroïdale du champ magnétique. La région radiative, elle, semble tourner quasiment de façon rigide : elle tourne « en bloc ». Son profil de rotation est de mieux en mieux établi. Par contre les premières observations des **modes de gravité** semblent montrer que le cœur nucléaire de l'étoile tourne plus vite ! Ceci pourrait représenter un vestige de la formation du système solaire. En effet, le jeune Soleil tournait sans doute très vite lorsqu'il s'est décollé du disque gazeux (reste de la nébuleuse initiale) qui l'entourait. Au cours de cette phase, le Soleil a pu être très actif et un fort champ

magnétique s'est alors créé dans la région radiative. Or sa diffusion est très lente : quelques milliards d'années. Ce champ fossile ainsi que les ondes internes générées par la convection peuvent influencer le magnétisme sur des temps plus longs que le cycle de 11 ans. Cette histoire de l'interaction magnétique du Soleil avec la Terre reste encore à écrire.

> **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 Paris 7-CNRS)
 CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

POUR EN SAVOIR PLUS

- Clefs CEA, N° 49, Printemps 2004, Le Soleil et la Terre.
- S. TURCK-CHIÈZE, R. A. GARCÍA, S. COUVIDAT *et al.*, *Astrophysical Journal*, vol. 604, p. 455, 2004.
- R. A. GARCÍA, S. TURCK-CHIÈZE, S. J. JIMENEZ-REYES *et al.*, *Science*, numéro 316, p. 1537, 2007.
- A. S. BRUN et L. JOUVE, *IAU Symposium 247*, p. 33, 2008.

Dans tout instrument de musique, le son produit est d'autant plus grave que la caisse de résonance est de dimensions importantes : que l'on songe à une contrebasse et un violon, par exemple. Le Soleil ayant un volume un million trois cent mille fois supérieur à celui de la Terre, on comprend instinctivement que ses ondes acoustiques auront des fréquences très basses. Et de fait, le Soleil produit des ondes sonores décalées de 17 octaves^[2] par rapport au « La naturel », qui vibre à 440 Hz. La fréquence des ondes solaires est centrée autour de 0,003 Hz, ce qui correspond à une période de cinq minutes.

Bien que récente, l'héliosismologie a déjà apporté une ample moisson de connaissances sur la globalité de notre étoile : profondeur de la base de la **zone convective**, abondance de l'**hélium** en surface, profil de densité, profil de rotation interne, diffusion des **éléments**... (voir *Les enseignements du Soleil*, p. 10 et *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90). Actuellement se développe une sismologie locale, qui s'intéresse aux phénomènes dynamiques de « courte » durée dans des régions proches de la surface. Les champs de vitesse et de température du **plasma** solaire sous la surface révèlent, par exemple, la structure sous-jacente des **taches solaires**. Avec le lancement du satellite franco-européen CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires – Cnes, ESA), le 27 décembre 2006,

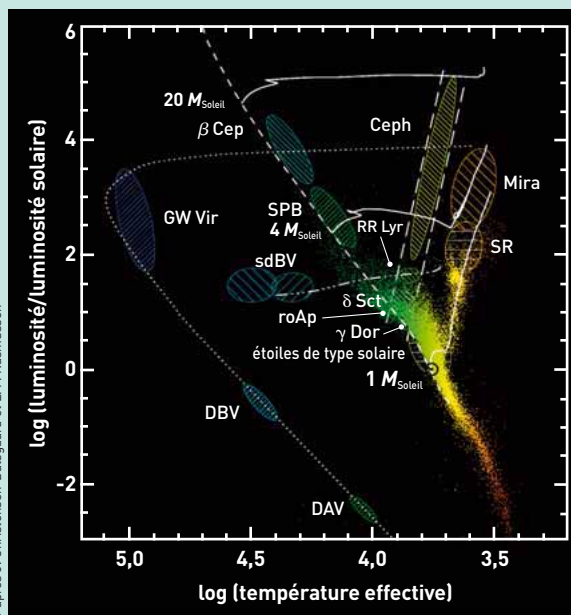


Figure 2.

Diagramme de Hertzsprung-Russell, montrant la relation entre la **température effective** et la **luminosité** des étoiles, où sont indiquées les principales familles d'étoiles pulsantes dans les bandes d'instabilité. Les lignes continues correspondent à des chemins d'évolution pour des étoiles de différentes masses solaires (1, 4 et 20 masses solaires de bas en haut). Sont également représentées les étoiles dans la **séquence principale d'âge zéro** (— — —), les étoiles dans la **branche horizontale** (-----) et la séquence de refroidissement des **naines blanches** (.....).

- β Cep : étoiles variables de type Beta Cephei
- SPB : étoiles faiblement variables de type B
- RR Lyr : étoiles variables de type RR Lyrae
- δ Sct : étoiles variables de type delta Scuti
- γ Dor : étoiles variables de type gamma Doradus
- roAp : étoiles de type Ap (chimiquement particulières) rapidement variables
- Ceph : **céphéides** classiques
- Mira : étoiles variables de type Mira
- SR : **variables semi-régulières**
- sdBV : étoiles sous-naines variables
- GW Vir : étoiles de type GW Virginis
- DBV : naines blanches variables de type spectral DB
- DAV : naines blanches variables de type spectral DA

l'astérosismologie est en plein essor. CoRoT a déjà observé des centaines d'étoiles de **types spectraux** bien différents, à divers stades de leur évolution. Autant de données qui affineront la théorie de l'évolution dynamique des étoiles (voir *L'origine des éléments lourds*, p. 22).

> **Rafael A. García**

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 Paris 7-CNRS)
 CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Du Soleil aux étoiles

Le **Soleil** est une **étoile** parmi des centaines de milliards d'autres dans la **Voie lactée**. Le nombre d'étoiles de type solaire (**type spectral G**) est évalué à trois milliards, dont un milliard du sous-type G2V, qui est précisément celui du Soleil, situées sur la **séquence principale** du **diagramme de Hertzsprung-Russell**. La température de surface de ces astres est comprise entre 5 700 et 5 800 K. La population stellaire est en fait très diverse, et chaque type d'étoile est doté d'une structure interne et de propriétés dynamiques propres. Les astres massifs (plus de deux fois la **masse solaire**) ont un cœur nucléaire **convectif** et une enveloppe **radiative**. Les étoiles de type solaire possèdent au contraire une enveloppe convective **turbulente** et un intérieur radiatif. Enfin les étoiles de faible masse se caractérisent par des zones convectives très profondes, qui peuvent même représenter la totalité de l'astre (figure 1 gauche). Il en résulte des comportements dynamiques, des régimes de rotations et des caractéristiques magnétiques fort différents.

À chaque étoile son activité

Depuis la fin des années 1970, la rotation et le magnétisme de plusieurs centaines d'étoiles ont été étudiés. Il en ressort que les astres pourvus d'une zone convective externe – à l'instar du Soleil – sont magnétiquement actifs et possèdent en général une

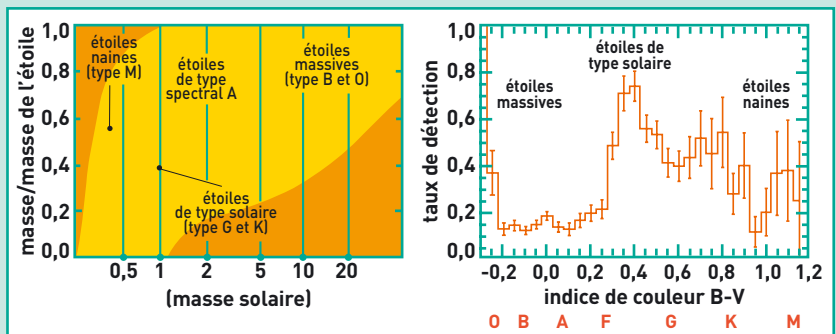


Figure 1.

À gauche, distribution spatiale et en masse des zones convectives en fonction de la masse de l'étoile (cœur convectif pour les massives, enveloppe pour les petites masses). La transition entre une convection principalement à la surface ou dans le centre des étoiles se situe vers 1,3 masse solaire. À droite, taux de détection en rayonnement X d'une activité magnétique dans les étoiles. Une quasi-absence de rayonnement, donc de champ, est observée pour les étoiles de type A et B possédant un cœur convectif. Il convient de noter que l'orientation sur l'abscisse va des naines aux massives (type M jusqu'à O) dans le schéma de gauche et inversement, ce qui est plus classique, dans le schéma de droite.

couronne chaude émettant des **rayons X**, ce qui est un bon indicateur d'activité (figure 1 droite). Le **champ magnétique** des étoiles de type solaire présente souvent des variations cycliques, d'une période allant de 7 à 25 ans (le demi-cycle du Soleil dure 11 ans). Il existe une corrélation entre le taux de rotation et l'activité, les étoiles tournant rapidement étant souvent très actives, avec un champ magnétique principalement horizontal (**toroïdal**). Cette activité atteint un plateau pour les très forts taux de rotation, à des vitesses de 35 km/s, 10 km/s et 3 km/s, respectivement, pour les étoiles de type G (le

Soleil tourne à 2 km/s), K et M. Le mécanisme de **dynamo** explique cette corrélation entre rotation et champ magnétique. Ce dernier dépend en effet des écoulements (courants, cisaillements, turbulences) qui se produisent dans la zone convective. Des **simulations numériques** effectuées au CEA ont mis en évidence les processus physiques à l'origine de l'effet dynamo et de ces écoulements à grande échelle, ainsi que la variation de ces processus physiques en fonction du taux de rotation de l'étoile (figure 2).

En revanche, l'immense majorité (90 %) des étoiles massives ne possède pas de champ magnétique ni de couronne chaude. Les étoiles de type A et B, en particulier, ont une activité très faible (figure 1 droite). Toutefois, lorsqu'elles sont dotées d'un champ magnétique, celui-ci est souvent très intense (plusieurs milliers de **gauss**), et semble oblique par rapport à l'axe de rotation. Il s'agit probablement d'un champ fossile datant de la formation de l'étoile, car le temps de **diffusion ohmique** des champs magnétiques stellaires est très long. Le cœur convectif de ces astres constitue certes une dynamo très efficace pouvant créer un champ de plusieurs millions de gauss, comme l'ont montré des simulations numériques (figure 2), mais ces champs n'émergent pas, arrêtés par l'enveloppe radiative très étendue.

> Allan Sacha Brun

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 Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

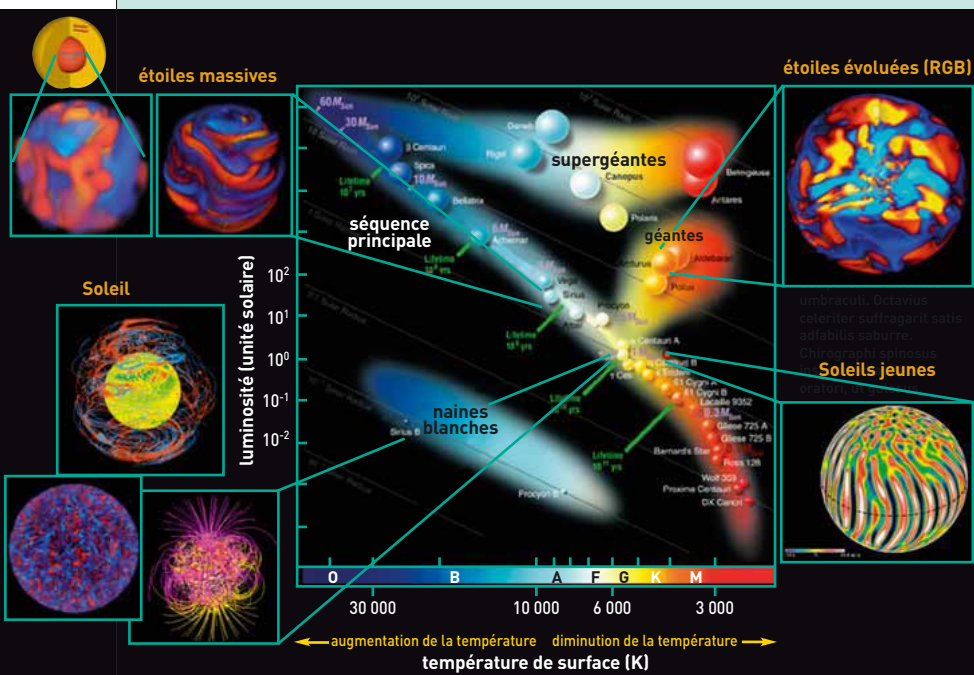


Figure 2. Simulations numériques tridimensionnelles de la **magnétohydrodynamique** de divers types d'étoiles repérées sur le diagramme de Hertzsprung-Russell, effectuées dans le cadre du projet européen STARS2 (www.stars2.eu). RGB signifie branche des **géantes rouges**.