

Notre compréhension du Soleil a accompli des progrès considérables au cours des trente dernières années. La raison principale, c'est qu'il est possible à présent de sonder l'intérieur de l'astre, grâce à l'héliosismologie, alors qu'auparavant on n'en connaissait guère que la surface et son environnement: chromosphère, couronne, vent solaire.

L'intérieur appartenait aux théoriciens, qui construisaient des modèles fondés sur la physique de base, et tenant compte des propriétés observables, comme le rayon et la luminosité du Soleil. Ils avaient prédit, par exemple, que la température centrale du Soleil était de l'ordre de 15 millions de degrés, et avaient établi que la source d'énergie devait être d'origine nucléaire, provenant de la transformation de l'hydrogène en hélium. Mais il fallut attendre l'avènement de l'héliosismologie, au milieu des années 1970, pour vérifier ces prédictions.

UNE ÉTOILE PAS ENCORE COMPLÈTEMENT EXPLIQUÉE

SACHA BRUN
CEA/IRFU-Service d'astrophysique, Chef
du Laboratoire dynamique des Étoiles
et de leur environnement

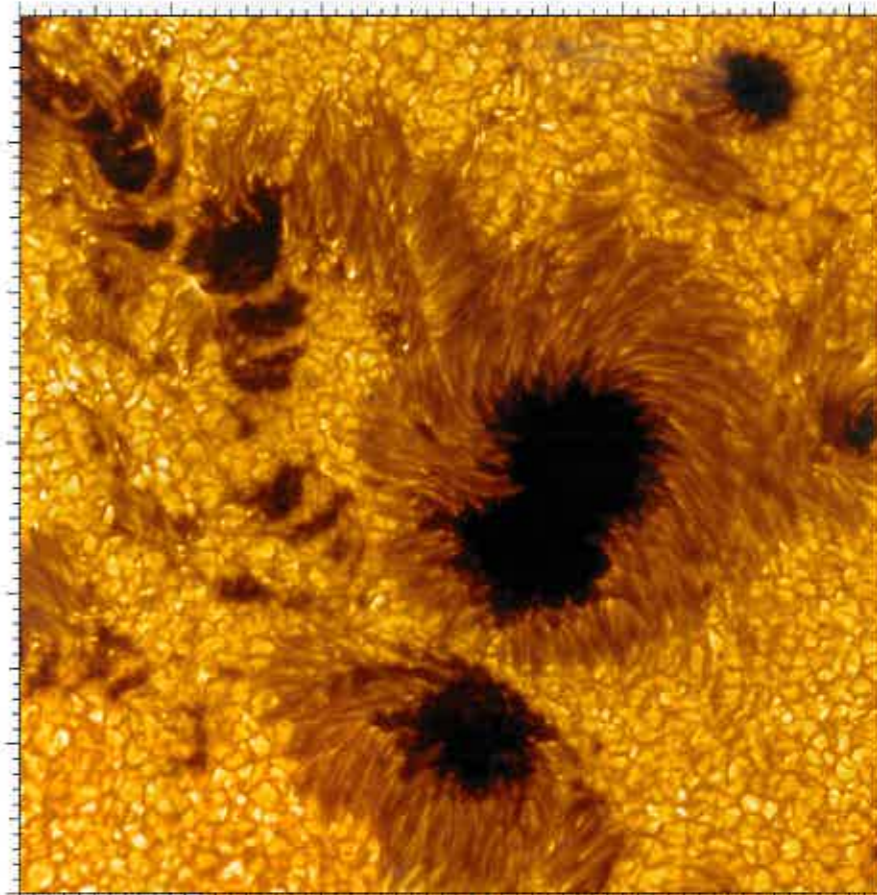
JEAN-PAUL ZAHN
LUTH, Observatoire de Paris

EXPLORER L'INTÉRIEUR DU SOLEIL: un défi relevé par l'héliosismologie

Technique très puissante, l'héliosismologie ressemble beaucoup à la sismologie terrestre, mais il existe des différences. Les géophysiciens mesurent le temps mis par les ondes sismiques émises lors d'un tremblement de terre (ou d'un séisme provoqué artificiellement) pour parvenir au détecteur, et ils en déduisent les propriétés physiques des couches traversées. Sur le Soleil, les ondes observées à la surface sont excitées en permanence par les mouvements turbulents qui agitent le haut de la zone convective (fig. 1) (1). Ces ondes ont une période de quelques minutes, comparable à la durée de vie des éléments turbulents; elles interfèrent pour former des ondes stationnaires de période bien définie, que l'on peut détecter à la surface par les déplacements ou les fluctuations de température qui leur sont associés. Leur identification ne fait aucun doute: ce sont des ondes acoustiques, dont la force de rappel est la compressibilité du milieu (du gaz ionisé, principalement hydrogène et hélium). Elles peuvent donc se propager dans tout l'astre, mais rares sont celles qui traversent ou même approchent le cœur nucléaire; elles permettent de déterminer, en fonction de la profondeur, la vitesse du son et la densité, dont on peut déduire la température. L'analyse fine des fréquences fournit même le profil de rotation. Enfin, des mouvements horizontaux à grande échelle ont été détectés par la technique dite héliosismologie locale.

Mais d'autres ondes sont prédites par la théorie: ce sont les ondes internes de gravité (ondes internes pour faire bref) dont la force de rappel est la force d'Archimède, et qui devraient être émises au bas de la zone convective. Ces ondes ne se propagent que dans la partie interne du Soleil, dite radiative, où la stratification est stable, car elles sont évanescentes dans la zone convective. C'est pourquoi elles produisent un signal si faible à la surface, au point que l'on débat encore pour trancher si elles ont bien été détectées.

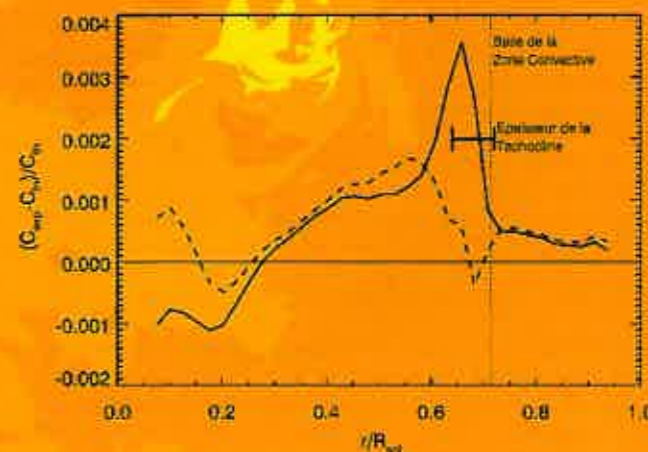
L'essentiel de ce que l'on connaît actuellement de l'intérieur du Soleil provient donc de l'observation des ondes acoustiques (lire encadré p. 33). Celle-ci s'effectue depuis le sol, par des réseaux couvrant la Terre entière pour assurer la collecte permanente des données (GONG, BiSON, IRIS, SONG) et dans l'espace (trois instruments embarqués sur le satellite SoHO ainsi que SDO et bientôt Solar Orbiter). L'héliosismologie a permis de valider et d'améliorer les modèles de l'intérieur solaire; par exemple elle a précisé la base de la zone convective, à 72 % du rayon solaire. En général on procède en comparant les données solaires à celles prédites par les modèles, comme on peut le voir sur la figure 2. Sur cette figure on a porté la différence relative de vitesse du son



1 Région active du Soleil, montrant des taches causées par le champ magnétique. Elles occupent moins d'un pour cent de la surface; le reste est couvert par les granules, partie visible de la zone convective.

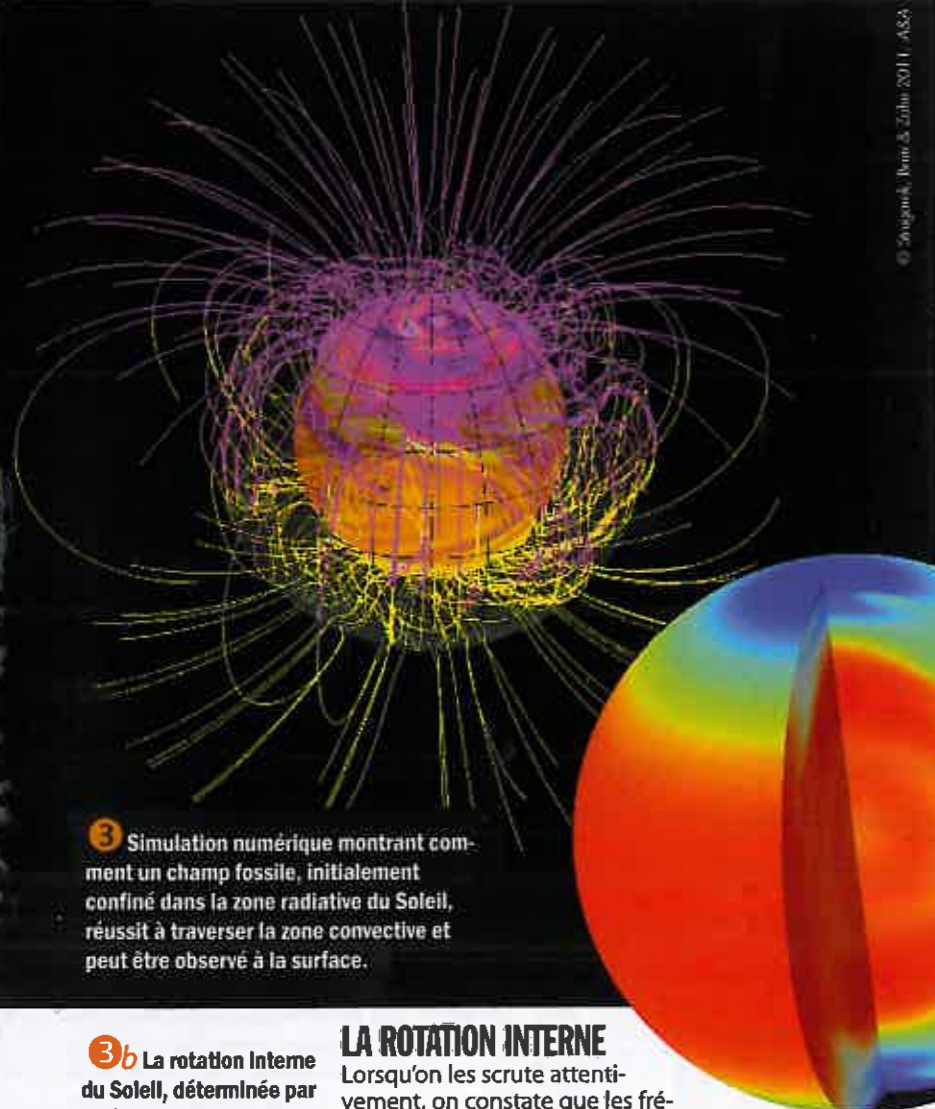
© Swedish Solar Telescope

entre les valeurs solaires déduites de l'héliosismologie et celles prédites par des modèles. Si l'accord était parfait, les courbes seraient confondues avec la droite de valeur zéro: on constate qu'elles s'écartent de quelques millièmes seulement, avec des déviations plus marquées juste sous la zone convective. C'est l'indication que nos modèles sont certes excellents, mais qu'ils peuvent (et doivent) être encore améliorés. L'écart entre les modèles et les observations pourrait être dû à une mauvaise estimation de l'opacité, ou à un traitement pas assez sophistiqué du mélange turbulent au bas de la zone convective.



2 Écart relatif de la vitesse du son en fonction du rayon, entre modèles (C_{th}) et données héliosismiques (C_{exp}). Si le modèle était parfait, la courbe se confondrait avec la droite de valeur zéro. L'écart le plus prononcé ne dépasse pas 0,4 % (en trait plein); il se réduit encore lorsqu'on tient compte du mélange dans la tachocline (courbe en traits).

© Brun et al. 2002



3 Simulation numérique montrant comment un champ fossile, initialement confiné dans la zone radiative du Soleil, réussit à traverser la zone convective et peut être observé à la surface.

3b La rotation interne du Soleil, déterminée par l'héliosismologie (Instrument MIDI sur le satellite SoHO); en bleu, les régions tournant plus lentement. Dans la zone radiative, la rotation est presque uniforme; dans la zone convective, les pôles tournent plus lentement que l'équateur, comme on peut l'observer à la surface.

LA ROTATION INTERNE

Lorsqu'on les scrute attentivement, on constate que les fréquences observées des ondes acoustiques se séparent en plusieurs composantes, dont les écarts permettent de déterminer la vitesse de rotation interne. La figure 3b montre comment la vitesse angulaire varie en fonction de la profondeur, à des latitudes choisies. Dans la zone convective, la vitesse angulaire varie peu avec la profondeur, mais elle dépend fortement de la latitude, avec un équateur tournant plus rapidement (1 tour en 25 jours) que les pôles (1 tour en 35 jours), comme on le constate à la surface. Au contraire, dans la zone radiative, la rotation est quasi uniforme. Entre ces deux régimes de rotation, la transition s'effectue dans une couche mince appelée la **tachocline**, dont l'épaisseur ne dépasse pas quelques pour cent du rayon solaire.

Pour expliquer la rotation presque uniforme de l'intérieur radiatif, ainsi que la minceur de la tachocline, certains chercheurs ont invoqué la présence d'un champ magnétique. Il est vrai qu'un champ relativement faible serait capable de rigidifier la rotation interne, mais d'où pourrait-il provenir? Il ne peut s'agir du champ dynamo généré dans la zone convective, dont il sera question plus loin, car celui-ci, à cause de ses renversements de polarité quasi périodiques, ne pourrait pas pénétrer bien loin dans l'intérieur profond. Mais ce pourrait être un champ fossile, piégé lors de la naissance du Soleil. Toutefois, à y regarder de plus près, un tel champ, même s'il était confiné initialement dans la zone radiative, devrait se propager lentement vers le haut, par ce que l'on appelle la diffusion ohmique, et il finirait par pénétrer dans la zone convective, qui elle est en rotation différen-

tielle. Si tel était le cas, cette rotation différentielle se transmettrait alors vers l'intérieur, le long des lignes de force du champ fossile, par un effet bien connu sous le nom de loi de Ferraro. Le résultat serait donc une zone radiative en rotation différentielle comme la zone convective, un scénario que nous avons vérifié au moyen de simulations numériques. Comme cela n'est pas observé, nous sommes tentés de conclure qu'il n'existe pas de champ fossile cohérent à grande échelle (fig. 3). Mais la question est loin d'être tranchée; en particulier, il reste à examiner le comportement d'un champ fossile qui ne serait pas aligné avec l'axe de rotation.

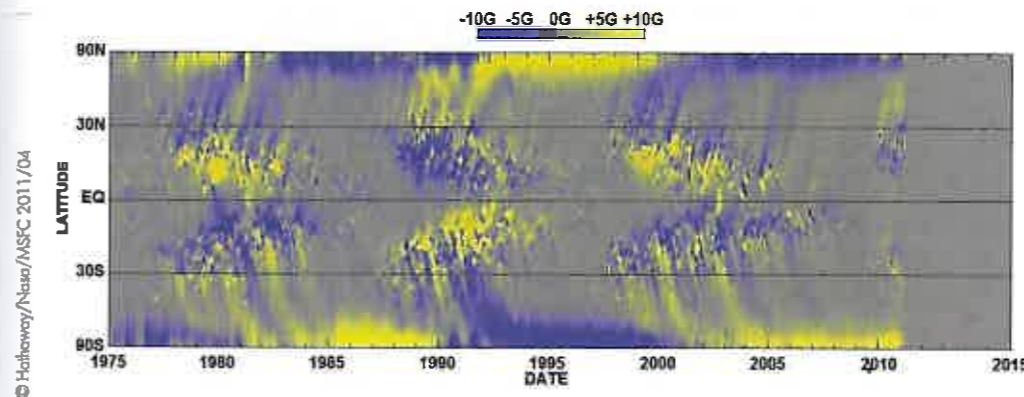
L'autre possibilité est que la rotation de la zone radiative soit rendue uniforme par des ondes internes de gravité.

Nous avons évoqué ces ondes plus haut, comme pouvant être utilisées pour l'héliosismologie.

Mais là il s'agit des ondes de longue période, de l'ordre de la dizaine de jours, émises à la base de la zone convective, et il est exclu de les détecter directement avec les moyens actuels. Ces ondes ont la propriété de modifier l'état de rotation d'un milieu, car elles transportent le moment cinétique (2) de l'endroit où elles sont générées à celui où elles sont amorties. Au fur et à mesure que le Soleil ralentit sous l'effet du vent solaire (lire l'article p. 19), elles extraient du moment cinétique de l'intérieur radiatif pour le déposer dans la zone convective, et elles parviennent ainsi à lisser le profil de rotation en fonction de la profondeur. Reste à expliquer pourquoi la rotation ne dépend pas de la latitude: on invoque pour cela une turbulence anisotrope qui serait créée par le cisaillement du champ de vitesse. Là encore des incertitudes demeurent, et le problème fait l'objet d'actives recherches.

LA DYNAMO SOLAIRE

La description du magnétisme du Soleil a été historiquement séparée en physique solaire interne et externe (la seule observable directement par effet Zeeman sur les raies du spectre solaire). De nos jours, grâce à l'avancée simultanée des observations, de la théorie et des simulations numériques, cette distinction tend à disparaître et le Soleil commence à être considéré dans sa globalité. On parle alors de modèle solaire intégré, du centre jusqu'à la couronne et son extension sous forme de vent de particules (lire l'article p. 19). Il reste que le magnétisme solaire est de nature différente selon qu'on se place à l'intérieur de notre étoile (où le



4 Diagramme papillon montrant l'émergence, en fonction du temps et de la latitude, du flux magnétique moyenné sur une rotation solaire. Les polarités sont distinguées par la couleur (bleu ou jaune). La cyclicité du magnétisme solaire est parfaitement illustrée, avec ses renversements de polarité environ tous les 11 ans. Noter comme les taches émergent à des latitudes de plus en plus basse, au fur et à mesure que le (demi) cycle se déroule, et comme le champ polaire s'inverse au maximum d'activité.

champ magnétique est entraîné par les mouvements) ou au niveau de son atmosphère (où c'est le champ magnétique qui impose la dynamique). L'origine du magnétisme est étroitement liée à la dynamique de l'intérieur du Soleil, notamment de son enveloppe convective et de son interaction avec son intérieur radiatif via la tachocline, que nous avons mentionnée plus haut.

Le Soleil possède en réalité deux types d'activité magnétique:

● **Une activité locale et irrégulière**, se manifestant par une émergence continue de flux magnétique à toutes les échelles et l'apparition de points brillants aux interstices des granules convectifs. Cet état est caractéristique de la turbulence magnétisée présente dans toute l'enveloppe convective.

● **Une activité globale et cyclique**, qui se renouvelle tous les 22 ans avec inversion de la polarité tous les 11 ans. Ce renversement du champ polaire (dit poloidal) se produit au maximum de l'activité magnétique, qui est caractérisé par de nombreuses taches à la surface du Soleil; ces taches forment le plus souvent des groupes bipolaires, dont la polarité diffère d'un hémisphère à l'autre et s'inverse également tous les 11 ans. Au début du cycle les taches apparaissent aux latitudes moyennes, puis elles émergent de plus en plus près de l'équateur. Le phénomène est illustré par le diagramme dit « papillon » (fig. 4). Ce diagramme montre l'émergence des taches solaires en fonction de la latitude et du temps au cours des derniers cycles; la polarité est représentée par la couleur (bleu ou

jaune). Une succession de bandes se propageant vers l'équateur et alternent leur signe tous les 11 ans, dessinant ainsi comme des ailes de papillon.

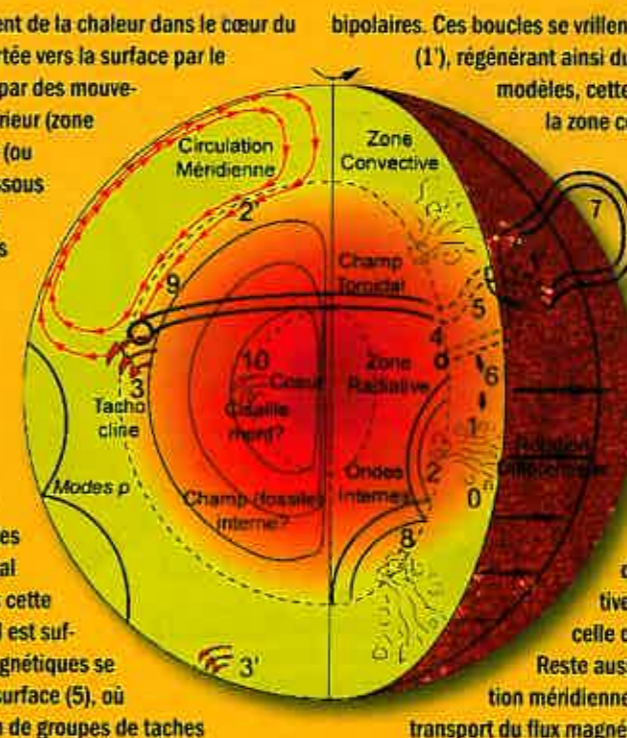
Ces deux types d'activité, l'une cyclique, l'autre non, ont en commun le processus physique de dynamo fluide, qui peut être défini ainsi: c'est la capacité qu'un fluide conducteur a de générer un champ magnétique par auto-induction et de le maintenir contre la dissipation ohmique (l'effet Joule).

Pour expliquer le champ global cyclique, tel qu'il est observé, on fait appel à plusieurs processus physiques qui contribuent à ce qu'on appelle la dynamo solaire:

● **La convection turbulente** - Le Soleil possède un aspect granuleux qui provient des mouvements convectifs turbu-

L'INTÉRIEUR DU SOLEIL

Les réactions nucléaires produisent de la chaleur dans le cœur du Soleil; celle-ci est d'abord transportée vers la surface par le rayonnement (zone radiative), puis par des mouvements turbulents dans le tiers supérieur (zone convective). Les ondes acoustiques (ou modes p) sont excitées juste en dessous de la surface, et elles se propagent dans tout l'astre. Les ondes internes (ou modes de gravité) sont émises au bas de la zone convective, et elles restent confinées dans la zone radiative (8). La tachocline (3) marque la frontière entre la zone radiative en rotation quasi uniforme et la zone convective en rotation différentielle, avec l'équateur tournant plus rapidement que les pôles. Le champ magnétique toroidal est généré vraisemblablement dans cette région de fort cisaillement; lorsqu'il est suffisamment intense, des boucles magnétiques se détachent (4) et « flottent » vers la surface (5), où elles se manifestent par l'apparition de groupes de taches



bipolaires. Ces boucles se vrillent sous l'influence de la rotation (1), régénérant ainsi du champ poloidal (7). Dans d'autres modèles, cette régénération a lieu à l'intérieur de la zone convective (6), mais dans tous les cas le champ est entraîné dans la tachocline par les mouvements turbulents organisés en « panaches » (0,1,2). Du champ toroidal pourrait se former également dans une autre couche de cisaillement détectée par l'héliosismologie, située tout près de la surface (3'). La présence d'un champ fossile (9) près du cœur nucléaire (10) est plus hypothétique, et plus encore celle d'une dynamo opérant dans la zone radiative (0-6), qui pourrait interférer avec celle opérant dans la zone convective (9). Reste aussi à éclaircir le rôle de la circulation méridienne (2'), qui pourrait participer au transport du flux magnétique.

lents transportant la chaleur vers sa surface. Les cellules convectives (ou granules) couvrent toute sa surface et leur taille est de l'ordre de 1 000 km (fig. 1). Ces mouvements convectifs turbulents créent du champ magnétique par induction, un processus qu'on appelle dynamo rapide car son temps caractéristique est de l'ordre de la durée de vie des granules, soit une dizaine de minutes. De plus, ces mouvements peuvent interférer avec le champ magnétique à grande échelle, pour régénérer du champ poloidal par ce qu'on appelle l'effet alpha.

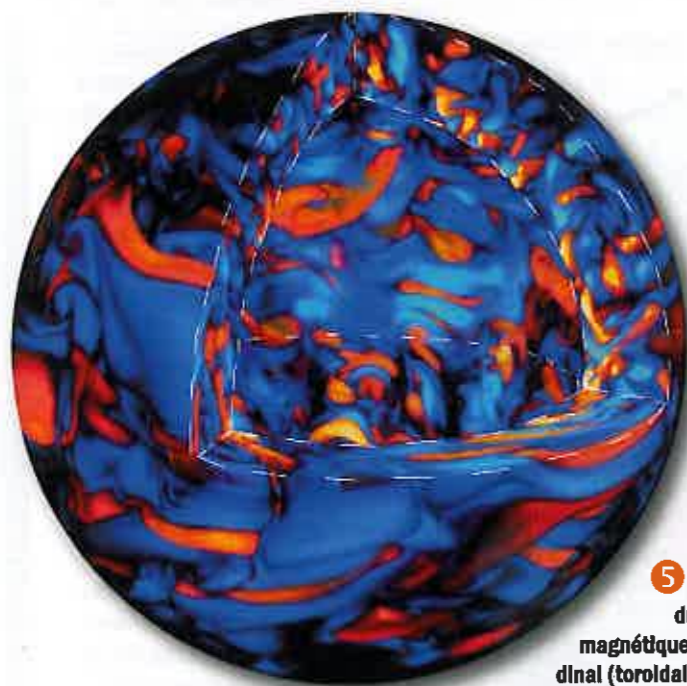
● **Le profil particulier de rotation interne du Soleil** – Comme nous l'avons mentionné plus haut, la zone convective du Soleil tourne plus rapidement à l'équateur qu'aux pôles, alors que sa zone radiative tourne de façon quasi rigide. Cette rotation différentielle en rayon et latitude agit sur le champ méridien (ou poloidal) et induit (par effet oméga) un champ magnétique azimuthal (ou toroidal), qui se manifeste à la surface par l'apparition de taches. Ce champ toroidal s'enroule autour de l'axe de rotation, de sorte que les lignes de champ magnétiques se trouvent entremêlées au cours du temps. Cet enchevêtrement serait au moins en partie responsable du cycle solaire de 22 ans.

● **Une circulation méridienne interne** – Associé aux mouvements convectifs et à la rotation différentielle, il existe un troisième écoulement dans le plan méridien, plus difficile à déceler: la circulation méridienne. Celle-ci est orientée de l'équateur vers les pôles à la surface et induit plus

profondément un flot retour dirigé vers l'équateur. Cet écoulement transporte le champ vers les pôles, et il participe au changement de flux magnétique et au renversement du champ polaire (dipôle) global. Le temps de circulation de ce flot serait en partie responsable de la période de 11 ans du cycle solaire.

● **Loi de Joy et terme magnétique de surface** – L'existence d'une déviation systématique des taches bi-polaires par rapport à la direction est-ouest, avec la tache « de tête » plus proche de l'équateur que la tache « suiveuse », cet angle variant entre 10° à moyenne latitude vers 4° près de l'équateur (loi de Joy), est à l'origine d'une production de champ polaire à la surface du Soleil. Ce champ d'une polarité opposée au champ polaire en début de chaque cycle de 11 ans est, comme dit précédemment, transporté vers les pôles, permettant ainsi l'inversion du champ polaire. Cet effet avec la turbulence hélicitaire de la convection constitue un effet alpha permettant la génération d'un champ poloidal (méridional) à partir d'un champ toroidal (le long des parallèles).

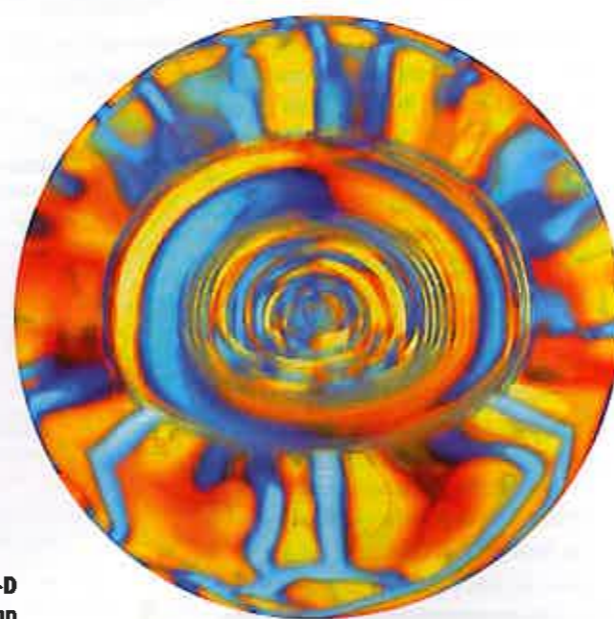
Tous ces effets se combinent pour engendrer un champ magnétique cyclique, à l'origine du cycle d'activité de 11 ans du Soleil bien que cette période puisse varier de plus ou moins 3 ans (cf. encadré p. 24). Grâce aux simulations numériques multi-dimensionnelles il est de nos jours possible de vérifier qu'une dynamo fluide de ce type est à l'origine du magnétisme solaire (fig. 5).



Brun, Miesch & Toomre (2004), Apl

5 Vue 3-D du champ magnétique longitudinal (toroidal) obtenu dans une simulation numérique

de la dynamo solaire. C'est l'action combinée des mouvements convectifs et de la rotation différentielle qui est à l'origine du champ magnétique. En bleu/rouge nous représentons la polarité négative/positive.



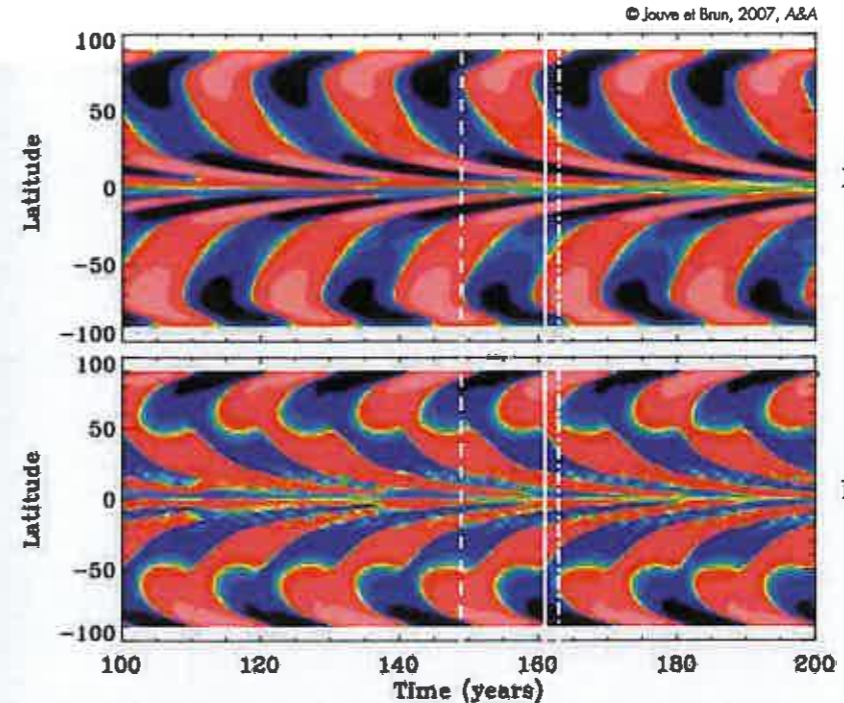
simulation numérique réalisée par Brun, Miesch et Toomre 2011

6 Coupe du Soleil montrant les mouvements dans la zone convective: en rouge la matière est plus chaude et elle monte, en bleu elle est plus froide et elle descend. Les ondes internes sont émises au bas de la zone convective, et elles se propagent vers l'intérieur.

LE SOLEIL SIMULÉ PAR L'ORDINATEUR

En effet, afin de comprendre l'activité magnétique du Soleil, de pouvoir l'anticiper et de se protéger de ses incidences sur la Terre, les astrophysiciens font appel à des modèles qu'ils font tourner dans des ordinateurs de plus en plus performants (lire aussi à ce sujet l'article de B. Schmieder et G. Aulanier p. 19). Ces modèles sont basés sur les équations qui expriment les lois physiques gouvernant l'équilibre, la dynamique et le magnétisme à l'intérieur de l'astre, et ils permettent d'analyser en détail les processus physiques qui y sont à l'œuvre: convection turbulente, transport de la chaleur, état de rotation, effet dynamo, mélange de la matière, etc. En quelque sorte, la physique solaire devient ainsi une science expérimentale, puisque l'on peut tester le rôle de tel ou tel paramètre.

Le développement d'ordinateurs massivement parallèles avec une puissance de calcul impressionnante (des millions de milliards d'opérations élémentaires par seconde ou petaflops) a permis des simulations numériques de plus en plus réalistes; les codes globaux, traitant l'astre dans sa totalité, mettent en jeu plusieurs milliards de points de grille, et leur résolution atteint à présent le millier de kilomètres, soit l'échelle de la granulation. Grâce à eux, on a élucidé pourquoi le Soleil tourne plus rapidement à l'équateur qu'aux pôles, et l'on a observé comment des ondes internes sont émises au



7 Diagramme papillon prédit par une simulation numérique. En haut champ toroidal et en bas champ radial (représentant le champ poloidal).

bas de la zone convective (fig. 6). Et l'on passe maintenant au problème du magnétisme solaire, en examinant chaque étape du cycle dynamo. C'est ainsi que l'on a vu effectivement le champ poloidal être « pompé » dans la tachocline, pour s'y organiser et produire le champ toroidal. Et l'on a assisté pour la première fois au renversement de la polarité du champ global, comme sur le Soleil. Des calculs plus simples à deux dimensions permettent d'étudier les cycles et créer des diagrammes papillon théoriques (fig. 7). Un nouveau champ de recherche est aussi en plein développement: la prédiction des cycles futurs à partir de modèles allant ainsi au-delà des indicateurs observationnels traditionnels (cf. encadré p. 24).

LE TEST DES NEUTRINOS

Au cœur des étoiles, certaines réactions de fusion nucléaire produisent des particules interagissant très peu avec la matière et appelées neutrinos. Il existe dans la nature trois types de neutrinos: électroniques, muoniques et tauiques; ces particules sont neutres électriquement et jusqu'à une dizaine d'années, elles étaient réputées sans masse. Or nos modèles prédisent que le Soleil émet environ 8×10^{38} neutrinos électroniques ν_e par seconde, ce qui veut dire qu'au niveau de la Terre chaque centimètre carré serait traversé chaque seconde par 65 milliards de ces particules. S'il était possible de vérifier cette prédiction, on pourrait donc valider le modèle solaire

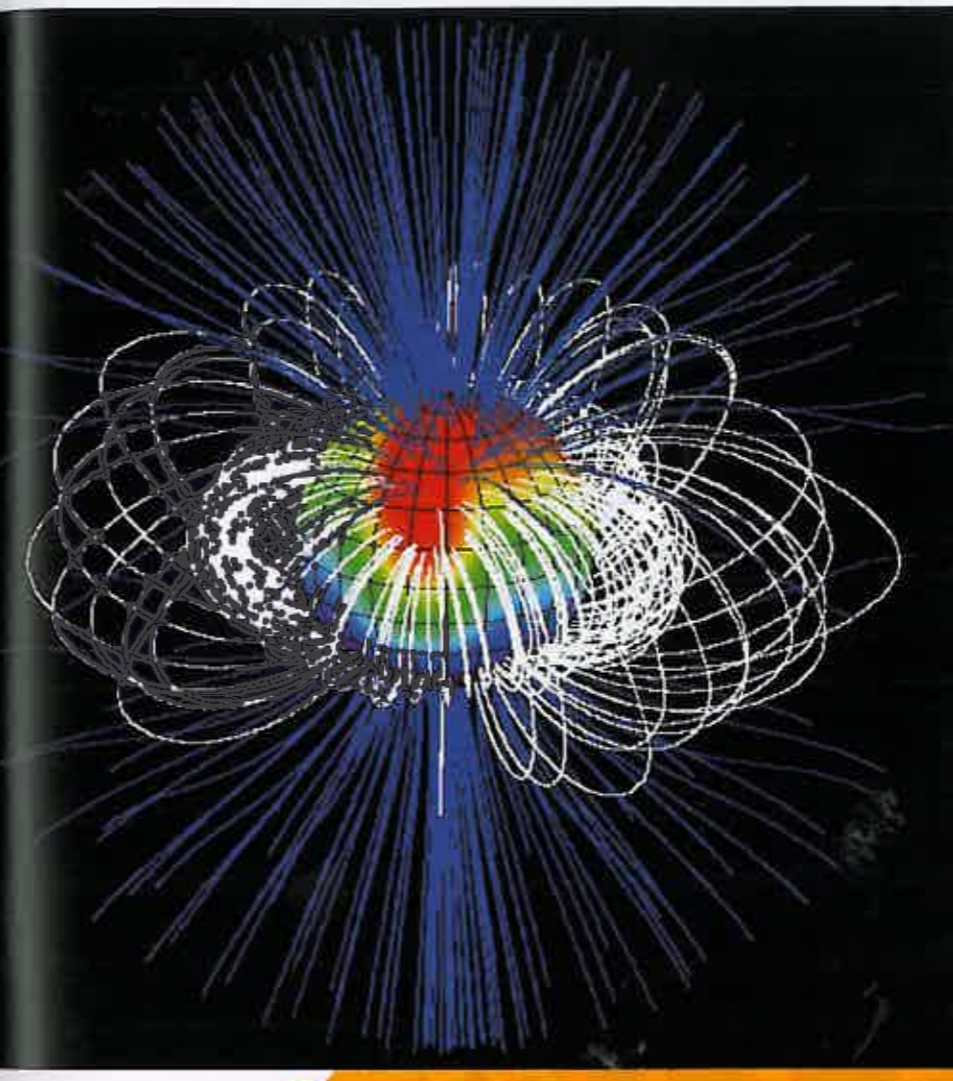
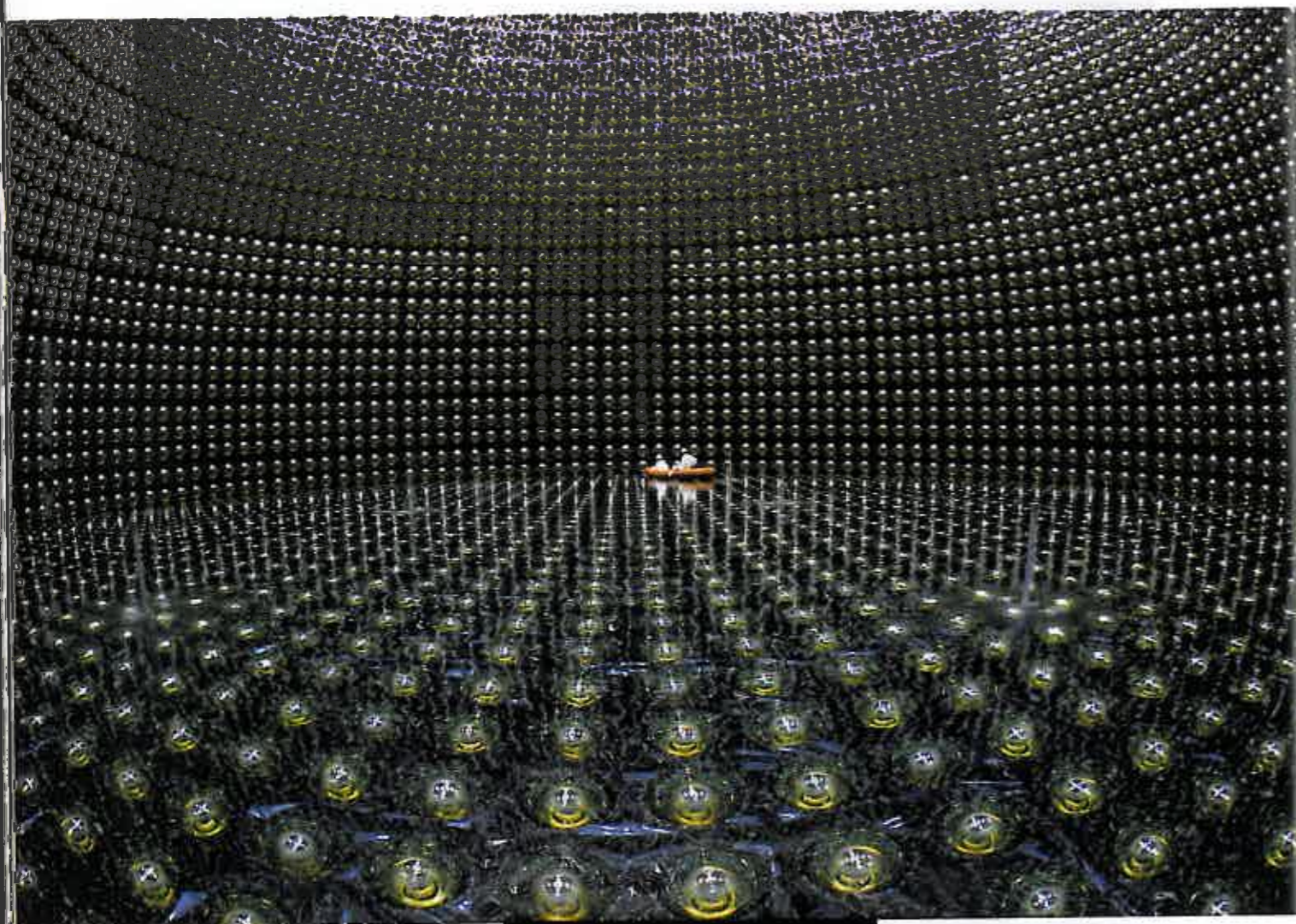
construit par les astrophysiciens, et en particulier confirmer la température centrale (environ 15 millions de degrés).

Le premier à tenter de détecter les neutrinos solaires fut R. Davis en 1968, par une expérience radiochimique basée sur le chlore (on lui décernera pour cela le prix Nobel de physique en 2002). Son expérience avait un seuil de détection de 0,814 MeV et elle ne captait donc que les neutrinos les plus énergétiques venant du béryllium ^7Be et du bore ^8B . Elle en détecta effectivement quelques dizaines par an, mais c'était 2 à 3 fois moins que les prédictions des modèles théoriques du Soleil. L'expérience Kamiokande, construite au Japon sous l'impulsion de M. Koshiba (co-lauréat du prix Nobel), confirmera à la fin des années 80, puis au milieu des années 90 dans sa version améliorée Superkamiokande (une immense cuve remplie de 50 000 tonnes d'eau tapissée de détecteurs de lumière

Cerenkov, fig. 8), ce déficit de neutrinos solaires. Elle confirmera également l'origine solaire des neutrinos détectés grâce à sa sensibilité angulaire (de pointage). En effet l'électron de Cerenkov créé dans l'expérience lors de la collision élastique entre le neutrino incident et l'électron présent dans la cuve de l'expérience conserve une partie de la direction initiale. Toutefois ces expériences avaient un seuil de détection relativement élevé et elles ne permettaient donc pas de capter les neutrinos émis par la réaction principale de la chaîne proton-proton, la réaction électrofaible qui produit le deutérium ($p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e + 1,172 \text{ MeV}$), car leur énergie est inférieure à 0,420 MeV. Il a fallu attendre les années 90 pour voir se développer des expériences avec un seuil suffisamment bas ($\sim 0,27 \text{ MeV}$; Gallex, Sage) pouvant détecter les neutrinos de basse énergie de cette réaction fondamentale. Avec ces quatre expériences on obtenait donc un échantillonnage depuis les neutrinos solaires de faible énergie jusqu'à ceux du bore (14 MeV). Les résultats cumulés de ces expériences confirmaient que la source d'énergie solaire était bien basée sur le brûlage de l'hydrogène en hélium, mais il subsistait un désaccord très net entre les résultats expérimentaux et la prédiction théorique des modèles solaires.

Or les astrophysiciens avaient réalisé des progrès considérables dans leur connaissance de la structure interne du Soleil, grâce surtout à l'héliosismologie (lire p. 31), et tout semblait indiquer que le problème devait provenir non pas des modèles, mais de la physique des particules, c'est-à-dire de quelques propriétés des neutrinos non prévues par la théorie standard de la physique des particules. Par exemple, si le neutrino avait une masse, il lui serait possible de changer de saveur (d'osciller d'électronique à muonique ou tauique), par interaction dans le plasma solaire ou dans le vide, et donc d'échapper aux détecteurs d'avant les années 2000, seulement sensibles aux neutrinos électroniques. Ou s'ils possédaient un moment magnétique, ils pourraient passer de l'hélicité gauche à l'hélicité droite (en interagissant avec le champ magnétique du Soleil), qui est

L'énigme des neutrinos solaires était donc résolue: les neutrinos ont une masse et le modèle nucléaire du Soleil était bien validé.



9 Le champ magnétique de l'étoile entièrement convective V374 Pegasi, obtenu par le spectro-polarimètre ESPaDOnS installé sur le télescope Canada-France-Hawaii. L'étoile est une naine rouge entièrement convective de 0,28 masse solaire. À la différence du Soleil, elle tourne très vite (un tour en 10 h 42 min) et elle possède un champ dipolaire intense (de l'ordre de 1 000 gauss).

stérile du point de vue de l'interaction faible, et donc ne pas déclencher un signal mesurable par les détecteurs.

Au début des années 2000, l'expérience SNO (constituée d'un réservoir de 1 000 tonnes d'eau lourde) s'est donc attaquée au problème du changement possible de saveur des neutrinos, car elle pouvait détecter non seulement les courants chargés ($\nu_e + D \rightarrow e^- + p + p$) seulement sensibles aux neutrinos électroniques mais aussi les courants neutres ($\nu_x + D \rightarrow \nu_x + p + n$) sensibles aux trois saveurs ν_x des neutrinos. En mai 2001 puis en 2003 (par l'ajout de sel ordinaire NaCl), cette expérience a clairement mis en évidence l'existence d'une oscillation du neutrino électronique solaire en ses cousins, en détectant les produits des réactions faisant intervenir les courants neutres. Lorsque la somme des différents flux est effectuée, le résultat est compatible avec les modèles solaires. L'énigme des neutrinos solaires était donc résolue : les neutrinos ont une masse et le modèle nucléaire du Soleil était bien validé. La recherche sur les neutrinos pouvait donc maintenant se concentrer sur la détermi-

8 L'expérience SuperKamiokande, au Japon, montrée ici en cours de nettoyage. En fonctionnement, la cuve contient 50 000 tonnes d'eau. Elle est tapissée de détecteurs de lumière permettant d'établir la trajectoire des électrons Cerenkov.

nation du type d'oscillation (dans la matière ou le vide, petit ou grand angle de mélange), à mieux caractériser le spectre des neutrinos solaires et à expliquer pourquoi les neutrinos avaient une si petite masse (bien inférieure à celle de l'électron). L'expérience KamLAND auprès des réacteurs nucléaires japonais a par exemple permis de mieux déterminer dans l'espace de paramètres masse-angle de mélange la solution la plus compatible avec toutes les expériences rejetant par exemple la solution à petit angle de mélange. Il semble qu'aujourd'hui en 2011 la solution préférée, en analysant toutes les données (tel que publié dans la Global Neutrino Oscillation Analysis), est celle d'une oscillation dite MSW dans la matière solaire (plutôt que dans le vide) à grand angle

de mélange et avec une différence de masse relativement élevée ($\Delta m^2 \sim 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$, $\tan^2 \theta \sim 0,46$). Elle permet par exemple de donner un taux de conversion de 0,61 entre modèle solaire et expériences, compatible avec toutes les expériences réalisées à ce jour.

L'expérience Borexino s'est attaquée à la détermination précise du spectre en énergie des neutrinos en détectant pour la première fois l'émission monochromatique du ${}^7\text{Be}$. En France l'expérience double Chooz auprès des réacteurs de la centrale située dans les Ardennes va permettre de mieux déterminer la masse relative des neutrinos et l'angle de mélange.

Comme on le voit, la recherche sur les neutrinos solaires a été riche en rebondissements ! Le travail complémentaire des scientifiques et le développement d'observations et d'expériences de plus en plus précises et sophistiquées a permis de lever le voile sur ces particules mystérieuses que sont les neutrinos et de confirmer l'origine nucléaire de l'énergie solaire.

OBSERVER LES ÉTOILES POUR MIEUX COMPRENDRE LE SOLEIL

Le Soleil est une étoile parmi des centaines de milliards d'autres dans notre galaxie, la Voie lactée. Les modèles ont établi que leur structure interne dépend fortement de la masse. Les étoiles massives possèdent un cœur convectif et une enveloppe radiative, alors que les étoiles de masse moyenne, comme le Soleil, possèdent un intérieur radiatif et une enveloppe convective. Les étoiles de faible masse ont une zone convective très profonde, et au-dessous de 0,3 masse solaire elles sont entièrement convectives. On peut donc s'attendre à ce que leur dynamique, leur rotation et leur magnétisme, notamment, se manifestent fort différemment d'un type d'étoile à l'autre. C'est ce que confirment les campagnes d'observations menées depuis la fin des années 70 : celles-ci sont effectuées à présent au moyen de spectro-

polarimètres hautement performants, qui permettent de caractériser le champ magnétique et la rotation de surface. Grâce à ces outils modernes, on a dressé le tableau suivant, très contrasté. Les étoiles possédant une zone convective de surface sont magnétiquement actives et possèdent généralement une couronne très chaude émettant en rayons X. Toutes les étoiles de type solaire qui ont été observées ont un champ magnétique, et celui-ci est souvent cyclique comme celui du Soleil, avec une durée du demi-cycle allant de 7 à 25 ans. Une corrélation entre activité et taux de rotation a été mise en évidence, les étoiles tournant rapidement étant souvent très actives et leur champ magnétique principalement toroïdal. Cette corrélation s'explique bien par le mécanisme dynamo que nous avons décrit plus haut pour le Soleil, et les toutes récentes simulations numériques, effectuées notamment au CEA, parviennent à rendre compte des

renversements de polarité observés. Mais les étoiles de faible masse, qui sont entièrement convectives et tournent très vite, sont le siège d'un champ intense de type poloidal, qui ne semble pas varier beaucoup au cours du temps, et l'on se demande d'où il provient (fig. 9).

Quant aux étoiles massives, au-dessus de 2 masses solaires, elles présentent un comportement fort différent. La plupart ne montrent pas d'activité magnétique, ou alors très faible. Dans celles qui sont magnétiques, ce qui est le cas de 10 % d'entre elles, le champ est souvent très intense (plusieurs milliers de gauss, soit 10 000 fois celui de la Terre), et il ne varie pas au cours du temps ; de plus le champ est incliné par rapport à l'axe de rotation. Le magnétisme de ces étoiles est vraisemblablement d'origine fossile, le champ du milieu interstellaire étant piégé lors de la formation de l'étoile. Des recherches sont en cours pour expliquer pourquoi un champ fossile peut ainsi subsister dans certaines étoiles, et pas dans les autres. Le magnétisme stellaire est un vaste sujet, que l'on commence seulement à explorer.

1. La zone convective occupe le tiers supérieur du Soleil, où le milieu n'est pas assez transparent pour que la chaleur libérée par les réactions nucléaires soit transportée seulement sous forme de radiation. Les mouvements convectifs prennent alors le relais.
2. Le moment cinétique, par unité de masse, est le produit de la vitesse angulaire par le carré de la distance à l'axe de rotation : Ωr^2 .