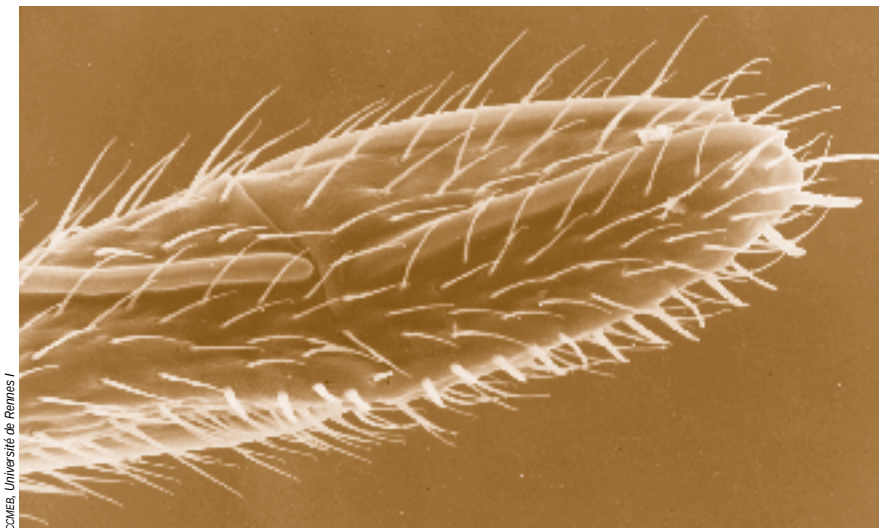




C. MEYER, Université de Rennes I

5. LES RÉCEPTEURS «GUSTATIFS» SITUÉS SUR LES ANTENNES d'*Anaphes victus* permettent à ces guêpes de détecter rapidement si les œufs de charançon sont déjà parasités (x 1 200).

de charançons aux femelles d'*Anaphes victus*, elles peuvent pondre jusqu'à une trentaine d'œufs sans s'arrêter, partant à la recherche d'un nouvel hôte dès qu'elles en ont parasité un.

Reconnaissance par contact antennaire

L'apprentissage se manifeste lors de cette séquence de ponte. Quand on présente à une femelle d'*Anaphes victus* un mélange d'hôtes sains et d'hôtes parasités par des femelles congénères, elle rejette les premiers hôtes parasités qu'elle rencontre après une piqûre sans ponte. Au bout d'environ six tentatives infructueuses avec des hôtes parasités, elle les rejette après un simple contact antennaire. La femelle apprend à associer l'odeur de la phéromone interne qui est spécifique et qu'elle reconnaît dès la première rencontre à l'odeur de la phéromone externe individuelle qui, initialement, ne produit pas de réaction.

Après quelques essais, elle décèle qu'un hôte est parasité uniquement grâce à ce nouveau stimulus. Cet apprentissage a toutes les caractéristiques d'un apprentissage associatif : la phéromone externe est le stimulus conditionnel qui, au début, ne provoque pas de réaction, et la phéromone interne est le stimulus inconconditionnel.

Les femelles qui acquièrent ce conditionnement peuvent-elles l'oublier, condition nécessaire pour que l'on parle d'apprentissage ? Quand on isole une femelle en la retirant de la zone de l'expérience au moment où elle rejette tous les hôtes après un simple contact anten-

naire et qu'on la remet dans une zone identique au bout de quatre heures (rapelons qu'elle ne vit, en moyenne, que 48 heures), elle se comporte comme une femelle qui n'a jamais appris. Elle rejette d'abord les hôtes parasités après une piqûre sans ponte, puis, au bout d'environ six rencontres avec des hôtes parasités, un simple contact antennaire suffit : la femelle a totalement oublié le comportement appris et doit tout réapprendre. Au contraire, quand on isole la femelle pendant 30 minutes seulement, elle rejette les premiers hôtes parasités rencontrés après une piqûre sans ponte, mais, dès la deuxième rencontre, elle reprend les rejets antennaires : elle «réapprend» beaucoup plus vite, car elle n'a pas totalement oublié sa première expérience. Cette durée de rétention d'information, ici d'environ quatre heures, correspond sans doute à la durée d'exploration d'une zone d'habitat : il est avantageux d'oublier la phéromone spécifique d'une zone quand on la quitte pour en explorer une nouvelle. Dans la nouvelle zone, une femelle *Anaphes victus* ne rencontrera vraisemblablement pas d'œufs parasités par la même congénère. Comme ces insectes ont une capacité de rétention des informations limitée, l'oubli des informations précédentes permet aux femelles d'en stocker de nouvelles.

Quel est le rôle de cet apprentissage ? Une génération vit environ onze jours au stade larvaire et deux jours au stade adulte, de sorte que de nombreuses générations se succèdent pendant le printemps et l'été. Le nombre de femelles d'*Anaphes victus* augmente à mesure que celui des œufs de charançons diminue.

La possibilité de rencontrer des hôtes parasités dépend de la date d'émergence des femelles. Quand elle éclôt à la fin de l'été, par exemple, elle est en compétition avec d'autres femelles. Lors d'une telle compétition, ce sont les descendants de la femelle qui trouve le plus vite des œufs non parasités qui ont le plus de chances de survivre : la reconnaissance par contact antennaire étant près de 20 fois plus rapide qu'une reconnaissance par piqûre sans ponte, l'apprentissage fait gagner un temps précieux aux femelles dans leur recherche d'hôtes sains pour leurs œufs.

Ainsi l'apprentissage est utilisé dans toutes les circonstances de la vie : la recherche de nourriture, de partenaires sexuels, le soin aux jeunes, les interactions entre individus de la même espèce, la navigation ou encore la défense contre les ennemis.

Diverses questions restent ouvertes : l'apprentissage est-il apparu de façon indépendante chez toutes les espèces sous l'influence de pressions de sélection qui ont déclenché le même type de réactions ? Existait-il déjà chez un même ancêtre commun ? Les diverses formes d'apprentissage dont sont dotées les différentes espèces sont-elles équivalentes ? Existe-t-il une forme supérieure d'apprentissage dont seuls l'homme et quelques mammifères seraient capables ? La seule étude du minuscule insecte *Anaphes victus* n'apportera pas toutes les réponses !

Joan VAN BAAREN est maître de conférences dans l'unité CNRS UMR 6552, à l'Université de Rennes I, où Jean-Pierre NÉNON dirige le Laboratoire de bioécologie des parasitoïdes. Ces recherches ont été réalisées dans le Laboratoire d'écophysiologie des parasitoïdes, Agriculture et Agroalimentaire Canada, dirigé par Guy BOIVIN, à Saint-Jean-sur-Richelieu, au Québec.

Insect Learning : Ecological and Evolutionary Perspectives, sous la direction de D.R. Papaj et A.C. Lewis, éditions Chapman and Hall, 1993.

J. VAN BAAREN, G. BOIVIN et J.-P. NÉNON, *Learning Affects how Anaphes n. sp. Discriminates, Insects Parasitoids*, in *Norw. J. Agric. Sci. Suppl.*, vol. 16, pp. 392-393, 1994.

J. VAN BAAREN, G. BOIVIN et J.-P. NÉNON, *Intra- and Interspecific Host Discrimination in two Closely Related Egg Parasitoids*, in *Oecologia*, pp. 325-330, 1994.

SOHO révèle les secrets du Soleil

KENNETH LANG

L'Observatoire solaire et héliosphérique SOHO est un nouvel engin spatial qui étudie le Soleil sans relâche depuis février 1996. Ses observations révèlent la vie secrète de notre étoile.

De loin, le Soleil ne semble pas très compliqué : c'est seulement une sphère de gaz uniforme et lisse. Toutefois, un examen détaillé montre que l'étoile est en constante agitation, ce qui entretient maints mystères fondamentaux. Par exemple, les astrophysiciens ne comprennent pas comment le Soleil engendre son champ magnétique, principal responsable de l'activité solaire et, notamment, des éruptions imprévisibles qui provoquent des orages magnétiques et des pannes d'électricité sur la Terre. Ils ignorent également pourquoi ce magnétisme se concentre dans les taches solaires, ces zones sombres aussi grandes que la Terre et des milliers de fois plus aimantées. De surcroît, les astrophysiciens n'expliquent pas les variations de l'activité solaire, avec une période de onze ans environ.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du Soleil et mieux prédire son impact sur notre planète, l'Agence spatiale européenne et la NASA ont lancé, le 2 décembre 1995, une sonde de deux tonnes nommée SOHO, acronyme anglais d'observatoire solaire et héliosphérique. Le 14 février 1996, le satellite a atteint une position stable par rapport au Soleil : le point de Lagrange interne, situé à environ un pour cent de la distance Terre-Soleil. En ce point, les attractions que la Terre et le Soleil exercent sur la sonde se compensent, et SOHO tourne autour du Soleil en même temps que la Terre. Alors que le Soleil était périodiquement caché à la vue des satellites précédents, qui étaient en orbite autour

de la Terre, SOHO observe le Soleil en permanence avec ses douze instruments sensibles. Chaque jour, les instruments transmettent, via les antennes du réseau spatial de la NASA, des milliers d'images au Centre opérationnel SOHO, dans le Maryland.

Là, des astrophysiciens du monde entier travaillent ensemble, observant le Soleil nuit et jour dans une pièce sans fenêtres. Lorsque les premières images arrivèrent, le Soleil était dans la phase la plus calme de son cycle de onze ans. Comme SOHO contient suffisamment de carburant pour demeurer en opération pendant encore une dizaine d'années au moins, il suivra l'évolution de l'activité solaire durant un cycle complet, jusqu'au prochain maximum solaire, qui se produira à la fin du siècle. Déjà, SOHO nous a gratifiés de découvertes surprenantes.

Les profondeurs du Soleil

Afin de comprendre les cycles du Soleil, les astronomes cherchent à en sonder les profondeurs qui engendrent le magnétisme. Comment accéder à ces régions invisibles ? En étudiant les vibrations du Soleil. À la manière d'une gigantesque cloche, le Soleil vibre. Les astronomes étudient ses vibrations en observant les mouvements de sa surface visible, la photosphère. Ces oscillations, dont l'amplitude atteint des dizaines de kilomètres et la vitesse quelques centaines de mètres par seconde, sont associées à des ondes sonores qui se propagent à l'intérieur de l'astre. Ces ondes sont piégées dans le Soleil,

parce qu'elles n'ont pas, dans le vide quasi absolu de l'espace, de support de propagation. Lorsqu'elles se réfléchissent contre la surface et replongent dans le Soleil, elles perturbent les gaz (ionisés, les gaz chauds du Soleil forment un plasma), les soulevant et les abaissant lentement avec une période d'environ cinq minutes.

L'œil ne perçoit pas les vibrations engendrées, mais les détecteurs de SOHO y sont sensibles. La caméra Doppler-Michelson (MDI) et l'enregistreur d'oscillations globales de basses fréquences (GOLF) mesurent la vitesse des oscillations superficielles avec une précision supérieure à un millimètre par seconde. Un troisième instrument surveille un autre effet des ondes sonores : lorsque ces ondes interagissent avec le gaz des régions solaires émettrices de lumière, l'astre tout entier clignote comme un stroboscope géant. À bord de SOHO, le système VIRGO (variabilité de la luminosité solaire et oscillations gravitationnelles) enregistre ces variations d'intensité qui ne représentent que des fractions de l'éclat moyen du Soleil.

Les oscillations de surface résultent de l'effet combiné d'environ dix millions d'ondes sonores, qui se propagent chacune selon un chemin particulier unique. Ainsi, pour caractériser physiquement toute l'étoile – de la zone convective bouillonnante, qui s'étend sur 28,7 pour cent du rayon à partir de la surface, jusqu'au cœur, en passant par la zone radiative – les astronomes cherchent à déterminer avec précision la fréquence de toutes les ondes (voir la figure 2).

La vitesse de chaque onde sonore dépend de la température et de la composition des régions solaires qu'elle traverse. Les scientifiques de la mission SOHO prédisent la vitesse du son à l'aide d'un modèle numérique. Ils utilisent les petites différences entre la vitesse du son calculée et celle qui est mesurée pour affiner le modèle et établir la variation radiale de température, de densité et de composition du Soleil.

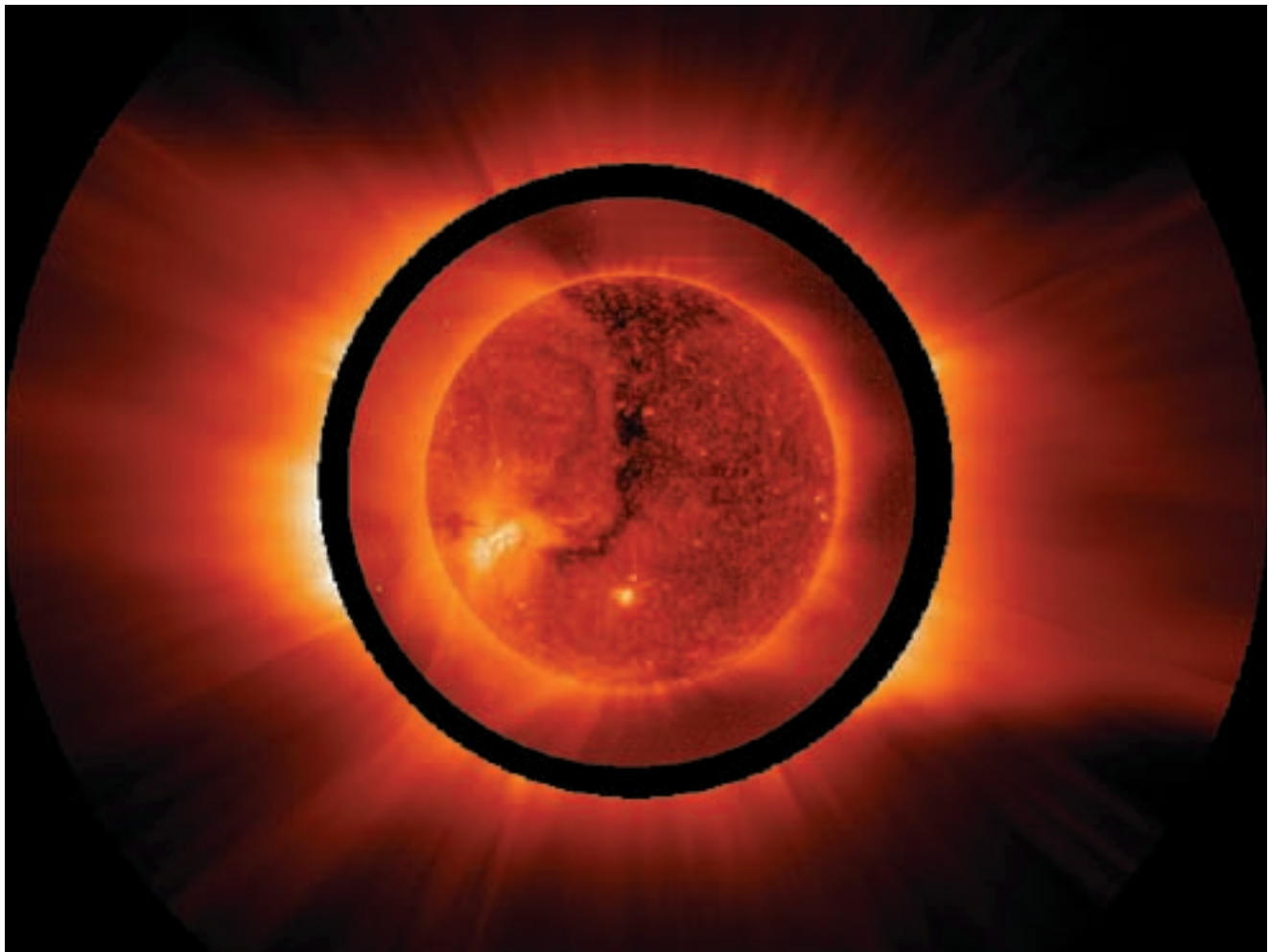
Après plus d'un an de fonctionnement, GOLF est l'instrument le plus performant pour sonder le cœur du Soleil, siège des réactions nucléaires. Il a déjà détecté plus de 100 types d'ondes acoustiques pénétrant dans les 20 pour cent les plus centraux du Soleil. À l'aide de ces mesures, on déduit la vitesse du son dans la partie centrale avec une précision relative meilleure que un pour dix mille, et on pourra ainsi calculer les profils de densité et de rotation dans le cœur nucléaire.

Avec le télescope MDI, les différences entre les prévisions théoriques et les observations sont inférieures à 0,2 pour cent, mais les zones où l'on observe ces différences sont importantes : à la frontière du cœur producteur d'énergie et sous la zone convective. Dans ces zones, un mélange de matière expliquerait les différences.

Depuis plus de trois siècles, l'observation des taches solaires montre aux astronomes que la photosphère tourne plus vite à l'équateur, la vitesse décroissant régulièrement vers chaque pôle. Les données de SOHO montrent que cette répartition des vitesses de rotation persiste dans la zone convective. En revanche, la vitesse de rotation est identique pour tous les points situés à moins d'un tiers du rayon. La vitesse de rotation change donc brusquement à la base de la zone convective. Là, les zones périphériques de l'intérieur radiatif,

qui tournent à une vitesse constante, rencontrent la zone convective, qui tourne plus vite à l'équateur. Le cisaillement à l'interface serait la source du magnétisme solaire.

Le télescope MDI a également sondé les couches externes du Soleil. Affranchi des perturbations atmosphériques qui gênent les télescopes terrestres, ce télescope suit en direct des détails invisibles du sol. Il s'est révélé particulièrement efficace en héliosismologie spatio-temporelle, une technique de mesure des mouvements gazeux dans les couches situées juste au-dessous de la photosphère. La méthode est simple : avec le télescope, chaque minute, on mesure les faibles variations périodiques de la longueur d'onde de la lumière émise en des millions de points du Soleil, dus au décalage Doppler (la longueur d'onde du rayonnement émis par une source augmente ou diminue, respective-



SOHO est un Consortium et Soho UIC Consortium

1. DEUX INSTRUMENTS DU SATELLITE SOHO ont enregistré les données à partir desquelles on a créé cette image de l'atmosphère externe du Soleil, de la base de la couronne jusqu'à des millions de kilomètres au-dessus de la surface solaire. À l'extérieur de l'anneau

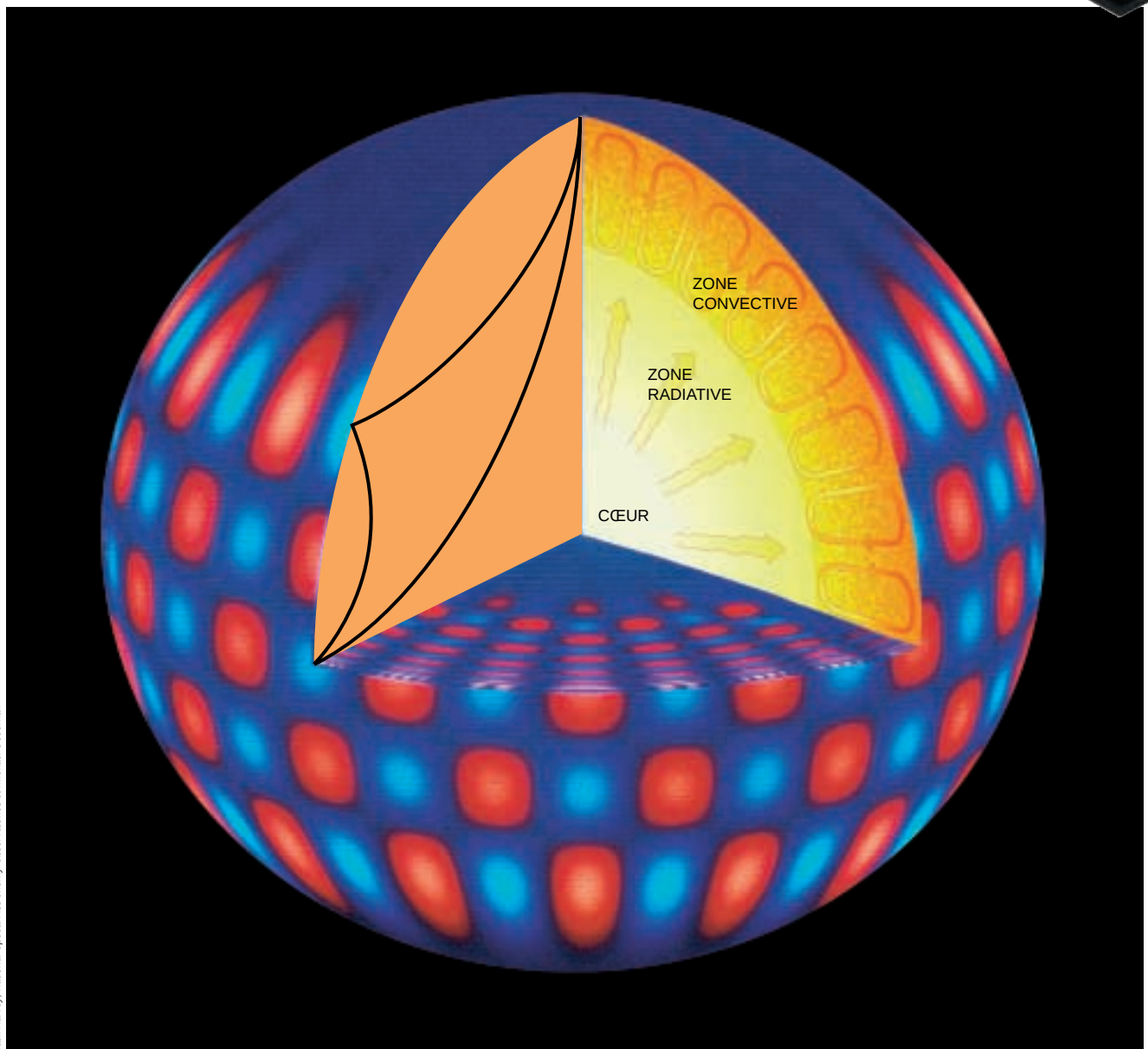
noir, le vent solaire est visible grâce aux ultraviolets émis par les ions oxygène. Le vent solaire est plus rapide quand il provient des trous coronaux qui apparaissent comme des régions sombres au pôle Nord (*en haut*) et au centre du disque solaire.

ment, selon que la source s'éloigne ou se rapproche de l'observateur). En comparant les répartitions successives de variation, on détecte la propagation des ondes sonores et l'on détermine leur vitesse à travers les couches externes du Soleil. Ce temps de propagation renseigne sur la température et l'écoulement de gaz le long d'un chemin interne reliant deux points de la surface visible du Soleil, car les ondes sonores se propagent d'autant plus vite que la température locale est élevée ; en outre, elles sont plus rapides quand elles se propagent dans la même direction que leur milieu de propagation.

Après avoir observé des myriades de points à la surface du Soleil, le télescope MDI a fourni des temps de propagation pour des sons parcourant des milliers de chemins. Les scientifiques de SOHO ont alors utilisé ces données pour déterminer la structure tridimensionnelle et la dynamique interne du Soleil : à l'aide de programmes analogues à ceux des tomodigraphes médicaux, des superordinateurs ont calculé pendant une semaine pour produire les premières cartes montrant les vitesses de convection au sein d'une étoile. Les écoulements ne sont pas des mouvements d'ensemble, telles les rotations déjà

évoquées, mais plutôt de petits déplacements qui semblent indépendants. Même ainsi, leur vitesse atteint un kilomètre par seconde, supérieure à celle d'un avion supersonique.

Pour déterminer les écoulements dans la zone convective, l'équipe du MDI a calculé les temps de propagation pour des ondes parcourant une distance d'environ 8 000 kilomètres dans le Soleil. Comme prévu, cette région tumultueuse ressemble à une casserole d'eau bouillante : la matière chaude s'élève, et les gaz



Jack Harvey, National Optical Astronomy Observatories et Michael Goodman

2. LES ONDES SONORES, représentées ici par des lignes noires dans la section découpée, résonnent à travers le Soleil. Elles sont produites par les turbulences du gaz chaud à la surface de la zone convective, qui surmonte la zone radiative et le cœur du Soleil. Lorsque les ondes

traversent le centre de l'étoile, elles accélèrent et sont réfractées vers l'extérieur. La surface du Soleil, elle, réfléchit les ondes vers l'intérieur. Finalement, l'étoile entière palpite, certaines régions se creusant (*taches rouges*), tandis que d'autres se bombent (*taches bleues*).



Les instruments de SOHO

Des centaines d'astrophysiciens de toutes nationalités étudient le Soleil à l'aide de 12 instruments embarqués sur SOHO. Trois dispositifs sondent l'intérieur du Soleil, six mesurent l'atmosphère solaire, et trois examinent le vent solaire.

plus froids s'enfoncent ; toutefois, de nombreux écoulements sont étonnamment peu profonds. Les astronomes ont également étudié les déplacements horizontaux à une profondeur d'environ 1 400 kilomètres et ils ont superposé les cartes de ces déplacements aux cartes du champ magnétique également obtenues par l'instrument MDI. Ils ont trouvé que le champ magnétique est particulièrement intense dans les régions où convergent les écoulements de gaz, sous la surface. Ainsi, le gaz bouillonnant rassemble probablement les lignes de champ magnétique et les concentre, surmontant la pression magnétique antagoniste qui devrait disperser ces concentrations locales.

SOHO révèle également la structure de l'atmosphère externe du Soleil et, en particulier, de la couronne. La bordure nette du disque solaire est illusoire : elle n'indique que le rayon au-delà duquel le gaz solaire devient transparent. La couronne, invisible, s'étend jusqu'aux planètes et présente l'un des paradoxes les plus intrigants de la physique solaire : bien que la température de la photosphère ne soit égale qu'à 5 500 °C, la partie de la couronne qui est au-dessus est à une température supérieure à un million de degrés. Comme la chaleur ne peut migrer d'une région froide vers une région plus chaude (le deuxième principe de la thermodynamique serait violé, ainsi que le bon sens), un mécanisme inconnu doit transporter de l'énergie de la photosphère, ou d'une région inférieure, jusqu'à la couronne. Quelle forme d'énergie ? L'énergie cinétique et l'énergie magnétique peuvent passer d'une zone froide à une zone chaude : des volutes de gaz et des mouvements du champ magnétique pourraient transporter cette énergie.

Pour étudier la couronne et identifier son mystérieux mécanisme de chauffage, les physiciens observent

INSTRUMENT	EXPÉRIENCE	RESPONSABLE PRINCIPAL
GOLF	Le dispositif pour la mesure des oscillations globales de basses fréquences mesure la vitesse des oscillations globales au sein du Soleil	Alan Gabriel, Institut d'astrophysique spatiale, France
VIRGO	L'instrument pour l'étude de la variabilité de la luminosité solaire et des oscillations de gravité mesure les fluctuations de l'éclat du Soleil, ainsi que la quantité d'énergie émise	Claus Fröhlich, Observatoire physico-météorologique de Davos et Centre mondial du rayonnement, Suisse
SOI/MDI	La caméra Doppler-Michelson pour l'étude des oscillations mesure la vitesse des oscillations produites par les sons piégés dans le Soleil	Philip Scherrer, Université Stanford, États-Unis
SUMER	L'instrument de mesure du rayonnement ultraviolet émis par le Soleil fournit des données sur la température, la densité et la vitesse de divers gaz dans la chromosphère et la couronne	Klaus Wilhelm, Institut d'aéronomie Max Planck, Allemagne
CDS	Le spectromètre de diagnostic coronal mesure la température et la densité des gaz dans la couronne	Richard Harrison, Laboratoire Rutherford Appleton, Royaume-Uni
EIT	Le télescope à imagerie en ultraviolet lointain donne des images du disque complet de la chromosphère et de la couronne	Jean-Pierre Delaboudinière, Institut d'astrophysique spatiale, France
UVCS	Le spectromètre à coronographe ultraviolet mesure la température et la vitesse des atomes d'hydrogène, d'oxygène et d'autres ions dans la couronne	John Kohl, Observatoire d'astrophysique Smithsonian, États-Unis
LASCO	Le coronographe spectroscopique à grande ouverture fournit des images qui révèlent l'activité, la masse, la quantité de mouvement et l'énergie de la couronne	Guenter Brueckner, Laboratoire de recherches de la marine, États-Unis
SWAN	Grâce à l'expérience de mesure des anisotropies du vent solaire, on étudie les variations spatiale et temporelle du vent solaire	Jean-Loup Bertaux, Service d'aéronomie du CNRS, France
CELIAS	Le système d'analyse des charges, éléments et isotopes quantifie la masse, la charge, la composition et la distribution d'énergie des particules du vent solaire	Peter Bochsler, Université de Berne, Suisse
COSTEP	L'analyseur de particules suprathermiques et énergiques détermine la répartition d'énergie des protons, des ions hélium et des électrons	Horst Kunow, Université de Kiel, Allemagne
ERNE	L'expérience «noyaux et électrons de haute énergie et relativistes» mesure la répartition d'énergie et la composition isotopique des protons, d'autres ions et des électrons	Jarmo Torsti, Université de Turku, Finlande

les rayonnements ultraviolets et X, car la matière chaude, comme celle de la couronne, émet la plus grande partie de son énergie à ces longueurs d'onde. Comme la photosphère est trop froide

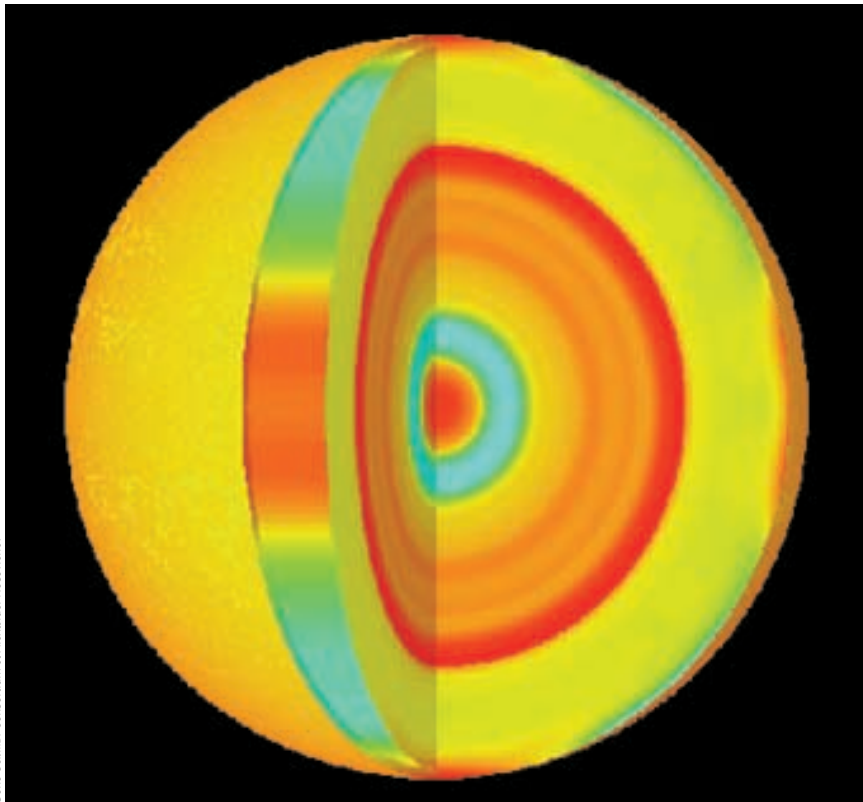
pour rayonner intensément à ces longueurs d'onde, elle forme un fond sombre sous la lumière du gaz chaud. De la Terre, les rayonnements de la couronne sont invisibles parce qu'ils

sont absorbés par l'atmosphère terrestre. SOHO, lui, mesure le rayonnement ultraviolet au moyen de quatre instruments : le télescope à imagerie en ultraviolet lointain (EIT), le détecteur de rayonnements ultraviolets émis par le Soleil (SUMER), le spectromètre de diagnostic coronal (CDS) et le spectromètre à coronographe ultraviolet (UVCS).

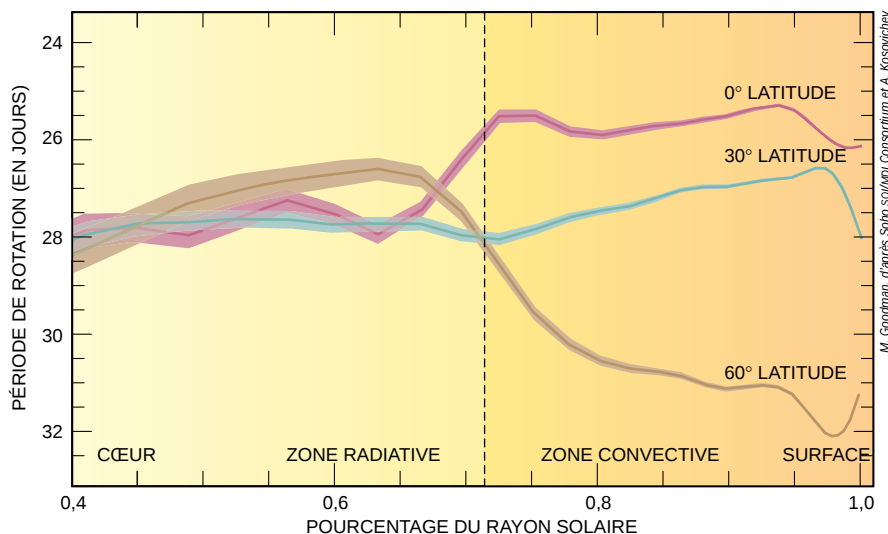
Pour identifier des structures dont la température est comprise entre 6 000 et deux millions de degrés, SOHO se fonde sur les raies spectrales. Ces raies s'obtiennent lorsqu'on sépare les diverses longueurs d'onde des rayonnements détectés. Les instruments de SOHO établissent des cartes de la température en identifiant les raies spectrales émises par les ions qui se sont formés : les atomes plus chauds perdent plus d'électrons par collision, et deviennent ainsi plus ionisés ; les émissions de ces différents ions, à des longueurs d'onde différentes, révèlent ainsi la température du milieu. De surcroît, on calcule la vitesse de la matière qui se déplace dans ces régions en mesurant les décalages Doppler des longueurs d'onde.

Le rayonnement ultraviolet montre que le Soleil est un corps turbulent, même au minimum d'activité du cycle de onze ans, ce qui expliquerait pourquoi la couronne est si chaude. Cette idée est apparue quand on a observé que le rayonnement ultraviolet du Soleil semblait provenir de petites régions brillantes localisées. SOHO a mesuré que ces points chauds présents en permanence se forment à une température de un million de degrés et semblent associés à de petites boucles magnétiques de gaz chaud que l'on trouve partout sur le Soleil, y compris aux pôles Nord et Sud. Certaines de ces boucles explosent, éjectant de la matière à des vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Les astrophysiciens de l'équipe SOHO étudient maintenant le rôle que jouent ces points brillants dans le mécanisme de chauffage coronal.

Afin d'étudier les variations qui se produisent dans la partie supérieure de l'atmosphère du Soleil, on utilise l'UVCS et le coronographe spectroscopique à grande ouverture (LASCO). Les deux instruments contiennent des disques qui occultent l'éclat de la photosphère solaire. LASCO détecte la lumière solaire visible



3. À PARTIR DES VITESSES DU SON, dans le Soleil, on détermine la densité et la température qui règnent dans différentes parties de notre étoile. Les zones rouges correspondent à des vitesses du son supérieures à celles d'un modèle solaire de référence (*en jaune*). Inversement, les zones bleues dénotent des vitesses du son inférieures. La brusque diminution de la vitesse du son à la frontière du cœur du Soleil résulterait d'instabilités qui y mélangent la matière, mais dont on ignore l'origine. Dans la zone convective, les vitesses de rotation observées diffèrent de la théorie selon la latitude (*tranche colorée vue de face*).



4. LA VITESSE DE ROTATION INTERNE du Soleil à 0, à 30 et à 60 degrés de latitude a été déterminé à l'aide de la caméra Doppler-Michelson (MDI). À la base de la zone convective, les régions polaires tournent plus lentement que les régions équatoriales. En dessous, la rotation semble plus uniforme, bien que les astrophysiciens n'aient pas encore déterminé les vitesses de rotation dans le cœur même du Soleil.

diffusée par les électrons de la couronne. Ses premières observations, durant la période de faible activité solaire, avaient révélé une couronne simple, symétrique, stable, avec des trous prononcés au Nord et au Sud. Ces trous coronaux sont des régions étendues, peu denses et froides, qui émettent très peu d'ultraviolets lointains et peu de rayons X.

En revanche, de minces jets de matière étaient éjectés des régions équatoriales. Le champ magnétique du Soleil façonne ces jets. À leur base, la matière chargée est fortement concentrée dans des boucles magnétiques enracinées dans la photosphère. Plus haut dans la couronne, les jets s'amincissent et s'étendent dans l'espace sur des dizaines de millions de kilomètres : la matière y est confinée à des températures d'environ deux millions de degrés, à l'intérieur de frontières magnétiques allongées, créant une nappe de gaz chaud qui entoure le Soleil.

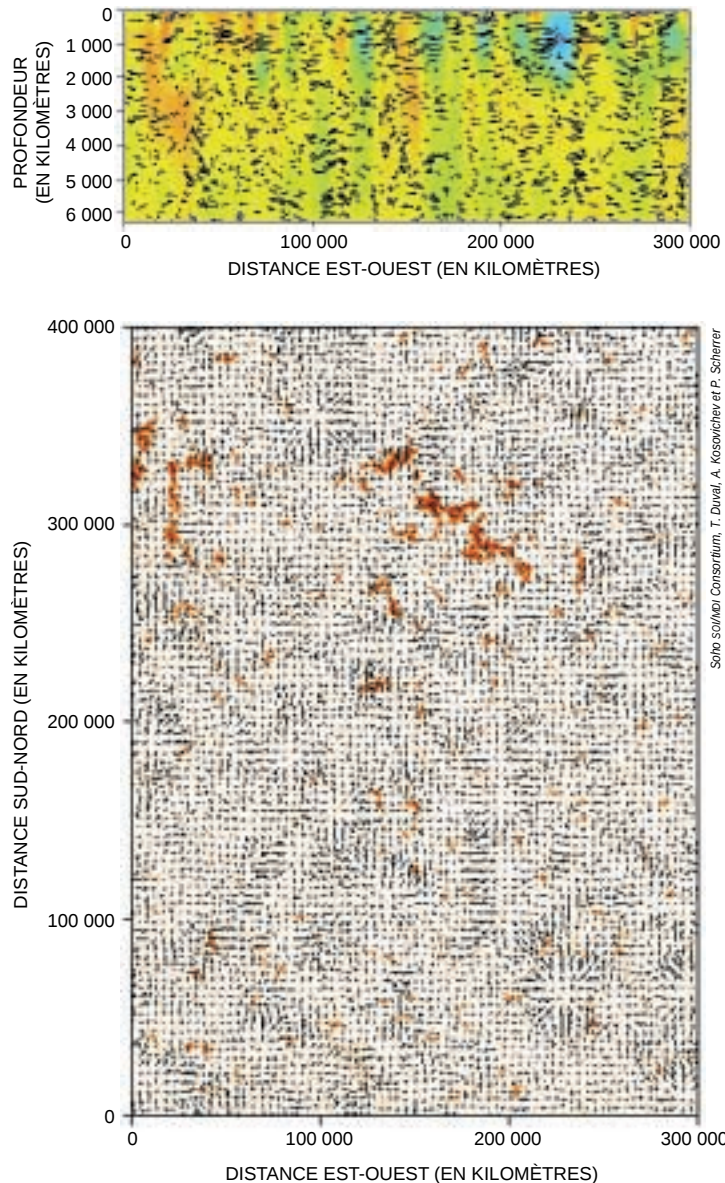
Dans les jets, la matière semble s'échapper continuellement le long des champs magnétiques ouverts. Parfois, les coronographes enregistrent des concentrations denses de matière qui se superposent aux jets, comme si des feuilles flottaient à la surface d'un cours d'eau. D'autres fois, de gigantesques éruptions coronales perturbent l'écoulement. Ces éruptions projettent des milliards de tonnes de gaz brûlant dans l'espace interplanétaire à des vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Cette matière atteint souvent la Terre en deux ou trois jours.

Grâce à LASCO, on a découvert que des éruptions équatoriales étaient émises de deux régions opposées du Soleil, à intervalles de quelques heures.

De la matière est-elle simultanément éjectée tout autour du Soleil ou bien seulement dans ces deux directions? Les coronographes n'ont, hélas, qu'une vision latérale du Soleil et ne peuvent ainsi voir la matière qui s'éloigne ou s'approche de la Terre.

En se fondant sur les observations, nous pensons tout de même que ces éjections sont des perturbations globales qui s'étendent tout autour du Soleil. De vastes régions du Soleil semblent agitées de convulsions lors

des éruptions coronales, du moins lors du minimum du cycle d'activité de onze ans. De plus, quelques jours avant les éruptions, le coronographe a détecté un sursaut de luminosité de la nappe, ce qui indique qu'il s'y accumule de la matière. La pression de cette matière supplémentaire croît probablement jusqu'à ce que la nappe s'ouvre sous la forme d'une éruption. Ce mécanisme est probablement lié à une réorganisation globale du champ magnétique solaire.

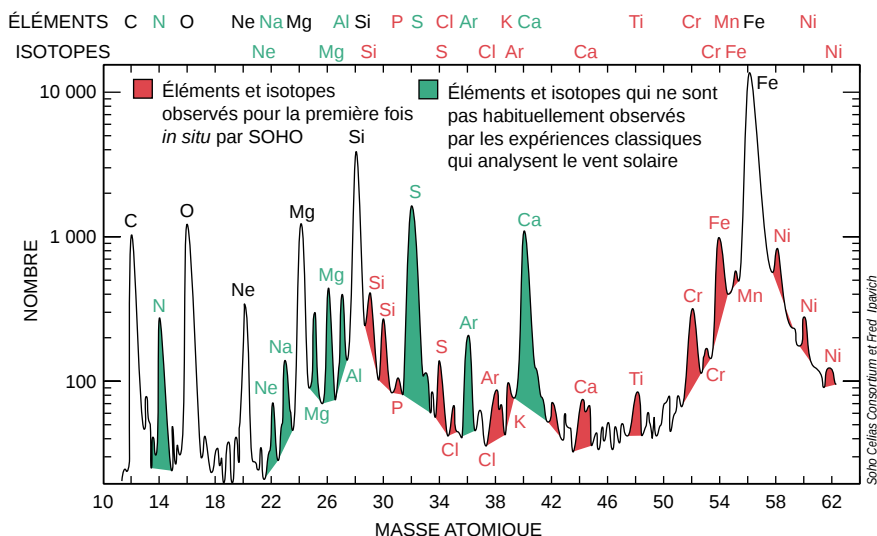


5. LA MATIÈRE s'écoule à la fois verticalement et horizontalement dans le Soleil. Ses mouvements et sa température peuvent être visualisés à l'aide de la caméra Doppler-Michelson (MDI), à bord de SOHO. La coupe verticale (en haut) montre des variations d'écoulement et de température dans une zone de 8 000 kilomètres sous la surface du Soleil. Les dégradés de couleur indiquent une variation de température du froid (en bleu) au chaud (en rouge). On a mesuré (en bas), à une profondeur de 1 400 kilomètres, la température et on l'a comparée aux champs magnétiques de surface (taches marrons). Dans les deux cas, les petits segments noirs indiquent la direction et les vitesses relatives de la matière, qui atteignent une vitesse maximale de un kilomètre par seconde.

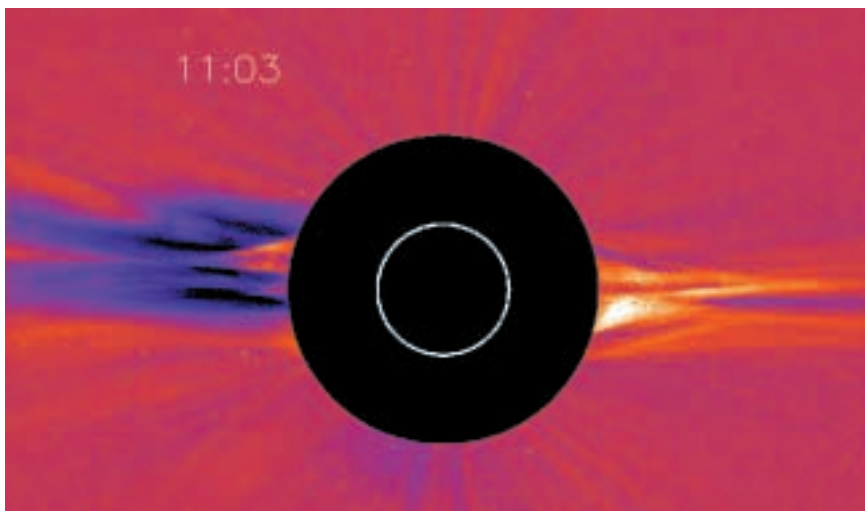
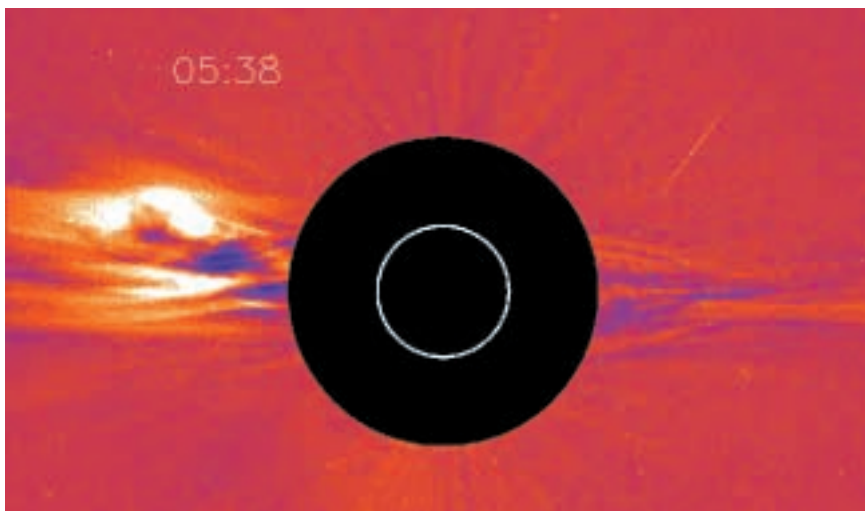
Vents solaires et au-delà

L'atmosphère chaude et agitée du Soleil s'étend dans toutes les directions, emplissant en permanence le Système solaire de vent solaire, composé d'électrons et d'ions, dont le déplacement s'accompagne d'un champ magnétique. Dans la couronne, l'énergie d'agitation thermique, qui s'accompagne d'une tendance à la dispersion de la matière, est supérieure à l'énergie potentielle gravitationnelle due au Soleil, ce qui permet l'éjection de matière. Ce vent est en permanence alimenté par du gaz qui provient de zones situées sous la couronne. Des mesures effectuées par diverses sondes spatiales antérieures ont montré que le vent est composé de particules rapides et de particules lentes. Les particules rapides se déplacent à environ 800 kilomètres par seconde, tandis que les particules lentes n'ont que la moitié de cette vitesse.

On ignore d'où part la composante lente et pourquoi la composante rapide est plus rapide, mais SOHO devrait fournir des réponses : la composante lente est associée à des régions équatoriales du Soleil, aujourd'hui observées par LASCO et UVCS. La



6. LE VENT SOLAIRE contient de nombreux éléments chimiques. Les instruments de SOHO ont maintenant identifié le soufre, l'argon et le calcium, en plus d'éléments voisins tels que le silicium et le fer. De même, l'azote, le carbone et l'oxygène sont tous facilement identifiés. SOHO détecte également des éléments peu abondants, dont le phosphore, le chlore, le potassium, le titane, le chrome, le manganèse et le nickel.



7. DES ÉJECTIONS CORONALES DE MASSE (en blanc) se produisant sur les côtés Est et Ouest du Soleil furent enregistrées à quelques heures d'intervalle, le même jour, par l'un des coronographes de SOHO. Le disque noir occulte l'éclat du Soleil, dont le bord est représenté par le cercle blanc.

composante rapide jaillit des trous coronaux polaires, car, dans ces régions, l'absence de champ magnétique permet aux particules chargées d'échapper à l'emprise gravitationnelle et magnétique du Soleil. On examine également si les panaches solaires (de grandes structures enracinées dans la photosphère qui s'étendent dans les trous coronaux) contribuent à la génération du vent solaire lent.

Les trous coronaux

L'instrument UVCS a analysé l'émission spectrale de l'hydrogène et de l'oxygène fortement ionisé dans les régions où la couronne est chauffée et où le vent solaire accélère : la vitesse d'agitation des ions hydrogène diffère notablement de celle des ions oxygène. Dans les trous coronaux polaires, où naît le vent solaire rapide, l'oxygène possède environ 60 fois plus d'énergie cinétique ; à plus de deux rayons solaires du centre du Soleil, l'oxygène possède sa vitesse d'agitation maximale, approchant 500 kilomètres par seconde. En revanche, l'hydrogène ne s'y meut qu'à environ 250 kilomètres par seconde. À l'inverse, dans les régions équatoriales, où naît le vent solaire lent, l'hydrogène se déplace plus vite que l'oxygène, conformément à ce que l'on prévoit pour un vent d'origine thermique.

Les astronomes tentent aujourd'hui de déterminer pourquoi les ions oxygène, plus massifs, se meuvent plus rapidement dans les trous coronaux. L'origine des mécanismes de chauffage et d'accélération est probablement dans les trous coronaux, où la densité est faible et où les ions et les électrons entrent rarement en collision. Des collisions fréquentes dans les écoulements plus denses pourraient, au contraire, effacer toute signature des phénomènes.

Un autre instrument embarqué à bord de SOHO, SWAN, étudie les atomes d'hydrogène interstellaire qui traversent notre Système solaire. Le rayonnement ultraviolet solaire éclaire cet hydrogène, tout comme un réverbère éclaire le brouillard, dans la nuit, mais les particules du vent solaire ionisent les atomes d'hydrogène : là où le vent solaire traverse le nuage d'hydrogène interstellaire, il crée une zone d'atomes ionisés qui n'absorbent plus les ultraviolets et restent sombres. De la sorte,

Les instruments de SOHO sont commandés du Centre opérationnel situé au Centre Goddard de la NASA, près de Washington. Ce centre permet une planification quotidienne des observations et un contact quasi permanent, aussi bien pour la réception des données (50 kilobits par seconde en continu) que pour l'envoi des commandes.

Pour faciliter et accroître la participation des scientifiques européens, l'Institut d'astrophysique

spatiale et le CNRS ont établi, à Orsay, un centre d'opérations, d'analyse et d'archivage des données (MEDOC). Les données d'observations y parviennent en direct du centre américain. Elles sont alors traitées et mises à la disposition des utilisateurs. Il est également possible d'y programmer des observations. Enfin, le MEDOC assure à Orsay, bientôt à Toulouse, l'archivage des données au titre de Centre d'archivage européen de SOHO.

SWAN détecte la structure du vent solaire : il a montré que le vent solaire est plus intense dans le plan équatorial du Soleil qu'au-dessus des pôles Nord et Sud.

Sur la Terre

Alors que l'économie mondiale se fonde progressivement sur des satellites en orbite autour de la Terre, elle devient plus vulnérable aux influences magnétiques solaires. Outre les tempêtes magnétiques, des éruptions coronales massives déclenchent des aurores polaires qui peuvent endommager les satellites. D'autres éruptions intenses, nommées éruptions solaires, expulsent des particules de haute énergie qui peuvent mettre en danger les astronautes et détruire l'électronique des satellites. Si nous connaissions des événements précurseurs de ces éruptions, SOHO serait un système de veille idéal.

Stationné juste devant la Terre, le satellite peut repérer les particules menaçantes avant qu'elles ne nous atteignent : son système CELIAS (pour «système d'analyse de charges, éléments, et isotopes») mesure la quantité relative d'éléments et d'isotopes rares qui n'étaient pas observés auparavant. La comparaison de ces quantités nous renseigne sur les conditions

physiques de l'atmosphère solaire, d'où provient le vent solaire. Deux autres instruments, l'analyseur COSTEP (particules suprathermiques et énergiques) et l'instrument ERNE (noyaux et électrons énergiques et relativistes), ont déjà mesuré directement les flux d'électrons, de protons et de noyaux d'hélium très énergiques approchant la Terre. L'origine de ces particules a été établie : elles proviennent d'éruptions solaires violentes détectées par l'instrument EIT. De tels événements deviendront sans doute plus nombreux lorsque l'activité solaire augmentera. SOHO suivra alors ces éruptions dès leur commencement, sous la surface visible du Soleil, jusqu'à la Terre et au reste du Système solaire.

En attendant, certains de ses instruments explorent d'autres phénomènes mystérieux. Les systèmes GOLF et VIRGO, par exemple, auront bientôt observé les oscillations solaires suffisamment longtemps, et suffisamment en profondeur, pour déterminer la température et la rotation au centre du Soleil. De surcroît, quand l'agitation interne et l'activité magnétique de notre étoile s'accroîtront, au cours des prochaines années, SOHO devrait déterminer comment naissent les éruptions menaçantes et le vent chaud et prévoir peut-être les conditions qui règnent dans l'atmosphère du Soleil.

Kenneth LANG est professeur d'astrophysique à l'Université Tufts.

Kenneth LANG, *Le Soleil et ses relations avec la Terre*, Springer-Verlag, 1997.

The SOHO Mission, sous la direction de Bernhard Fleck, Vicente Domingo et Arthur I. Poland, numéro spécial de *Solar Physics*, vol. 162, n° 1-2, 1995.

Elizabeth NESME-RIBES, Sallie L. BALIU-

NAS et Dmitry SOKOLOFF, *La dynamo stellaire*, in *Pour la Science*, octobre 1996.

Kenneth R. LANG, *Unsolved Mysteries of the Sun, Parts 1-2*, in *Sky and Telescope*, vol. 92, n° 2, pp. 38-42, août 1996 et vol. 92, n° 3, pp. 24-28, septembre 1996.

De nombreux liens vers le MEDOC et vers divers sites sur SOHO sont accessibles de notre site Web :

<http://www.pourlascience.com>

Les ordinateurs configurables

JOHN VILLASENOR • WILLIAM MANGIONE-SMITH

L'industrie de la microélectronique met au point des ordinateurs qui modifient la configuration de leurs circuits durant leur fonctionnement. Ils excellent dans la reconnaissance de formes, le traitement d'images et le chiffrement des informations.

La conception d'un ordinateur est toujours un compromis entre rapidité et polyvalence : les puces généralistes exécutent relativement lentement des tâches variées, tandis que les circuits spécialisés font très rapidement des calculs particuliers. Les microprocesseurs des ordinateurs personnels, tels le *PowerPC* de la Société *Motorola* ou le *Pentium* de la Société *Intel*, sont généralistes : des programmes binaires (0 ou 1) leur font exécuter n'importe quelle opération logique, et ils servent aussi bien au traitement de texte qu'aux jeux.

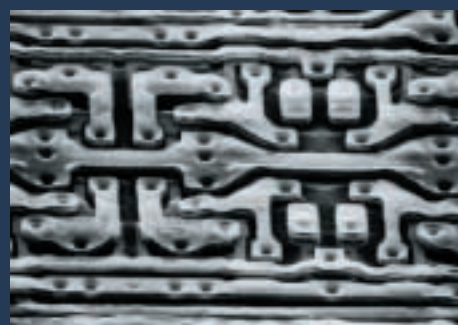
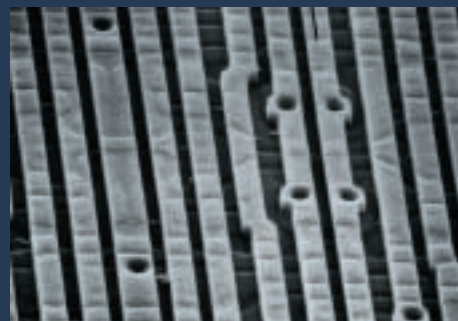
En revanche, les circuits spécialisés nommés ASIC (l'acronyme anglais d'*Application-Specific Integrated Circuit*, soit «circuit intégré spécifique») ne sont conçus que pour une tâche précise. Plus petits, plus rapides et moins onéreux que les processeurs généralistes, ils consomment en outre moins d'énergie. Un coprocesseur graphique conçu sur mesure pour un ordinateur personnel, par exemple, peut tracer des traits ou colorier des images à l'écran 10 à 100 fois plus vite qu'une unité centrale généraliste.

Lors de la création d'un ordinateur, le coût détermine souvent le choix du type de puces employées. Un circuit spécialisé bien conçu résoudra le problème pour lequel il a été construit, mais probablement pas un problème légèrement différent. En outre, si l'on crée ultérieurement un circuit modifié pour résoudre le nouveau problème, on l'intègre diffici-

lement au reste de l'ordinateur initial. Ainsi, l'effort de recherche investi dans la création d'un processeur spécialisé doit être amorti avec un petit nombre d'unités.

Aujourd'hui, une nouvelle sorte de puces allie la souplesse des puces généralistes et la puissance des circuits spécialisés : les circuits logiques configurables, ou FPGA, l'acronyme anglais de *Field-Programmable Gate Array*. Grands et rapides, ces circuits intégrés peuvent être modifiés au cours de leur utilisation. Ils sont composés de blocs logiques configurables qui effectuent les opérations fondamentales des portes logiques. Les portes logiques sont des opérateurs à plusieurs entrées et à une sortie. Ce sont elles qui exécutent les opérations binaires de base telles que ET, NON-ET, OU, NON-OU et OU EXCLUSIF. Dans la plupart des matériels informatiques utilisés aujourd'hui, les fonctions logiques des portes sont précâblées sur les circuits et ne peuvent être modifiées. En revanche, dans les circuits configurables, des signaux envoyés au circuit modifient les fonctions logiques exécutées dans les blocs logiques ainsi que les connexions entre ces blocs. Ces blocs ont la même structure que ceux qui composent les circuits spécialisés, mais on peut les connecter à volonté, lors de la programmation.

Les premiers circuits configurables ne convenaient qu'aux ingénieurs qui devaient tester rapidement plusieurs



1. CE CIRCUIT INTÉGRÉ (à droite) comporte des circuits qui peuvent se modifier en cours de fonctionnement. Les micrographies à