

Sous la direction de
JEAN AUDOUZE

Le ciel
à découvert

CNRS EDITIONS

Présentation de l'éditeur



Un tour d'horizon de l'astrophysique contemporaine. Une synthèse fondamentale, sans précédent, ouverte à tous. Les plus récentes découvertes présentées par les meilleurs spécialistes.

Le Soleil et l'ensemble du système planétaire. Les étoiles et le milieu interstellaire. Les galaxies et les grandes structures de l'Univers. La cosmologie... Où en est l'astronomie, aujourd'hui ? Quelles révolutions a-t-elle traversées ? Qu'en est-il de la Terre ? De la vie, ailleurs, dans l'Univers ? De la recherche d'exoplanètes ? Des moyens les plus récents et les moins conventionnels d'observer le ciel ? Qu'en sera-t-il, demain, des savants, de leurs laboratoires, de leurs instruments, de leurs méthodes, de leurs découvertes ?

Voici, enfin, un panorama complet et inédit sur la façon dont les astrophysiciens voient et comprennent ce Monde qui est le nôtre.

Un ouvrage accessible, à l'issue de l'Année mondiale de l'Astronomie, illustrant l'excellence de la recherche française, auquel ont collaboré les meilleurs spécialistes issus de l'Institut des Sciences de l'Univers du CNRS, des observatoires de Paris et de Nice, du CEA et des Universités Paris 6, 7 et 11, à savoir :

*Monique Arnaud,
Didier Barret,
Jean-Loup Bertaux,
Jean-Pierre Bibring,
Roger-Maurice
Bonnet,
François R. Bouchet,
François Boulanger,
André Brack,*

*André Brahic,
Michel Cassé,
Stéphane Charlot,
Suzy Collin-Zahn,
Françoise Combes,
Aurélien Crida,
Frédéric Daigne,
Anne Decourchelle,
Eric Fossat,*

*Martin Giard,
Jean Kovalevsky,
Martin Lemoine,
Anny-Chantal
Levasseur-Regourd,
Yannick Mellier,
Robert Mochkovitch,
Alessandro
Morbidelli,*

*Étienne Parizot,
Jacques Paul,
Alain Riazuelo,
Jean-Philippe Uzan,
Elisabeth Vangioni,
Jean-Claude Vial,
Alfred Vidal
Madjar,
Laurent Vigroux,
Jean-Paul Zahn.*

Sous la direction de **Jean Audouze**,
*directeur de recherche émérite à l'Institut d'Astrophysique de Paris du CNRS et à l'Université Pierre
et Marie Curie.*

Le ciel
à découvert

Sous la direction de
JEAN AUDOUZE

Le **Ciel**
à découvrir

CNRS EDITIONS

Sommaire

Avant-propos, <i>Jean Audouze</i>	9
---	---

- Première partie -

LE SOLEIL ET LE SYSTÈME SOLAIRE

1. Le Soleil, une étoile dans notre Galaxie, <i>Jean-Claude Vial</i>	15
2. Disques protoplanétaires et formation planétaire, <i>Aurélien Crida et Alessandro Morbidelli</i>	24
3. Vénus, la planète chaude, <i>Jean-Loup Bertaux</i>	32
4. La planète Mars, <i>Jean-Pierre Bibring</i>	42
5. Les planètes géantes, <i>André Brabic</i>	53
6. Comètes et petits corps du Système solaire, <i>Anny-Chantal Levasseur-Regourd</i>	65

- Deuxième partie -

LES ÉTOILES ET LE MILIEU INTERSTELLAIRE

7. L'évolution des étoiles, <i>Jean-Paul Zahn</i>	77
8. Sismologie solaire et stellaire, <i>Eric Fossat</i>	87
9. Les supernovae, <i>Robert Mochkovitch</i>	96
10. Les sursauts gamma, <i>Frédéric Daigne</i>	104
11. L'espace interstellaire, <i>François Boulanger</i>	114
12. La nucléosynthèse, <i>Jean Audouze</i>	123

- Troisième partie -

LES GALAXIES ET LES GRANDES STRUCTURES DE L'UNIVERS

13. À la découverte de la Galaxie, <i>Jean Kovalevsky</i>	137
14. Les galaxies, <i>Laurent Vigroux</i>	146
15. La formation et l'évolution des galaxies, <i>Stéphane Charlot</i>	157
16. Grandes Structures et Matière Noire, <i>Françoise Combes</i>	167
17. Quasars et Noyaux Actifs de Galaxies, <i>Suzy Collin-Zahn</i>	174
18. Les trous noirs, <i>Alain Riazuelo</i>	183
19. Arcs et lentilles gravitationnelles, <i>Yannick Mellier</i>	191

- Quatrième partie -

L'UNIVERS DANS SON ENSEMBLE

20. Vous avez dit Big Bang ?, <i>Jean-Philippe Uzan</i>	203
21. Au-delà des dimensions sensibles de l'espace, <i>Michel Cassé</i>	214
22. Le nouveau regard de Planck sur la plus vieille image du monde, <i>François R. Bouchet</i>	222
23. La nucléosynthèse primordiale, <i>Élisabeth Vangioni</i>	229

- Cinquième partie -

SOMMES-NOUS SEULS ?

24. Exo-planètes et vie extraterrestre, <i>Alfred Vidal-Madjar</i>	239
25. L'exobiologie ou la recherche de vie extraterrestre, <i>André Brack</i>	250

- Sixième partie -

DE NOUVEAUX REGARDS SUR LE CIEL

26. Espace et astronomie, <i>Roger-Maurice Bonnet</i>	263
27. L'astronomie X, <i>Monique Arnaud, Didier Barret et Anne Decourchelle</i>	274
28. L'astronomie gamma, <i>Jacques Paul</i>	284
29. Les rayons cosmiques de ultra-haute énergie, <i>Martin Lemoine</i>	294
30. Les nouveaux messagers non photoniques, <i>Étienne Parizot</i>	301
31. L'astronomie du futur, <i>Martin Giard</i>	313
Les auteurs.....	321

Avant-propos

Jean Audouze

L'Union astronomique internationale et l'Unesco ont convaincu les Nations unies de proclamer « Année mondiale de l'astronomie » l'année 2009. Cette année fût, en effet, marquée par le 400^e anniversaire de la lunette astronomique de Galilée, et donc le début de l'instrumentation en astronomie. On célébra également le 50^e anniversaire de la mission Apollo qui permit à quelques cosmonautes américains de marcher sur la Lune. Cette Année mondiale, organisée en France par Anny-Chantal Levasseur Regourd et Françoise Combes, toutes deux coauteurs du présent ouvrage, a donné lieu dans le monde entier et surtout en France à de très nombreuses manifestations, conférences, observations du ciel, expositions telles que celle intitulée « Les mystères de l'Univers », organisée par le CNRS qui se tint dans les jardins du Trocadéro à Paris en octobre et novembre 2009. Le Comité international des Recherches spatiales et l'Unesco clôturèrent cette année mondiale les 14 et 15 janvier 2010 par un colloque intitulé « La contribution de la Recherche spatiale à l'Astronomie ». Plusieurs chapitres de ce livre (1, 3, 4, 5, 6, 13, 16, 22, 24, 26, 27, 28 et 31) reflètent les présentations et les discussions de ce colloque.

Le 14 mai 2009, l'Agence spatiale européenne lança grâce à la fusée Ariane 5 deux missions astronomiques de premier plan, d'une part la mission Herschel qui doit scruter le ciel dans l'infra rouge lointain, d'autre part la sonde Planck-Surveyor qui va mesurer et analyser avec une précision inégalée les faibles irrégularités du fond diffus dans le

but de tenter de comprendre le passé lointain (le fameux Big Bang) de l'Univers : grâce à Planck, on peut dire que nous allons disposer de la meilleure photographie possible de notre Univers lors de ses premiers balbutiements, quand il n'était âgé que de 380 000 ans. Un des responsables de cette mission, François Bouchet consacre le chapitre 22 de ce livre à son propos.

Le projet de cet ouvrage fût conçu au cours de cette année anniversaire. Il me fût facile de convaincre Jean-François Colosimo, directeur de CNRS Editions, de publier un livre rassemblant les résultats les plus récents de l'astrophysique auxquels le CNRS, son Institut des Sciences de l'Univers (l'INSU) les organismes associés (CEA, CNES, Observatoire de Paris-Meudon, Observatoire de Nice, Universités de Paris 6, 7, 11, de Versailles et Saint Quentin.) sans oublier mon propre institut, l'Institut d'Astrophysique du CNRS et de l'Université Pierre et Marie Curie, ont contribué. Je souhaite le remercier ainsi que son équipe (dont Marie Bellosa et Élodie Gesnel) pour avoir rendu possible la production d'un ouvrage copieux et richement illustré rassemblant les dernières nouvelles du ciel. Je suis également très heureux et fier d'avoir réussi à rassembler autour de la production de ce livre mes collègues et amis qui sont parmi les astrophysiciens les plus réputés non seulement en France mais aussi au plan international. Je tiens à les remercier tous d'avoir bien voulu écrire chacun des chapitres de cette « saga céleste ». On trouve à la fin de l'ouvrage quelques lignes biogra-

phiques concernant chacun(e) des auteurs de ce livre collectif pour que vous puissiez un peu les connaître. Nous avons collectivement l'ambition de donner à lire un ouvrage à la fois clair et pédagogique qui fasse un point aussi complet que possible sur l'ensemble des résultats les plus actuels, obtenus dans nos observatoires et laboratoires concernant l'ensemble de l'astronomie et l'astrophysique. Les lecteurs nous diront, j'espère, si nous y sommes parvenus.

Les trente et un chapitres de ce livre sont répartis dans six sections : la première est consacrée au Soleil et au Système solaire. On pourra constater à quel point nos connaissances dans ce domaine sont en train de progresser, singulièrement grâce aux missions spatiales consacrées au Soleil lui-même et à l'exploration planétaire. La deuxième partie évoque les étoiles et le milieu interstellaire : dans son chapitre 8, Eric Fossat expose tout ce que l'on apprend en étudiant les tremblements solaires et stellaires et François Boulanger fait le point sur un sujet à la fois fondamental et complexe, représenté par l'analyse du milieu interstellaire.

La troisième section de l'ouvrage traite des galaxies et des grandes structures de l'Univers. On peut constater que ce domaine a été révolutionné grâce à l'accès aux grands instruments que sont par exemple le VLT (le très grand télescope de 4 x 8 m) du mont Paranal (Chili) de l'Observatoire européen austral (ESO) et bien sûr grâce aussi au télescope spatial Hubble. La Relativité Générale d'Einstein nous apprend que la matière influence les trajec-

toires de la lumière. Les chapitres d'Alain Riazuelo et de Yannick Mellier, respectivement consacrés aux trous noirs et aux arcs et lentilles gravitationnelles dérivent directement de cet effet physique fondamental. La quatrième partie concerne la cosmologie, c'est-à-dire l'étude de l'Univers dans son ensemble. Les quatre chapitres rassemblés ici démontrent que cette discipline qui donnait lieu dans le passé à des développements mathématiques et/ou philosophiques a acquis récemment un véritable statut astrophysique. La cosmologie est maintenant une branche de la physique à part entière comme le montrent les rapprochements très féconds entre la physique des particules élémentaires et celles des grandes structures de l'Univers.

Dans la cinquième partie, Alfred Vidal-Madjar et André Brack font le point des recherches concernant l'apparition de la vie sur Terre et évoquent ce que l'on fait pour chercher à savoir si nous sommes seuls ou non. L'ouvrage se termine par la section intitulée « de nouveaux regards sur le ciel » à l'intérieur de laquelle on évoque les astronomies non conventionnelles qui ont véritablement débuté avec l'ère spatiale comme l'astronomie X par Monique Arnaud, Didier Barret et Anne Decourchelle et l'astronomie gamma par Jacques Paul. Martin Lemoine fait le point sur les recherches concernant les

rayons cosmiques et Etienne Parizot sur l'ensemble des messagers non photoniques tels que les neutrino ou les ondes gravitationnelles... Roger Bonnet, qui est à l'origine de la programmation scientifique de l'Agence spatiale européenne, expose tout ce que l'astronomie doit à l'espace et finalement Martin Giard nous projette dans les prochaines décennies avec l'évocation de plusieurs projets futurs. On pourra constater à la lecture de cet ouvrage combien tous ces chapitres sont liés entre eux : les relations entre les différents sujets constituant l'astrophysique actuelle sont très fortes et se manifestent de façon assez évidente tout au long du livre.

Quatre cents ans après les premières observations du ciel effectuées par Galilée avec un instrument passablement rudimentaire, l'astronomie et l'astrophysique ont accompli des progrès fantastiques. La raison principale de ces succès immenses vient de l'instrumentation et de l'informatique qui ont donné année après année des moyens d'observation et d'analyse de plus en plus performants aux chercheurs de cette discipline. Et, comme le décrit bien Martin Giard, d'autres progrès, d'autres découvertes sont encore à venir. En ce qui concerne l'astronomie française, la bonne santé de ce secteur d'activité est due à l'organisation du CNRS et de l'INSU,

à l'activité de ses personnels et aux partenariats qu'il a su nouer avec les observatoires, les universités et les autres organismes impliqués que sont le CEA et le CNES. C'est aussi pour cette raison que nous avons souhaité publier ce livre dans la maison d'édition de notre organisme.

Nous avons écrit ce livre en pensant à tous ceux qui sont fascinés par le ciel, jeunes ou moins jeunes, membres d'associations d'astronomie amateur, lycéens ou étudiants qui se sentent attirés par la recherche scientifique, en particulier, l'astronomie et l'astrophysique... en bref tous ceux qui souhaitent savoir ce qu'il y a au dessus de nos têtes et comment tout cela évolue et fonctionne. Comme nous avons cherché à le montrer, il y a beaucoup de sujets évoqués ici qui vont évoluer au cours des prochaines années en raison de la programmation des futures missions spatiales et de l'aboutissement des projets de télescopes au sol, encore plus grands et dotés d'instrumentations encore plus performantes. Les élèves des collèges et des lycées et les étudiants d'aujourd'hui auront beaucoup de chance s'ils parviennent à se joindre à la communauté des astrophysiciens au moment où ces moyens deviendront disponibles. Nous espérons, enfin, avoir donné de nos recherches un exposé abordable par tous. Je vous invite donc à « découvrir » le ciel avec nous.

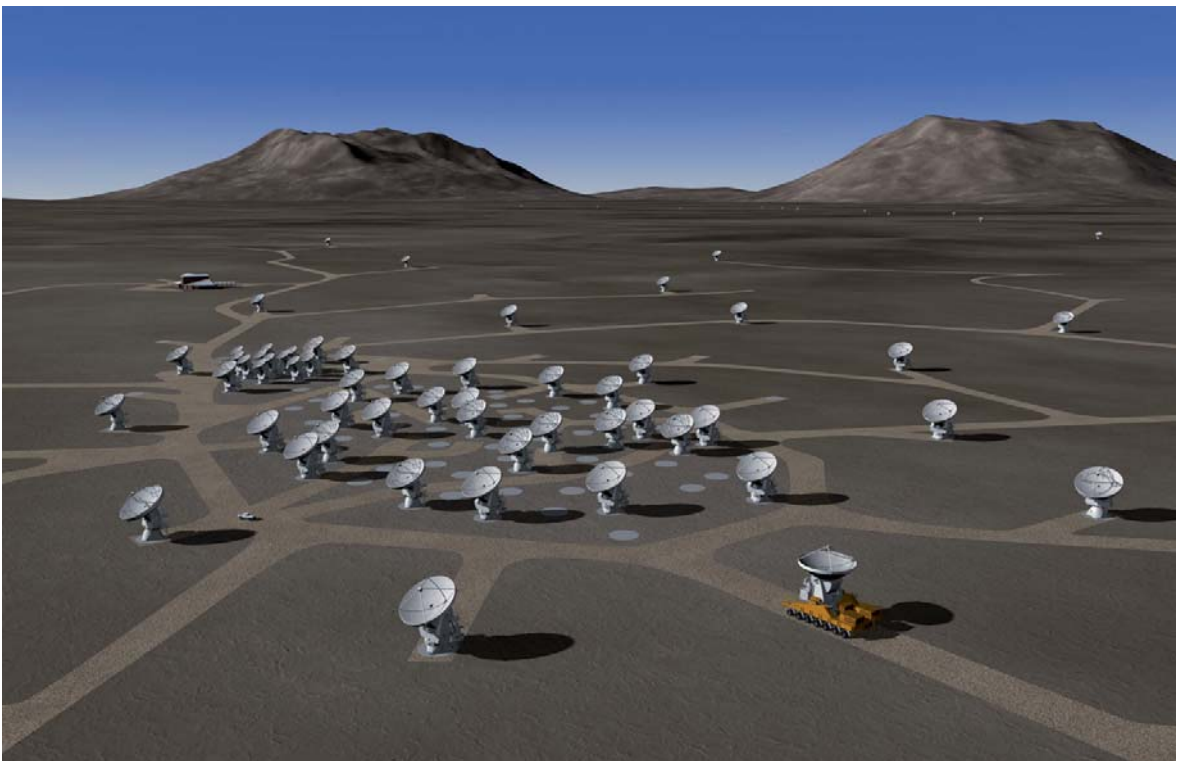
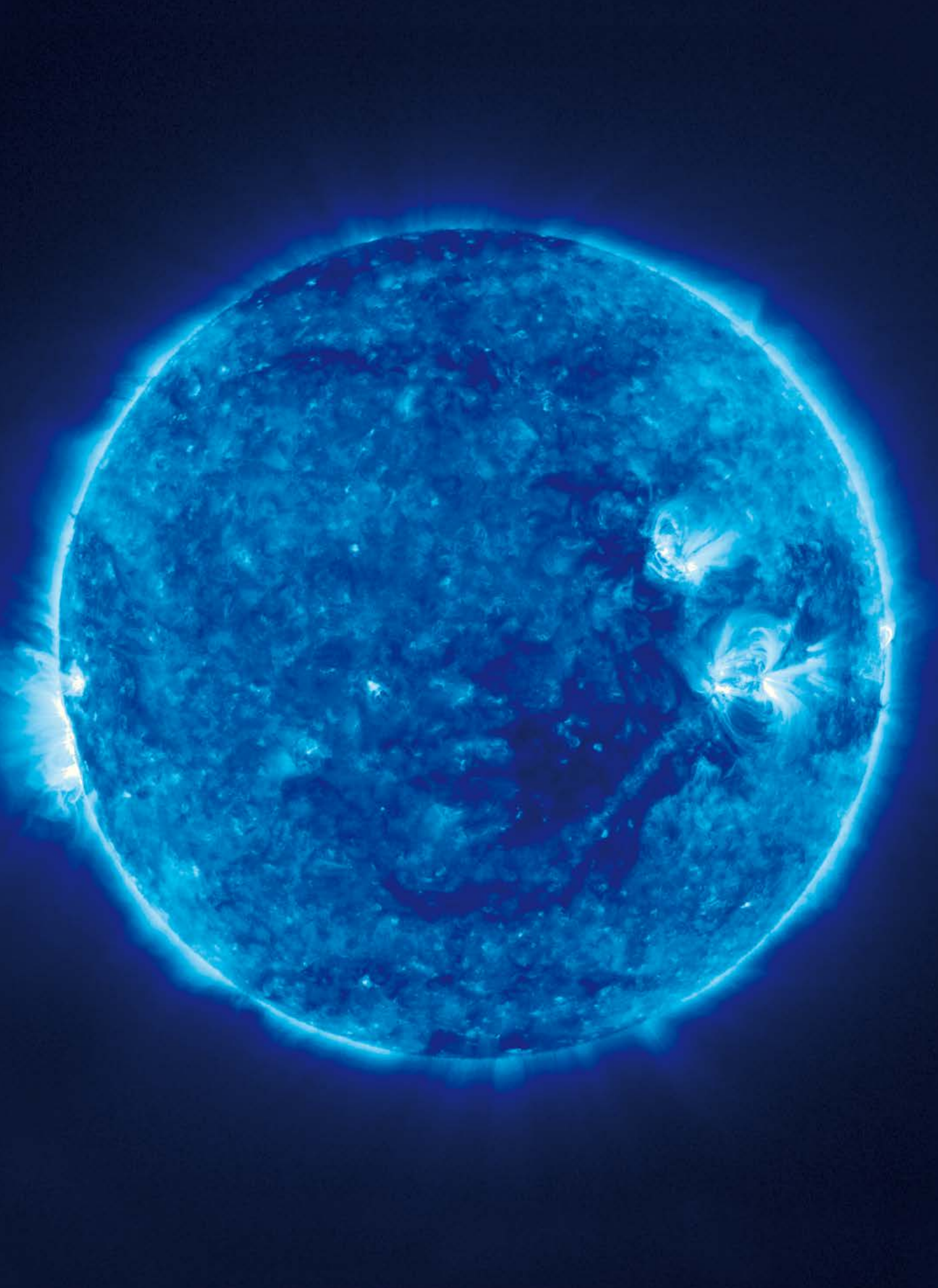


Fig. 1 et 2 – Le projet ALMA consiste en un réseau de 80 antennes capables de scruter le ciel dans le domaine des ondes millimétriques et submillimétriques. ALMA va être l'instrument le plus performant pour observer l'Univers froid tel que le gaz interstellaire ou le rayonnement fossile à 2,7 K. Ce projet est complètement international puisqu'il fait intervenir la communauté astronomique du monde entier sur ce haut plateau du Chili.



- PREMIÈRE PARTIE -

Le Soleil et le Système solaire

1. Le Soleil, une étoile dans notre Galaxie

Jean-Claude Vial

Par une belle nuit sans Lune (et sans nuages), levons les yeux vers le ciel. L'œil est immédiatement attiré par le cortège d'étoiles brillantes qui a donné son nom à la Voie lactée. Il s'agit en fait d'une galaxie de près de 200 milliards d'étoiles qui abrite notre Soleil et ses planètes, c'est notre galaxie, « la » Galaxie, comme une île dans le vaste cosmos.

La Galaxie: ses 150 à 200 milliards d'étoiles sont réparties selon des bras spiraux autour d'un noyau central et pour la plupart confinées dans un disque lenticulaire (de type « soucoupe volante »), un disque que la lumière met près de 100 000 ans à traverser à la vitesse de 300 000 km/s: on parle d'une distance de 100 000 années-lumière. Et notre Soleil: un peu « perdu » à plus de 30 000 années-lumière du centre de la Galaxie. Et un peu banal, aussi, par rapport à l'extraordinaire diversité des autres étoiles, y compris par sa couleur jaune, qui contraste avec celle des étoiles de nos constellations familières (Aldebaran rouge, Vega blanc-bleu...), par sa masse et son âge.

Mais c'est notre étoile, celle que les Égyptiens espéraient chaque jour voir réapparaître dans le ciel, pour apporter, depuis sa barque, lumière et chaleur. Une étoile dont les mystères ont commencé à être élucidés par Galilée et sa lunette, il y a près de quatre cents ans, mystères que les outils modernes d'observation, au sol puis dans l'espace, n'ont cessé de percer.

Qu'en savons-nous aujourd'hui ?

Un portrait chiffré

Le Soleil est né, il y a quelque 4,5 milliards d'années, de l'effondrement d'un immense nuage de gaz interstellaire. C'est aujourd'hui une sphère de 1 392 000 km de diamètre (soit près de 110 fois celui de la Terre) et de masse $1,989 \cdot 10^{30}$ kg (soit près de 330 000 fois celle de la Terre). Cette sphère gazeuse est constituée essentiellement d'hydrogène et d'hélium et sa densité moyenne est de l'ordre de $1\,410 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, plus faible que celle de la Terre solide mais bien plus élevée que celle de l'atmosphère terrestre.

La température à la surface est de 5 770 K, celle du centre estimée à quinze millions de K. C'est de ce cœur où se produisent des réactions nucléaires par fusion de noyaux d'atomes d'hydrogène en hélium que le Soleil tire son énergie. La densité y atteint $151\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et la pression s'y élève à $2,33 \cdot 10^{11}$ bar, soit 233 milliards de fois la pression atmosphérique terrestre.

La distance Terre-Soleil varie de 147,1 millions de kilomètres en janvier à 152,1 millions de kilomètres en juillet. La valeur moyenne de cette distance, nommée Unité Astronomique, sert de référence pour comparer les orbites des planètes du Système solaire (1 UA = 149 597 900 km). Cette distance considérable ne doit pas faire oublier que le Soleil est l'étoile la plus proche (cent mille fois plus proche que Proxima du Centaure) que l'on puisse observer.

Le Soleil est le plus gros objet du Système solaire dont il représente près de 99,8 % de la masse totale. En nombre d'atomes, il contient 92,1 % d'hydrogène, 7,8 % d'hélium, les 0,1 % restants étant constitués de carbone, azote, oxygène et également de métaux.

Le Soleil tourne sur lui-même en 25,4 jours environ, autour d'un axe incliné de $82^{\circ}49'$ par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite de la Terre). Comme son sens de rotation est le même que le sens de révolution de la Terre et des autres planètes autour de lui, il paraît tourner plus lentement vu de la Terre (27,5 jours environ). Sa rotation est aussi différentielle: beaucoup plus rapide à l'équateur (24,6 jours) qu'au voisinage des pôles (35 jours).

Son rayonnement

Outre la connaissance de sa masse et de son diamètre, l'essentiel de l'information acquise sur le Soleil vient de l'étude de son rayonnement, par ailleurs crucial pour la vie sur Terre.

Sa luminosité (ou énergie lumineuse totale rayonnée par seconde) est de l'ordre de $3,9 \cdot 10^{23}$ kW soit près de un million de milliards de milliards de centrales électriques de 1 000 MW. Au niveau de la Terre (hors atmosphère terrestre), un m^2 reçoit en moyenne 1 370 W, éclairement qui varie avec les saisons et l'activité du Soleil.

La distribution de l'énergie lumineuse avec la longueur d'onde est proche de celle d'un corps noir porté à la température de 5770 K. Ceci est vrai de l'ultra-violet (vers 200 nm) jusqu'aux longueurs d'onde radio inférieures à 1 mm. Le pic d'émission a lieu dans le bleu-vert à 470 nm et correspond à une température d'émission de 6200 K. Les photons émis dans cette vaste gamme proviennent de la « surface » ou photosphère. À première vue, le spectre paraît continu mais à haute résolution spectrale, il est en fait cannelé par de très nombreuses bandes sombres : ce sont les raies d'absorption d'éléments bien identifiés de la couche froide située au-dessus de la photosphère et qui absorbent le rayonnement sous-jacent.

Ces deux propriétés – température de corps noir équivalent (on parle de température effective) et nature des raies d'absorption – permettent de situer le Soleil par rapport aux autres étoiles. Elles sont à la base de la classification stellaire.

Cette classification stellaire, initialement définie à partir de la couleur de l'étoile et de l'importance de son rayonnement (sa magnitude), repose sur la température effective d'une part et sur la nature des raies d'absorption d'autre part : les étoiles (bleues) de type O sont à une température de l'ordre de 25 000 K et on y trouve des raies d'absorption de l'hélium et de l'hydrogène ; à l'autre bout de l'échelle, les étoiles (rouges) de type

M sont à quelque 3 000 K et montrent des raies d'absorption moléculaires.

Le Soleil est une étoile de type G (6 000 K), et son spectre révèle, notamment, la présence d'hydrogène, de fer et de calcium (neutre et ionisé). Cette température lui assure un rayonnement dont les propriétés tout à fait « modestes » (comparées aux étoiles très chaudes, sans parler des étoiles très denses comme les étoiles à neutrons ou les trous noirs) ne sont sans doute pas étrangères à l'apparition de la vie sur Terre.

La source interne de ce rayonnement

Pour la découvrir, il faut pénétrer à l'intérieur du Soleil, pourtant inaccessible à une vue directe. Ce que l'on sait aujourd'hui, soit par des travaux théoriques de modélisation de l'évolution des étoiles (chapitre 7), soit par des mesures indirectes de type sismologie (voir chapitre 8), c'est que le cœur du Soleil s'étend sur un rayon d'environ 175 000 km. Les rayonnements gamma produits par la fusion thermonucléaire s'échappent dans une région dite zone radiative où ils sont en permanence réexpédiés dans toutes les directions par les protons et les électrons. Ils se transforment en photons moins énergétiques et ces parties de ping-pong finissent à une distance d'environ 500 000 km du

centre du Soleil. Rencontrant là un gaz plus froid et neutre, ces photons sont définitivement absorbés. Le surplus d'énergie ainsi accumulé ne peut alors être évacué que par de gigantesques mouvements de matière qui apportent la chaleur à la surface. La zone ainsi située entre 500 000 et 696 000 km est appelée zone convective.

Entre le cœur et la surface, règnent donc des conditions incroyablement diverses qu'il s'agisse de la température (une quinzaine de millions de K dans le cœur jusqu'à 4 200 K au-dessus de la surface) ou de la densité, qui passe de valeurs élevées dans le cœur (un litre de gaz y contient 100 kg de matière) à des valeurs très faibles (à la surface elle est 10 000 fois moins dense que l'air que nous respirons).

Granulation... et champ magnétique

Les indices les plus évidents du régime de brassage à l'œuvre dans la zone convective viennent d'images de la surface du Soleil (figure 1). La précision des instruments actuels (au sol ou dans l'espace), leur capacité d'observation continue (et les traitements informatiques des images) permettent aujourd'hui de suivre l'évolution des « granules » de gaz chaud qui viennent éclater à la surface comme des bulles d'air dans une casserole d'eau portée à ébullition. La taille de ces granules est de l'ordre de 1 000 km : au centre, la matière montante est chaude et donc brillante ; parvenue à la surface, elle

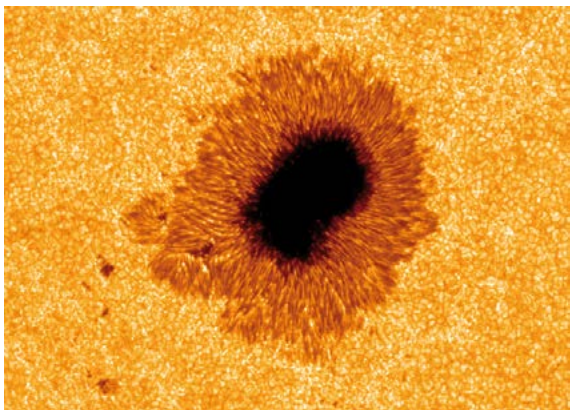


Fig. 1 – Granulation et tache solaire. Cette image a été obtenue par l'instrument SOT sur le satellite japonais Hinode à la longueur d'onde 430 nm (bande dite « G » dans le bleu). Ce rayonnement est issu de la photosphère. La zone couverte est de 120 000 sur 100 000 km. On distingue la granulation qui couvre l'essentiel de la surface et la tache constituée de deux zones bien distinctes : l'ombre (région sombre centrale plus grande que la Terre) et la pénombre constituée de fils de matière issue de l'ombre et rejoignant la photosphère. (SOT/Hinode). ■

peut dissiper son rayonnement et se refroidit ; les bords de ces granules sont plus sombres, signe de l'enfouissement de la matière refroidie. On mesure bien leur durée de vie (de l'ordre d'une dizaine de minutes), les vitesses d'ascension et de descente de la matière (de l'ordre du dixième de km/s), les écarts de température (de l'ordre de quelques dizaines de K).

Mais il est une autre énergie qui intervient au sein de ce gaz à près de 6 000 K, une énergie cachée.

Dans la figure 1, on voit apparaître des régions sombres (donc plus froides) : les taches solaires, déjà aperçues par Galilée. C'est en positionnant la fente de son spectrographe sur l'image de ces taches que l'astronome américain George Hale a pu, en 1908, observer un dédoublement de certaines raies sensibles au champ magnétique. On a mesuré depuis, et avec une extrême précision, ce champ magnétique, qui peut atteindre plus de 0,1 Tesla, soit 10 000 fois le champ magnétique terrestre. De tels champs magnétiques ont une profonde influence sur l'atmosphère du Soleil, comme nous le verrons plus loin. Mais ce champ exceptionnel est l'arbre qui cache la forêt : présent partout à la surface du Soleil, il est poussé vers la frontière entre granules où il émerge un peu coincé (ce sont les structures allongées très brillantes de la figure 1, structures, à peine discernables, en dehors de la tache) et, rencontrant en montant un milieu de plus en plus dilué, il étend sa région d'influence jusqu'à piéger le gaz. Il joue donc un rôle fondamental dans les couches les plus externes du Soleil, et notamment sa couronne.

La couronne solaire

À la surface du Soleil, la température est de l'ordre de 6 000 K. Continuons notre ascension : l'atmosphère au-dessus de la surface nous réserve quelques surprises. Quelques cen-

taines de km plus haut, la température est descendue à 4 200 K environ, et l'on pourrait s'attendre à ce qu'elle diminue encore quand on s'éloigne de la source d'énergie.

Mais non ! Dans un premier temps, sur un millier de km, la température augmente jusqu'à 10 000 K : c'est la chromosphère, couche colorée visible à l'occasion d'une éclipse ; dans un deuxième temps, la température grimpe allègrement, sur quelques centaines de km, à plus d'un million de degrés K et caractérise ainsi une zone chaude très étendue, elle aussi bien visible en éclipse totale : la couronne. Cette augmentation brutale de la température s'accompagne d'une diminution tout aussi brutale de la densité, ce qui explique que la couronne ne soit visible, du moins dans les couleurs ordinaires, que quand le disque ultra-brillant est occulté, par exemple par la Lune. Dans ces conditions de température (1 à 2 millions de K), les atomes du gaz perdent leurs électrons, ainsi libérés, et deviennent des ions chargés positivement : on dit que le gaz est ionisé et constitue un plasma. Le champ magnétique a alors toute facilité pour piéger et orienter ces particules chargées, ions et électrons.

Il convient alors de distinguer deux cas de figures :

De la matière qui s'évade le long du champ magnétique : le vent solaire

Le champ est « ouvert », c'est-à-dire que si au départ du champ à la surface de l'étoile la polarité est Nord, on ne trouvera la polarité Sud que très loin dans l'espace interplanétaire. C'est le cas notamment des trous coronaux polaires bien visibles sur la figure 2. Examinons pour l'instant les régions polaires de la figure, en particulier la moitié gauche du disque solaire, vu ici dans une raie EUV (ultra violet extrême) de l'hélium une fois ionisé. On remarque que les deux calottes polaires sont plus sombres (régions appelées trous coronaux)

et que semblent en sortir des rayons nettement radiaux. Le passage étant ouvert par le champ magnétique, on comprend que la matière chargée puisse s'en échapper pour former un vent rapide, de l'ordre de 800 km/s. À vrai dire, on ne sait pas pourquoi ce vent est plus rapide que le vent résultant de la simple « évaporation » de la couronne alors que la température de la source coronale arrive à peine au million de K, contrairement à la couronne voisine plus chaude. Des mécanismes mettant en jeu un couplage entre les *particules* ionisées qui tournent autour des lignes de champ magnétique et les *ondes* produites plus bas dans la chromosphère sont sans doute à l'œuvre. À côté de ce vent rapide, coexiste un vent plus lent de l'ordre de 400 km/s. La perte de masse due à ces vents (un million de tonnes par seconde) ne doit pas nous inquiéter car il faudrait attendre quelque 10 000 milliards d'années pour épuiser ainsi la masse du Soleil. L'impact de ces vents sur notre Terre ne doit pas, lui, être sous-estimé, car le champ magnétique emporté par le vent va buter contre le champ magnétique de la Terre et le perturber. Ce vent atteint enfin les confins de l'héliosphère (située à plus d'une centaine d'UA) où il rencontre le vent interstellaire avec lequel il échange sa charge électrique.

De la matière prisonnière d'énormes pièges magnétiques : les boucles coronales

Le champ magnétique est « fermé » et souvent intense : les lignes issues d'un pôle Nord (local, par exemple une tache) se ferment alors en un pôle Sud à proximité (par exemple une autre tache), non sans s'être déployées dans la couronne diluée. Ce sont les boucles coronales de la figure 3. Elles peuvent atteindre des hauteurs de 100 000 km ; par contraste, leur section (leur « épaisseur ») est de l'ordre de quelque 100 km, et peut-être même moins encore. La stabilité de ces boucles,

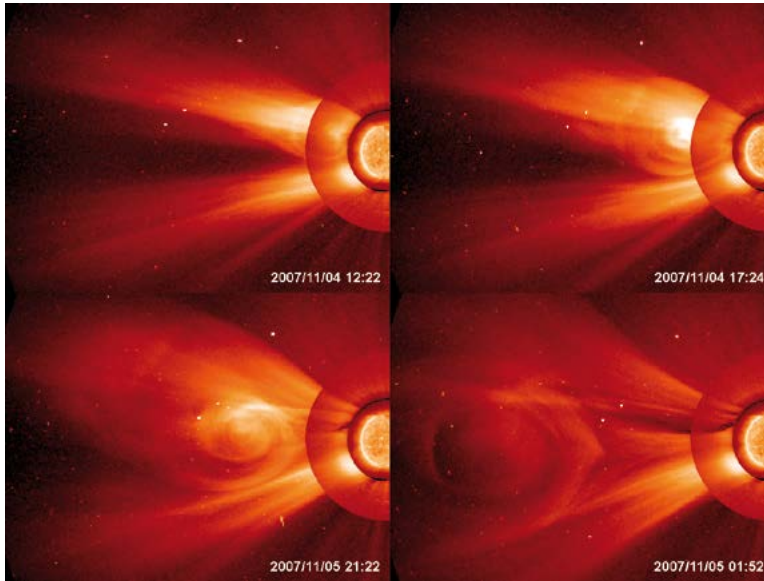


Fig. 2 – Couronne et Éjection de Masse Coronale (CME). Chaque image, qui représente l'évolution temporelle d'une CME, est constituée d'un montage de trois images obtenues par la sonde STEREO de la NASA: à droite, l'image centrale, dans l'extrême ultraviolet, visualise la couronne très près du disque solaire (instrument EUVI); à sa gauche, l'image suivante obtenue dans la lumière visible, visualise la couronne jusqu'à deux rayons solaires, soit 1 400 000 km, au-dessus du disque (coronographe COR1); à gauche encore, l'image très étendue, obtenue elle aussi en lumière visible, visualise la couronne jusqu'à 13 rayons solaires, soit 9 millions de km, au-dessus du bord (coronographe COR2). (Nasa/STEREO). ■

leur état thermique exact, les mouvements de matière longitudinaux, le fait même que leurs sections semblent constantes d'un pied à l'autre restent à ce jour des énigmes entières. On soupçonne que chacune de ces boucles élémentaires est en fait constituée de fibres très fines dont la taille réelle est inaccessible à l'instrumentation présente. C'est dire aussi qu'une telle structuration de la matière à des échelles élémentaires de l'ordre du km (la distance parcourue par un proton entre deux collisions) soulève de nouveaux problèmes de (micro) physique des plasmas.

Ces boucles coronales ne sont visibles que par l'observation dans des rayonnements de fréquences

élevées (soit de courtes longueurs d'onde): EUV et X émis par de la matière chaude, de l'ordre du million de K. La durée de vie des boucles coronales peut être aussi importante que celle de l'ensemble magnétique dont elles relèvent: un tel complexe magnétique, dit région active, peut subsister pendant plusieurs rotations solaires (ou plusieurs mois). Il lui arrive aussi « d'exploser » avec abondance d'émission lumineuse (surtout X et EUV), départ de particules mises en mouvement par de puissants accélérateurs situés dans la couronne solaire et éjection colossale de matière: ce sont les éruptions (sursauts ou « flares » en américain) et éjections de masse coronale (Coronal Mass Ejections, ou CME).

Les filaments et protubérances solaires

Avant d'étudier ces emballages dans l'atmosphère solaire, il faut dire quelques mots de structures qui avaient fasciné les observateurs du XIX^e (notamment le père Secchi qui les décrivait ainsi dans son livre intitulé *Le Soleil* (1877): des « amas de matière lumineuse ayant une grande vivacité et possédant une activité photogénique très remarquable »): les protubérances solaires qui « dépassent » du bord solaire et qui apparaissent comme des filaments sombres sur le disque solaire.

Une protubérance est une poche de plasma dense (10^{17} m^{-3}) et froid (8 000 K) dans la couronne solaire chaude et diluée. Elle apparaît brillante au-dessus du limbe car sa matière absorbe et diffuse le rayonne-

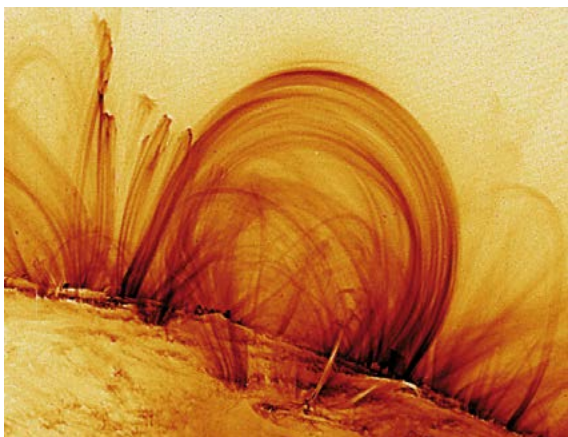


Fig. 3 – Boucles coronales. Cette image a été obtenue dans l'euv par le satellite TRACE de la NASA. Elle a été traitée de façon à mettre en évidence la structure fine de boucles coronales en-dehors du bord solaire. Les régions sombres correspondent à de la matière plus froide que le milieu coronal ambiant et qui absorbe le rayonnement de la couronne. Noter que les boucles centrales atteignent une altitude de 200 000 km alors que leur épaisseur ne dépasse pas 1 000 km. (TRACE). ■

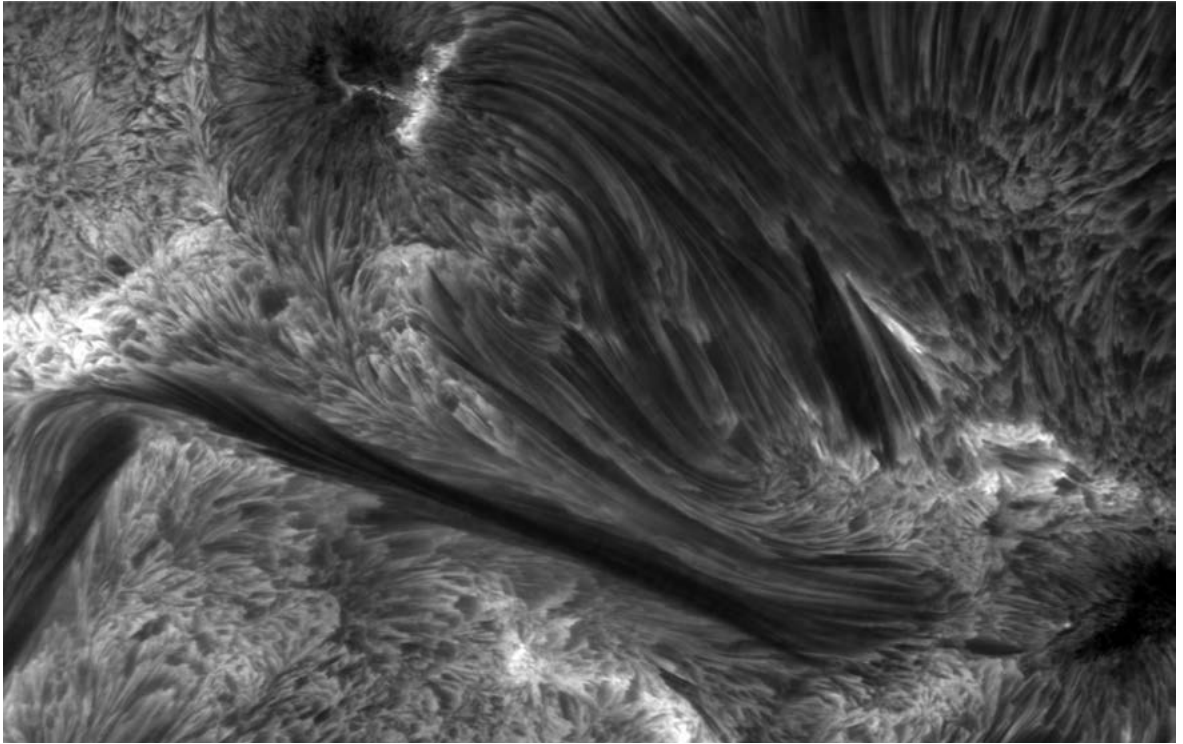


Fig. 4 – Filament dans la raie H α . Cette image a été obtenue le 22 août 2003 par le Swedish Solar Telescope (îles Canaries) dans une raie de l'Hydrogène située dans la partie rouge du spectre (656.3 nm). Le filament lui-même constitué de fils très allongés est situé dans la partie basse de l'image. Sa matière est plus froide que la chromosphère environnante et absorbe son rayonnement. Noter une tache solaire en haut à gauche de l'image. (SST). ■

ment chromosphérique sous-jacent et apparaît donc brillante, vue au-dessus du bord. Pour la même raison, on la voit comme un filament sombre sur le disque (figure 4). Sa longueur peut atteindre quelques centaines de milliers de km, sa hauteur quelques dizaines de milliers de km et son « épaisseur » plusieurs milliers de km.

La magnétométrie de la surface solaire a montré que la composante verticale du champ magnétique s'annule à l'aplomb des filaments et qu'ainsi ces lignes neutres (pas du tout rectilignes !) sont des régions frontières entre polarités opposées. On peut donc imaginer que la matière est retenue dans des creux situés au sommet de ponts magnétiques traversant la frontière. Comme le montre la figure 4, ces ponts sont très fins (leur section est sans doute de l'ordre de 100 km), parallèles entre eux et inclinés par rapport à la

direction générale du filament. Les films obtenus au sol (Swedish Solar Telescope) et dans l'espace (Solar Optical Telescope sur le satellite japonais Hinode) montrent que la matière se déplace avec des vitesses de quelques km/s le long de ces fils fins. C'est dire que ces structures apparemment stables, puisqu'elles peuvent durer jusqu'à plusieurs mois, ont une vie intérieure très agitée. Ajoutons qu'elles mettent en œuvre une masse considérable (des milliards de tonnes), une fraction non négligeable de la masse de toute la couronne.

Les éruptions solaires

C'est en 1859 que l'observateur anglais R. Carrington détecta une augmentation brutale et très localisée de l'émission visible à la surface du Soleil dans la bande dite « lumière

blanche ». L'événement devait être exceptionnellement fort car ce sont les couches supérieures de l'atmosphère solaire (chromosphère et couronne) qui sont ordinairement concernées par le phénomène alors que le surplus d'émission en lumière blanche provient, lui, de la photosphère. Comment en arrive-t-on à une explosion mettant en œuvre des énergies atteignant 10^{26} Joule (soit l'équivalent de l'énergie lumineuse émise par tout le Soleil pendant une seconde) ?

Il faut admettre que la stabilité magnétique et mécanique d'une région active est très précaire : les mouvements photosphériques incessants des pieds des structures dus à la granulation produisent des torsions ou des cisaillements qui peuvent conduire à des instabilités électromagnétiques à l'occasion, par exemple, de l'émergence d'un nouveau système magnétique. Si ce nouveau champ

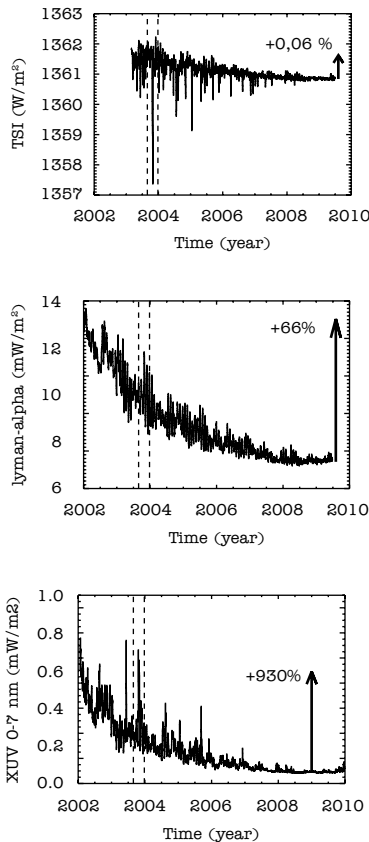


Fig. 5 – Variations de l'irradiance totale ou Total Solar Irradiance (TSI) (5a en haut), de l'irradiance UV (raie $\text{L}\alpha$ de l'Hydrogène) (5b au milieu) et de l'irradiance XUV (en dessous de 0.7 nm) (5c en bas) entre les années 2002 et 2009. La période de temps entre les deux lignes pointillées correspond à un fort passage de taches sur la surface. (Dr Tom Woods). ■

émergent, même modeste, a le mauvais goût d'être de signe opposé au système qui fait la loi dans la région, on assiste alors à un phénomène nouveau : la reconnexion magnétique. On peut dire que les lignes de champ magnétique prennent alors le plus court chemin qui leur est offert. Ce faisant, elles déclenchent des ondes magnétiques, un régime de courants très intenses s'instaure dans une très fine couche neutre d'où sont accélérées des particules très énergétiques (électrons, protons et noyaux d'hélium) qui suivent les lignes de force du champ magnétique. Les unes, parties vers le bas, vont bombarder

la chromosphère et même la photosphère et c'est ce bombardement qui explique l'essentiel de l'augmentation de l'émission lumineuse (100 % en lumière blanche jusqu'à un facteur 100 dans certaines raies EUV et X). Les autres, suivant des lignes de champ ouvertes, vont s'échapper vers l'espace interplanétaire et, pour certaines d'entre elles, atteindre la Terre, entrer par les failles magnétiques de la planète (les cornets polaires) et pénétrer son bouclier magnétique.

Notons que ces phénomènes de reconnexion magnétique sont (en partie) à la source des difficultés rencontrées dans les machines de fusion pour assurer la stabilité du plasma. On a ainsi une idée de l'extraordinaire laboratoire naturel que constitue le Soleil.

Les Ejections de Masse Coronales (ou CME)

Sont souvent – mais pas toujours – associés aux éruptions des départs spectaculaires de matière dont la première la sonde SOHO (Solar Heliospheric Observatory) a pu mesurer l'ampleur et la fréquence dans les années 1996-2006. Mais avec les deux sondes STEREO qui observent le Soleil sous des angles différents et qui possèdent également un jeu complet d'imageurs-coronographes, il est désormais possible de suivre ces perturbations coronales quasiment jusqu'à la Terre (figure 2). Cette combinaison d'images a été obtenue à l'aide d'un imageur EUV et de deux coronographes emportés sur l'une des deux sondes de la mission STEREO. Les quatre images sont séparées de 4 à 5 heures et permettent de suivre le développement d'une CME située à gauche. On notera qu'à 17 h 24, la CME a une allure de bulle de plasma. À 21 h 22, cette bulle s'est déplacée de près de deux millions de kilomètres et a pris une allure hélicoïdale dictée

par le champ magnétique. On peut dire que la perturbation magnétique à « petite » échelle d'une éruption a pris maintenant la dimension de tout un centre actif et qu'avec le champ magnétique qui s'éloigne du Soleil, c'est aussi de la matière qui s'en va à une vitesse pouvant dépasser 1 000 km/s et jouer ainsi au chasseur-neige avec la matière coronale plus lente du vent solaire. On pense toutefois que la masse la plus importante n'est pas devant mais derrière le choc ainsi créé. Cette masse est fournie par la matière d'une protubérance elle aussi déstabilisée par l'éruption et tirée vers le haut par une force électromagnétique d'autant plus forte que le champ magnétique (ou le courant) est plus intense.

Le Soleil, une étoile magnétique

Nous venons d'évoquer des manifestations brutales – et à ce jour imprévues – de l'activité magnétique du Soleil. Cette activité se manifeste à diverses échelles : celle de l'éruption, soit quelques dizaines de secondes pour que les particules soient accélérées et que l'émission en X durs soit multipliée par mille et celle des cycles solaires, soit une dizaine d'années. C'est cette variabilité, passée, présente et future et son impact possible sur la Terre qui font l'objet d'études très diverses dites de « météorologie de l'espace », ainsi que de débats passionnés.

La cyclicité solaire et la Terre : aujourd'hui et hier...

Les manifestations de l'activité solaire sont multiples : la source de cette activité étant magnétique, on ne s'étonnera pas que le nombre de taches présentes à la surface augmente entre un minimum et un maximum d'activité. Pendant longtemps, il a d'ailleurs été le seul indice d'activité, appelé « nombre

Diderot, responsable du groupe « Astrophysique des Hautes Énergies » au laboratoire APC (Astroparticule et Cosmologie). Ses travaux portent principalement sur les rayons cosmiques et sur l'accélération et la propagation des particules dans l'univers. Il est membre de la collaboration internationale Pierre Auger, responsable français et co-responsable européen du projet spatial JEM-EUSO, pour l'observation des rayons cosmiques ultra-énergétiques. Il dirige également un programme de recherche en Réalité Virtuelle immersive, EVEILS, pour l'éducation et l'illustration scientifiques.

Jacques Paul est l'un des « pères fondateurs » de l'astronomie gamma spatiale ; il est conseiller scientifique au Commissariat à l'énergie atomique. Il est également attaché scientifique au laboratoire « Astroparticules et Cosmologie » de l'université Paris Diderot. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages dont le dernier en date, *Oh l'Univers*, écrit avec Jean-Luc Robert, a reçu le prix Le goût des sciences 2009 décerné par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Alain Riazuelo est chargé de recherche au CNRS, à l'Institut d'Astrophysique de Paris et à l'université Pierre et Marie Curie. Ses travaux portent principalement sur la cosmologie primordiale, l'étude du fond diffus cosmologique et la physique des trous noirs.

Jean-Philippe Uzan est directeur de recherche au CNRS à l'Institut d'Astrophysique de Paris et à l'université Pierre et Marie Curie. Il enseigne la cosmologie au M2 de Physique théorique à l'École

normale supérieure de Paris et la physique à l'École Nationale supérieure des Mines de Paris. Ses travaux portent principalement sur la cosmologie théorique et les théories de la gravitation. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages (*Cosmologie Primordiale, De l'importance d'être une constante, La gravitation et Ici l'Univers!*).

Élisabeth Vangioni est astrophysicienne à l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP) du CNRS et à l'université Pierre et Marie Curie. Ses recherches portent sur l'astrophysique des hautes énergies et l'astrophysique nucléaire, plus particulièrement sur l'origine et l'évolution des atomes dans l'Univers, du Big Bang jusqu'à aujourd'hui. Elle est responsable des relations entre l'IAP, les écoles, les collèges et les lycées et a publié *Petite Étoile* avec M. Cassé et J.-C. Carrière.

Jean-Claude Vial est directeur de recherche à l'Institut d'Astrophysique spatiale (CNRS-université Paris-Sud) à Orsay. Ses travaux portent sur l'étude spectroscopique UV de l'atmosphère solaire à partir de données issues de missions spatiales auxquelles il a contribué. Ses intérêts se tournent aujourd'hui vers les relations Soleil-Terre. Il est co-auteur de diverses encyclopédies et en 2004 de l'ouvrage « Soleil » avec C. Ngo et J.-P. Verdier.

Alfred Vidal-Madjar est astrophysicien, directeur de recherche émérite au CNRS à l'Institut d'Astrophysique de Paris et à l'université Pierre et Marie Curie. Ses recherches concernent la spectroscopie UV spatiale, l'analyse de la composition

du milieu interstellaire proche, l'étude du disque de débris de l'étoile Beta Pictoris, la recherche de la masse manquante de l'Univers et l'observation détaillée des atmosphères des planètes extra-solaires. Il enseigna de nombreuses années la physique à l'École polytechnique. Il reçut la Médaille d'Argent du CNRS et le Prix Ampère 2007 de l'Académie des Sciences et est l'auteur de plusieurs ouvrages.

Laurent Vigroux est le directeur de l'Institut d'Astrophysique de Paris du CNRS et de l'université Pierre et Marie Curie. Il est directeur de recherche au CEA, où il a accompli l'essentiel de sa carrière, ayant en particulier dirigé le Service d'Astrophysique du CEA de 1993 à 2001. Ses travaux scientifiques portent sur l'évolution des galaxies, et sur le développement d'instruments pour des observatoires au sol et dans l'espace. À ce titre, il est le co-responsable scientifique de l'instrument SPIRE de l'observatoire spatial Herschel lancé par l'Agence Spatiale Européenne le 14 mai 2009. Une grande partie des programmes scientifiques d'Herschel est dédiée à l'observation des galaxies.

Jean-Paul Zahn est astronome émérite à l'Observatoire de Paris Meudon. Spécialiste de la dynamique des fluides astrophysiques, ses recherches portent principalement sur la structure interne et l'évolution du Soleil et des étoiles. Il a dirigé l'Observatoire de Nice, puis l'Observatoire du Pic du Midi et Toulouse. Il a reçu notamment le prix du Commissariat à l'Énergie Atomique, grand prix de l'Académie des Sciences.

Retrouvez tous les ouvrages
de CNRS Éditions
sur notre site

www.cnrseditions.fr