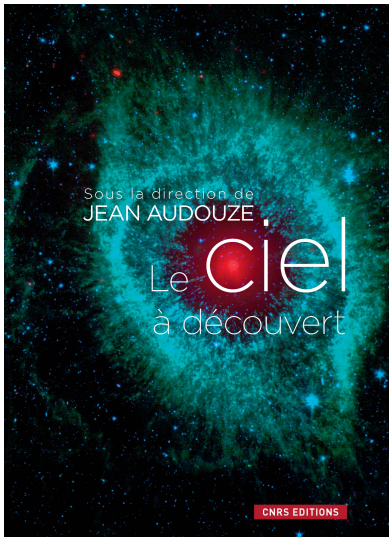


Sous la direction de
JEAN AUDOUZE

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 découvert

CNRS EDITIONS

© CNRS Éditions, Paris, 2010
ISBN : 978-2-271-11797-7

Sommaire

Avant-propos, *Jean Audouze* 9

- Première partie -

Le Soleil et le Système solaire

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

- Deuxième partie -

Les étoiles et le milieu interstellaire

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

- Troisième partie -

Les galaxies et les grandes structures de l'Univers

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

- Quatrième partie -

L'Univers dans son ensemble

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

- Cinquième partie -

Sommes-nous seuls ?

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

- Sixième partie -

De nouveaux regards sur le ciel

26. Espace et astronomie, *Roger-Maurice Bonnet* 263
27. L'astronomie X, *Monique Arnaud, Didier Barret et Anne Decourchelle* 274
28. L'astronomie gamma, *Jacques Paul* 284
29. Les rayons cosmiques de ultra-haute énergie, *Martin Lemoine* 294
30. Les nouveaux messagers non photoniques, *Étienne Parizot* 301
31. L'astronomie du futur, *Martin Giard* 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 400e anniversaire de la lunette astronomique de Galilée, et donc le début de l'instrumentation en astronomie. On célébra également le 50e 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 partout 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 Bellosta 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 biographiques concernant chacun(e) des auteurs de ce livre collectif pour que vous puissiez un peu les connaître. Nous avions 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 téléscope 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.

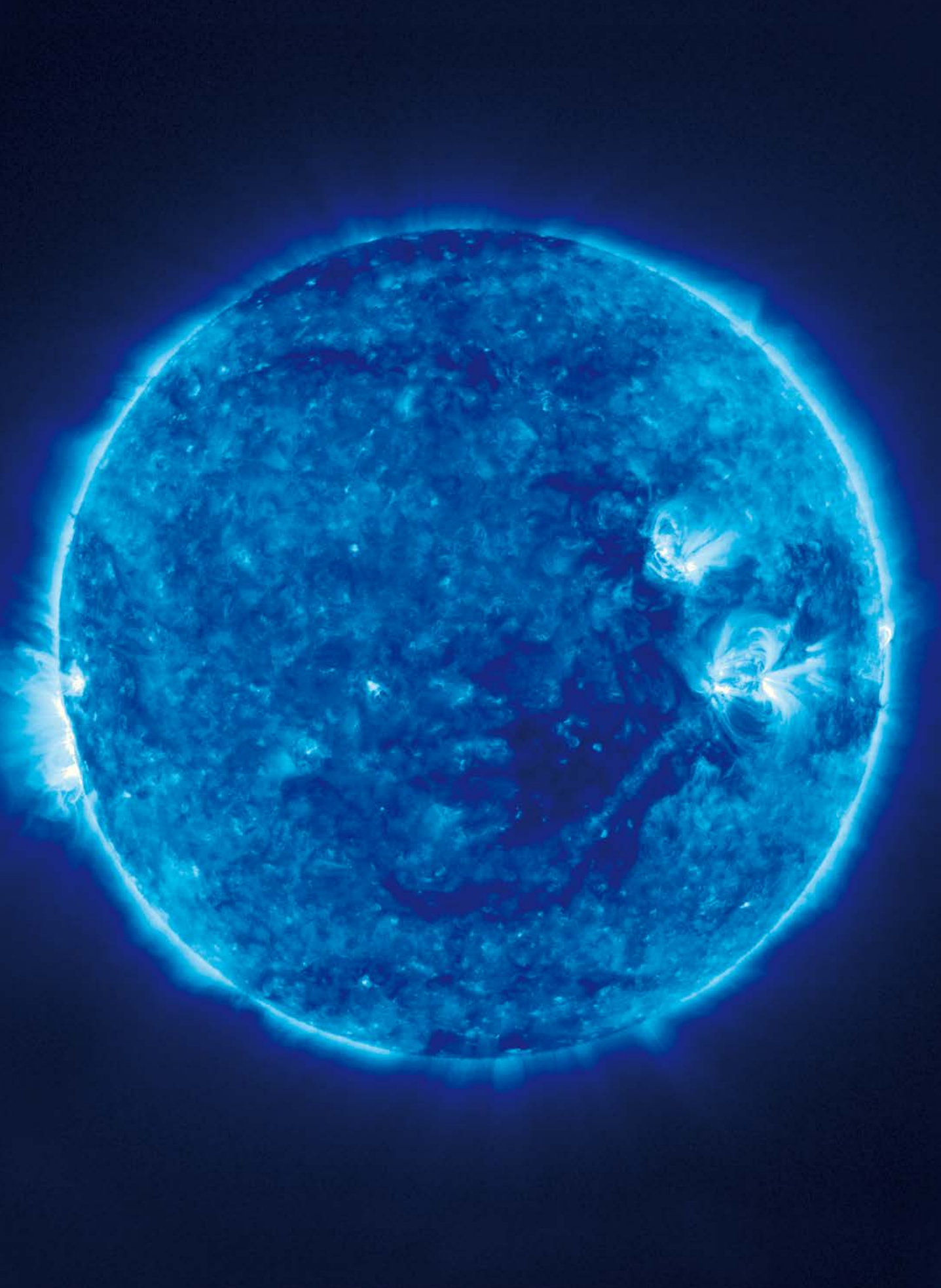
Dans la cinquième partie, Alfred Vidal-Madjar et André Brack font le point des recherches concernant l'apparition de la vie sur Terre et évoquent ce que l'on fait pour chercher à savoir si nous sommes seuls ou non. L'ouvrage se termine par la section intitulée « de nouveaux regards sur le ciel » à l'intérieur 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 liées 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

Page précédente – Le soleil photographié en UV. SOHO/EIT. ■

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 $1{,}989.10^{30}$ 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 kg. 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 kg. m^{-3} et la pression s'y élève à $2{,}33\ 10^{11}$ 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°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 $3{,}9\ 10^{23}$ 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 5 770 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 6 200 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

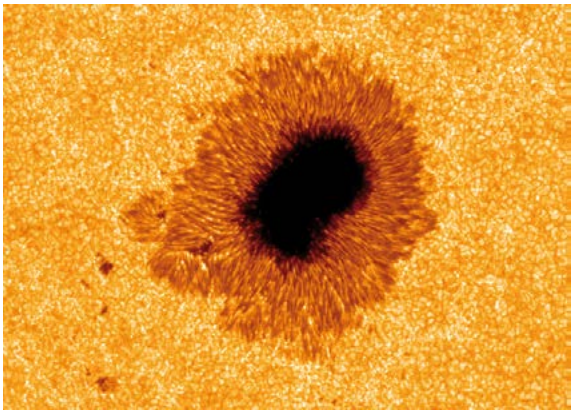


Fig. 1 – **Granulation et tache solaire.** Cette image a été obtenue par l'instrument SOT sur le satellite japonais Hinode à la longueur d'onde 430 nm (bande dite « G » dans le bleu). Ce rayonnement est issu de la photosphère. La zone couverte est de 120 000 sur 100 000 km. On distingue la granulation 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 centaines 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,

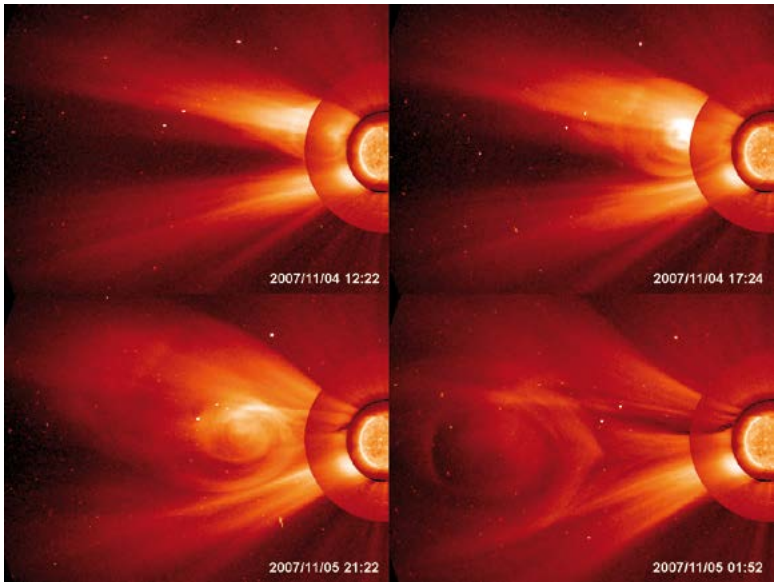


Fig. 2 – **Couronne et Éjection de Masse Coronale (CME).** Chaque image, qui représente l'évolution temporelle d'une CME, est constituée d'un montage de trois images obtenues par la sonde STEREO de la NASA : à droite, l'image centrale, dans l'extrême ultraviolet, visualise la couronne très près du disque 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 emballements 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-

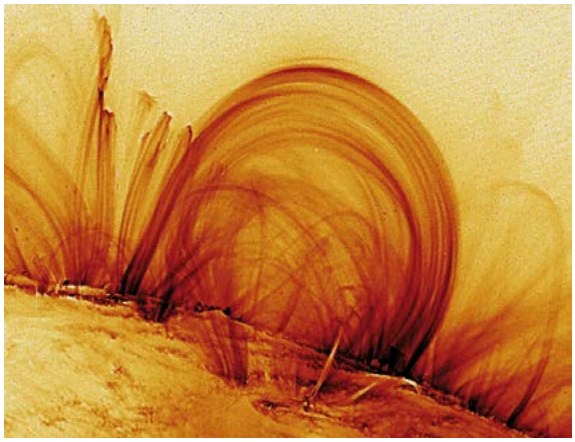


Fig. 3 – **Boucles coronales.** Cette image a été obtenue dans l'euv par le satellite TRACE de la NASA. Elle a été traitée de façon à mettre en évidence la structure fine de boucles coronales en-dehors du bord solaire. Les régions sombres correspondent à de la matière plus froide que le milieu coronal 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). ■

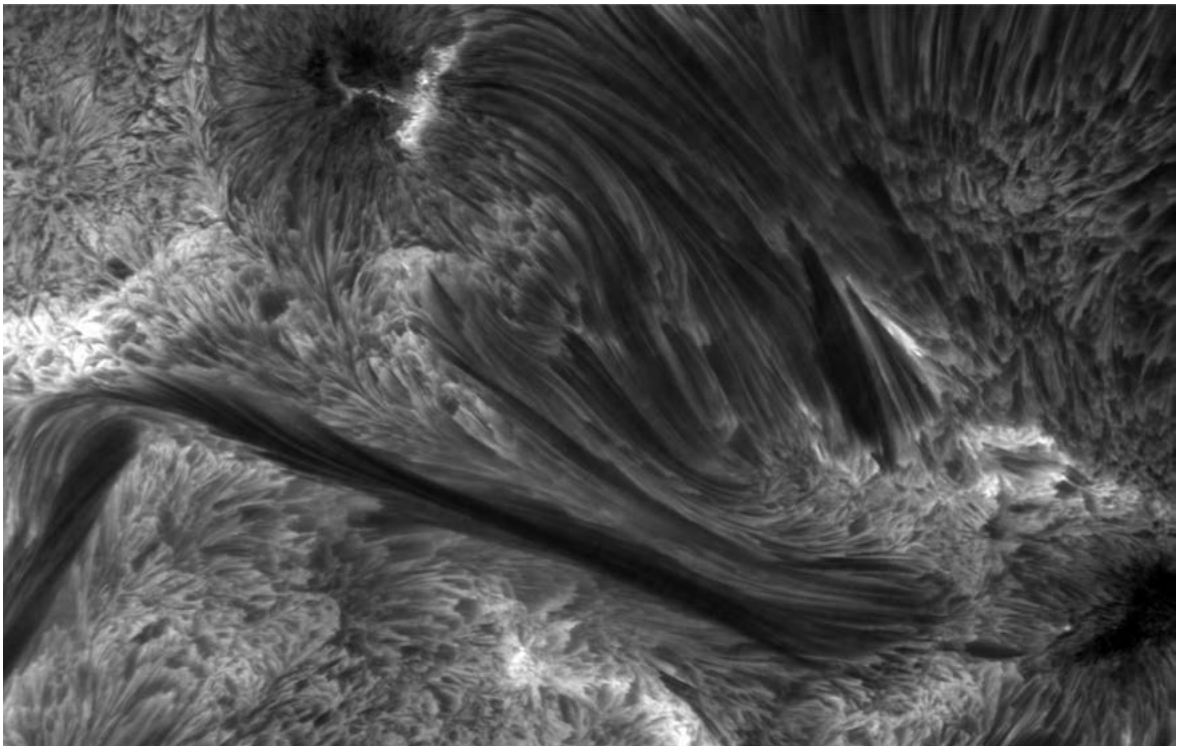


Fig. 4 – **Filament dans la raie Hα.** Cette image a été obtenue le 22 août 2003 par le Swedish Solar Telescope (Îles Canaries) dans une raie de l'Hydrogène située dans la partie rouge du spectre (656.3 nm). Le filament lui-même constitué de fils très allongés est situé dans la partie basse de l'image. 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

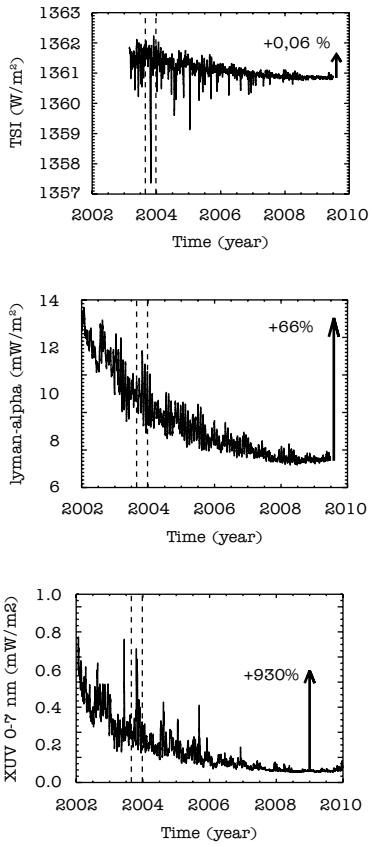


Fig. 5 – Variations de l'irradiance totale ou Total Solar Irradiance (TSI) (5a en haut), de l'irradiance UV (raie Lα de l'Hydrogène) (5b au milieu) et de l'irradiance XUV (en dessous de 0.7 nm) (5c en bas) entre les années 2002 et 2009. La période de temps entre les deux lignes pointillées correspond 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 chasse-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

de Wolf », du nom de l'astronome suisse qui l'a proposé. Mais on peut aussi, grâce aux magnétomètres spatiaux, mesurer le flux magnétique total du Soleil (indépendamment de l'orientation du champ, Nord ou Sud). Les cycles ainsi mis en évidence ont une période de l'ordre de 11 ans, en moyenne, et c'est donc au bout de 22 ans environ que le Soleil retrouve une configuration magnétique identique (par exemple un pôle Nord magnétiquement Nord et un pôle Sud magnétiquement Sud).

On peut aussi, depuis l'avènement des radiomètres spatiaux, c'est-à-dire depuis plus de 25 ans, estimer précisément le rayonnement total du Soleil (au moins celui mesuré depuis la Terre), une quantité appelée irradiance totale. On a constaté alors que ce rayonnement suit fidèlement les variations cycliques magnétiques et que sa fluctuation entre minimum et maximum est de l'ordre de 0,1 % (soit une variation d'éclairement de + ou – 1,5 W/m^2 à l'orbite terrestre).

Mais concentrons notre attention sur les huit dernières années (figure 5). Nous constatons que l'irradiance totale a eu des variations épisodiques de quelques W/m^2, jusqu'à 0,3 %, lors du passage de grosses taches à la fin de l'année 2003 (zone en pointillés dans la figure 5a) mais qu'en moyenne elle a baissé de moins d'un W/m^2 entre 2002 et la mi-2009. Si nous examinons plus finement les variations d'irradiance dans l'ultraviolet (figure 5b), nous constatons qu'aux périodes de chute d'irradiance totale (passage de taches) correspond une augmentation de l'émission UV (zone en pointillés). Mais aussi qu'entre 2002 et 2009, l'irradiance UV a baissé de 70 % environ. Allons plus loin dans l'UV (figure 5c). Ici encore l'irradiance (en X et en UV plus courts que 7 nm) augmente ponctuellement avec le nombre de taches (zone en pointillés) et diminue entre 2002 et 2009, cette fois de près de 800 % ! Sachant que ce sont ces rayonnements UV qui ionisent l'atmosphère terrestre (jusqu'à créer une couche totalement ionisée appelée ionosphère, celle qui réfléchit certains rayonnements radios), on conçoit que l'impact radiatif du Soleil, notamment dans l'UV, sur le climat de notre Terre fasse l'objet de nombreux travaux et, en ce qui concerne le passé et l'avenir, de nombre de spéculations.

Mais comment remonter dans le passé ? C'est la mise au point de la lunette puis du télescope, et donc la possibilité de dénombrer les taches visibles à la surface, qui a permis de reconstituer l'activité sur les 400 dernières années. Les résultats montrent des cycles solaires qui diffèrent entre eux par la durée réelle d'un cycle (entre 10 et 12 ans) et le nombre de taches au maximum (quand il n'y a pas plusieurs maxima comme en 2000 et 2002 !). Et surtout une période stupéfiante quasiment sans aucune tache, entre 1650 et 1715, période dite « minimum de Maunder », du nom de l'astronome anglais E. Maunder (qui, coïncidence, correspond au règne de notre roi Soleil !). Les climatologues ont noté que l'Europe a alors connu des hivers très rigoureux (les Londoniens patinaient sur la Tamise). Et il est tentant d'associer cette absence d'activité solaire à une baisse prolongée d'irradiance reçue par la Terre. Les modèles climatiques prédisent en effet qu'une diminution d'irradiance totale de 0,25 %, telle qu'elle a pu se produire pendant ce minimum, conduit à une diminution globale de la température de la Terre de l'ordre de 0,15 C.

Permet-elle d'expliquer les aberrations climatiques de l'époque ? Et comment connaître exactement la chute réelle d'irradiance pendant le minimum de Maunder ? Est-on sûr

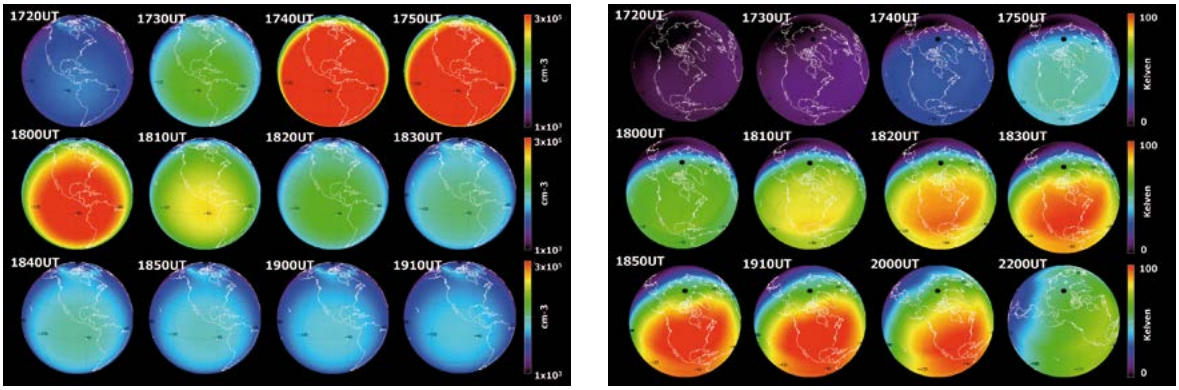


Fig. 6 – **Variations de température et densité dans la thermosphère terrestre suite à une éruption solaire.** Le groupe d'images du haut représente la répartition de température à 350 km d'altitude dans la thermosphère de la Terre, en fonction du temps indiqué en Temps Universel (UT). Noter l'échelle de variation entre 0 et 100 degrés K. Le groupe d'images du bas représente la répartition de densité à 110 km d'altitude dans la thermosphère en fonction du temps. Noter l'échelle de variation entre 10^3 et 10^5 électrons par cm3. La densité varie quasi instantanément avec la production de l'éruption (l'éruption, très intense commence à 17 h 17 et connaît son maximum à 17 h 40) alors que la température ne commence à augmenter qu'une dizaine de minutes plus tard. (Courtesy Gang Lu, NCAR/HAO). ■

aussi qu'il a fait si froid partout et tout le temps ? Le grand incendie de Londres de 1666 n'a-t-il pas coïncidé avec une forte canicule ? N'y a-t-il pas eu en Bourgogne des vendanges précoces donc des étés chauds dans la même période ? Plus troublant encore, l'astronome américain J. Eddy a montré, en étudiant la rotation des quelques taches visibles sur le disque observées au cours des années 1642-1644, que les taches tournaient plus vite et que la rotation différentielle était plus forte, soit les conditions idéales pour créer par un effet dynamo des champs magnétiques plus puissants !

Est-il possible d'utiliser une autre méthode que le dénombrement des taches et de remonter plus loin dans le temps ? La réponse est oui, si l'on examine des effets géophysiques tels que le contenu isotopique des arbres (méthode de datation du ^{14}C) ou des glaces (méthode de datation du ^{10}Be par laquelle les glaciologues français C. Lorius et J. Jouzel se sont illustrés). Le même astronome américain J. Eddy avait dès 1977 montré que la courbe de variation avec le temps du ^{14}C indiquait un minimum de Maunder, mais il remontait beaucoup plus loin encore pour prouver que le Soleil avait eu un très fort minimum d'activité vers 5 000 ans avant J.-C.

Il ne faudrait pas toutefois douter de l'influence de la variabilité solaire sur l'atmosphère neutre et ionisée de la Terre ! L'exemple de l'impact des éruptions est assez éloquent. Nous avons vu que des particules solaires sont puissamment accélérées quand la stabilité magnétique d'un centre actif est rompue. Si certaines particules vont heurter la surface solaire, d'autres s'en éloignent, avec une énergie qui peut atteindre quelques GeV (voir p. 281), pour frapper la Terre. Elles arrivent après les rayonnements X et EUV dont l'impact se mesure par des augmentations persistantes de température (jusqu'à 100 C) et de densité électronique (par un facteur 100) dans l'atmosphère neutre terrestre (figure 6). Les particules moins énergétiques arrivent, elles, un ou deux jours plus tard mais leurs effets peuvent être plus forts et persistants. Escortées d'un puissant champ magnétique, elles peuvent faire reculer le bouclier magnétique que constitue la magnétosphère terrestre. Elles génèrent des orages magnétiques connus depuis l'invention de la boussole par les Chinois. Entre autres effets, elles conduisent à l'exposition des satellites aux particules solaires (et donc à des pannes fort coûteuses), aux ruptures du réseau de distribution électrique dans les pays nordiques, et bien sûr, aux majestueuses aurores boréales qui sont la trace de précipitations de particules appartenant à l'atmosphère terrestre.

Les effets climatiques durables d'éruptions répétées restent toutefois à prouver.

La cyclicité solaire et la Terre : aujourd'hui et demain…

Le comportement bizarre du Soleil en 2008-2009 a conduit les physiciens solaires à se demander s'il ne préparait pas une phase du type « minimum de Maunder ». La fin du cycle 23 (commencé en 1996) était en effet attendue en 2007. Or, le minimum d'activité s'est prolongé en 2008 et même 2009, ce qui a conduit à de nombreuses conjectures sur le moment et l'intensité de la reprise d'activité du cycle suivant. Ces prévisions reposent aujourd'hui non seulement sur l'étude des cycles passés (parmi leurs nombreux paramètres on recherche des « précurseurs »), mais surtout sur l'étude physique des mouvements profonds de l'atmosphère susceptibles d'accélérer ou ralentir l'émergence de champs magnétiques dont nous avons vu le rôle capital dans l'activité solaire. Ces recherches, certes encore loin de prévisions « sûres », sont à mettre au crédit de la sismologie solaire qui permet de sonder l'intérieur du Soleil, qu'il s'agisse de sa densité, de sa température, de ses mouvements méridiens et azimutaux, et de son magnétisme local et global profond. Une vision du monde interne d'une étoile (le Soleil) qui aurait stupéfié l'astronome anglais sir A. Eddington qui avait affirmé que l'intérieur du Soleil resterait opaque à notre observation.

Quand démarrera donc le cycle 24 ? Les experts prévoient la mi-2009 (ce qui semble se confirmer), un maximum « modéré » vers 2012-2013, avec un nombre de taches près de deux fois inférieur à celui enregistré au maximum précédent en 2000-2002. Nous pouvons affirmer sans trop de risque que ce n'est pas cette chute d'activité qui contrebalancera le réchauffement climatique terrestre en cours…

Le Soleil et la vie sur Terre

Il est clair que le Soleil joue un rôle capital dans le bilan énergétique du Système solaire en général et de la Terre en particulier. Ce rôle a-t-il toujours été le même ?

On estime que sa luminosité (et donc l'irradiance totale déjà évoquée) était au début du Soleil plus faible d'environ 30 % qu'aujourd'hui. La Terre était donc alors très froide et les océans en principe gelés, ce qui n'est pas une condition très favorable à l'apparition de la vie. Or, il y a des preuves de vie (fossiles) dès le premier milliard d'années de notre Système solaire. C'est là un paradoxe encore mal expliqué (on pense par exemple à une hyper salinité des océans à cette époque), qui se double d'une autre énigme, celle des effets de l'activité du jeune Soleil. Si la luminosité moyenne du Soleil était plus faible qu'aujourd'hui, l'activité magnétique était sans doute plus forte car il tournait plus vite et fabriquait, par effet dynamo, un courant et un champ magnétique plus forts. On peut soupçonner qu'il envoyait dans l'espace interplanétaire des bouffées plus fortes de particules énergétiques plus violentes et déclen-

chait des éjections de masse coronale plus colossales et plus fréquentes. Son rayonnement X et UV était sans doute beaucoup plus intense et intermittent qu'aujourd'hui. Le vent solaire lui-même était peut-être dix fois plus fort qu'aujourd'hui.

Formation de la vie : des conditions exceptionnelles ?

On sait qu'un rayonnement UV énergétique peut briser des molécules, y compris l'ADN. C'est une indication supplémentaire que la vie est apparue en premier lieu dans les océans, à l'abri de ces rayonnements et particules meurtriers. Reconstituer ce scénario est une entreprise passionnante de recherche en bio-astronomie qui nécessite de connaître le présent et le passé du Soleil, de le comparer avec des étoiles équivalentes âgées d'un milliard d'années, telle Alpha du Centaure, et bien sûr de connaître une biologie fonctionnant dans les conditions très particulières de la jeune Terre.

Ce travail fascinant permet de focaliser la recherche d'autres « terres » (voir le chapitre 24) autour d'étoiles « favorables » comme les étoiles de type solaire (G) mais aussi des étoiles plus froides, moins actives, et surtout plus nombreuses dans notre Galaxie.

La disparition programmée de la vie :

Si la luminosité du Soleil était plus faible de 30 % aux débuts du Soleil, c'est qu'elle croît continûment (mais non linéairement) avec l'âge. Dans un milliard d'années environ, elle passera à une valeur de quelque 10 % supérieure à celle d'aujourd'hui, ce qui signifie une augmentation de température de l'ordre de quelques dizaines de degrés, susceptible de vaporiser les océans. On voit mal alors comment la vie sur Terre pourrait subsister.

Cet âge critique met des bornes indépassables à la vie sur Terre. Il ne nous dispense pas, au contraire, de maintenir les meilleures conditions pour que cette vie continue sans dommage et que notre civilisation atteigne des niveaux de sagesse et de savoir lui permettant d'envisager la pacifique colonisation « d'autres mondes ».

Ce savoir passe aussi par une compréhension des humeurs de notre Soleil, qui peuvent mettre en danger le moindre voyage interplanétaire. Ces humeurs étant dictées par ses champs magnétiques changeants, il est de toute première importance de les observer pour comprendre le fonctionnement d'une dynamo plus de cent fois plus grande et près de dix mille fois plus intense que celle de la Terre.

Les physiciens solaires peuvent compter sur une multitude de missions spatiales, dont la mission Picard du CNES et Solar Dynamics Observatory de la NASA qui observera le Soleil 24 heures sur 24 toutes les 10 secondes ! Vers 2016-2017, d'autres missions commenceront à explorer notre étoile *in situ* (selon le mode des missions planétaires) : la mission Solar Orbiter de l'Agence spatiale européenne ira visiter la banlieue coronale et sortira de l'écliptique pour sonder les pôles du Soleil. La mission Solar Probe Plus de la NASA, plus kamikaze, se rapprochera à moins de 7 millions de km (10 fois le rayon solaire) de la surface du Soleil pour déchiffrer les mystères du chauffage et de la turbulence de la couronne.

Sans doute en saurons-nous alors beaucoup plus sur la machine Soleil, une machine où se produisent des processus physiques très variés, allant des réactions thermonucléaires de fusion dans le cœur à la reconnexion magnétique dans la couronne. Une machine où les échelles spatiales vont du rayon du Soleil au km et où les échelles temporelles peuvent aller de la seconde (au cours d'une éruption) à la dizaine d'années (l'échelle d'un cycle). Un système complexe dont la compréhension est nécessaire pour les progrès de l'astrophysique et de la physique des relations Soleil-Terre.

Références bibliographiques

Ouvrages généraux d'astronomie qui contiennent des chapitres sur le soleil

- *Grand Atlas de l'Astronomie,* 1993, sous la direction de J. Audouze et G. Israël, Encyclopaedia Universalis.
- *Le Grand Livre du Ciel*, 2005, P. de la Cotardière et R. Ferlet, Paris, Bordas.
- M. Marcelin, 2004, *L'astronomie*, Paris, Hachette.

Sur le Soleil

- P. Lantos, 1997, *Le Soleil en face*, Paris, Masson.
- K. Lang, 1997, *Le Soleil et ses relations avec la Terre*, Berlin, Springer Verlag.
- J. Lilensten & J. Bornarel, 2001, *Sous les feux du Soleil*, Paris, EDP Sciences.
- S. Vauclair, 2002, *La chanson du Soleil*, Paris, Albin Michel.
- C. Ngô, J.-P. Verdet, J.-C. Vial, *Soleil*, 2004, Paris, Fayard-Cité des sciences et de l'industrie.

Et aussi

- J.-C. Vial, 2004, 3 cours sur « Le Soleil, étoile de la Terre », mars-avril 2004, Les carrefours du savoir, Le collège de la Cité des Sciences (cours disponibles sur : http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/college/03-04/carrefours/cours/03-04-soleil/03-vial/index. htm).

2. Disques protoplanétaires et formation planétaire

Aurélien Crida et Alessandro Morbidelli

Introduction

Les planètes tournent autour du Soleil.

Cette phrase banale ne l'a pas toujours été (on sait que Copernic et Galilée ont risqué gros pour l'avoir affirmé), mais les mesures précises de Tycho Brahé analysées par Kepler ne laissent plus place au doute : Mars et les autres planètes suivent une orbite elliptique dont le Soleil occupe l'un des foyers. C'est la première des trois lois de Kepler décrivant le mouvement des planètes, publiées en 1609 et 1619. Ces lois sont uniquement fondées sur des observations. Ce n'est que quelques décennies plus tard que Newton montrera qu'elles se déduisent aisément de sa théorie de la gravitation universelle ; déjà au XVII^{e} siècle, la théorie était en retard sur l'observation… Une observation encore plus simple, et à l'époque inexpliquée, est que les planètes vues depuis la Terre parcourent toutes la même zone du ciel étoilé : le Zodiaque, qui traverse 12 célèbres constellations (ainsi qu'une treizième, Ophiucus). Cela signifie qu'elles tournent autour du Soleil dans le même plan (l'écliptique) et dans le même sens.

Pourquoi ? D'où viennent les planètes ? Une idée émerge alors, via notamment Kant et Laplace : les planètes se seraient condensées à partir d'un disque de gaz et de poussières qui tournait autour du Soleil à l'origine. Le Système solaire aurait simplement gardé cette forme. À partir de là, la théorie va prendre de l'avance sur les observations. Sans qu'un tel disque ait jamais été observé, les théories de formation planétaire vont se développer dans ce cadre ; il faut dire que l'idée d'un disque entourant les jeunes étoiles est en accord avec les théories de formation stellaire. À la fin des années 1970, début des années 1980, Weidenshilling et Hayashi vont développer le concept de Nébuleuse Solaire de Masse Minimale (NSMM) : il s'agit d'un disque-étalon obtenu en effectuant mentalement l'opération inverse ; en pulvérisant les planètes et en étalant les débris autour de leurs orbites, on obtient un disque de poussières relativement homogène. Si on ajoute du gaz en quantité suffisante, il devient un disque protoplanétaire. Ce disque virtuel donne plus de consistance à la théorie de formation planétaire, et fournit aux théoriciens une idée des paramètres physiques de l'environnement dans lequel les planètes doivent se former. Toutefois, l'idée de la NSMM repose sur deux hypothèses fondamentales : que les planètes se sont formées *localement*, à partir des solides qui étaient autour de leurs orbites actuelles, et qu'elles se sont formées à partir de *tous* les solides disponibles, sans perte. Nous allons voir plus loin que ces deux hypothèses sont sans doute à remettre en question. Si la formation planétaire consiste principalement à coller ensemble les poussières d'un disque protoplanétaire, et à entourer éventuellement de gaz les protoplanètes ainsi obtenues, cela ne se fait pas sans mal.

Disques proto-planétaires

Lors de la formation d'une étoile, un nuage moléculaire (une nébuleuse froide et dense contenant du H_2) s'effondre sur lui-même sous l'effet de sa propre gravité. Au centre, la densité, la pression, et la température deviennent si élevées que les premières réactions de fusion nucléaire démarrent : l'étoile s'allume. Mais si le nuage tournait, ne fût-ce que très légèrement, sur lui-même au départ, il va conserver son moment cinétique[1] au cours de l'effondrement. Comme le patineur qui tourne plus vite en ramenant les bras le long du corps, le gaz tourne de plus en plus vite en tombant vers le centre. Finalement, la force centrifuge empêche la chute finale vers l'étoile dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation. L'étoile devrait donc être entourée d'un disque qui lui tourne autour.

On observe que les étoiles âgées de quelques millions d'années (l'équivalent d'un mois pour un homme de 80 ans d'espérance de vie) émettent trop d'infra-rouge relativement à leur masse et leur température. On appelle ces bébés étoiles des T-Tauri. Leur excès d'infra-rouge est la signature spectrale d'un autre objet situé dans le voisinage de l'étoile. L'explication la plus simple est qu'elles sont entourées de quelque chose qui rayonne dans l'infra-rouge, sans pour autant la masquer. Par exemple, un disque de gaz et de poussières,

chauffé par l'étoile... Si on analyse finement l'excès infra-rouge observé, on peut même en déduire la masse et la température du disque, ainsi que sa structure sommaire : s'il manque les longueurs d'ondes correspondant aux températures caractéristiques d'une certaine région, on en déduit que le disque présente un trou à cet endroit.

Structure des disques protoplanétaires

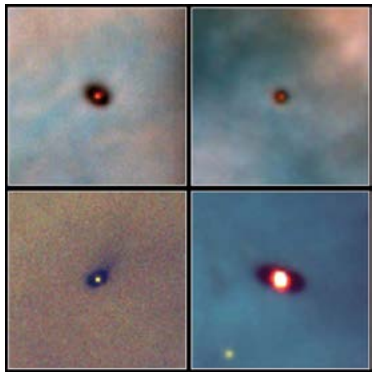
En 1995, le télescope spatial Hubble a enfin photographié plusieurs de ces disques (voir figure 1). Depuis, la technique de l'interférométrie (utilisation de plusieurs télescopes à la fois) a permis des observations plus précises dans diverses longueurs d'ondes (en particulier au Plateau de Bure, dans les Hautes-Alpes). La prochaine génération d'interféromètres (par exemple ALMA) apportera encore de nouvelles avancées pour étudier plus en détail de nombreux disques. Un disque protoplanétaire typique a un rayon de quelques centaines d'unités astronomiques[2] (UA), et une épaisseur à peu près proportionnelle à la distance à l'étoile centrale, ce qui lui donne un profil en forme de nœud papillon. Plus précisément, si H est la hauteur du disque et r la distance à l'étoile (voir figure 1), on a en général $H/r \approx 0{,}05$ (augmentant légèrement avec r).

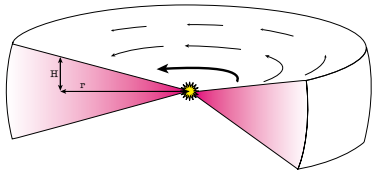
C'est la pression du gaz qui est responsable de l'épaisseur du disque : sans pression, le disque s'effondrerait verticalement et deviendrait complètement plat ; c'est le cas des anneaux de Saturne qui ne sont pas faits de gaz mais de blocs de glace. Ainsi, connaître l'épaisseur des disques donne accès à la pression et donc à la température du gaz. Dans le plan médian du disque, celle-ci est de l'ordre de 150 degrés Kelvin à 1 UA de l'étoile, et décroît quand on s'éloigne de l'étoile. La composition chimique du disque va donc dépendre de l'endroit considéré. En particulier, il existe une limite au-delà de laquelle l'eau se trouve à l'état de glace solide tandis que dans les régions plus internes et plus chaudes, elle ne peut subsister qu'à l'état de vapeur. Cette ligne des glaces se situe entre 3 et 5 UA de l'étoile, selon la masse de l'étoile et l'âge du disque. À l'extérieur de la ligne des glaces, il y a donc plus de matériel solide disponible pour la formation planétaire, et surtout, de l'eau se trouve incorporée, sous forme de glace, aux embryons planétaires qui s'y forment. Schématiquement, cela explique la différence entre les astéroïdes de la ceinture principale du Système solaire, située entre Mars et Jupiter, entre 2 et 3,3 UA, qui sont secs, rocheux ou métalliques, et les comètes, situées au-delà de Jupiter (elle-même à 5,2 UA du Soleil), composées pour moitié de glace.

La composition d'un disque protoplanétaire est environ 99 % d'hydrogène et d'hélium (que nous appellerons gaz) et 1 % d'éléments plus lourds (que nous appellerons poussières). Parmi ces poussières, on trouve principalement de l'oxygène, du carbone, du silicium, du fer, du nickel, le tout combiné en molécules comme CO, CO_2, H_2O, CH_4, SiO_2, à l'état solide ou vapeur... La densité totale dans la NSMM est 60 M_{Terre}/UA^2 à 1 UA du Soleil, et décroît quand on s'éloigne de l'étoile, proportionnellement à $1/\sqrt{r^3}$. La densité mesurée dans les disques est en général similaire bien qu'un peu supérieure, mais varie selon l'étoile, et surtout selon l'âge du disque : la masse totale du disque est de l'ordre de 10 % de la masse de l'étoile au début, mais décroît régulièrement, jusqu'à la disparition du disque.

Évolution des disques

En fait, à chaque fois qu'un disque est observé ou détecté, on observe aussi des signatures d'accrétion : du gaz tombe en permanence sur l'étoile, qui l'absorbe, et la masse du disque diminue. Pourquoi le gaz ne reste-t-il pas sagement en orbite autour de l'étoile ? Parce que la troisième loi de Kepler impose une vitesse différente sur chaque orbite, qui décroît comme l'inverse de la racine carrée de la distance à l'étoile (par exemple, Mercure se meut autour du Soleil à 47 km/s, la Terre à 30 km/s, Jupiter à 13 km/s, etc.). Considérons un cercle centré sur l'étoile. Le gaz situé à l'intérieur du cercle tourne plus vite que le gaz situé à l'extérieur. Par conséquent, le frottement à l'interface entre l'intérieur et l'extérieur, causé par la viscosité du gaz, provoque un freinage du disque interne, et une accélération du disque externe. Il y a transfert d'énergie et de moment cinétique de l'intérieur vers l'extérieur. Ceci est vrai pour tout cercle autour de l'étoile. Nous venons de démontrer que dans un disque de gaz en orbite autour d'un corps central, le moment cinétique et l'énergie sont continuellement transférés par la viscosité de l'intérieur vers l'extérieur. Or le moment cinétique et l'énergie d'un corps augmentent avec r, et détermi-


a



b

Fig. 1 – Observations (a) et schéma en coupe (b) de disques protoplanétaires. M.J. McCaughrean (MPIA), C.R. O'Dell (Rice University), NASA. ■

nent le rayon de son orbite (conséquence de la troisième loi de Kepler). Par conséquent, le disque s'étale : les régions les plus externes, accélérées, s'éloignent de l'étoile, tandis que les parties internes, freinées, s'en approchent. Ainsi, l'étoile absorbe finalement presque toute la masse du disque. D'après les observations, ce processus dure entre 3 et 10 millions d'années, selon principalement la masse de l'étoile centrale (plus elle est massive, plus le disque évolue et disparaît rapidement).

Cela pose un problème : la viscosité du gaz est trop faible pour expliquer une accrétion si rapide. On considère donc que le gaz est turbulent, car la turbulence a exactement le même effet que la viscosité pour transférer du moment cinétique et de l'énergie. D'où vient donc cette turbulence ? Cette question est l'objet de nombreux débats parmi les scientifiques. La cause la plus généralement admise est l'Instabilité Magnéto-Rotationnelle : à cause de la rotation différentielle décrite ci-dessus, les lignes de champ magnétique, entraînées par les ions et grains chargés électriquement présents dans le gaz sont étirées, distordues, et finissent par craquer. Dans certaines régions du disque, il pourrait ne pas y avoir assez de grains ionisés pour que l'instabilité ait lieu : cela permet d'envisager des zones mortes dans lesquelles le disque ne serait pas turbulent et donc presque pas visqueux. L'existence de zones mortes est elle aussi en débat…

En résumé, un disque protoplanétaire est un disque de gaz et de poussières (environ 1 %) autour d'une étoile jeune, de rayon une centaine d'UA, assez fin mais pas complètement plat, plus chaud au centre que vers l'extérieur, qui tombe petit à petit sur l'étoile à cause de sa viscosité (causée par la turbulence), et disparaît en quelques millions d'années. C'est dans ce contexte que doivent se former les planètes, en particulier celles du Système solaire il y a 4,5 milliards d'années.

Formation planétaire

Les poussières se trouvent dans le disque initialement sous la forme de grains micrométriques. Pour obtenir finalement des planètes de plusieurs milliers de kilomètres de rayon, il faut donc multiplier la taille des corps solides par quelques millions de millions. On se doute que la croissance des solides est due à des processus différents selon l'ordre de grandeur de la taille considéré. Il y a donc plusieurs étapes dans la formation planétaire.

Embryons

Lorsqu'ils se rencontrent, les grains se collent grâce à des interactions atomiques, formant des agrégats filamenteux pouvant atteindre plusieurs millimètres. Les grains et les agrégats ne sont pas sensibles à la pression du gaz. Par conséquent, ils ne peuvent pas rester dans l'épaisseur du disque, mais tombent dans son plan médian. Ce phénomène s'appelle la sédimentation, et permet d'obtenir une couche centrale dans le disque où la densité de solides est plus forte. Les agrégats peuvent alors se rencontrer et, si la vitesse y est favorable (ni trop lente ni trop rapide), fusionner. Petit à petit, des agrégats de plus en plus gros se forment (comme la poussière forme lentement des moutons sous les lits).

Mais cette croissance est fragile : une collision trop violente et l'agrégat est disloqué. De plus, les agrégats subissent un vent de face de la part du gaz, car ce dernier tourne légèrement moins vite autour de l'étoile que ce qu'imposent les lois de Kepler (à cause de la pression encore). Les agrégats perdent donc de l'énergie et spiralent vers l'étoile centrale, ce qui menace sérieusement leur survie. Ce frottement est le plus sensible pour des agrégats de 10 cm à 10 m, et la difficulté de survivre à cette taille assez longtemps pour devenir plus gros est connue comme la barrière du mètre.

Une fois cette barrière franchie, la gravitation, auparavant négligeable, commence à jouer un rôle significatif pour fusionner des corps de taille supérieure au kilomètre (appelés planétésimaux). En incurvant les trajectoires de deux corps qui s'approchent, la gravité facilite les collisions. Cet effet de focalisation est d'autant plus efficace qu'un corps est massif. On entre donc dans un régime dit de croissance emballée, dans lequel les plus gros objets grandissent plus vite que les plus petits, et se détachent rapidement du commun des planétésimaux. Pour faire clair, ce régime est l'équivalent astronomique du capitalisme libéral.

Lorsqu'un objet devient si gros qu'il perturbe les planétésimaux et leur donne une vitesse d'agitation élevée (de l'ordre de sa propre vitesse de libération), la focalisation gravitationnelle devient négligeable. Dès lors, les écarts de masse diminuent entre les gros objets, qui continuent à croître en absorbant des planétésimaux, mais moins vite s'ils sont plus massifs ; ce régime est appelé croissance oligarchique, puisqu'il crée et entretient une classe de plusieurs dominants. Après un à trois millions d'années, les « oligarques » ont absorbé tous les solides présents dans leur zone d'influence (autour de leur orbite, d'une largeur proportionnelle à leur masse). Ils ont alors atteint leur masse d'isolation, de l'ordre de celle de la Lune vers 1 UA et plus grande quand on s'éloigne de l'étoile. On obtient ainsi des embryons planétaires, sur des orbites suffisamment espacées pour éviter toute collision à court terme.

De récents modèles permettent de franchir la barrière du mètre et d'obtenir directement des embryons, en utilisant la turbulence du disque. En effet, entraînés par le gaz, les agrégats centimétriques de poussières tendent à converger au centre d'un tourbillon. Il semblerait que sous certaines conditions, on puisse atteindre une densité de solides telle que les poussières soient

gravitationnellement liées les unes aux autres. Elles ne pourraient alors plus que s'agglomérer pour former un embryon dont la taille pourrait atteindre plusieurs centaines de km. Encore à l'étude, ces modèles ne font pas l'unanimité dans la communauté scientifique, bien qu'ils présentent de nombreux avantages.

Planètes géantes

Au-delà de la ligne des glaces, les embryons peuvent sans doute atteindre plusieurs fois la masse de la Terre. À partir de 10 masses terrestres, la gravité de l'embryon est suffisante pour retenir du gaz du disque, et constituer une enveloppe d'hydrogène et d'hélium. Pour cette raison, on appelle aussi ces embryons planétaires des cœurs.

L'accrétion d'une couche de gaz significative prend du temps : la pression s'oppose à l'effondrement du gaz sur le cœur. Durant plusieurs millions d'années, l'accrétion se poursuit lentement : plus le cœur acquiert de la masse en accumulant des solides, plus il est capable de retenir une grande enveloppe de gaz, qui se refroidit lentement. L'enveloppe ne doit pas être confondue avec l'atmosphère d'une planète : elle est beaucoup plus étendue et moins dense. Un mini-disque entoure la planète, par lequel elle accrète du gaz, à l'instar de l'étoile. Cette phase dure plusieurs millions d'années, ce qui peut être trop long étant donné la durée de vie d'un disque. Elle peut cependant être accélérée si la migration (voir section suivante) permet au cœur solide de grossir plus vite, en allant chercher de nouveaux solides hors de sa zone d'influence désormais vide.

Si la masse de l'enveloppe atteint environ 100 masses terrestres, la pression ne peut plus la soutenir, et l'enveloppe s'effondre. Tout le gaz disponible est alors absorbé par la planète, qui atteint rapidement la masse de Jupiter, voire la dépasse. Comme rien (ou presque) ne peut arrêter l'effondrement, on voit que la quantité de gaz disponible déterminera la masse finale de la planète. Or, nous avons vu que la densité de gaz dans le disque protoplanétaire diminue au fil du temps. Cela pourrait expliquer la masse relativement modérée de Saturne : si elle s'est formée plus tard que Jupiter, il y avait moins de gaz à disposition. De plus, Saturne et Jupiter sont enrichies en éléments lourds par rapport à la composition solaire (et donc au disque proto-solaire initial), ce qui pourrait venir du fait qu'elles se sont formées à partir d'un disque ayant déjà perdu une bonne partie de son gaz.

Si la masse critique pour l'effondrement n'est pas atteinte avant que le disque de gaz ne se dissipe complètement, la planète ne deviendra jamais une géante gazeuse, mais restera sous la forme d'un gros cœur de roches et glaces d'une quinzaine de fois la masse de la Terre, entouré d'un peu d'hydrogène et d'hélium. C'est probablement ce qui s'est passé pour Uranus et Neptune.

Mentionnons également une alternative au modèle d'accrétion de cœur décrit ci-dessus : l'instabilité gravitationnelle. Selon cette idée, certaines parties du disque s'effondrent sur elles-mêmes sous l'effet de leur propre gravité, à l'instar du nuage moléculaire qui avait donné naissance à l'étoile. Le résultat de cet effondrement rapide serait une planète géante. Toutefois, il semble difficile que les conditions de densité et température soient réunies dans le disque pour qu'un tel effondrement ait lieu, et il ne pourrait expliquer ni l'enrichissement de Jupiter et Saturne, ni l'existence d'Uranus et Neptune. La plupart des planétologues s'accordent à penser que l'instabilité gravitationnelle n'a probablement lieu que rarement, dans les parties les plus lointaines du disque, à des dizaines voire centaines d'UA de l'étoile, mais c'est un sujet de recherche et de débats très actuel.

Planètes telluriques

Reprenons nos embryons de taille lunaire, trop petits pour retenir du gaz, qui se trouvent dans les régions plus internes du système. Lorsque le disque de gaz disparaît, qui tend à rendre circulaires les orbites des embryons, ces derniers peuvent acquérir des orbites allongées (ou excentriques[3]) car les uns perturbent le mouvement des autres. Ils peuvent alors se croiser. C'est ainsi que démarre la phase des impacts géants.

En 30 à 100 millions d'années (selon notamment l'excentricité de l'orbite de Jupiter à cette période), les embryons vont fusionner par collisions violentes, jusqu'à ce que le nombre d'objets ait décru suffisamment pour que la configuration orbitale soit stable. Finalement, il ne restera dans le Système solaire que les 4 planètes telluriques que nous connaissons actuellement, ce qui est cohérent avec les simulations numériques, dans lesquelles on obtient en général de 3 à 5 objets de masses inférieures à deux fois la Terre. À noter que sa petite taille suggère que Mars serait en réalité un des embryons originaux, qui a échappé à cette phase de cannibalisme planétaire.

Un de ces impacts sur la jeune Terre peut, sous certaines conditions de masse et de vitesse de l'embryon projectile, créer un disque autour de la Terre, qui s'agglomère pour former la Lune. Des mécanismes d'équilibrage entre le disque (liquide) et la Terre (couverte d'un océan de magma) permettent d'expliquer la similarité de la composition isotopique de la Terre et de la Lune. Il faut pour cela que la composition des deux soit restée constante depuis, c'est-à-dire que cet impact devait être le dernier. De toute façon, l'arrivée d'un autre embryon sur Terre aurait déstabilisé l'orbite de la Lune. Les plus récentes estimations de l'âge de la Lune (60 à 120 millions d'années après la formation du Système solaire) sont en accord avec ce scénario.

Discussion

La théorie décrite ci-dessus n'est pas parfaite, il y a des problèmes de temps, la barrière du mètre, de nombreux aspects à raffiner, mais elle offre une idée satisfaisante de la formation planétaire : il semble logique que l'on forme dans un disque protoplanétaire des planètes telluriques proches de l'étoile, et des géantes gazeuses plus loin. Il semble donc probable que les autres étoiles abritent des systèmes planétaires semblables au nôtre, la théorie devance l'observation. La première observation d'une planète autour d'une étoile de type solaire en 1995 par Mayor et Queloz a donc fait l'effet d'une bombe : il s'agissait d'une planète d'environ la moitié de la masse de Jupiter, située à 0,02 UA de son étoile, 51-Pegasus. Aujourd'hui, sur les presque 300 exoplanètes connues de masse supérieure à une demi masse de Jupiter, 45 % sont plus proches de leur étoile que la Terre du Soleil, et 15 % orbitent à moins de 0,05 UA de leur étoile. Comment ces Jupiters chauds peuvent-ils se former ?

Migration planétaire

Lorsqu'une planète de masse respectable (plus grosse que la Lune) orbite autour de l'étoile au milieu du disque de gaz, elle est capable, par sa gravité, de perturber le gaz. Il se forme ainsi dans le disque une spirale en sur-densité (voir figure 2), qui à son tour perturbe le mouvement de la planète. En général, la planète est freinée, d'autant plus que la spirale est importante, donc d'autant plus que la planète est massive. La planète perd ainsi de l'énergie et du moment cinétique, et le rayon de son orbite décroît, à une vitesse proportionnelle à sa masse. Cette migration (dite de type I) de la planète dans le disque est très rapide : par exemple, pour un cœur de 10 M_{Terre} dans la NSMM à 5 UA, il suffit de 100 000 ans pour atteindre l'étoile. C'est un gros problème, puisqu'on devrait alors perdre tous les cœurs de planètes géantes dès qu'ils se forment, sans même leur laisser le temps d'acquérir une massive enveloppe de gaz.

Ce sujet de recherche est particulièrement actif, et plusieurs solutions à ce problème sont proposées. Localement, la migration de type I s'arrête si la densité du disque augmente brutalement vers l'extérieur ; ce serait le cas du bord interne d'une zone morte par exemple, et cela permet de sauver un cœur, qui à son tour fait barrage pour les autres. Globalement, la turbulence dans le disque cause sur la planète une force variable, qui la fait migrer de manière aléatoire, plutôt que constamment vers l'intérieur ; quelques cœurs peuvent ainsi échapper à la chute vers l'étoile. Il a aussi été démontré que si les variations de température sont prises en compte, un effet additionnel apparaît, capable de repousser la planète vers l'extérieur si la température (ou plus précisément l'entropie du gaz) décroît suffisamment rapidement lorsqu'on s'éloigne de l'étoile. Enfin, les interactions d'une petite planète avec des planétésimaux pourraient conduire à la faire migrer dans n'importe quelle direction, plus fortement encore que l'interaction avec le gaz. Il est donc certain que des corps de 1 à 30 masses terrestres migrent dans le disque, probablement rapidement, mais il n'est pas encore clair dans quelle direction et jusqu'où...

Dans le cas d'une planète géante, la force de la planète sur le gaz est telle qu'elle est capable de repousser le gaz et d'ouvrir un sillon autour de son orbite (voir figure 2). En effet, en attirant vers elle la spirale dense, la planète accélère le disque externe (ce qui l'éloigne de l'étoile), et freine le disque interne (ce qui le pousse vers l'étoile). Le disque est alors coupé en deux, avec la planète en orbite au milieu. Mais nous avons vu que le disque s'étale, et tombe vers l'étoile. La planète étant coincée dans le sillon doit suivre le disque : elle migre aussi vers l'étoile, au rythme cette fois-ci de l'étalement visqueux du disque. On peut donc amener lentement une planète géante formée loin de l'étoile (comme dans la partie précédente) jusqu'au voisinage proche de l'étoile. Cette migration (dite de type II) permet de comprendre l'observation des très nombreux « Jupiters chauds », comme 51-Peg b.

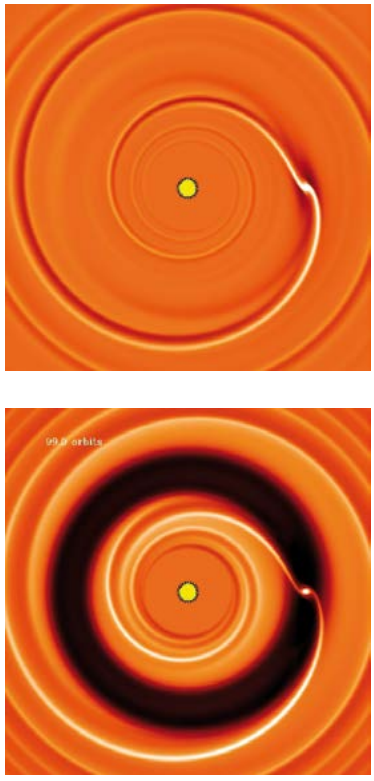


Fig. 2 – Simulations d'un disque protoplanétaire perturbé par une planète, vu de dessus. La couleur représente la densité du gaz : clair pour une sur-densité, sombre pour une sous-densité. L'étoile est au centre, en jaune ; la planète est à droite, au milieu du lobe blanc. En haut : petite planète créant une spirale. En bas : planète géante ouvrant un sillon. (Images : F. Masset). ■

Mais toutes les planètes géantes n'ont pas migré jusque-là, par exemple Jupiter et Saturne sont toujours à 5,2 et 9,6 UA du Soleil. La solution la plus simple à ce problème est de considérer que nos pla-

nètes géantes se sont formées à la fin de la vie du disque (comme évoqué en 3.2), et que donc elles n'ont pas eu le temps de migrer jusqu'au Soleil avant que le gaz ne se dissipe. D'autre part, on observe dans les simulations numériques que Jupiter et Saturne tendent à entrer au cours de leur migration en résonance de moyen mouvement : il s'agit d'un rapport simple entre leurs périodes orbitales. Par exemple c'est le cas si Jupiter fait exactement 3 tours autour du Soleil quand Saturne en fait 2. Dans pareil cas, tous les deux tours, Saturne retrouve Jupiter entre elle et le Soleil, qui lui donne une pichenette gravitationnelle. Ces pichenettes se produisent toujours au même endroit dans le cas d'une résonance de moyen mouvement, au lieu d'être réparties aléatoirement sur l'orbite de Saturne. Elles s'accumulent donc, ce qui modifie l'orbite de Saturne. Réciproquement, Saturne modifie l'orbite de Jupiter. Les deux géantes sont ainsi capables de s'échanger énergie et moment cinétiques, et de résister ensemble à la migration de type II : dans un sillon commun, Saturne est repoussée vers l'intérieur par le disque externe tandis que Jupiter est repoussée vers l'extérieur par le disque interne. Mais la résonance empêche les planètes de s'approcher l'une de l'autre, et Jupiter étant plus massive l'emporte : les deux planètes migrent de concert légèrement vers l'extérieur. Selon les paramètres du disque et le rapport de masse des deux planètes, la migration en résonance est plus ou moins rapide, vers l'intérieur ou l'extérieur. Cela offre de nombreuses possibilités quant aux éléments orbitaux (excentricité et demi-grand-axe) obtenus, ce qui permet d'expliquer certains systèmes d'exoplanètes observés, et pourquoi Jupiter et Saturne sont restées si loin du Soleil.

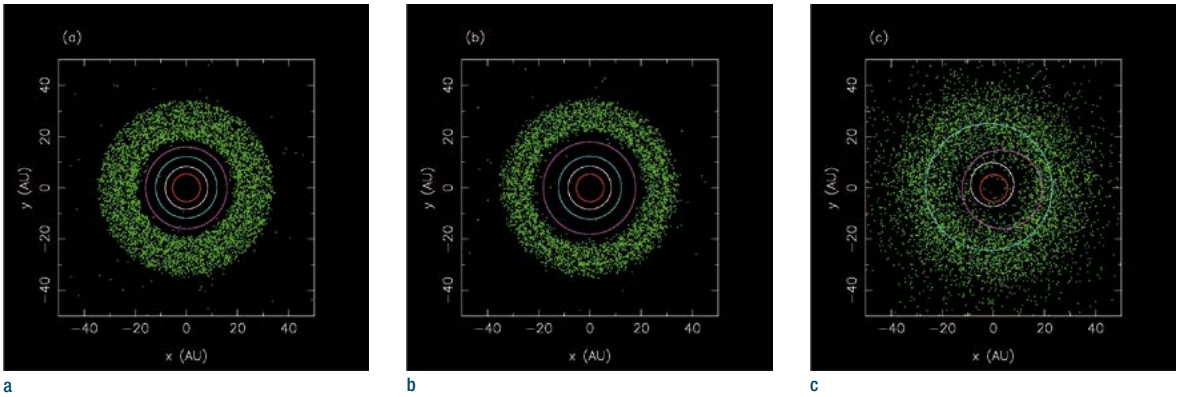
Dans tous les cas, une planète migre au cours de sa formation, suivant différents types de migration selon sa masse. La migration planétaire est problématique pour les cœurs, mais aussi nécessaire pour comprendre la répartition des exoplanètes, en particulier les nombreux « Jupiters chauds ». Elle permet aussi de favoriser les rencontres entre planétésimaux et embryons planétaires, et ainsi d'accélérer la formation planétaire. Précisons à toutes fins utiles que cette migration n'a lieu que grâce au disque protoplanétaire et s'arrête quand celui-ci se dissipe. Il n'y a plus de migration planétaire dans le Système solaire actuel.

Architecture du Système solaire et Grand Bombardement Tardif : le modèle de Nice

Le fait que Jupiter et Saturne, poussées par le gaz, rentrent en résonance 2:3 et arrêtent de migrer, d'une part explique pourquoi nous n'avons pas de « Jupiter chaud » dans notre Système solaire, et d'autre part nous permet de comprendre quelle devait être la configuration des planètes géantes à la fin de la vie du disque protoplanétaire. En effet, si Jupiter et Saturne ne migrent pas, Uranus et Neptune doivent s'approcher des géantes gazeuses par migration de type I, jusqu'à ce qu'elles soient piégées à leur tour en résonance. On atteint donc forcément un système en résonance multiple, où chaque planète est en résonance avec sa voisine. Dans cette configuration, les planètes ont des orbites bien plus rapprochées les unes des autres et moins excentriques et inclinées[4] que maintenant. Comment alors les orbites actuelles ont-elles été atteintes ?

C'est la question au cœur du « modèle de Nice », une reconstruction à l'ordinateur de l'évolution dynamique des planètes après la disparition du disque protoplanétaire, développé par un groupe de chercheurs à l'Observatoire de la Côte d'Azur. On pourrait penser que, une fois le gaz disparu, les orbites planétaires sont figées pour l'éternité. Rien de plus faux ! Une ceinture massive de planétésimaux rescapés de la formation des planètes géantes, qui n'ont pas eu le temps de croître, est censée exister au-delà de l'orbite de Neptune (voir figure 3, panneau a). L'interaction gravitationnelle entre les planètes et ces planétésimaux conduit les orbites des planètes à s'écarter lentement. Ainsi, après un temps très long (allant de plusieurs centaines de millions d'années à un milliard d'années ou plus selon les simulations, 880 millions d'années dans la figure 3) les planètes quittent leur résonance multiple originelle. Dès lors, elles commencent à avoir des rencontres proches mutuelles, ce qui déstabilise le système des planètes géantes dans sa globalité. Uranus et Neptune, acquérant des orbites très allongées, pénètrent dans la ceinture ; ceci augmente son interaction avec les planètes, le processus s'emballe, les orbites sont chamboulées et la ceinture est détruite (fig. 3, panneau c). Avec une ceinture de planétésimaux de masse totale 35 masses terrestres étendue jusqu'à 35 UA, les planètes sont conduites vers leurs orbites actuelles en quelques dizaines de millions d'années, à partir du début de l'instabilité (panneau d).

Ce scénario justifie donc la structure orbitale présente des planètes géantes, mais aussi reproduit en même temps d'autres phénomènes autrement inexpliqués. Ainsi, on estime que la dispersion rapide mais tardive des planétésimaux trans-Neptuniens serait à l'origine du mystérieux Grand Bombardement Tardif. Il s'agit d'un sursaut du taux de bombardement météoritique des planètes (d'intensité environ 10 000 fois supérieure à celle du bombardement actuel dû aux astéroïdes géocroiseurs) qui s'est déclenché



a b c d

Fig. 3 – Évolution du Système solaire externe après dissipation du disque protoplanétaire. Le Soleil se trouve au centre. L'orbite de Jupiter est indiquée en rouge, celles de Saturne en blanc, d'Uranus en violet et celle de Neptune en bleu. Les planétésimaux formant la ceinture externe sont indiqués en vert. Ces diagrammes montrent différents instants : (a) après 101 millions d'années (Ma) ; (b) 880 Ma, juste avant l'instabilité ; (c) 883 Ma, pendant l'instabilité ; (d) 1 200 Ma. ■

soudainement, 650 millions d'années après la formation du Système solaire, et qui est responsable de la formation des bassins lunaires (les taches sombres que l'on voit à l'œil nu sur la Lune, cicatrices d'énormes cratères et tous âgés d'environ 3,9 milliards d'années).

L'évolution du Système solaire décrite par le modèle de Nice reproduit ce bombardement et explique également beaucoup d'autres aspects de la structure du Système solaire actuel, notamment les propriétés orbitales des populations de petits corps qui ont survécu jusqu'à nos jours : les astéroïdes entre Mars et Jupiter, la ceinture de Kuiper au-delà de Neptune (qui est le reste de la ceinture originale responsable de l'instabilité globale), les Troyens (planétésimaux qui partagent la même orbite que Jupiter ou Neptune) et les satellites distants (dits « irréguliers ») des planètes géantes.

Rencontres proches entre planètes géantes... Cela peut paraître de la science-fiction, mais c'est peut-être un phénomène répandu. Les planètes géantes détectées autour d'autres étoiles ont pour la plupart des excentricités orbitales bien plus élevées que celles des planètes de notre Système solaire. C'est d'autant plus surprenant que toute bonne théorie de la formation des planètes géantes prévoit que celles-ci naissent sur des orbites circulaires ! Seules les rencontres proches entre planètes semblent capables d'augmenter autant les excentricités. On s'attend donc à ce qu'en général, les systèmes planétaires deviennent, à un moment ou à un autre, instables – peut-être suite à la migration planétaire et à la disparition du gaz. Les rencontres proches entre planètes qui en découlent s'arrêteraient seulement quand une planète est éjectée du système, ou parquée sur une orbite à grande distance de son étoile (50 à 150 UA), comme celles vues directement fin 2008 autour des étoiles Fomalhaut, HD8799, et β-Pictoris, grâce aux récentes percées instrumentales. Dans ce contexte, notre Système solaire, grâce à un jeu favorable de paramètres, aurait eu de la chance, en ne connaissant qu'une instabilité relativement mineure, qui a conduit à des excentricités orbitales très modérées. Que nous nous trouvions dans un système atypique n'est pas surprenant : si Jupiter avait eu une orbite très excentrique, la Terre aurait été très appauvrie en eau, sur une orbite également plus excentrique avec des saisons extrêmes. Nous ne serions alors pas là, à nous interroger sur nos origines...

Conclusion

Il convient de retenir que les planètes se forment dans un disque de gaz et de poussières, qui entoure une étoile après sa naissance, pendant 3 à 10 millions d'années. Des grains de poussière aux planètes, la croissance des solides connaît plusieurs phases : collage simple pour former des agrégats, puis croissance emballée sous

l'effet de la gravité, puis croissance oligarchique, pour finir éventuellement par l'accrétion d'une enveloppe gazeuse qui s'effondre, ou par des impacts géants entre embryons planétaires.

Toutefois, l'idée simple de la Nébuleuse Solaire de Masse Minimale, dans laquelle tous les solides s'agglomèrent localement pour former les planètes du Système solaire s'avère simpliste. Non seulement les planètes changent d'orbite dans le disque de gaz (par migration) et les poussières elles-mêmes dérivent dans le disque à cause du frottement avec le gaz, mais encore les planètes peuvent changer d'orbite après la dissipation du disque de gaz, en interagissant entre elles et avec des planétésimaux restant, comme ce fut probablement le cas dans le Système solaire jeune. En conséquence de la complexité des processus de formation planétaire, la variété des disques protoplanétaires engendre une grande variété de systèmes planétaires possibles, ce qui permet de rendre compte qualitativement des nombreuses exoplanètes détectées. La détection future de nombreuses nouvelles exoplanètes, et l'amélioration des observations des disques protoplanétaires permettront d'apporter des contraintes plus fines pour les modèles, et d'envisager une approche statistique de la théorie de formation planétaire : il ne s'agira plus d'expliquer individuellement tel ou tel système, mais de comprendre la fréquence et la répartition des planètes dans notre Galaxie.

Références bibliographiques

• Dutrey, A. 2008, « Protoplanetary Disks as seen by Interferometry », *The Power of Optical/IR Interferometry : Recent Scientific Results and 2nd Generation Instrumentation, Eso Astrophysics Symposia*, p. 217-226.

• Montmerle, T. ; Augereau, J.-C. ; Chaussidon, M. ; Gounelle, M. ; Marty, B. ; Morbidelli, A. 2006, « From Suns to Life : A Chronological Approach to the History of Life on Earth 3. Solar System Formation and Early Evolution : the First 100 Million Years », *Earth Moon and Planets* 98, p. 39-95.

• Papaloizou, J. C. B. ; Nelson, R. P. ; Kley, W. ; Masset, F. S. ; Artymowicz, P. 2007, « Disk-Planet Interactions During Planet Formation » in B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil (eds.), *Protostars and Planets V*, University of Arizona Press, p. 655-668.

• Gomes, R. ; Levison, H. F. ; Tsiganis, K. ; Morbidelli, A. 2005, « Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets », *Nature*, 435, p. 466-469.

• Tsiganis, K. ; Gomes, R. ; Morbidelli, A. ; Levison, H. F. 2005, « Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System », Nature, 435, p. 459-461.

Notes

1. Le moment cinétique d'un corps est le produit du rayon de son orbite par sa vitesse et sa masse. C'est en quelque sorte une quantité de rotation.

2. Une unité astronomique est la distance de la Terre au Soleil, soit 150 millions de kilomètres.

3. L'excentricité d'une orbite en forme d'ellipse caractérise sa forme ; elle vaut 0 pour un cercle parfait, et tend vers 1 pour des ellipses extrêmement allongées. L'excentricité de la Terre est 0,0167 ; celle de Jupiter, Saturne, et Uranus est environ 0,05 ; celle de la comète de Halley est de 0,967.

4. En réalité, les planètes n'orbitent pas parfaitement dans le même plan : l'orbite de Jupiter est inclinée de 1,3° par rapport à l'écliptique, celle de Saturne de 2,5°, celle d'Uranus de 0,8°, et celle de Neptune de 1,7°.

3. Vénus, la planète chaude

Jean-Loup Bertaux

La planète du soir ou du matin

Qui d'entre nous n'a jamais été stupéfait par la vision nocturne d'un astre extrêmement brillant, seulement surpassé par le Soleil et la Lune, mais apparemment bien plus petit que ceux-ci ? C'est la planète Vénus ! Mais comme elle bouge dans le ciel, elle n'est pas toujours visible la nuit ; et tout d'un coup, quand la saison de visibilité revient, elle s'impose à nous comme elle s'est imposée à nos ancêtres. Pas étonnant dans ces conditions que la mythologie grecque ait associé cette planète à la déesse de l'amour, Aphrodite en grec, Vénus en latin. Car quoi de plus important que l'amour ?

Quand Galilée l'observa pour la première fois dans sa lunette (en 1610), il vit comme une demi-lune, ce qui se comprend très bien (figure 1) puisque Vénus tourne autour du Soleil tout comme la Terre, mais sur une orbite plus petite. Ce phénomène des phases de Vénus, comme celles de la lune, était la démonstration la plus éclatante de l'héliocentrisme : toutes les planètes tournent autour du Soleil, et non pas autour de la Terre, comme l'exigeait encore le dogme de l'Église. Gros problème de Galilée avec le pape, qui faillit tourner très mal pour le physicien italien. N'oublions pas le sort de Giordano Bruno, brûlé vif peu auparavant, en 1600, pour avoir suggéré le premier que les étoiles étaient des objets comme le Soleil, mais simplement beaucoup plus éloignés, et possiblement entourés d'autres mondes habités. Cette vision éjectait la Terre de sa position privilégiée par le Créateur, au centre de l'Univers. Une baisse de statut inacceptable pour l'Église.

Vénus tourne en 224 jours sur son orbite de rayon 0,72 Unités Astronomiques (UA), la terre tournant par définition à une UA du soleil. Ceci a deux conséquences immédiates. Vue depuis la terre, elle n'est jamais à plus de 46° du soleil ; et on la voit tantôt dans le ciel du soir, tantôt dans le ciel du matin, phare impressionnant, la fameuse « étoile » du berger qui s'allume la première, et s'éteint la dernière quand le jour se lève ; encore qu'on puisse la voir en plein jour, si le ciel est bien clair, et si on sait où regarder, une expérience qu'on ne saurait trop recommander au lecteur. Et par une nuit bien noire, quand la Lune est absente, la lumière de Vénus projette des ombres qu'un œil attentif peut détecter.

La planète Vénus tourne très lentement sur elle-même, en 243 jours, ce qui fait que la durée du jour est plus longue que celle de l'année. Autre bizarrerie, elle tourne dans le sens rétrograde, c'est-à-dire dans le sens contraire à sa rotation autour du Soleil, ce qui n'est pas le cas des autres planètes, qui tournent plus vite sur elles-mêmes, et toutes dans le même sens.

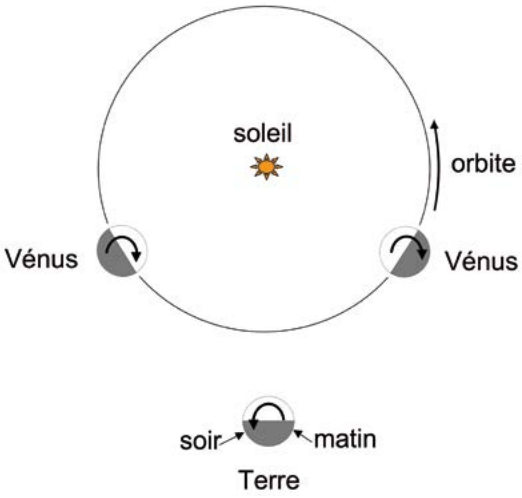


Fig. 1 – **Vénus tourne autour du Soleil sur une orbite plus petite que celle de la Terre (0,72 UA de rayon), dans le même sens que la Terre.** Ce qui fait que, vue depuis la Terre, elle est toujours à moins de 46° du Soleil. Pour bien la voir, il faut être sur Terre, soit du côté soir, soit du côté matin. Ce schéma est vu depuis le pôle nord de l'écliptique, le plan qui contient l'orbite de la Terre et de Vénus. On a figuré le sens rétrograde de la rotation sur elle-même de Vénus, inverse de celui de la Terre. ■