

Sous la direction de Denis Priou

Voyage au bout

de

Le cosmos, observé par
les astronomes amateurs,
décrypté par les professionnels



- l'Univers

Voyage au bout de l'Univers

Sous la direction
de Denis Priou

Voyage au bout de l'Univers

Le cosmos, observé par
les astronomes amateurs,
décrypté par les professionnels

Contributeurs :

Les astronomes professionnels

Janet Borg, Frédéric Deschamps, Éric Emsellem, Thérèse Encrenaz,
François Hammer, James Lequeux, Miguel Montargès, Quentin Parker,
Noël Robichon, Asma Steinhäusser, Jean-Claude Vial

Les astronomes amateurs

APO Team (Thierry Demange, Richard Galli, Thomas Petit),
Markus Blauensteiner, Jean-Pierre Brahic, Christian Buil,
Stéphane Charbonnel, Ciel Austral (Laurent Bourgon,
Didier Chaplain, Philippe Bernhard, Jean-Claude Canonne,
Georges Chassaigne, Mike Selby, Nicolas Outters), Matthieu Conjat,
Marc Delcroix, Association Dimension Parabole, Marcel Drechsler,
Patrick Dufour, Sven Eklund, Olivier Garde, Peter Goodhew,
Olivier de Goursac, Janus Team (Laurent Bernasconi, Michel Meunier),
Pascal Le Dü, Nicolas Lefaudeux, Thierry Lombry, Peter Maasewerd,
Les Observateurs associés, Rolf Olsen, Denis Priou, Gerald Rhemann,
Yann Sainty, Emmanuele Sordini, Xavier Strottner, Christian Viladrich

Delachaux et Niestlé, Paris, 2024

Direction éditoriale : **Michel Larrieu**

Édition : **Joris Lautard**

Création graphique et mise en page : **ABM Studio**

Préparation de copie et relecture : **Claire Lemoine**

Fabrication : **Titouan Roland** et **Suzanne Tassel**

Photogravure : **ARN**

Première de couverture :

NGC 2359, la casque de Thor. © Janus Team

Quatrième de couverture :

Nébuleuse du cœur de l'Hydre. © M. Drechsler, X. Strottner

ISBN : 978-2-603-03118-6

Dépôt légal : octobre 2024

Achevé d'imprimer en août 2024

sur les presses de **SEPEC AGM** en France.

Cet ouvrage ne peut être reproduit, même partiellement, et sous quelque forme que ce soit (photocopie, décalque, microfilm, duplicateur ou tout autre procédé analogique ou numérique), sans une autorisation écrite de l'éditeur. Tous droits d'adaptation, de reproduction et de traduction réservés pour tous pays.

CHARTRE DELACHAUX ET NIESTLÉ

- 1 L'éditeur nature de référence depuis 1882.
- 2 Le fonds éditorial le plus complet en langue française avec plus de 450 ouvrages consacrés à la nature et à l'environnement.
- 3 Des auteurs scientifiques et naturalistes reconnus.
- 4 Les meilleurs illustrateurs naturalistes, pour la précision et le réalisme.
- 5 Des ouvrages spécifiquement adaptés à l'utilisation sur le terrain.
- 6 Des contenus actualisés régulièrement pour relayer les avancées scientifiques les plus récentes.
- 7 Une démarche éco-responsable pour la conception et la fabrication de nos ouvrages.
- 8 Une approche pédagogique qui sensibilise les plus jeunes à l'écologie.
- 9 Une réflexion qui éclaire les grands débats sur l'environnement (biodiversité, changement climatique, écosystèmes).
- 10 Une implication aux côtés de tous ceux qui œuvrent en faveur de la protection de l'environnement et de la conservation de la biodiversité.

RETROUVEZ-NOUS SUR WWW.DELACHAUXETNIESTLE.COM ET SUR FACEBOOK





NGC 55.
© D. Priou

8	LE SYSTÈME SOLAIRE
10	INTRODUCTION LE SYSTÈME SOLAIRE, OBSERVÉ PAR LES AMATEURS, DÉCRYPTÉ PAR LES PROFESSIONNELS
14	CHAPITRE 1 LE SOLEIL
32	CHAPITRE 2 LE SYSTÈME TERRE-LUNE
50	CHAPITRE 3 LES PLANÈTES
72	CHAPITRE 4 LES PETITS CORPS DU SYSTÈME SOLAIRE
88	LA VOIE LACTÉE
90	INTRODUCTION LA VOIE LACTÉE, OBSERVÉE PAR LES AMATEURS, DÉCRYPTÉE PAR LES PROFESSIONNELS
102	CHAPITRE 5 LES ÉTOILES
126	CHAPITRE 6 LES AMAS D'ÉTOILES
144	CHAPITRE 7 LE MILIEU INTERSTELLAIRE
186	CHAPITRE 8 LES NÉBULEUSES PLANÉTAIRES
200	LE MONDE DES GALAXIES
202	CHAPITRE 9 LA BANLIEUE DE NOTRE GALAXIE
216	CHAPITRE 10 LES MULTIPLES VISAGES DES GALAXIES
238	ANNEXES



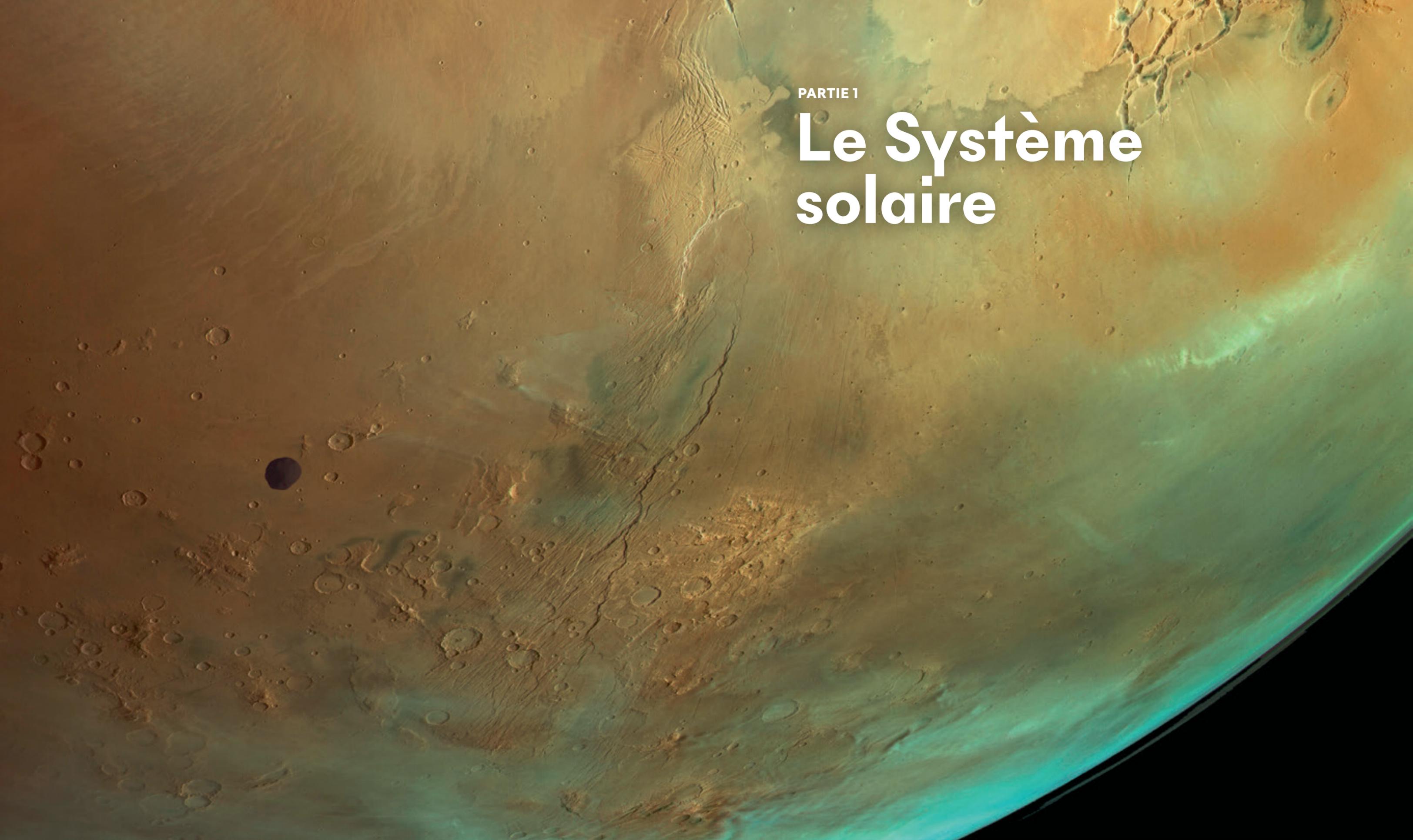
NGC 2736.
© D. Priou

Cet ouvrage est la rencontre de deux groupes de passionnés. Les uns explorent le cosmos en réalisant des images célestes : ce sont les astronomes amateurs. Ils installent leur télescope dans leur jardin ou à l'autre bout du monde. Ils emploient des capteurs numériques sophistiqués et dédient des milliers de nuits à l'observation du ciel, avec un seul but en tête : obtenir des images spectaculaires, révéler les détails les plus fins, les zones les plus sombres, des objets célestes observés. Les autres arpentent et mesurent le cosmos à l'aide de grands télescopes, terrestres ou spatiaux. Ils observent l'Univers à des longueurs d'onde inaccessibles aux amateurs. Ils bâtissent des modèles théoriques qu'ils confrontent aux données observationnelles, pour révéler les mécanismes physiques à l'œuvre dans l'Univers, en comprendre l'histoire, en esquisser le futur : ce sont les astronomes professionnels.

Les uns et les autres contemplant le ciel, chacun à sa façon. Les amateurs restituent les beautés du ciel à l'aide d'une palette d'outils d'imagerie et de traitement numérique. Ces peintres des temps modernes nous proposent des paysages cosmiques fascinants, colorés et mystérieux, qui nous questionnent sur l'immensité dans laquelle nous vivons et sur notre place dans l'Univers. Les professionnels analysent les données observationnelles, ils construisent une vision quantitative de l'évolution du cosmos, ils étudient la vie et la mort des étoiles, la naissance des galaxies, les origines de la vie, le destin de l'Univers. Amateurs et professionnels s'extasient devant sa beauté, que les images des uns et la science des autres rendent plus intense. Souvent, amateurs et professionnels se rencontrent et coopèrent pour produire de la connaissance scientifique tout en dévoilant la beauté du ciel : quête esthétique et soif de connaissance se rassemblent dans le cadre de « pro-am », des projets associant professionnels et amateurs. Leurs travaux débouchent sur des publications dans les revues scientifiques professionnelles et dans les magazines destinés au grand public.

Cet ouvrage est un voyage dans le cosmos, sous le double regard de l'astronome amateur et du scientifique professionnel. Partant des objets familiers du ciel, le Soleil et la Lune, ce livre nous invite à un grand tour du Système solaire, des planètes géantes aux plus petits corps, astéroïdes et comètes, porteurs de secrets sur nos origines. Nous visiterons ensuite notre Galaxie, la Voie lactée, et les principaux objets célestes qui la peuplent. Leurs couleurs et leurs formes étonnantes révèlent leur histoire et leur destin : comme nous, les objets célestes naissent, grandissent, déclinent et meurent. Leurs cendres viendront nourrir l'écosystème galactique, susciter de nouvelles naissances et poursuivre le cycle de la vie céleste. Nous arpenterons enfin le monde des galaxies, ces univers-îles, parfois solitaires, parfois regroupés dans d'immenses amas, flottant dans les abîmes cosmologiques. À chaque étape, nous serons guidés par un astronome professionnel et par des astronomes amateurs ayant consacré leur carrière ou leurs loisirs à tel ou tel type d'objet céleste.

L'observation et l'étude du ciel ont toujours suscité la curiosité intellectuelle et l'imagination. Les Anciens y projetaient leurs légendes et leurs mythes en peuplant le ciel de divinités. L'invention des lunettes et des télescopes a révélé la vraie nature du cosmos, analysé à l'aune de la science, ce qui n'a pas empêché les astronomes modernes de « voir » des formes familières dans des objets célestes lointains : dragons combattants, casque de dieu guerrier, cité Inca, tête de cheval, calmar géant, et même statue de la Liberté. Les objets célestes nous parlent aussi de nous-mêmes. Mondes lointains, engloutis au fond des siècles. Mondes étrangers, et pourtant, mondes si proches, gouvernés par les mêmes lois. Le messager lumineux qu'ils nous envoient, et qui nous parvient sur Terre, a franchi les abîmes des ténèbres. Ma nuit d'observation astronomique se termine, l'aube va bientôt poindre : lui et moi avons traversé la nuit pour nous rencontrer. Ce salut fraternel venu du fond des âges m'émeut et je réponds naïvement par un vague signe de la main. Le froid et la fatigue m'envahissent. Je vais rentrer mon matériel d'observation, mais demain, je partirai à la découverte d'un nouveau monde lointain. L'astronomie est une science reine, tour à tour naturaliste et mathématique. Elle est aussi une formidable école d'esthétique. Elle est enfin le plus grand des voyages intérieurs.



PARTIE 1

Le Système solaire

INTRODUCTION

Le Système solaire, observé par les amateurs, décrypté par les professionnels

Thérèse Encrenaz, Denis Priou

Double page précédente
Mars, observé par le High Resolution Stereo Camera (HRSC) le 19 octobre 2023, (mission Mars Express). © ESA

Figure 1 [←]
Calotte polaire nord de la planète Mars, observée par Mars Express (ESA) lors de la 125e orbite de la sonde, le 2 mai 2014. On y voit un banc de stratocumulus flottant au-dessus de Borealis Planitia, ainsi que les hautes terres de Tempe Terra (au centre) avec le large bassin de Chryse Planitia qui s'étire à gauche et qui est voilé aussi de nuages. © ESA/DLR/FU Berlin/J. Cowart/The Planetary Society - O. de Goursac

Figure 2 [→]
Représentation schématique du Système solaire.
© T. Encrenaz

Le Système solaire en quelques mots

Le Système solaire est constitué de l'ensemble des corps célestes soumis au champ de gravitation du Soleil. Les plus gros d'entre eux sont les huit planètes que nous connaissons : les quatre planètes rocheuses, aussi dites « telluriques » – Mercure, Vénus, la Terre et Mars – et, plus loin du Soleil, les quatre géantes – Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Depuis la Terre, les autres planètes sont visibles à l'œil nu dans le ciel nocturne et connues depuis l'Antiquité, à l'exception des deux dernières. Leurs noms sont à l'origine de ceux qui désignent les jours de la semaine. Toutes les planètes, à l'exception de Mercure, sont dotées d'une atmosphère. Leurs trajectoires présentent une caractéristique remarquable : elles sont toutes proches du plan de l'orbite terrestre, utilisé comme référence et appelé « écliptique ».

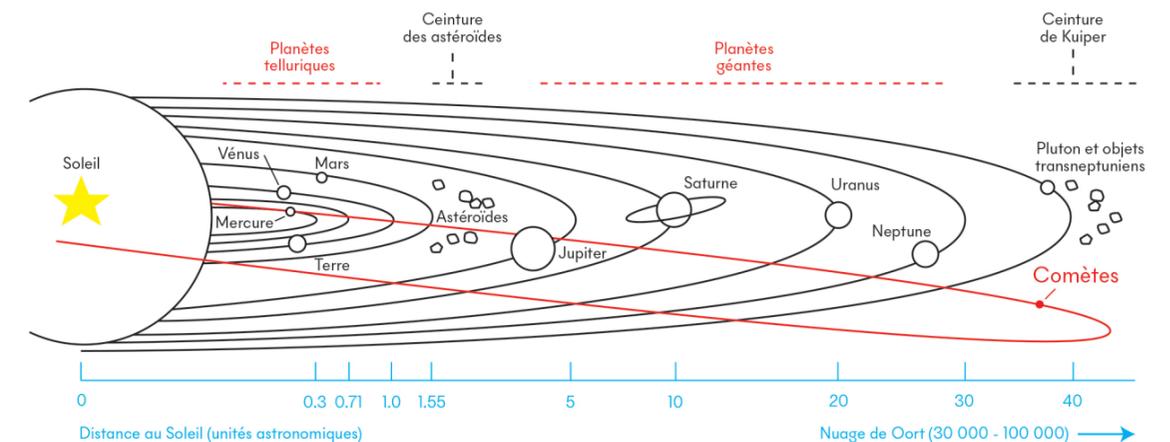
D'autres classes d'objets peuplent le Système solaire. Des satellites sont en orbite autour des planètes. C'est le cas de notre voisine, la Lune. Mars possède deux petits satellites, Phobos et Déimos, alors que Mercure et Vénus en sont dépourvus. Ils sont particulièrement nombreux autour des planètes géantes qui, de plus, sont entourées d'un système d'anneaux. Seul Titan, le plus gros satellite de Saturne, est doté d'une atmosphère dense ; quelques autres possèdent des atmosphères très ténues ou transitoires.

Viennent ensuite les astéroïdes, ou « petites planètes », tous dénués d'atmosphère. La plupart d'entre eux résident dans la Ceinture principale, entre Mars et

Jupiter. Toutefois, certains se rapprochent de la Terre : ce sont les géocroiseurs, qui font l'objet d'une surveillance afin de pouvoir anticiper les risques d'une éventuelle collision. Une autre classe d'objets a été découverte relativement récemment, dans les années 1990 : il s'agit des objets transneptuniens, dont l'orbite est située entièrement ou en grande partie au-delà de l'orbite de Neptune. La planète naine Pluton a été découverte en 1930 et cataloguée comme planète jusqu'en 2006 ; elle est le plus gros représentant de cette nouvelle classe d'objets.

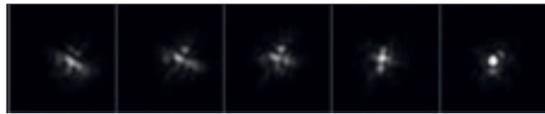
Enfin, les comètes sont de très petits objets dont le noyau fait au plus quelques dizaines de kilomètres. Leur orbite très elliptique les fait voyager du plus loin au plus près du Soleil, et lorsqu'elles s'en approchent, la glace de leur surface se sublime, donnant naissance à une chevelure souvent spectaculaire. Elles ont aussi une ou parfois plusieurs queues, constituées de glaces, de poussières et d'atomes ionisés qui s'étirent dans la direction antisolaire, ce qui les rend visibles depuis la Terre ; elles sont connues depuis l'Antiquité.

Comment mesurer les distances dans le Système solaire ? Une unité commode est l'unité astronomique (ua), définie comme la distance moyenne Soleil-Terre, très proche de 150 millions de kilomètres. Les orbites des planètes s'échelonnent entre 0,3 unité astronomique pour Mercure à 30 unités astronomiques pour Neptune. Les objets transneptuniens sont situés au-delà de 40 ua dans la ceinture de Kuiper et, pour certains d'entre eux, à plusieurs centaines d'unités astronomiques. Quant aux comètes, certaines d'entre elles proviennent de la ceinture de Kuiper mais d'autres proviennent d'un autre réservoir bien plus éloigné, le nuage de Oort, entre 30 000 et 100 000 unités astronomiques, soit entre 0,5 et 1,5 année-lumière : on atteint là les confins du Système solaire. L'étoile la plus proche, Proxima du Centaure, est située à plus de 4 années-lumière du Soleil.



Le Système solaire, observé par les astronomes amateurs

L’observation des principaux corps du Système solaire est une course à la très haute résolution : comment saisir les plus fins détails de la photosphère solaire, de la surface lunaire et des planètes, alors que le rayonnement lumineux qui nous en parvient est dégradé par la turbulente atmosphère terrestre ? Le mouvement de masses d’air, de températures différentes, dans notre atmosphère, dégrade en effet la finesse des images obtenues. Lorsqu’on observe la surface de la Lune ou d’une planète à un fort grossissement, celle-ci paraît « trembler » et « danser » sans relâche : la surface semble se déformer légèrement mais aléatoirement et à très haute fréquence, comme un mirage dans le désert. Instant après instant, l’atmosphère turbulente modifie légèrement la trajectoire des rayons lumineux émis par l’objet observé. Lorsqu’ils pénètrent dans l’instrument d’observation (téléscope ou lunette), l’image reconstituée par ce dernier change instant après instant. Cet effet est aussi visible lorsqu’on observe une étoile. Dans la *figure 3*, la séquence d’images d’une étoile prises à 5 millisecondes d’intervalle illustre la variabilité rapide de la turbulence : seule l’image de droite est à peu près nette, tandis que les autres sont fortement déformées par cette turbulence.



Des traitements astucieux permettent néanmoins aux amateurs de faire réapparaître la finesse des détails dans les images solaires, lunaires et planétaires. La stratégie consiste à mener les observations durant des périodes où la turbulence est minimale (par exemple, pour le Soleil, le matin, tant que le sol n’est pas encore chaud), en enregistrant des séquences d’images qui sont ensuite traitées par logiciel. On filme les objets célestes à haute fréquence, au moyen de caméras numériques rapides (jusqu’à plus de 150 images par seconde) et avec des temps de pose très courts pour chaque image de la séquence, afin de « geler » la turbulence atmosphérique : plus le temps de pose est bref, moins la turbulence « a le temps » de déformer l’objet observé. Si l’on ne retient du film que les meilleures

images, et si on les recalc les unes par rapport aux autres en utilisant des points de repère communs, identifiables d’une image à l’autre, on peut alors les combiner pour obtenir une image finale dévoilant de très fins détails : l’effet de la turbulence atmosphérique a été sensiblement réduit. Cette méthode, qui a pour but d’extraire, dans une série d’images, celles qui, par chance, sont meilleures que les autres, a été dénommée « *lucky imaging* ». On procède ensuite au rehaussement des contrastes par diverses méthodes de traitement des images.

Cette façon de procéder est facilitée par le fait que les objets observés sont très lumineux et que des temps de pose courts permettent d’en obtenir des images correctement illuminées. Le Soleil est un cas extrême qui justifie une mise en garde impérative. Notre astre est si lumineux que son observation directe, sans protection, provoque quasi instantanément des blessures irréversibles aux yeux : celles et ceux qui observent le Soleil respectent des règles de sécurité très strictes.

*Observer le Soleil avec un **filtre astronomique dédié**, atténuant au moins 100 000 fois le rayonnement émis par notre astre avant son passage dans l’instrument d’observation, est **indispensable**. Son usage **impératif** permet observer le Soleil dans de bonnes conditions, sous peine de **cécité immédiate et définitive**.*

La Lune est nettement moins lumineuse, mais il est courant de l’observer aussi avec un filtre atténuateur, pour préserver la vue des observateurs, notamment des plus jeunes.

La *figure 4* illustre les différentes étapes du traitement. L’image du haut est une image individuelle de la granulation solaire, avant traitement : seule une toute petite partie de celle-ci (en bas à gauche) est nette. La partie droite, en particulier la tache solaire (en haut à droite), est complètement floue. L’image centrale est le résultat de la combinaison de trente images. En bas se trouve le résultat final du traitement, par augmentation des microcontrastes.

Ces traitements s’avèrent efficaces si l’instrument d’observation, d’une focale souvent importante (jusqu’à 7 mètres), est lui-même d’une qualité optique exceptionnelle. Le moindre défaut compromet tout espoir de produire des images de très haute résolution. La collimation, c’est-à-dire l’alignement des optiques qui composent l’instrument, est un enjeu vital. L’astronome vérifie en général la collimation de son instrument juste avant de débiter ses observations. À ce titre, les matériaux utilisés pour les pièces optiques et mécaniques sont très particuliers : très faible coefficient de dilatation thermique, très faible conductivité thermique, pour éviter toute déformation

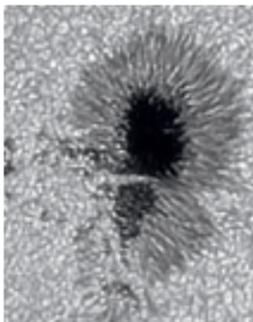
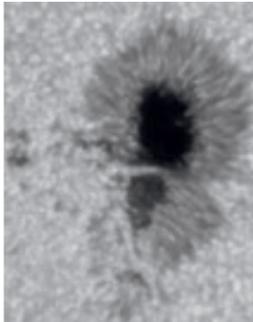
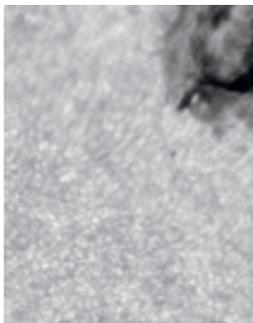


Figure 4 [↑]
Trois images du Soleil, à différentes étapes du traitement. © C. Viladrich

Figure 3 [←]
Effet de la turbulence atmosphérique sur une étoile observée au télescope. © C. Viladrich

du tube optique pendant l’observation et toute turbulence engendrée dans l’instrument. La *figure 5* montre une imposante lunette de 230 millimètres de diamètre, utilisée pour l’imagerie à haute résolution.

Les comètes sont des objets nettement moins lumineux. Les techniques de prise de vue et de traitement sont proches de celles employées pour les objets du « ciel profond » (voir partie 2, introduction).



Figure 5 [→]
Lunette de 230 mm de diamètre, utilisée pour l’imagerie à très haute résolution. © J.-P. Brahic

Le Système solaire, décrypté par les astronomes professionnels

Les instruments utilisés par les astronomes professionnels pour étudier les objets du Système solaire sont sensiblement les mêmes que ceux utilisés pour l’astronomie stellaire ou galactique, à une différence importante près. Les objets du Système solaire ont un mouvement apparent très important sur la sphère céleste, en comparaison des étoiles qui semblent fixes sur cette dernière, à des échelles de temps faibles. Pour suivre ces déplacements, les astronomes disposent de montures à suivi très rapide pilotées par des logiciels. Ces logiciels calculent la position apparente, sur la sphère céleste, du corps observé à partir de sa trajectoire (tridimensionnelle) dans le Système solaire, précalculée par les astronomes en s’appuyant sur les lois de la mécanique céleste (ce que l’on appelle ses « éphémérides »).

Les planétologues font appel à trois types d’instrumentation : la photométrie qui mesure la lumière reçue, la spectroscopie qui analyse la lumière reçue en fonction de sa longueur d’onde, et enfin l’imagerie. Cette instrumentation se retrouve aussi dans les sondes spatiales planétaires sous forme simplifiée, pour des raisons de fiabilité et compte tenu des contraintes de masse, de volume et de puissance.

La photométrie permet de mesurer très précisément la brillance d’un astre, dans le visible ou l’infrarouge proche ; on l’utilise en particulier pour établir la courbe de lumière des objets ponctuels (astéroïdes, comètes, objets transneptuniens), afin de déterminer leur forme, leur orientation et leur vitesse de rotation. Des photomètres à cadence rapide sont utilisés pour les expériences d’occultation stellaire. Aujourd’hui, on utilise des capteurs bidimensionnels numériques, comprenant plusieurs millions de pixels, qui servent à la fois à la photométrie et à l’imagerie. Il s’agit principalement de caméras CCD (*Charge Coupled Device*) ou CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), ces derniers ayant l’avantage d’une lecture plus rapide.

La spectroscopie des objets du Système solaire se fait avec les instruments de l’astronomie classique (voir partie 2, introduction). Le développement des capteurs bidimensionnels a favorisé l’avènement de la spectro-imagerie, qui permet d’obtenir un spectre en tout point d’une image ; les informations sont stockées sous forme de cubes dotés de deux dimensions spatiales et d’une dimension spectrale. À titre d’exemple, un spectro-imageur à longue fente permet de cartographier un disque planétaire dans un domaine de longueur d’onde donné ; les deux axes du capteur correspondent à la dimension spectrale et à une dimension spatiale ; le déplacement de la fente sur le disque planétaire fournit la deuxième dimension spatiale.

En parallèle avec les observations depuis le sol, les planétologues utilisent également des instruments dédiés à l’observation depuis des sondes spatiales. Les instruments de sondage à distance (caméras, spectromètres) sont conçus pour être légers, peu encombrants, peu demandeurs d’énergie et d’une grande fiabilité. À cette panoplie s’ajoutent les instruments dédiés aux observations *in situ*. Ainsi, les sondes atmosphériques permettent de mesurer en temps réel la pression, la température et les vents lorsqu’une sonde spatiale descend dans une atmosphère planétaire ; les spectromètres de masse fournissent une mesure de la composition chimique de l’atmosphère ; les radars permettent une mesure très précise de l’altimétrie des surfaces et peuvent donner des informations sur la nature du sous-sol.

CHAPITRE 1

Le Soleil

Jean-Claude Vial



Figure 1 [←]
Éclipse totale de Soleil,
3 juillet 2019. © N. Lefaudeux

Le Soleil en quelques mots

Âgé de quelque 4,6 milliards d'années, le Soleil est une sphère de gaz essentiellement composée d'hydrogène (92,1 % en nombre) et d'hélium (7,8 %). Son diamètre est de 1,392 million de kilomètres (près de 110 fois le diamètre de la Terre). Sa masse vaut 330 000 fois celle de la Terre. La masse volumique moyenne du Soleil vaut donc $1\,410\text{ kg/m}^3$. Toutefois, cette valeur moyenne cache une énorme variation entre l'intérieur et l'extérieur du Soleil : le nombre de particules par mètre cube dégringole de 10^{32} au centre du Soleil à environ 10^{13} par mètre cube dans la haute atmosphère solaire. Il en est de même de la température, qui décroît de 15 millions de kelvins, au centre, à 5 770 kelvins à la limite supérieure d'une couche appelée « photosphère », qui définit sa « surface ». Cette sphère de gaz est située à environ 149 millions de kilomètres de la Terre (cette distance définit l'unité astronomique), une distance 100 000 fois plus petite que celle qui sépare le Soleil de la plus proche étoile (Proxima du Centaure). Mais cette dernière distance est encore 7 000 fois plus petite que celle qui sépare le Soleil du centre de notre Galaxie. Le Soleil libère une puissance lumineuse de $3,8 \times 10^{23}\text{ kW}$: à la distance de 1 unité astronomique, 1 mètre carré reçoit, hors atmosphère terrestre, 1,4 kW.

Le Soleil tourne sur lui-même en 25,4 jours environ, autour d'un axe incliné de 83 degrés par rapport au plan de l'écliptique. Sa rotation étant de même sens que le sens de révolution de la Terre, il paraît tourner plus lentement vu de la Terre (27,5 jours environ). Gazeux, le Soleil ne tourne pas comme un corps rigide : sa rotation est beaucoup plus rapide à l'équateur (24,6 jours) qu'au voisinage des pôles (35 jours).

Une éclipse totale de Soleil est un événement impressionnant (figure 1), qui dévoile toute la complexité de l'astre du jour. Cette image de l'éclipse totale du 3 juillet 2019 a été prise depuis l'observatoire interaméricain du Cerro Tololo (Chili). Le Soleil dévoile toute sa majesté, sur un fond d'étoiles révélé par l'obscurité. La ville de La Serena, distante de 50 kilomètres, est visible en bas de l'image.

La structure du Soleil

Les couches de la sphère solaire sont souvent décrites comme des « pelures d'oignon » ; on peut toutefois les caractériser en seulement deux régions bien distinctes : d'une part, l'intérieur du Soleil ou « atmosphère interne », avec des températures et des densités très élevées ; d'autre part, l'« atmosphère externe », beaucoup plus ténue, au-dessus de la surface. L'atmosphère externe s'étend *de facto* jusqu'aux confins de l'héliosphère (ou héliopause), la zone d'influence du Soleil, soit à environ 200 unités astronomiques du Soleil.

L'intérieur du Soleil

En partant du centre du Soleil, on rencontre trois zones aux propriétés bien distinctes : le cœur du Soleil (ou noyau), qui s'étend sur un rayon d'environ 175 000 kilomètres ; la zone radiative ; et la zone convective.

Le cœur du Soleil

Au cœur du Soleil, la masse volumique atteint $151\,000\text{ kg/m}^3$, la température est de 15 millions de kelvins et la pression s'y élève à 233 milliards de fois la pression atmosphérique terrestre. Ce cœur représente une sphère dont le rayon équivaut environ au quart du rayon solaire : il contient 60 % de la masse du Soleil. Il est le siège de réactions thermonucléaires au cours desquelles, à l'issue de diverses réactions intermédiaires, quatre noyaux d'hydrogène sont transformés en un noyau d'hélium.

La différence entre la somme des masses des noyaux de départ (quatre protons) et celle du noyau d'arrivée (^4He), différence de l'ordre de 0,7 %, conduit, en vertu de la relation d'Einstein ($E = mc^2$), à la libération d'énergie lumineuse ($6,3 \times 10^{14}$ joules par kilogramme d'hydrogène) sous forme de photons gamma. Elle conduit d'ailleurs aussi à la libération de positrons (électrons de charge positive) et de neutrinos. Ainsi, 620 millions de tonnes d'hydrogène sont « consommées » chaque seconde au cœur du Soleil et transformées en près de 616 millions de tonnes d'hélium.

La zone radiative

Ces photons engendrés dans le cœur ont une énergie très élevée (rayonnement gamma), qu'ils vont perdre peu à peu en se propageant dans une zone située à l'extérieur du noyau, au cours de leurs interactions

avec des protons et des électrons. Cette zone est dite « radiative » car le processus dominant est la diffusion du rayonnement dans toutes les directions. Ce processus conduit à la « sortie » vers le haut d'un rayonnement moins énergétique. Au gré de ses interactions avec les protons et les électrons de cette zone, ce rayonnement gamma parvient, au bout de 100 000 ans (en moyenne), à une distance d'environ 600 000 kilomètres du centre du Soleil, où il rencontre un gaz plus froid et neutre : il est alors absorbé.

La zone convective

Les conditions physiques qui règnent ne permettant plus l'évacuation de l'énergie par diffusion du rayonnement, un autre processus est enclenché : le transport de matière vers la surface. Ce processus de convection est bien connu des amateurs de vol à voile qui profitent des « thermiques » dans notre atmosphère, c'est-à-dire des mouvements ascendants de masses d'air chaud. Dans le Soleil, c'est toute une zone située entre 600 000 et 696 000 kilomètres du centre qui est ainsi mise en mouvement.

À la surface, cette convection se manifeste sous forme de cellules brillantes (dont le diamètre est de l'ordre du millier de kilomètres) alimentées par la matière chaude montante, et sous forme de lignes sombres qui les séparent par où redescend la matière refroidie.

Sonder l'intérieur du Soleil

Jusqu'aux années 1970, la connaissance de l'intérieur du Soleil reposait sur des calculs théoriques basés sur les lois de la physique des gaz et des plasmas, appliquées à un objet particulier : le Soleil. Ses principales caractéristiques physiques (masse, taille, gravité, rayonnement émis et température de surface) étant mesurées directement ou indirectement, un modèle théorique a été créé. Il a été confirmé par les résultats spectaculaires obtenus dès les années 1970 grâce à une technique d'observation nouvelle : l'héliosismologie. Le principe de cette discipline rejoint celui de la sismologie terrestre : pour connaître la structure interne de notre planète, les scientifiques étudient la façon dont les ondes sismiques engendrées par un séisme (ou à l'aide de générateurs d'ondes sismiques) se propagent dans les profondeurs de la Terre.

Le Soleil est soumis à des ondes sonores générées par les mouvements convectifs décrits plus haut. Ces ondes (qui se propagent dans tout l'intérieur du Soleil) viennent frapper la surface solaire comme le font les ondes sonores à la surface d'un tambour. Les déformations de cette surface donnent notamment lieu à des mouvements verticaux oscillatoires, mesurables par les astronomes. Ces mouvements se font à des fréquences précises (on parle de « mode

propre d'oscillation »). Notre étoile « joue du tambour » de façon particulière : les rythmes que le Soleil est capable de jouer révèlent sa structure et sa composition interne. Le premier mode détecté, dans les années 1960, correspondait à une période d'oscillation d'environ 300 secondes. Quelques années plus tard, observateurs et théoriciens ont identifié des millions d'autres modes. Leur connaissance permet d'en déduire toutes sortes d'informations sur l'intérieur du Soleil, par exemple la température et la composition chimique à différentes profondeurs. On peut aussi mesurer la vitesse de rotation interne : on a ainsi détecté une région (la tachocline), au pied de la zone convective où, du nord au sud en passant par l'équateur solaire, le gaz tourne à la même vitesse. On a aussi détecté, à la base de la zone convective, un mouvement de matière des pôles vers l'équateur, fermant ainsi le circuit de transport de l'équateur vers les pôles observé à la surface.

Les techniques de l'héliosismologie sont couramment utilisées aujourd'hui pour étudier l'intérieur des étoiles (on parle d'« astérosismologie ») et des planètes gazeuses.

L'atmosphère externe du Soleil

La photosphère

La division entre atmosphères interne et externe est assez arbitraire, tout comme la notion de surface solaire, définie par les astronomes comme la couche gazeuse d'où provient le rayonnement visible. Cette surface est située dans une couche relativement étendue au-dessus de la zone convective et qui porte le nom de « photosphère ». La température y décroît de quelque 6 000 kelvins pour atteindre, au-delà de cette couche, un minimum de 4 250 kelvins. C'est de là que provient l'essentiel du rayonnement solaire que reçoit la Terre. C'est bien là qu'on peut observer la granulation et les taches autrefois observées et dénommées par Galilée. Ces deux types de structures (*figures 2 et 3*) sont des cibles idéales pour les astronomes amateurs, qui peuvent noter l'apparition et le groupement des taches, leur rotation et leur disparition.

La *figure 2* montre l'aspect de la photosphère solaire tel qu'obtenu à travers un filtre UV. On voit les taches solaires, généralement en groupes. Ces taches matérialisent le lieu où les lignes de champ magnétique traversent la « surface » du Soleil. Le champ magnétique intense bloque la convection dans la photosphère qui, localement, est plus froide (de 1 500 kelvins) et paraît plus sombre (d'où la tache). On observe aussi des zones plus claires entourant

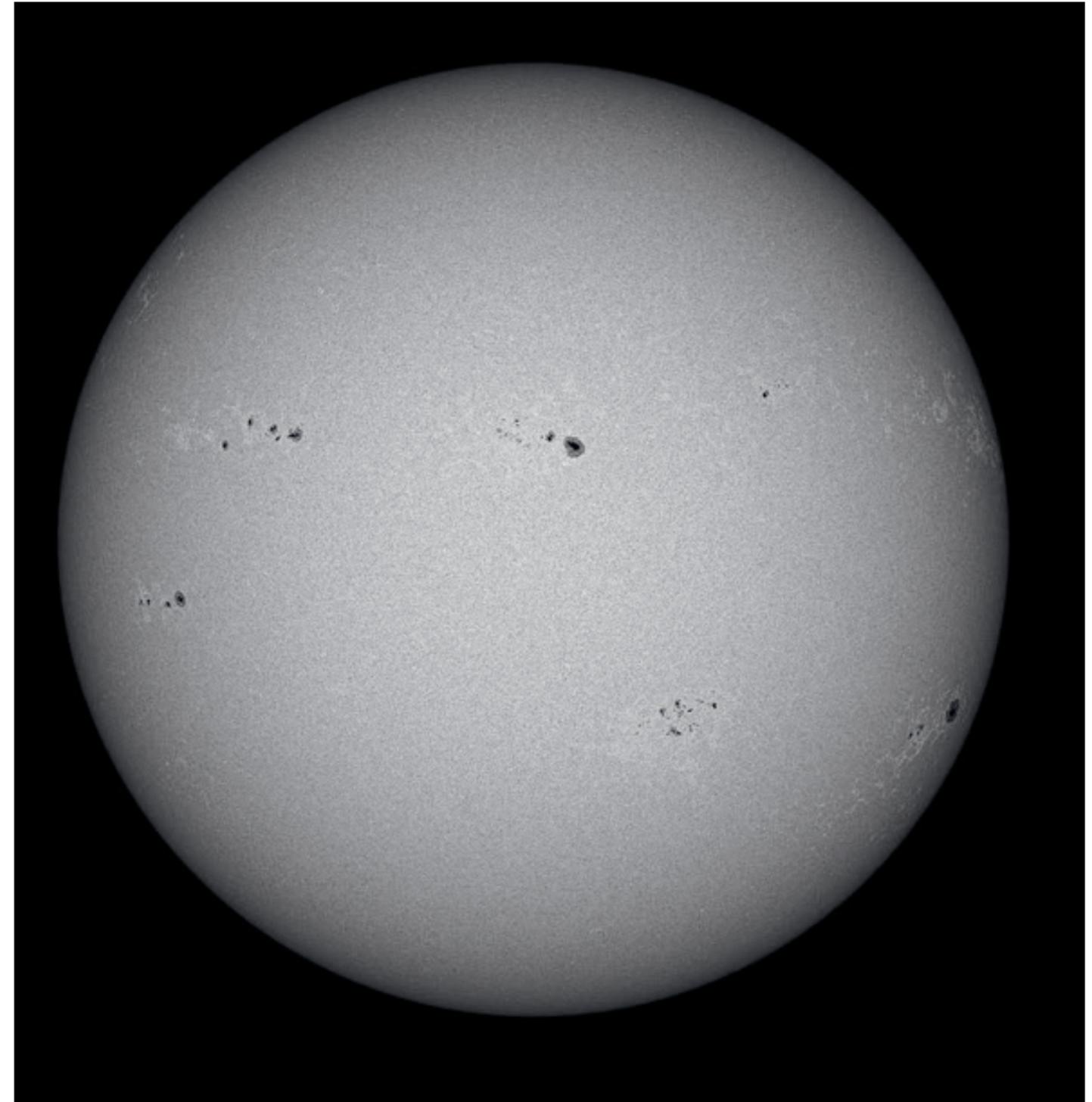
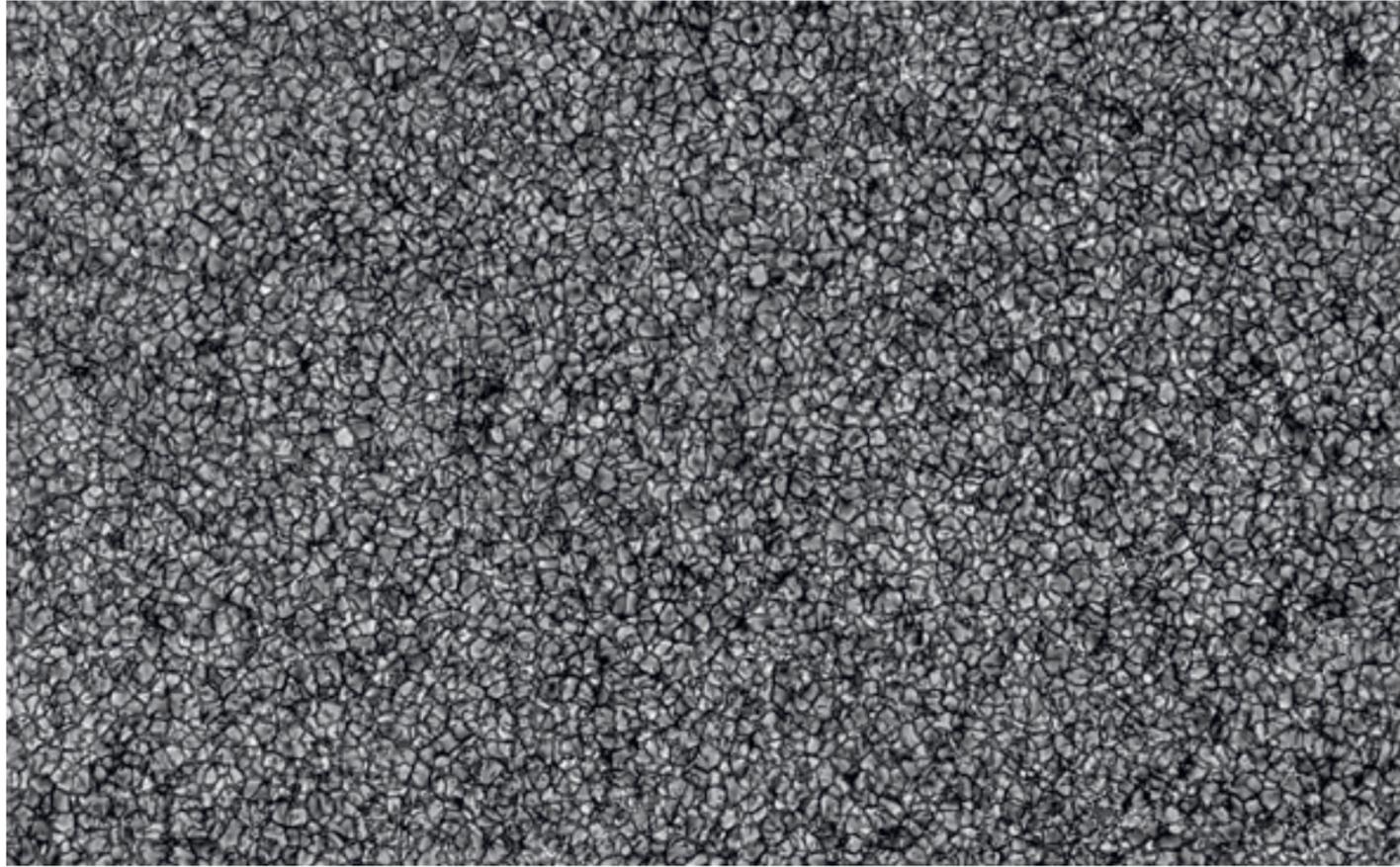


Figure 2 [→]
La photosphère, observée à travers un filtre à bande large dans l'ultraviolet. © C. Viladrich



les taches : les plages faculaires (concentration des lignes de champ magnétique). L'assombrissement au bord du disque solaire est dû au fait que les couches visibles sur le limbe sont moins profondes (donc moins chaudes et brillantes) qu'au centre du disque. La surface ne semble pas « lisse » : on devine la granulation.

Observée à grande définition, la photosphère apparaît comme une surface non uniforme et granulée (figure 3). La granulation est le signe d'une convection à petite échelle, c'est-à-dire d'un transfert de matière vers la surface. Les grains brillants (les granules) sont des cellules de plasma chaud qui remontent vers la surface. Les zones intergranulaires, plus sombres, sont plus froides : le plasma « retombe » vers les profondeurs.

La taille typique d'une cellule convective est de 1 000 kilomètres. Sa durée de vie est de 5 à 10 minutes. Le champ de l'image, très resserré (environ 3 minutes de degré), en montre une multitude.

La chromosphère

Son nom provient de la couleur rougeâtre de la couche observée au-dessus du bord lunaire lors des éclipses de Soleil. La température y croît très rapidement, passant de 4 250 kelvins à quelque 10 000 kelvins en 2 000 à 3 000 kilomètres. De fait, la « couche » est très hétérogène. À l'extrême bord du disque solaire, on observe des structures quasi coniques d'une durée de vie de l'ordre de 10 minutes, d'où le gaz est éjecté de façon continue avec une vitesse de 20 km/s : les spicules.

La figure 4 montre l'activité solaire au bord du limbe et permet d'observer la surface solaire en perspective rasante, ce qui donne une impression de relief tridimensionnel.

La tache se situe plus bas et paraît presque entièrement recouverte par les fibrilles, des filaments horizontaux entourant sa partie sombre.

Figure 3 [↑]
Granulation solaire obtenue à travers un filtre UV.
© C. Viladrich

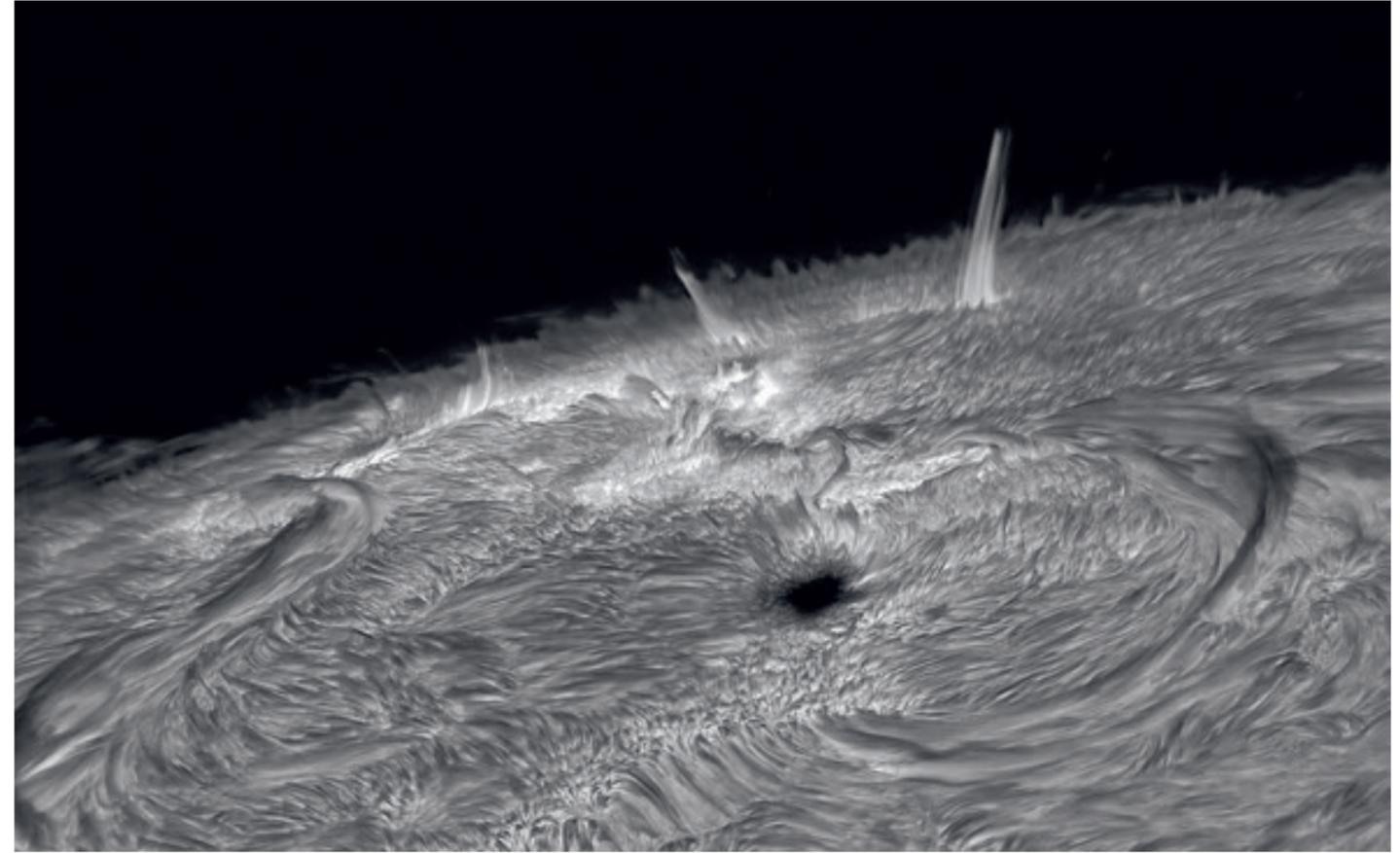


Figure 4 [↑]
La chromosphère solaire, observée à proximité du limbe.
© C. Viladrich

Des jets semi-verticaux sont bien visibles à proximité du limbe. On observe aussi des filaments, plus sombres, autour de la tache.

La figure 5 (page 20) montre des spicules. Bien visibles sur le limbe, on les distingue aussi sur le disque solaire (image du haut) : les spicules sont groupés et forment des « buissons » plus sombres s'élevant à la verticale. Dans l'image du bas, une éruption solaire est bien visible.

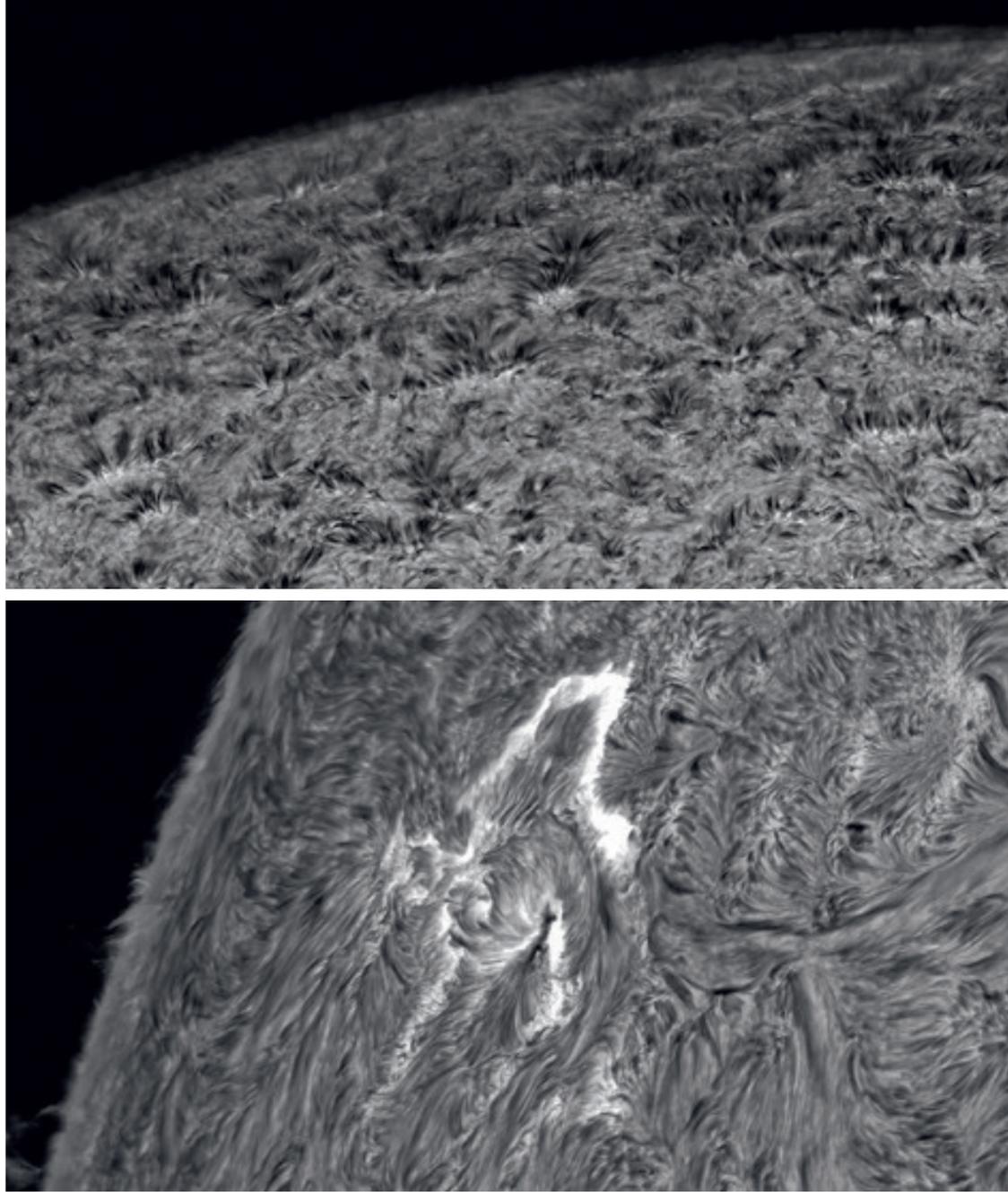
Pour obtenir les images des figures 4 et 5, l'observateur a sélectionné, grâce à un filtre, une couleur bien précise parmi toutes celles émises par le Soleil. D'une longueur d'onde de 656,3 nanomètres, elle est associée à la présence d'hydrogène : on la nomme « raie H α ».

En sélectionnant une autre couleur spécifique, associée au calcium, grâce à un autre filtre nommé Ca K (Calcium K), on peut observer la basse chromosphère (raie UV du calcium ionisé). Ce filtre ne laisse passer que le rayonnement le plus bleu

émis par le Soleil et visible par l'œil humain. La physionomie du Soleil est alors assez différente.

La figure 6 (page 21) montre la basse chromosphère, située 1 500 à 2 000 kilomètres au-dessus de la photosphère. On distingue deux bandes constituées de taches (sombres) et de zones plus claires (car plus chaudes), les facules, de part et d'autre de l'équateur solaire. On observe enfin la supergranulation, une structure en pelure d'orange matérialisant un phénomène de convection à grande échelle.

Dans la figure 7 (page 22), les images du haut et du centre couvrent un champ équivalent à 8 fois le diamètre de la Terre. La résolution est meilleure que 0,3 seconde de degré, soit environ 200 kilomètres. On y observe des zones brillantes correspondant aux facules observées en visible, mais vues ici à une altitude plus grande. On y voit aussi des cellules dont le centre est sombre (plus froid, mouvement vers le bas) et les bords brillants



(plus chaud). On y observe un groupe de taches solaires. Dans l'image centrale, de nombreux ponts de lumière sont visibles : ils sont divisés par une fine ligne centrale. Dans l'image du bas, on observe

des structures filamenteuses recouvrant partiellement un groupe de taches, ainsi que des éruptions. Les détails les plus fins sont de 0,6 seconde de degré, soit environ 410 kilomètres.

Figure 5 [←]
Deux images de spicules
au voisinage du limbe solaire.
© C. Viladrich

Figure 6 [→]
La chromosphère du Soleil,
observée à travers un filtre
Calcium K. © C. Viladrich

