

Bond

L'exploration du système solaire

| Traduction de Nicolas Dupont-Bloch



de boeck

L'exploration du système solaire

Chez le même éditeur

BENSON, Le ballet des planètes

COMINS, À la découverte de l'Univers

FREDERICK, Science atmosphérique. Une introduction

HOBBS, Fondements de la géographie régionale

HOUGHTON, Le réchauffement climatique

MILLOT, VANDERMARLIÈRE, Dessine-moi l'univers

RAVEN, BERG, HASSENZAHL, Environnement

RYDEL, Conception et construction de télescopes et astrographes amateurs

SANDERS, À la recherche de la matière noire. Histoire d'une découverte fondamentale

Bond

L'exploration du système solaire

Traduction de l'édition anglaise par Nicolas Dupont-Bloch

Ouvrage original

Exploring the Solar System, This edition first published 2012 © 2012 by Peter Bond. Wiley-Blackwell. A John Wiley & Sons, Ltd. Publication

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with De Boeck Supérieur and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web: **www.deboeck.com**

© De Boeck Supérieur s.a., 2014
Fond Jean Pâques, 4, 1348 Louvain-la-Neuve
Pour la traduction et l'adaptation française

1^{re} édition

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Imprimé en Italie

Dépôt légal:
Bibliothèque nationale, Paris: octobre 2014
Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles: 2014/0074/255

ISBN 978-2-8041-8496-4

Dédicace

À ma femme Edna, avec qui j'ai traversé le chemin rocailleux de la vie.

Sommaire

Introduction	1
1 Origines	3
2 Le Soleil	23
3 La Terre	52
4 La Lune	86
5 Mercure	112
6 Vénus	133
7 Mars	156
8 Jupiter	211
9 Saturne	243
10 Uranus	281
11 Neptune	298
12 Pluton et la ceinture de Kuiper	314
13 Les comètes, les astéroïdes et les météorites	335
14 Les exoplanètes	379
Annexes	412
Glossaire	432
Documentation complémentaire	437
Index	450

SITE WEB COMPAGNON

Ce livre possède un site Web associé (en Anglais) :

www.wiley.com/go/bond/solarsystem

incluant des illustrations et tableaux de ce livre, mis à disposition pour le téléchargement

Introduction

Nous ne cesserons d'explorer et le but de toute notre exploration sera d'arriver là où nous avons commencé... et d'en connaître l'emplacement pour la première fois. (T.S. Elliot)

Ce livre est consacré à un petit endroit particulier de l'Univers, une petite extension d'un espace majoritairement vide qui entoure une étoile banale, dans la banlieue d'une galaxie appelée Voie Lactée. Connue sous le nom de Système Solaire, cette région est occupée par le Soleil, huit planètes, des satellites naturels et des planètes naines par douzaines, et une multitude de corps encore plus petits.

Pourquoi est-il si important d'explorer et comprendre le Système Solaire ? Parce que la troisième planète en partant du Soleil est notre foyer : la Terre est, à l'heure actuelle, le seul endroit connu qui abrite des organismes vivants et de l'intelligence, le seul endroit connu qui en a jamais abrité. Ce monde « Boucles d'Or »¹ unique est le berceau de l'humanité, une fragile oasis dans l'immensité de l'espace.

Quoi qu'il en soit, le vaisseau Terre est la cible de nombreuses menaces et tensions. Certaines sont l'œuvre de l'humanité, comme la déforestation, la pollution atmosphérique, l'émission de gaz détruisant la couche d'ozone. D'autres relèvent de phénomènes planétaires naturels, comme les mouvements de la croûte terrestre, les changements du niveau de la mer. D'autres encore sont externes, comme les éruptions solaires, les astéroïdes errants.

Comme les nouvelles études sur les catastrophes naturelles nous le rappellent en permanence, la Terre est un monde en perpétuelle évolution, subissant âges glaciaires, formations de montagnes, séismes, éruptions volcaniques et impacts cosmiques dévastateurs. Depuis sa naissance, il y a 4,5 milliards d'années, la planète a subi toutes ces forces naturelles jusqu'à devenir ce monde accueillant que nous voyons aujourd'hui. Si nous pouvions comprendre comment s'est déroulée cette évolution passée, nous pourrions prédire son évolution à venir.

C'est ici que l'étude du Soleil, des planètes et des autres corps du Système Solaire passe au premier plan. Ce n'est qu'en comparant, en mettant en évidence les différences d'évolutions de tous ces corps si disparates, que nous pouvons espérer comprendre le passé, le présent et l'avenir de notre Terre.

Cette entreprise scientifique a été rendue possible par l'avènement de l'Ère Spatiale. Au cours de cette grande époque de découvertes, la technologie moderne nous a permis de construire des vaisseaux spatiaux automatiques et des robots capables d'explorer à notre place, filant à l'aventure dans l'immense et hostile océan de l'espace, afin de trouver et étudier de nouveaux mondes.

En plus d'un demi-siècle, des centaines de vaisseaux spatiaux robotiques ont été lancés de la Terre pour observer à bout portant toutes les planètes ainsi que nombre d'autres objets célestes, dans notre Système Solaire. Ce livre prend sa source dans le flot d'informations qui nous a été retourné par ces sondes, ce qui a permis aux scientifiques de constituer, morceau par morceau, une représentation réaliste de notre Système Solaire. Pour la première fois, des yeux humains ont pu voir d'imposantes falaises, des éruptions volcaniques, des lits de rivières asséchées et des formations glaciaires sur des douzaines d'autres mondes, la plupart étant totalement différents de ce qu'on observe sur Terre.

Il y a de nombreuses années, mon imagination était enflammée par des livres qui décrivaient la famille des mondes étrangers qui orbitaient autour du Soleil, bien qu'à cette époque les informations fussent, pour l'essentiel, purement spéculatives. Dès lors, j'étais devenu fasciné par les membres nombreux et variés du Système Solaire. Je souhaite que les lecteurs de ce livre soient tout autant fascinés et inspirés.

L'exploration du Système Solaire a été conçue comme une première approche pour les étudiants de premier cycle universitaire, avec un bagage scientifique réduit. Il est également destiné à offrir des connaissances et inspirer toute personne qui tourne son regard vers le ciel nocturne, et souhaite en savoir plus sur les mondes étrangers qui peuplent ce petit coin de l'Univers.

Après un chapitre d'introduction qui présente un survol du Système Solaire, ce livre se propose de décrire méthodiquement les caractéristiques de chaque planète principale et sa suite de satellites naturels, ainsi que les plus petits corps dans l'entourage du Soleil. Le dernier chapitre offre au lecteur l'occasion de comparer notre Système Solaire avec les systèmes gravitant autour d'étoiles lointaines, là où de nombreuses exoplanètes, surprenantes, exotiques, ont été découvertes.

¹ NDT : désigne une planète située dans la « zone habitable » (Chapitre 14), ni trop chaude ni trop froide, en référence au conte.

À la fin de chaque chapitre, des questions ont été ajoutées à l'usage des étudiants pour assimiler les principaux points à retenir, et pouvoir comparer les différentes planètes. Des références utiles sont mises à disposition dans les nombreux appendices, ainsi qu'une liste de publications (en Anglais) et un glossaire.

Ce livre n'aurait pas pu être écrit sans l'aide et l'encouragement de Ian Francis, directeur éditorial de Wiley-Blackwell, et Delia Sanford, éditrice responsable de ce projet. Je leur suis grandement redevable pour leur patience et leur indulgence jusqu'à l'achèvement de ce livre.

J'adresse également mes sincères remerciements à Kelvin Matthews, de Wiley-Blackwell, qui a contrôlé l'ensemble des illustrations, à l'équipe de production, en particulier Kathy Syplywczak, et aux divers relecteurs dont les commentaires et conseils utiles ont joué un rôle si important pour la mise en forme du texte final.

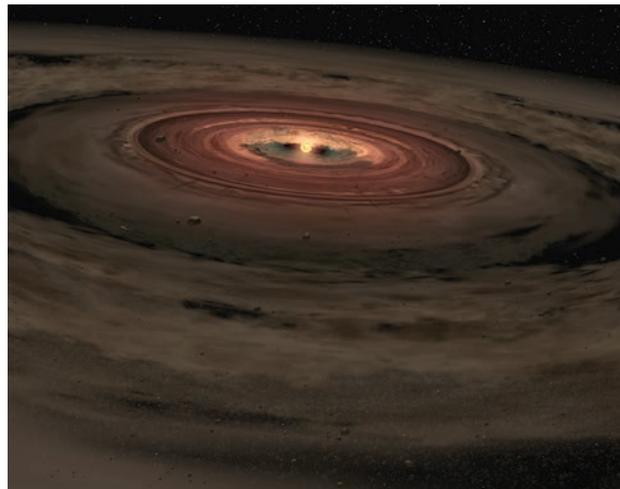
La majeure partie des informations de ce livre est issue de publications scientifiques, nombre d'entre elles sont référencées dans les dernières pages. De nombreuses autres sources scientifiques – désormais accessible par Internet – ont également été utilisées, dont des articles de revues, des communiqués de presse, et d'autres données fournies par des agences spatiales – en particulier la NASA – et des universités. Je suis également grandement reconnaissant à tous ceux qui m'ont aidé à obtenir, ou qui m'ont directement fourni, les illustrations spectaculaires qui ont enrichi cette aventure vouée au dépassement et à la découverte.

Pour conclure, je voudrais remercier ma femme, Edna, qui m'a encouragé dès le début à décrire et expliquer les merveilles de notre système Solaire.

Peter Bond

UN

Origines



Depuis des millénaires, les Hommes ont étudié le ciel et se sont questionnés sur la nature et l'origine du Soleil, de la Lune et des planètes. L'étude du Système Solaire a régné en maître sur toute l'astronomie jusqu'à l'avènement des puissants télescopes et des instruments évolués du 19^e siècle. Dans les 50 dernières années, les engins spatiaux ont survolé ou se sont mis en orbite autour de toutes

les planètes principales, se sont posés sur la Lune, Mars, Titan et un astéroïde, ont rapporté des échantillons rocheux de la Lune, du vent solaire, de poussière d'astéroïde et de comète. Cette ère d'exploration humaine et robotique a révolutionné la connaissance scientifique de ce coin de la Galaxie, et d'autres stupéfiantes découvertes sont attendues dans les prochaines décennies.

Étoiles vagabondes

Depuis des temps immémoriaux, le regard des Hommes s'est perdu avec émerveillement dans le ciel étoilé. Dans le précédent millénaire, lorsque la noirceur du ciel n'était pas altérée par l'éclairage des villes, on constatait aisément que les figures du ciel glissaient d'un horizon à l'autre au cours de la nuit, et qu'elles changeaient alors que les saisons se succédaient.

Outre le scintillement habituel des étoiles, des observateurs ont remarqué sept objets qui se déplaçaient à différentes vitesses par rapport à l'arrière-plan des étoiles « fixes »¹. Classées par ordre de luminosité décroissante, il y avait le Soleil, la Lune, Vénus, Jupiter, Mars, Mercure et Saturne. Les Grecs de l'antiquité les appelaient « planètes » (« étoiles errantes »), terme toujours en usage aujourd'hui mais qui exclut le Soleil et la Lune.

Pour les astrologues et astronomes de l'Antiquité (les deux disciplines étaient inextricablement liées pendant des siècles), les astres errants les plus importants étaient le Soleil, responsable de la lumière du jour, et la Lune, qui dominait pendant la nuit. Ces deux objets montraient un disque apparent et se déplaçaient rapidement dans le ciel. L'étude minutieuse de leurs mouvements réguliers et de leurs apparitions ont permis d'établir des calendriers, et de mesurer l'écoulement du temps de manière commode. Ainsi, une année était le temps que le Soleil mettait pour retrouver la même hauteur dans le ciel, tandis que le mois était la durée qui s'écoulait entre deux nouvelles Lunes, ou encore entre deux pleines Lunes.

Les cinq autres planètes étaient moins remarquables, bien que chacune ait ses caractéristiques propres. Par exemple, Mercure et Vénus ne s'écartaient jamais bien loin du Soleil, tant au crépuscule qu'à l'aube. Les trois autres se déplaçaient encore plus lentement de constellation en constellation, décrivant parfois des boucles dans le ciel lorsqu'elles changeaient temporairement de sens.

Il était clair, également, que les sept planètes apparaissaient souvent ensemble dans le ciel, ou, même, passaient derrière la Lune pendant les **occultations**. Elles restaient toujours confinées dans une bande étroite, appelées le **zodiaque** (d'après le mot grec « animal »). La trajectoire annuelle du Soleil dans le ciel, appelée **écliptique**, courait au milieu de cette autoroute du ciel. Il était évident que les plans des orbites des planètes étaient étroitement alignés les uns sur les autres.

L'univers géocentrique

Jusqu'au milieu du 16^e siècle, la plupart des civilisations considéraient comme un fait établi que la Terre était placée au centre de l'Univers², comme si elle constituait l'axe d'une roue, tout le reste tournant autour.

Les motivations justifiant cette opinion paraissaient légitimes. Tous les objets célestes, y compris le Soleil, se déplaçaient dans le ciel d'est en ouest (à l'exception de quelques comètes et étoiles filantes occasionnelles). De plus, comme personne n'avait jamais ressenti

¹ À une certaine période, les Grecs pensaient qu'il existait neuf planètes. Vénus possédait deux noms : l'Étoile du Soir (Hespérus) et l'Étoile du Matin (Phosphorus). De même, ils pensaient que Mercure était deux planètes différentes – Lucifer et Hermès.

² Un Univers héliocentrique (centré sur le Soleil) fut proposé par l'astronome grec Hipparque au 3^e siècle avant notre ère, mais cette idée fut loin d'être largement acceptée.

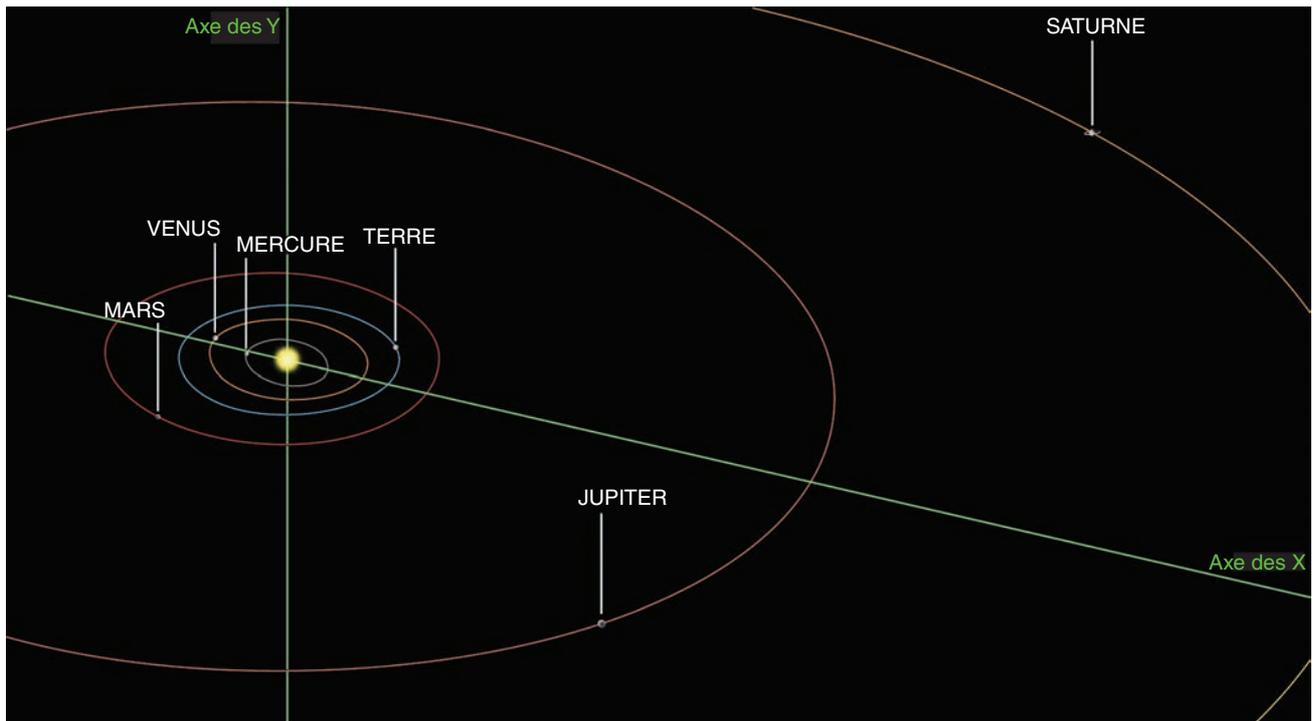


Figure 1.1 Les tailles relatives des orbites des sept « planètes » (y compris le Soleil et la Lune) visibles à l'œil nu et reconnues par les astronomes de l'antiquité. Toutes les orbites sont plus ou moins elliptiques et à peu de choses près dans le même plan que l'orbite de la Terre (l'écliptique). Le schéma est vu depuis une position au-dessus du plan de l'écliptique et décalé par rapport à l'axe perpendiculaire qui traverse le Soleil. (Lunar and Planetary Institute)

physiquement que la Terre tournait, il semblait logique de penser que c'était le ciel qui tournait autour de la Terre.

Selon la **théorie géocentrique**, le Soleil, la Lune et les planètes étaient entraînées par des sphères cristallines, invisibles, qui étaient centrées sur la Terre. Une dernière sphère, beaucoup plus grande, portait les étoiles et tournait autour de la Terre centrale en un jour.

Alors que les premières civilisations acceptaient par la preuve visuelle que la Terre était plus ou moins plate, cette idée était contredite par plusieurs séries de faits (voir Chapitre 3). Par exemple, certaines figures du ciel étoilé – les constellations – n'étaient visibles que depuis certains lieux d'observation. Or si la Terre était plate, on devrait observer les mêmes constellations depuis les différents lieux au même instant.

Une des preuves maîtresses était la courbure de l'ombre projetée de la Terre se déplaçant sur la Lune, pendant une éclipse totale de Lune. On constatait le même phénomène quel que soit le lieu d'observation, quel que soit le moment où le phénomène se produisait. Seul un corps sphérique pouvait projeter une ombre ronde dans toutes les directions : il semblait indiscutable que la Terre était sphérique.

De même, l'observation d'un navire disparaissant à l'horizon montrait que, au lieu de simplement rapetisser progressivement, sa coque disparaissait en premier, puis sa voile, enfin son mât. Cela ne pouvait être expliqué que si l'océan était courbe.

La mesure des distances et des dimensions

Un des problèmes les plus fondamentaux qu'ont eu à affronter les premiers astronomes était l'échelle de l'Univers. Quelle était la taille

de la Terre, du Soleil et de la Lune, à quelle distance étaient-ils ? Il était flagrant que la Terre était immense par rapport à n'importe quel autre objet, et comme elle hébergeait toute l'humanité, on la considérait comme le principal corps de l'Univers.

La question de la taille d'une Terre sphérique fut résolue au 3^e siècle avant notre ère par Ératosthène. Il compara la longueur des ombres en différents lieux, au moment de l'équinoxe de printemps (voir chapitre 3). D'autres informations sur les distances et tailles relatives d'autres objets célestes étaient également connues.

Puisque l'ombre de la Terre recouvrait largement la pleine Lune pendant les éclipses lunaires, la Terre devait être notablement plus large que son satellite naturel. Pendant une éclipse de Soleil, la Lune passait devant le Soleil, donc ce dernier devait être le plus éloigné des deux. De plus, puisque leurs diamètres apparents étaient comparables, le Soleil devait être nettement plus grand que la Lune. De la même manière, il arrivait que la Lune occulte ou passe devant des étoiles ou des planètes ; donc ces dernières devaient être considérablement plus lointaines.

Les calculs des astronomes grecs Aristarque (310-230 avant notre ère) et Hipparque (190-120), basés sur la dimension de l'ombre de la Terre, suggéraient que le diamètre de la Lune devait représenter un tiers de celui de la Terre, et que sa distance devait être d'environ 59 fois le rayon terrestre. Cela établit l'échelle du système Terre-Lune avec une bonne précision. Par contre, leurs méthodes géométriques simples conduirent à grandement sous-estimer la distance du Soleil.

La détermination des distances des planètes resta un problème sans solution pendant une longue période. Il devint vite manifeste, pour les observateurs du monde antique, que certaines planètes se déplaçaient plus lentement que d'autres par rapport aux constellations. Puisque des planètes comme Saturne, qui se déplacent lentement,

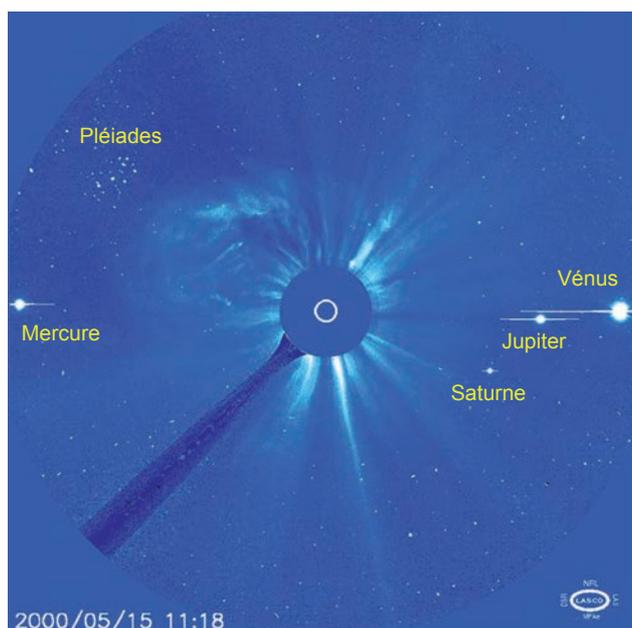


Figure 1.2 Toutes les planètes suivent une orbite qui se tient dans 8° par rapport à la trajectoire du Soleil dans le ciel – l'écliptique. Cette étroite bande céleste est appelée le zodiaque. Dans cette image provenant de la sonde SOHO, quatre planètes sont visibles près du Soleil (dont la lumière est masquée par un disque occulteur). Cette vue comprend également quelques étoiles « fixes » en arrière-plan, dont l'amas des Pléiades. (NASA-ESA)

sont moins brillantes que des planètes qui se déplacent plus vite comme Mars ou Jupiter, il semblait logique de penser que Saturne était bien plus loin de la Terre.

Il était tout aussi évident que le Soleil, la Lune et les planètes ne se déplaçaient pas toutes à la même vitesse, ni ne se contentaient de suivre de simples trajectoires courbes dans le ciel. Une des constatations les plus difficiles à expliquer étaient les « boucles » apparentes temporairement parcourues par les planètes, plus distantes. Cela se manifestait lorsque Mars, Jupiter et Saturne brillaient au plus fort aux alentours de minuit. À ces moments, la planète se dirigeait vers l'est (mouvement « *prograde* ») puis, nuit après nuit, se déplaçait moins vite, jusqu'à rester fixe par rapport aux étoiles. Elle amorçait ensuite un mouvement relatif vers l'ouest, devenant *rétrograde*, avant de se remettre progressivement à suivre le mouvement d'ensemble, vers l'est.

Pour expliquer ce mouvement, on dut attendre que les astronomes réalisent que le Soleil se tenait au centre de l'ensemble des planètes, et que la Terre décrivait une orbite autour du Soleil (voir « Le Soleil au centre » page 6. On put dès lors comprendre que ces boucles étaient la conséquence apparente de l'orbite plus petite de la Terre, qui rattrapait, puis dépassait les planètes extérieures (voir fig. 1.3) – à l'instar d'un coureur prenant la piste intérieure.

Les calculs précis des distances planétaires durent également attendre le 17^e siècle, lorsque les observateurs furent capables de mesurer des distances angulaires avec une précision suffisante. La méthode géométrique sur laquelle ils se basèrent est appelée la *parallaxe*.

Elle impliquait la mesure du décalage apparent de la position d'un objet observé depuis deux points de vue différents. Pour l'illustrer, placez votre doigt devant votre nez, puis fermez un œil, ouvrez ensuite

l'autre en fermant le premier. Votre doigt semble décalé par rapport à l'arrière-plan, bien que, naturellement, il n'ait pas bougé. Plus votre doigt est près de votre nez, plus le décalage augmente, et inversement.

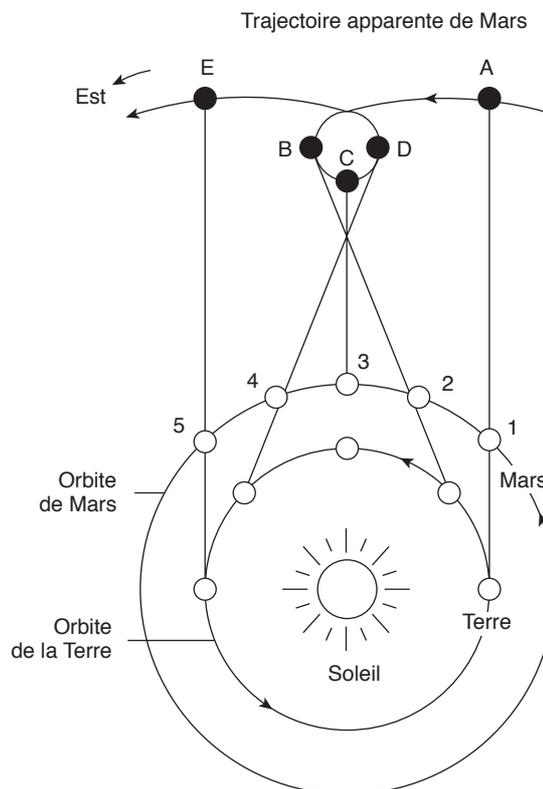


Figure 1.3 Les boucles rétrogrades apparentes dans les mouvements de Mars, Jupiter et Saturne, dont on sait maintenant qu'elles sont provoquées par les mouvements relatifs des planètes et de la Terre. Puisque la terre se déplace plus vite sur son orbite que les planètes plus éloignées, elle les dépasse en suivant sa trajectoire intérieure. Lorsque la Terre s'approche de Mars et la rattrape, la planète extérieure qui se meut plus lentement (positions 2 à 4) semble se déplacer à reculons (positions B et D) pendant quelques mois par rapport à la toile de fond des étoiles « fixes ». (Kenneth R. Lang / Tufts University, NASA)

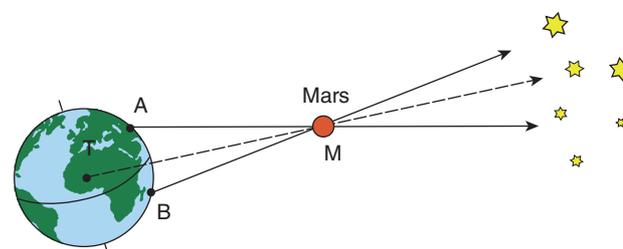


Figure 1.4 La distance d'une planète comme Mars peut être calculée en mesurant son angle de visée – sa position par rapport à l'arrière-plan des étoiles fixes – à partir de deux ou plusieurs emplacements depuis la Terre. Si la longueur de la base (c'est-à-dire la distance entre deux sites d'observation, A-A) est connue, la distance peut être connue grâce à la trigonométrie élémentaire. (ESO)

Les astronomes réalisèrent que si le décalage parallactique – la parallaxe – d’une planète pouvait être mesuré depuis deux lieux d’observation largement éloignés, alors ils pouvaient calculer sa distance. Cette méthode fut utilisée pour la première fois par un astronome français, Jean Richer, qui travaillait à Cayenne (en Guyane française), en relation avec Giovanni Domenico Cassini et Jean Picard, restés à Paris. Ils réalisèrent des mesures simultanées de la parallaxe de Mars alors qu’elle était au plus près de la terre en 1671, utilisant l’horloge à pendule récemment inventée pour s’assurer que les mesures étaient réalisées au même instant³.

Le calcul de Cassini conduit à attribuer la valeur de 140 millions de km à l’**unité astronomique** (UA) – la distance moyenne Terre-Soleil. Dès lors que cette distance fut connue avec une précision satisfaisante, la troisième loi de Kepler (voir Encadré 1.1) pouvait être exploitée pour calculer, pour la première fois, les distances entre le Soleil et les planètes.

Au cours du 18^e siècle, une importante mobilisation de temps, d’argent et d’efforts fut consacrée pour tenter d’affiner ces données. Une des méthodes était d’observer les rares transits de Vénus devant le Soleil depuis différents lieux. Les plus célèbres observations de ces transits se déroulèrent en 1761 et 1769, quand l’explorateur britannique, le capitaine James Cook, fit voile vers le Pacifique, parmi une armée de 150 observateurs éparpillés sur la surface du globe. Cependant les résultats ne furent guère précis (voir Chapitre 6).

Une tentative plus chanceuse fut la campagne internationale de détermination de la parallaxe de l’astéroïde Éros, lorsqu’il passa au plus près de la Terre en 1931. Des mesures extrêmement précises furent possibles, car Éros, dénué d’atmosphère, apparaît comme parfaitement ponctuel même dans les plus grands télescopes. La valeur de l’Unité Astronomique fut ramenée à 149,6 millions de km.

Depuis, des techniques plus sophistiquées ont été mises en œuvre pour améliorer la précision de l’échelle du Système Solaire. Une des plus productives est le radar, envoyant un signal radio qui se réfléchit sur les surfaces des planètes (voir Chapitres 5, 6 et 13). En connaissant la vitesse de ces micro-ondes, et en mesurant à la fraction de seconde près le temps séparant leur émission de leur réception, on mesure aisément les distances (le radar est également utilisé pour révéler les tailles et dimensions de centaines d’astéroïdes). On utilise une technique similaire pour calculer les variations de distance Terre-Lune, en exploitant la réflexion d’un flash laser sur des miroirs spéciaux laissés sur la surface lunaire.

Dès que la distance d’un objet est connue avec précision, on peut déterminer son diamètre à partir de ses dimensions angulaires apparentes, telles qu’on les voit dans un télescope. Malheureusement, cela est très difficile pour les membres du Système Solaire qui sont les plus petits et les plus distants, en particulier si leur **albédo**, ou réflectivité de surface, est incertain.

En général, plus l’objet est grand, plus sa surface réfléchit la lumière. Toutefois, certains objets sont de bien meilleurs miroirs que d’autres. Un objet petit et réfléchissant peut avoir la même luminosité apparente qu’un objet de grande taille mais peu réfléchissant. De récentes observations de quelques objets de la ceinture de Kuiper, au-delà de l’orbite de Pluton, indiquent que leur albédo est plus important qu’on le pensait. Puisqu’ils sont plus réfléchissants que prévu, les astronomes ont révisé leur diamètre à la baisse.

Une autre méthode, mettant en œuvre l’occultation d’une étoile par une planète ou tout autre objet, est particulièrement adaptée aux

objets qui présentent des difficultés d’observation. Le diamètre de l’objet est calculé en se basant sur la durée pendant laquelle il occulte une étoile. Malheureusement, s’il possède une atmosphère dense et nuageuse, l’occultation ne permet que de mesurer le diamètre de sa couche nuageuse supérieure.

Le Soleil au centre

La difficile rupture avec la tradition et l’acceptation de l’idée que le Soleil est au centre de l’Univers a commencé avec le prêtre et astronome polonais Nicolaus Copernicus, ou Copernic (1473-1543). Il décida que le seul moyen de donner un sens aux orbites des planètes était de reléguer le statut de la Terre à celui d’une planète décrivant une orbite autour du Soleil. Le mouvement des étoiles, les faisant traverser le ciel, s’expliqua par une Terre sphérique et en rotation, tandis que le calendrier des saisons et le défilement des constellations dans le ciel furent mis sur le compte de son déplacement annuel autour du Soleil.

L’ouvrage le plus marquant de Copernic, intitulé *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (À propos des révolutions et des sphères célestes), fut publié peu avant sa mort. Curieusement, cela ne provoqua pas de violentes réactions de la part de ses contemporains traditionnalistes, et il n’en résulta pas de bouleversement dans la pensée scientifique. Manquant de preuves déterminantes pour pencher dans l’un ou l’autre sens, les grands esprits de l’époque étaient dans l’impasse.

Un demi-siècle s’écoula avant que l’intervention de deux savants fit pencher la balance en faveur de la théorie **héliocentrique** de Copernic. La première percée fut effectuée par un jeune allemand, Johannes Kepler. Par une étrange ironie de l’histoire, Kepler était un élève de Tycho Brahé, un des plus ardents opposants à la théorie de Copernic. Chargé du douteux privilège de devoir trouver une explication au mouvement rétrograde de Mars (figure 1.3), Kepler fut en mesure de faire usage des remarquables données observationnelles collectées par son employeur.

Brahé mourut en 1601, mais Kepler continua avec acharnement à étudier le problème, et trouva enfin la solution. Les orbites des planètes, déclara-t-il, n’étaient pas des cercles, mais des ellipses⁴. En peu de temps, Kepler put élaborer les deux premières **lois des mouvements planétaires** (voir Encadré 1.2). Sa troisième, et plus importante loi, suivit en 1619.

Dès lors, la distance relative de chaque planète par rapport au Soleil put être calculée avec précision. Saturne, la plus éloignée des planètes connues à cette époque, fut placée à près de dix fois la distance Terre-Soleil. Puisque les distances absolues demeuraient inconnues, l’unité de mesure standard devint l’unité astronomique.

L’année où Kepler découvrit que les orbites étaient elliptiques, un scientifique italien, Galileo Galilei, ou Galilée, construisit une lunette rudimentaire, constituée de deux lentilles placées à chaque extrémité d’un tube, puis commença à étudier le ciel étoilé. Il obtint rapidement la preuve observationnelle qui consolida les théories de Copernic et Kepler. Galilée devint le premier dans l’histoire qui observa les phases de Vénus provoquées par son mouvement autour du Soleil. Il nota également des montagnes et des cratères sur la Lune, vit les planètes comme des disques et non plus de simples points.

Le plus important fut sa découverte de quatre objets d’aspect stellaire près de Jupiter. En notant leurs déplacements journaliers, il fut capable de calculer leurs périodes orbitales, et montra qu’il s’agissait

³ Une découverte annexe de cette expérience fut que le pendule oscillait plus lentement à Cayenne qu’à Paris, révélant ainsi que la gravité est légèrement inférieure à l’équateur. Newton exploita par la suite ce résultat pour démontrer que le diamètre de la Terre est plus grand à l’équateur.

⁴ La tâche de Kepler fut quelque peu facilitée par le fait que, des cinq planètes connues, seule Mercure suivait une orbite plus elliptique que Mars.

Ori.	*	*	○	*	Occ.	
Ori.		○	*	*	*	Occ.
Ori.		*	*	○	Occ.	

Figure 1.5 En janvier 1610, Galileo Galilei (Galilée) a utilisé sa lunette rudimentaire pour découvrir trois « étoiles » alignées de part et d'autre de Jupiter. Sur une période de quelques semaines, une quatrième « étoile » est apparue. Puisque leurs positions se décalaient, Galilée en a correctement déduit qu'il s'agissait de quatre satellites naturels. Occ. est l'abréviation en Latin pour « ouest », et Ori. Signifie « est ».

des lunes joviennes (voir Chapitre 7). Cette découverte des premières lunes autour d'une planète (autres que la Lune autour de la Terre), confirma que la Terre n'était pas au centre de l'Univers, et que tout ne tournait pas autour de notre monde.

Les découvertes de Galilée firent sensation, bien que les dirigeants de l'Église catholique romaine continuèrent obstinément à professer un Univers géocentrique. En 1633, Galilée fut convoqué devant l'inquisition, et dû se rétracter sous peine de torture.

Newton et la gravitation

L'épreuve suivante allait être celle de l'explication des lois de Kepler. Bien que Galilée conduisit de nombreuses expériences sur l'effet de la gravitation, il ne se rendit pas compte de toute la portée de ses découvertes. Cela fut laissé à un anglais, Isaac Newton, né en 1642, l'année même de la mort de Galilée.

On attribue à Newton l'anecdote selon laquelle il découvrit la gravitation universelle en observant une pomme tombant d'un arbre. Quelle que soit la vérité, en 1684 Newton fut en mesure d'expliquer les mouvements planétaires. Sa **loi de la gravitation** postulait que toutes les choses s'attirent mutuellement, et que la force de cette attraction gravitationnelle était proportionnelle à leurs masses (voir Chapitre 8).

Étant donné que le Soleil concentre presque toute la masse du Système Solaire, il aurait dû attirer à lui toutes les planètes. Newton expliqua que cela n'arrivait pas car les vitesses orbitales étaient tout juste suffisantes pour compenser la gravitation du Soleil. Il en résulte que les planètes tombent vers le Soleil, mais que les courbes de leurs chutes les font tomber autour de lui. On appelle parfois cela la chute libre (la même explication, bien sûr, s'applique aux satellites artificiels).

Les lois de Newton postulèrent aussi que l'attraction gravitationnelle décroît avec la distance. Par exemple, si la planète A est deux fois plus loin du Soleil que la planète B, la force gravitationnelle s'exerçant sur la planète A vaut le quart de celle qui s'exerce sur la planète B. En pratique, cela signifie qu'un satellite artificiel en orbite basse autour de la Terre doit tourner à 8 km/s, alors que la Lune doit tourner autour de la Terre à 1 km/s pour éviter de s'écraser sur notre planète. De même, les planètes éloignées du Soleil peuvent décrire des mouvements orbitaux moins rapides que celles qui sont dans le Système Solaire interne.

Les lois de Newton expliquent également pourquoi la vitesse orbitale d'une planète augmente lorsqu'elle approche du périhélie (le point le plus proche du Soleil), et ralentit à l'approche de l'aphélie (le point le plus éloigné du Soleil).

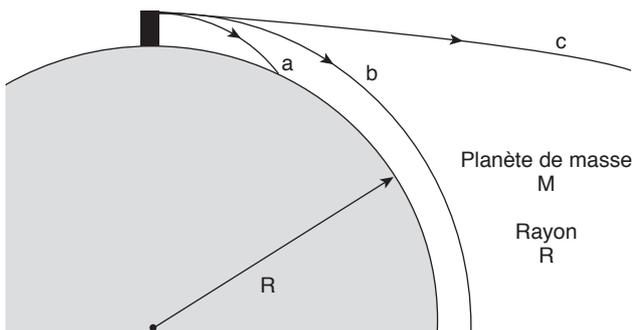


Figure 1.6 (a) si une sonde n'atteint pas la vitesse orbitale, elle retombe à la surface de la planète. (b) Si elle atteint la vitesse orbitale, elle se maintiendra dans une trajectoire rapprochée (en orbite) autour de la planète dans des conditions de chute libre. (c) Si la sonde atteint la vitesse de libération, elle sera en mesure d'échapper à l'attraction gravitationnelle de la planète et de se diriger vers les autres planètes. Les mêmes règles s'appliquent aux satellites artificiels autour des planètes et à ceux qui sont en orbite autour du Soleil.

Depuis cette époque, la mécanique céleste des orbites dans le Système Solaire fut très bien comprise. À l'exception de Mercure, dont le mouvement orbital refusait d'obéir aux lois de Newton (voir Chapitre 5), les seuls problèmes significatifs concernaient des variations orbitales mineures, causées par l'interaction gravitationnelle entre les planètes, en particulier dans le cas de la massive Jupiter. L'étude minutieuse de changements inattendus dans la vitesse orbitale d'Uranus permit de déterminer l'emplacement de Neptune, qui a été calculé avec succès (voir Chapitre 11), bien que certains considèrent que cette découverte fut seulement un coup de chance.

Qu'est-ce qu'une planète ?

Dans l'antiquité, les astronomes connaissaient huit planètes. Lorsque le Soleil, la Terre et la Lune furent soustraits à cette liste, le nombre de planètes visibles à l'œil nu fut réduit à cinq : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne.

L'invention du télescope rendit possible la recherche de planètes moins lumineuses, plus lointaines. La première nouvelle venue, Uranus, fut découverte bien au-delà de l'orbite de Saturne par William Herschel en 1781. La liste s'allongea en 1801, lorsque Giuseppe Piazzi dénicha Cérès dans l'intervalle entre les orbites de Mars et Jupiter. Pallas, Junon et Vesta – objets dont les orbites étaient similaires à celles de Cérès – furent découverts entre 1802 et 1807. Comme ils étaient notablement plus petits et moins massifs que les autres planètes, ils furent bientôt rétrogradés au rang de « planètes mineures », ou « astéroïdes » (objets ponctuels comme les étoiles).

Presque 40 années s'écoulèrent avant que la huitième planète, Neptune, soit observée par Johan Galle et Heinrich D'Arrest. Cependant, ni Uranus ni Neptune ne semblait suivre la trajectoire attendue, suggérant que même les plus lointaines planètes pouvaient être perturbées par leurs voisins. Cette quête des mondes s'acheva en 1930, lorsque Clyde Tombaugh prit un cliché de la minuscule image de Pluton.

Pendant de nombreuses années, on accepta généralement l'idée qu'il existait neuf planètes, en dépit des protestations croissantes selon lesquelles Pluton était trop petite et de masse trop faible pour mériter

Encadré 1.1 Orbites

La direction d'une sonde ou d'un quelconque corps sur son orbite peut être **prograde**, lorsqu'un satellite tourne dans le même sens que la planète (ou que l'étoile), ou **rétrograde**, quand il tourne dans le sens opposé à celui de la planète (ou de l'étoile). Toutes les planètes tournent autour du Soleil dans le même sens prograde – d'ouest en est, c'est-à-dire dans le sens inverse des aiguilles d'une montre lorsqu'on se place au-dessus du pôle nord du Soleil. Par contre, beaucoup de comètes voyagent dans le sens rétrograde (dans le sens des aiguilles d'une montre).

Divers termes techniques sont en usage pour décrire les caractéristiques de ces orbites. Le temps que met un objet pour boucler son orbite est la **période orbitale**. Le point le plus rapproché d'une orbite possède le préfixe « péri » – par conséquent **périgée** pour un satellite autour de la Terre, et **périhélie** pour un objet tournant autour du Soleil (Helios = Soleil). Le point le plus éloigné d'une orbite a pour préfixe « ap » – comme dans l'**apogée** et l'**aphélie**.

Le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil s'appelle l'**écliptique**. Les orbites des autres planètes, comètes et astéroïdes sont inclinées par rapport à ce plan. L'angle de cette inclinaison est l'**inclinaison orbitale**. L'inclinaison de l'orbite d'un satellite est mesurée par rapport à l'équateur de la planète. En conséquence, une orbite placée exactement au-dessus de l'équateur possède une inclinaison de 0°, tandis qu'une autre passant au-dessus des pôles de la planète a une inclinaison de 90°.

Une planète, un astéroïde ou une comète traverse l'écliptique deux fois au cours de chacune de ses orbites autour du Soleil. Les points où une orbite croise un plan s'appellent les **nœuds**. Lorsqu'un corps en orbite traverse le plan de l'écliptique en direction du nord (on pourrait dire « au-dessus »), ce nœud est considéré comme le **nœud ascendant**. En direction du sud (« au-dessous »), c'est le **nœud descendant**. La ligne qui joint le nœud ascendant et le nœud descendant d'une orbite est appelée la **ligne des nœuds**.

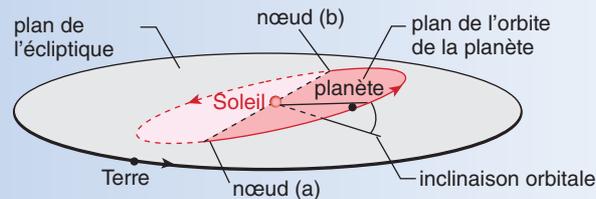


Figure 1.7 Quelques caractéristiques importantes de l'orbite d'une planète. Il s'agit ici d'une planète inférieure, c'est-à-dire plus proche du Soleil que la Terre. Son orbite est inclinée sur l'écliptique – le plan de l'orbite de la terre. L'orbite de la planète traverse l'écliptique en deux nœuds – le nœud ascendant (a) et le nœud descendant (b). (D'après l'Open University)

Un des plus importants éléments orbitaux, ou Kepleriens, est le **demi-grand axe**, assimilé à la distance moyenne d'un objet par rapport à son centre (planète ou Soleil). La forme d'une orbite est décrite par son **excentricité**, mesurée par un nombre entre zéro et un. Une excentricité de zéro indique une orbite circulaire. Une parabole a une excentricité de 1.

ce titre. La discorde éclata en 2003, lorsque Mike Brown découvrit 2003 UB 313 (appelée aujourd'hui Eris), un objet dont la taille est comparable à celle de Pluton. Avec l'utilisation de détecteurs de plus en plus sensibles, il semblait probable qu'on eut bientôt découvert des dizaines de planètes de la taille de Pluton.

Considérant qu'il n'existait pas de définition unanimement admise pour le terme « planète », et face au débat féroce quant à la rétrogradation du statut de Pluton, les membres de l'Union Astronomique Internationale se réunirent en assemblée générale en 2006, à Prague. Après une interminable discussion, ils s'accordèrent pour définir une planète comme un corps céleste qui : (a) est en orbite autour du Soleil, (b) possède une masse suffisante pour que sa propre gravité vainque les forces de cohésion de ses constituants, de façon qu'il prenne une forme (approximativement) ronde en équilibre hydrostatique, et (c) qui a nettoyé le voisinage de son orbite.

En se fondant sur ces nouveaux critères, on considère aujourd'hui que le Système Solaire se compose de huit planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Une nouvelle catégorie distincte, celle des « planètes naines », fit son apparition. Pour être classée dans les planètes naines, un corps doit décrire une orbite autour du Soleil et présenter une forme approximativement

ronde. Les premiers corps baptisés planètes naines furent Cérès (le plus grand des astéroïdes), Pluton et Eris, et l'on s'attend à ce que beaucoup d'autres soient découverts à l'avenir.

Cette décision n'a pas reçu l'agrément de tous. Une critique fréquente concerne la signification exacte de ce qui est appelé « nettoyer son voisinage ». Par exemple, les critiques font prévaloir que Neptune est considérée comme une planète, alors que de nombreux objets de la ceinture de Kuiper (dont Pluton) croisent son orbite. Les tenants de cette critique suggèrent qu'il serait peut-être plus approprié de choisir la taille comme critère, surtout lorsqu'on considère les diamètres des objets assez grands pour que leur propre gravitation domine leur résistance structurelle. Il est également quelque peu embarrassant de considérer Cérès – le plus grand des astéroïdes – comme une planète naine.

Une autre complication survient lorsque la définition en vigueur est appliquée aux planètes extrasolaires, c'est-à-dire aux planètes en orbite autour d'autres étoiles (voir Chapitre 14). La taille n'est pas un critère déterminant, puisque beaucoup de ces planètes ont une taille et une masse similaires à des « étoiles ratées », petites et froides, connues sous le nom de naines brunes. Au lieu de cela, les astronomes tentent de distinguer les planètes extrasolaires géantes des naines

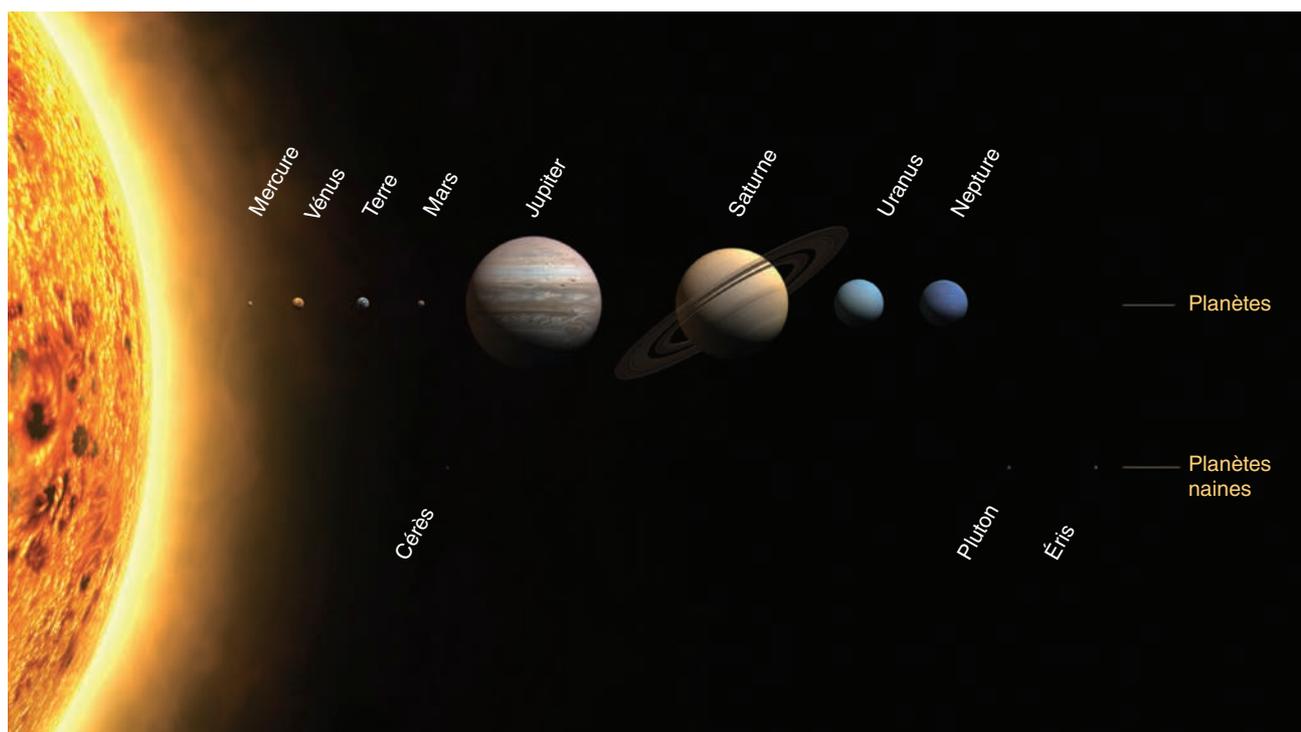


Figure 1.8 Dans ce « nouveau » Système Solaire, tel qu'il a été défini par l'Union Astronomique Internationale en 2006, on trouve huit planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune (vues ici dans l'ordre de leur distance au Soleil). Une nouvelle catégorie distincte d'objets, appelée « planètes naines » inclut le plus grand des astéroïdes, Cérès, et les deux plus grands objets connus de la ceinture de Kuiper, Pluton et Eris. Les dimensions relatives des planètes et du Soleil sont respectées dans ce dessin. Le diamètre de Jupiter est d'environ onze fois celui de la Terre, et celui du Soleil d'environ dix fois celui de Jupiter. Les distances des planètes ne sont pas à l'échelle. (UAI)

brunes en déterminant la manière dont elles sont nées. Une étoile se forme à partir de l'effondrement gravitationnel d'une nébuleuse gazeuse, tandis qu'une planète est le résultat de collisions et d'accrétions (effet boule de neige) des particules d'un disque de gaz et de poussières autour d'une étoile centrale. Et même dans ce cas, cette méthode de différenciation est difficile à appliquer, particulièrement dans le cas d'objets de la taille d'une planète qui ont été éjectés dans l'espace interstellaire, et n'ont plus d'étoile autour de laquelle tourner.

Le système Solaire

Il y a cinquante ans, la population du Système Solaire comprenait une étoile centrale, neuf planètes, 31 satellites naturels et des milliers de comètes et astéroïdes. Cependant, avec l'avènement de l'Ère Spatiale et du développement d'instruments au sol toujours plus sensibles, l'inventaire des objets s'est spectaculairement accru. Aujourd'hui, la communauté astronomique reconnaît huit planètes et cinq planètes naines, le score des satellites naturels a dépassé 170 et le nombre de petits corps identifiés grimpe rapidement, au fur et à mesure que les recherches, utilisant des équipements dont la sensibilité augmente, dénichent des milliers de comètes passant à proximité du Soleil, et de corps glacés de la ceinture de Kuiper, au-delà de Neptune.

Numériquement, le Système Solaire est essentiellement constitué de débris sous forme de comètes, astéroïdes, météorites et poussières. Ce sont les laissés-pour-compte de la formation des planètes, il y a quatre milliards d'années et demi. La ceinture principale d'astéroïdes,

entre Mars et Jupiter, est peuplée par des millions de corps rocheux qui sont gardés, comme un troupeau, par la puissante gravitation des géantes gazeuses à proximité. On pense que ce sont des **planétésimaux** – de petites briques planétaires – qui n'ont pas été en mesure de s'accréter à cause de l'influence gravitationnelle de Jupiter.

Au-delà de l'orbite de Neptune, on trouve deux autres concentrations de petits corps, cette fois largement constitués de glace. La région interne, connue sous le nom de ceinture de Kuiper, est le point d'origine des comètes à courte période. Pluton et Eris sont ses habitants les plus connus. Les périodes orbitales des corps de la ceinture de Kuiper vont de 200 à 400 ans, pour des corps comme Pluton, à 1 000 ans ou plus pour ceux qui suivent des orbites très elliptiques, les amenant loin du Soleil.

La ceinture de Kuiper constitue une sérieuse énigme pour les théories de la formation des planètes, car elle contient moins d'un pourcent de la masse supposée dans la théorie de la nébuleuse protosolaire. Si les corps de la ceinture de Kuiper s'étaient formés comme l'ont fait les planètes de type terrestre, ou planètes telluriques, en grossissant par l'accumulation de petits corps tandis qu'ils couraient sur leur orbite autour du Soleil, cela aurait pris plus longtemps que l'âge du Système Solaire pour ne former qu'un seul de ces objets de la ceinture de Kuiper !

Plus loin encore – en réalité tellement loin qu'aucun de ces corps n'a encore été découvert, on suppose qu'il existe le nuage d'Oort, le foyer des comètes à longue période.

Les caractéristiques de base du Système Solaire sont simples à décrire. Près du Soleil, là où les températures sont élevées, on trouve

Tableau 1.1

Les planètes : relation entre leur distance au Soleil et leur densité moyenne.

Planète	Distance au Soleil (UA)	Densité moyenne (g/cm ³)
Mercure	0,3871	5,43
Vénus	0,7233	5,24
La Terre	1,0	5,52
Mars	1,5237	3,91
Jupiter	5,2028	1,33
Saturne	9,5388	0,69
Uranus	19,1914	1,29
Neptune	30,0611	1,64

quatre planètes « terrestres », petites mais denses, composées de roches. Au-delà de Mars, où les températures sont toujours au-dessous de zéro, commence le domaine des géantes gazeuses, Jupiter et Saturne, puis des géantes de glace, Uranus et Neptune.

Les orbites des planètes principales sont approximativement circulaires, et proches du plan de l'écliptique. Toutes les planètes ainsi que la ceinture principale d'astéroïdes tournent autour du Soleil dans la même direction, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre si l'on se place au-dessus du pôle nord du Soleil. C'est aussi le sens de rotation du Soleil. Toutefois, cette belle symétrie se brise lorsqu'on s'approche des petits corps glacés du Système Solaire. Les comètes peuvent survenir de n'importe quelle direction, les orbites des corps de la ceinture de Kuiper n'ont pas d'orientation préférentielle, suggérant qu'il existe un essaim sphérique de ces objets, entourant le Soleil et les planètes principales.

Des quatre planètes internes, seules Vénus et Mars possèdent des atmosphères denses – bien qu'elles soient de nature très dissemblable – tandis que Mercure est trop peu massive pour être capable de retenir une enveloppe gazeuse. Tandis que Vénus et Mars ont largement en commun le dioxyde de carbone, la Terre fait figure d'originale, avec son atmosphère dominée par l'azote et l'oxygène. La présence de ce dernier peut être attribuée au fait que la Terre – pour autant qu'on le sache – est la seule à héberger la vie dans le Système Solaire. Les satellites ne sont pas légion : la Lune tourne autour de la Terre, Mars possède deux petits compagnons qui sont généralement considérés comme des astéroïdes capturés.

Comme leurs noms le suggèrent, les géantes sont caractérisées par leur grande taille – des dizaines, jusqu'à des centaines de fois plus massives que la Terre, et des densités globalement assez faibles dues à la prédominance d'hydrogène et d'hélium dans leur constitution. Sans exception, ces quatre géantes possèdent des systèmes d'anneaux constitués de poussières, de glace et de débris rocheux, et leur influence gravitationnelle est telle qu'elles retiennent des douzaines de satellites – la plupart d'entre eux ayant été capturés il y a des milliards d'années.

Les planètes telluriques, relativement proches du Soleil, ont toutes des vitesses orbitales élevées, avec des durées inférieures à deux années terrestres (voir Encadré 1.2). Par contre, leurs rotations axiales sont lentes, et leurs inclinaisons axiales sont très différentes.

L'axe de Mercure est presque à angle droit de son orbite. Il lui faut 58 jours pour faire un tour sur elle-même, soit approximativement les deux tiers du temps qu'il lui faut pour parcourir son orbite autour du Soleil. Vénus semble avoir été frappée à la renverse. Ainsi, elle tourne sur elle-même dans le sens rétrograde en 243 jours terrestres, une durée plus longue que sa révolution orbitale. La Terre et Mars ont des journées et des saisons très comparables – du moins à l'époque actuelle ; en effet, la période sidérale⁵ de leur rotation axiale, ou journée sidérale, sont pour toutes deux d'environ 24 heures, et leurs axes sont inclinés de 24 à 25° sur leur orbite.

Les mouvements des planètes externes sont bien différents. Leur grande distance au Soleil ne requiert qu'une faible vitesse pour les maintenir en orbite. Les périodes orbitales sont comprises entre 12 ans pour Jupiter, à 165 ans pour Neptune. Cependant, malgré leur embonpoint, elles tournent toutes plus vite sur leur axe que leurs cousines telluriques, avec des journées sidérales de 10 à 20 heures. Par ailleurs, on constate une grande variété dans leurs inclinaisons axiales. Jupiter est pratiquement droite, Saturne et Neptune sont plus inclinées que la Terre ou Mars, tandis qu'Uranus tourne penchée sur le côté, à tel point que ses régions polaires sont pointées soit en direction, soit à l'opposé du Soleil.

La naissance du Système Solaire – premières hypothèses

Le Soleil, qui concentre largement 99 % de toute la masse du Système Solaire, effectue une rotation en approximativement 24 jours. À l'opposé, les plus grandes planètes, Jupiter et Saturne, tournent sur elles-mêmes en 10 heures environ. Lorsqu'on combine cela avec leurs mouvements orbitaux, il apparaît que Jupiter monopolise 60 % du moment angulaire du Système Solaire, Saturne en concentre 25 %. À comparer aux 2 % du paresseux Soleil.

Toute théorie de cosmogonie qui tente de prendre en considération la formation du Système Solaire doit prendre en compte le moment angulaire des objets du Système Solaire, ainsi que le fait que toutes les planètes tournent autour du Soleil dans la même direction, plus ou moins sur le même plan. La conclusion évidente est qu'ils se sont tous formés de la même façon, et à peu près à la même époque.

Deux possibilités semblent émerger : soit les planètes se sont formées à partir des matériaux provenant du Soleil ou d'une étoile compagne voisine, soit elles se sont formées à partir d'un nuage de matière éparpillée qui entourait le Soleil. Quoi qu'il en soit, les théoriciens se sont affrontés pendant des siècles pour faire coïncider leurs hypothèses avec les faits, afin de choisir l'une d'entre elles.

Une des plus anciennes hypothèses, et qui a le plus de succès, qui tente d'expliquer d'où provient le Système Solaire, est l'hypothèse de la nébuleuse primordiale – l'idée que le Soleil et les planètes se sont formés à partir d'un immense disque de gaz et de poussières en rotation lente. Une version modifiée de cette hypothèse est l'explication généralement acceptée aujourd'hui.

Quelques preuves déterminantes proviennent des observations contemporaines des systèmes stellaires lointains. Aujourd'hui, les télescopes spatiaux peuvent pénétrer le cœur des nuages moléculaires géants, tels que la Nébuleuse d'Orion, et chercher des étoiles jeunes de type solaire qui reproduisent les conditions qui ont prévalu dans notre Système Solaire il y a 4,6 milliards d'années.

Ces observations dévoilent que ce qu'on appelle des disques protoplanétaires, ou *proplyds*, sont présents autour de la plupart de très

⁵ La période de rotation sidérale est le temps que met une planète à tourner une fois sur son axe, par rapport à une étoile en arrière plan.

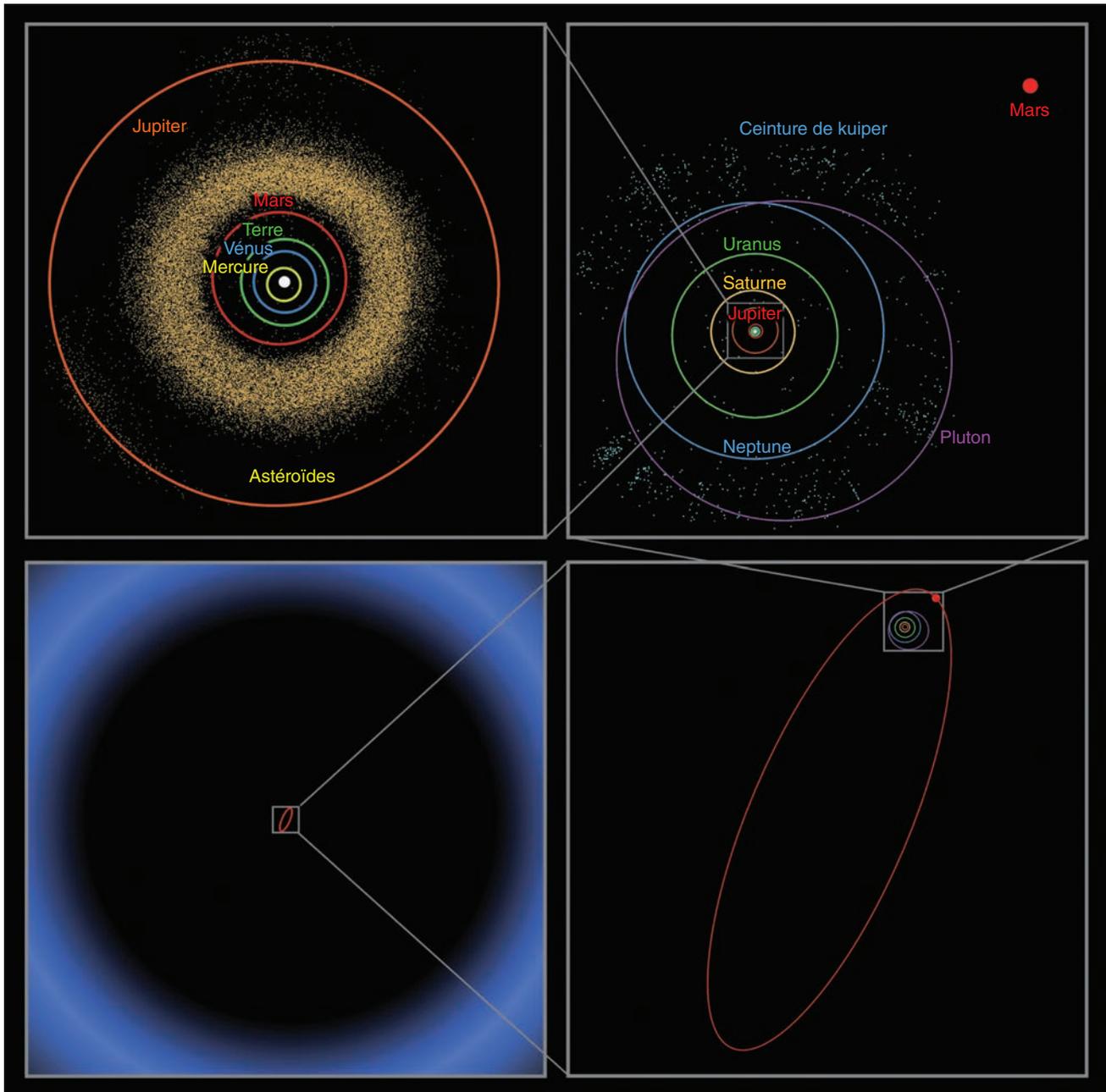


Figure 1.9 Ces quatre cadres montrent l'échelle du Système Solaire tel que nous le connaissons aujourd'hui. En haut à gauche, les orbites des planètes internes et la ceinture principale d'astéroïdes. En haut à droite, les orbites des planètes externes et la ceinture de Kuiper. En bas à droite, l'orbite et la position actuelle de Sedna, qui s'éloigne plus du Soleil qu'aucun autre objet du Système Solaire. En bas à gauche, même l'orbite particulièrement elliptique de Sedna reste bien en deçà du bord interne du nuage d'Oort estimé (en bleu). Ce nuage sphérique contient des millions de corps glacés en orbite aux limites de l'attraction gravitationnelle du Soleil. (NASA/JPL/R. Hurt, SSC-Caltech)

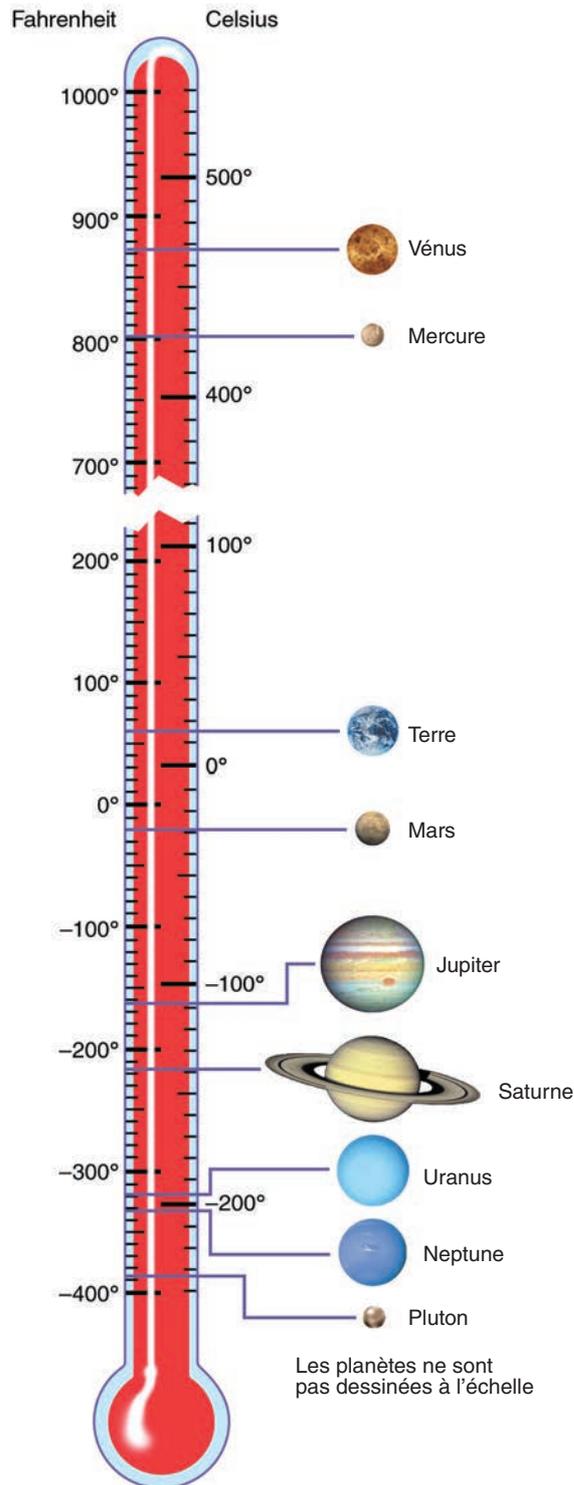


Figure 1.10 En général, la surface d'une planète décroît avec sa distance au Soleil. Vénus est l'exception, car son atmosphère dense de dioxyde de carbone piège la radiation infrarouge. L'effet de serre galopant élève sa température de surface à 467 °C. La lente rotation de Mercure et sa fine atmosphère ont pour conséquence une température du côté nuit 500 °C plus froide que celle de son côté jour indiquée au-dessus. Les températures de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune sont indiquées pour une altitude où la pression de l'atmosphère est égale à celle du niveau de la mer sur Terre. La Terre réside au centre de la « zone habitable », où l'eau peut exister à l'état liquide et où les conditions sont favorables à la vie. (Lunar and Planetary Institute)

jeunes étoiles – âgées de moins de 10 millions d'années. Beaucoup de ces disques sont plus grands que notre Système Solaire. Des observations d'étoiles un peu plus vieilles montrent comment ces disques évoluent au cours du temps, avec la formation de nuées de débris de roche et de glace, de hiatus créés par la naissance de nouvelles planètes.

On considère en général que le Système Solaire a débuté avec la contraction d'un nuage de gaz interstellaire. Le déclencheur de cet affaissement a pu être le souffle d'une onde de choc d'origine extérieure – peut-être une explosion de supernova, des ondes de densité se propageant dans la Galaxie, ou une décroissance majeure du champ magnétique ou de la température du nuage. La première de ces explications est le meilleur candidat, puisque nombre d'étoiles se forment en amas au sein de nuages contenant une matière équivalant à des centaines de masses solaires. Lorsque les étoiles géantes de l'amas atteignent le terme de leur courte vie, elles produisent probablement une série de supernovae, précédées par de puissants vents stellaires.

Au bout de plusieurs millions d'années, le nuage originel peut se réduire en fragments plus petits, chacun se mélangeant avec des éléments plus lourds provenant des étoiles agonisantes, en plus des omniprésents hydrogène et hélium. Une fois que ces fragments ont atteint une densité critique, ils peuvent vaincre les forces associées à la pression du gaz, puis s'effondrer sous l'effet de leur propre gravitation.

Le nuage en contraction commence à tourner sur lui-même, doucement dans les premiers temps, puis de plus en plus vite – à l'image d'un patineur qui tournoie plus vite en repliant ses bras. Étant donné que les matériaux tombant d'au-dessus et d'au-dessous du plan de rotation se percutent au niveau du plan moyen du nuage en cours de contraction, leur mouvement est stoppé. Le nuage commence à s'aplatir sous forme de disque, avec un renflement au centre, là où la protoétoile se forme. Le disque était probablement plus fin à grande distance de la protoétoile, la pression du gaz y étant plus faible.

Une telle nébuleuse doit certainement tourner lentement à ses premiers stades, mais à mesure de sa contraction, en raison de la conservation de son moment angulaire, le nuage se met à tourner de plus en plus vite. Si ce processus se poursuit, le noyau qui se forme au centre de la nébuleuse tournera si vite sur lui-même qu'il finira par s'éparpiller avant d'avoir eu une chance de former une étoile. D'une manière ou d'une autre, le moment angulaire doit être neutralisé pour qu'une étoile se forme.

L'étude d'autres étoiles jeunes et de leur disque environnant apportent la preuve que, à mesure que le gaz interstellaire se contracte, il se débarrasse du champ magnétique qui imprègne la nébuleuse. Le gaz animé d'une vitesse de rotation trop élevée pour se contracter est expulsé et dispersé le long du champ magnétique.

Ce processus forme spontanément des champs magnétiques spirales qui favorisent l'apparition de jets et écoulements polaires associés aux très jeunes étoiles. À ce moment, les jets annulent le moment angulaire, permettant aux autres matériaux de s'accréter et de se contracter. L'instabilité gravitationnelle, la turbulence et les forces de marée au sein de ce disque grumeleux sont susceptibles de jouer un rôle en transférant une grande part du moment angulaire vers les régions externes du disque en formation.

Le disque protoplanétaire est chauffé par les chutes de matériaux. Les régions internes, où le nuage est le plus massif, deviennent assez chaudes pour vaporiser la poussière et ioniser le gaz. Tandis que la contraction continue et que la densité du nuage augmente, la température en son cœur atteint le seuil où la fusion nucléaire commence. La protoétoile émergente commence à irradier de copieuses quantités d'ultraviolets.

La pression de radiation repousse au loin une grande part de la poussière environnante, séparant ainsi l'étoile de la nébuleuse.

La jeune étoile peut rester à ce stade d'étoile T Tauri⁶ pendant environ 10 millions d'années, après quoi l'essentiel des résidus de la nébuleuse s'est évaporé, ou a été repoussé vers l'espace interstellaire. Tout ce qui reste du nuage originel est un disque raréfié de particules de poussières, principalement des silicates et des cristaux de glace.

Pendant ce temps, les graines des planètes ont commencé à germer. Les éléments réfractaires se condensent dans les régions internes et chaudes de la nébuleuse, alors que les cristaux de glace se condensent dans les régions externes froides. Les grains individuels se percutent et s'accolent, grossissant en particules de dimension centimétrique. Celles-ci tourbillonnent alentour avec plus ou moins de force à l'intérieur du disque qui s'embrace, en partie à cause de la turbulence, en partie à cause des traînées de différentes forces exercées par le gaz. Après quelques millions d'années, ces balles de golf poussiéreuses ou glacées entament leur accréition en planétésimaux de l'ordre du kilomètre, puis la gravitation devient la force prédominante.

À ce stade, le Système Solaire ressemble à un champ de bataille, avec des objets se déplaçant à haute vitesse de façon chaotique, et sujets à de fréquentes collisions mutuelles. Certains de ces impacts sont destructeurs, les objets volent en éclats et laissent de grandes quantités de poussières et de débris. D'autres collisions sont constructives, provoquant des effets de boule de neige. Avec le temps qui passe, l'énergie dissipée dans les collisions a finalement laissé la place à la domination de la construction.

À la fin, le système contient un nombre assez limité de grands corps, ou protoplanètes. Pendant des millions d'années, elles continuent à nettoyer les matériaux issus des restes de la nébuleuse solaire, se percutent entre eux, et cela conduit en définitive à une population de mondes largement isolés, occupant des orbites stables, voyageant dans la même direction autour d'une jeune étoile centrale.

Il mérite d'être souligné que les simulations informatiques des premiers âges du Système Solaire révèlent que les plus petites variations des conditions initiales peuvent aboutir à différents systèmes planétaires. En fonction de l'emplacement précis de la formation des embryons, les positions orbitales des nouvelles planètes varient aléatoirement de simulation en simulation. Le nombre total de planètes – donc leur masse finale – peut également être sujet à d'importantes variations. Il semble que la formation des planètes résulte d'un processus très chaotique.

Planètes rocheuses

La modélisation suggère que les collisions entre planétésimaux se sont initialement produites à de faibles vitesses, leur permettant de fusionner et grossir. À 150 millions de km du Soleil (la distance Terre-Soleil), il faut compter seulement un millier d'années pour que des objets larges de 1 km grossissent jusqu'à 100 km de diamètre. 10 000 années de plus produisent des protoplanètes de 1 000 km de diamètre, et encore 10 000 années supplémentaires produisent des objets d'un diamètre double. Ces modèles indiquent que des objets de la taille de la Lune peuvent se former en un peu plus de 20 000 ans.

À mesure que les planétésimaux du disque protosolaire gagnent en taille et en masse, leur gravitation augmente, et, lorsque quelques-uns de ces objets atteignent une taille de 1 000 km, ils commencent à influencer la position des plus petits objets restants. Des rencontres

⁶NTD : En référence à la première étoile observée à ce stade, très jeune et encore instable.

Encadré 1.2 Les lois de Kepler sur les mouvements planétaires

Johannes Kepler (1571-1630) fut un des plus importants personnages dans l'histoire de la découverte du fonctionnement du Système Solaire. Ce mathématicien né en Allemagne était employé comme assistant de Tycho Brahé (1546-1601), le plus célèbre observateur du moment. Étant autorisé à accéder aux mesures des positions dans le catalogue de Brahé, Kepler avait pour tâche d'expliquer l'orbite de Mars. Après quatre années de calculs, Kepler a finalement réalisé en 1605 que les orbites n'étaient pas des cercles parfaits, mais des cercles allongés appelés **ellipses**.

Alors que le cercle possède un point central, une ellipse est dotée de deux points clés intérieurs appelés foyers. **La somme des distances des foyers à tout point de l'ellipse est constante.** Pour les objets du système solaire, le Soleil est toujours à l'emplacement d'un des foyers (voir plus bas).

Pour dessiner une ellipse, placez deux épingles légèrement espacées et enroulez chaque extrémité d'un fil autour de l'une d'elles. Placez un crayon à l'intérieur du fil et tournez le crayon autour des épingles. Déplacez ensuite une des épingles et refaites l'expérience. Remarquez comment la forme de l'ellipse a changé.

Le taux « d'étirement » ou « d'aplatissement » de l'ellipse est appelé l'**excentricité**. Toute ellipse possède une excentricité valant entre zéro et un. Un cercle peut être considéré comme une ellipse dont l'excentricité vaut zéro. À mesure que l'ellipse est étirée, l'excentricité approche la valeur de un.

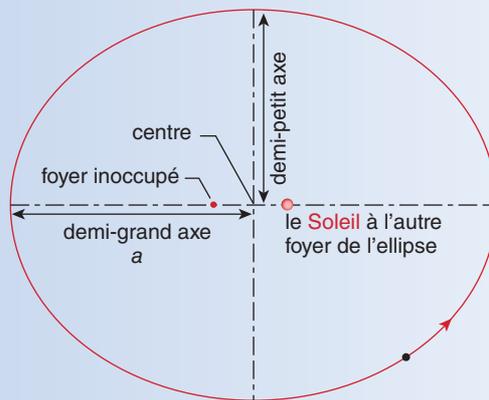


Figure 1.11 Un cercle a une excentricité de zéro. À mesure que l'ellipse est étirée (c'est-à-dire que ses foyers s'éloignent), l'excentricité s'approche de un. La moitié du grand axe s'appelle le semi-grand axe. Puisqu'une planète parcourt une orbite elliptique, sa distance moyenne par rapport au Soleil est égale à la longueur du semi-grand axe. L'excentricité est calculée en divisant la distance entre les deux foyers par la longueur du grand axe. (Open University)

En réalité, la plupart des planètes suivent des orbites qui sont à peine elliptiques. Leurs excentricités sont si faibles qu'elles semblent circulaires à première vue. Pluton et Mercure sont les principales exceptions avec des excentricités dépassant 0,2.

Une autre caractéristique clef d'une ellipse est sa largeur maximale, appelée **grand axe**. La moitié du grand axe est désignée par le terme de **demi-grand axe**. La distance moyenne d'une planète au Soleil, autour duquel elle tourne, est égale au demi-grand axe. Après un travail intense sur les implications de sa découverte, Kepler a finalement formulé ses Trois Lois des Mouvements Planétaires.

- Première Loi de Kepler : les orbites des planètes sont des ellipses, dont le Soleil occupe un des foyers (généralement, il n'y a rien à l'autre foyer).
- Deuxième Loi de Kepler : les lignes joignant les planètes au Soleil balayent des surfaces égales dans des temps égaux pendant que les planètes suivent leur orbite. Pour cela, une planète doit se déplacer plus vite lorsque son orbite est proche du Soleil, et plus lentement lorsqu'elle s'en éloigne. Le point où une planète est au plus près du Soleil est le **périhélie** ; le point où son orbite est la plus éloignée du Soleil est l'**aphélie**. Donc, une planète se déplace plus vite lorsqu'elle s'approche du périhélie et plus lentement en s'approchant du périhélie.
- Troisième Loi de Kepler : le carré de la période orbitale d'une planète est proportionnelle au cube de sa distance moyenne au Soleil (le demi-grand axe). Cela signifie que cette période, le temps que met une planète pour décrire une orbite complète autour du Soleil, s'accroît rapidement en fonction de sa distance au Soleil. Ainsi, Mercure, la planète la plus interne, met seulement 88 jours pour parcourir une orbite autour du Soleil, alors que Pluton met 248 ans pour en faire autant.

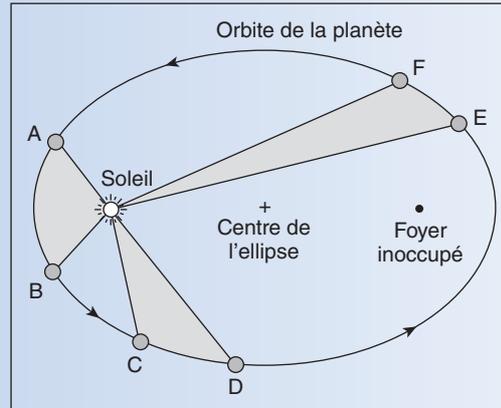


Figure 1.12 La première loi de Kepler établit que l'orbite d'une planète autour du Soleil est une ellipse dont un des foyers est occupé par le Soleil. L'autre foyer de l'ellipse est vide. Selon la seconde loi de Kepler, la ligne joignant une planète au Soleil balaie des surfaces égales en des temps égaux. Dans ce schéma, les trois zones sombres ABS, CDS et EFS ont toutes des surfaces égales. Une planète met autant de temps à voyager de A en B que de C à D et de E à F. Elle se déplace plus rapidement lorsqu'elle est au plus près du Soleil (au périhélie) et plus lentement lorsqu'elle est au plus loin du Soleil (à l'aphélie). (Kenneth R. Lang, Tufts University)

Cette loi peut être utilisée pour réaliser quelques calculs tout à fait simples, mais utiles. Par exemple, si la période P est mesurée en années terrestres et la distance R en unités astronomiques (UA), la loi peut être écrite sous la forme simple : $P(\text{années})^2 = R(\text{UA})^3$.

Cette équation peut également s'écrire comme ceci : $P(\text{années}) = R(\text{UA})^{3/2}$. Ainsi, si nous savons que la distance moyenne de Pluton au Soleil (demi-grand axe) est de 39,44 UA, nous pouvons calculer que sa période orbitale vaut : $P = (39,44)^{3/2} = 247,69$ années. De la même façon, si nous savons que Mars met 1,88 années pour parcourir son orbite autour du Soleil, nous pouvons calculer que son demi-grand axe est $R = (1,88)^{2/3} = 1,52$ UA.

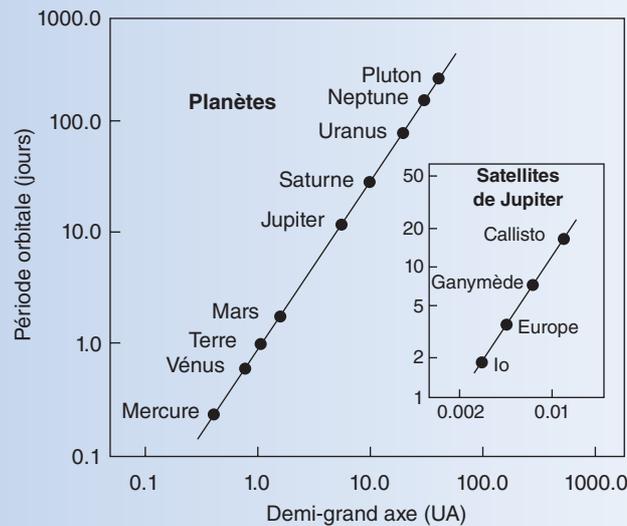


Figure 1.13 Un graphique montrant les périodes orbitales des planètes en fonction de leurs demi-grands axes, en utilisant une échelle logarithmique. La ligne droite qui relie les planètes a une pente de $3/2$, vérifiant la troisième loi de Kepler qui établit que les carrés des périodes orbitales augmentent avec le cube des distances planétaires. Cette loi s'applique à tous les corps en orbite elliptique, y compris les quatre plus grands satellites de Jupiter (vignette). (Kenneth R. Lang, Tufts University)

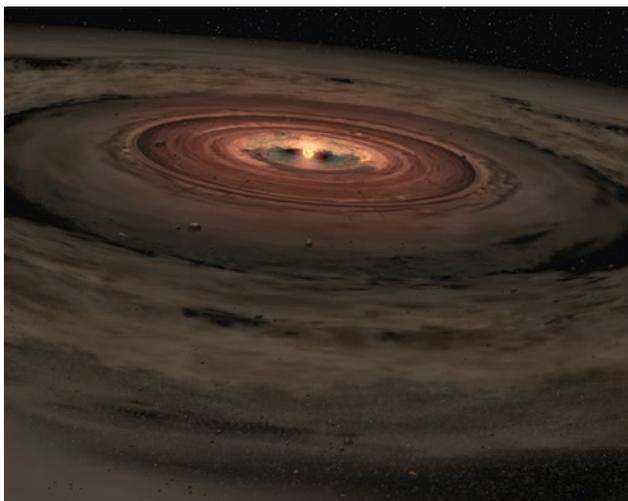


Figure 1.14 Les planètes se sont formées il y a 4,5 milliards d'années à partir d'une immense nébuleuse – un nuage de gaz et de poussière – qui entourait le jeune Soleil. En quelques millions d'années, les particules en collision dans la nébuleuse se sont accrétées en cailloux de la taille d'une balle de golf. Des collisions ultérieures en ont augmenté la masse, jusqu'à aboutir aux planètes que l'on voit aujourd'hui. Certaines d'entre elles, éloignées du Soleil, furent capables d'attirer à elles d'immenses atmosphères d'hydrogène et d'hélium. Celles des régions internes, plus chaudes, étaient composées de roches plutôt que de glaces et de gaz légers. Les restes formèrent les comètes et astéroïdes. (NASA/JPL-Caltech/T. Pyle, SSC)

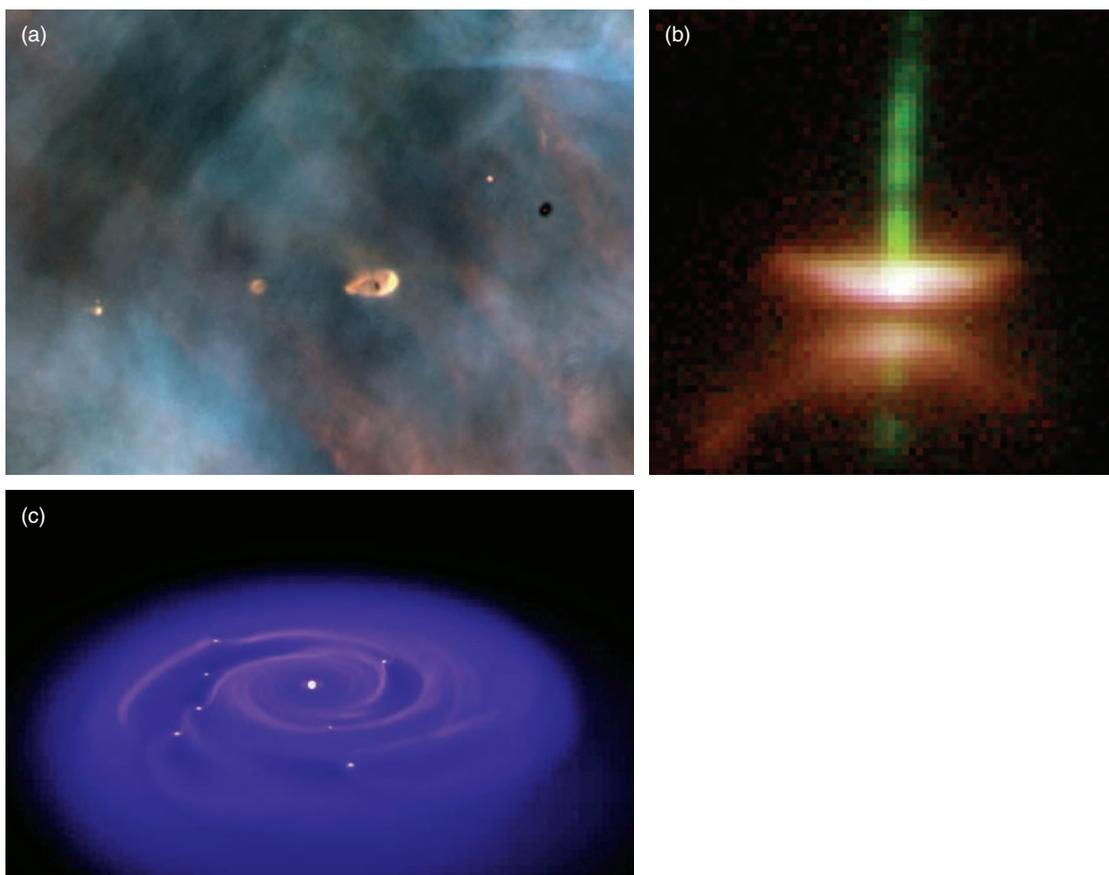


Figure 1.15 Les premiers stades de la formation d'une étoile et des planètes : (a) Une image du télescope spatial Hubble (HST, pour Hubble Space Telescope) montrant cinq jeunes étoiles dans la nébuleuse d'Orion. Quatre d'entre elles sont entourées par du gaz et de la poussière piégées en orbite au moment de la formation de l'étoile. Il s'agit peut-être de disques protoplanétaires, ou « proplyds », qui pourraient en définitive former des planètes. Les proplyds lumineux sont plus proches des étoiles les plus chaudes de l'amas stellaire géniteur, tandis que les objets plus éloignés des étoiles les plus chaudes apparaissent sombres. (C.R. O'Dell/Rice University ; NASA). (b) Cette image du HST montre Herbig-Haro 30, une jeune étoile entourée par un disque fin et sombre. Ce disque s'étend sur 64 milliards de km, divisant la nébuleuse en deux. L'étoile centrale est inaccessible à une vue directe, mais sa lumière se reflète sur les surfaces supérieure et inférieure du disque, et produit un couple de nébuleuses rougeâtres. Des jets gazeux (en vert) expulsent des matériaux au-dessus et au-dessous du disque et transfèrent une partie du moment angulaire vers l'extérieur. (c) une simulation par ordinateur montrant comment un disque protoplanétaire entourant une jeune étoile commence à se fragmenter et à former des planètes géantes gazeuses sur des orbites stables. (Mayer, Wadsley, Stadel)

Encadré 1.3 Masse et densité

Deux des propriétés fondamentales des objets du Système Solaire sont la masse et la densité. La masse est la mesure de la quantité de matière d'une particule ou d'un objet. L'unité standard de la masse dans le Système International (SI) est le kilogramme (kg). Elle est en général déterminée par la mesure de l'influence gravitationnelle de l'objet sur d'autres objets, par exemple les satellites naturels ou artificiels.

Une fois que le volume de l'objet est connu, sa densité globale peut être calculée. Dans ce livre, la densité est d'ordinaire exprimée en grammes par centimètre cube (g/cm^3). Pour référence, la densité de l'eau est de $1,0 \text{ g/cm}^3$. Les objets dont la densité est plus faible que celle de l'eau sont capables de flotter (en supposant qu'il y ait assez d'eau disponible !).

Si une planète possède une forte densité, cela signifie qu'elle est majoritairement composée de matériaux denses, tels les roches ou les matériaux métalliques. Souvent, les objets ont une densité faible parce qu'ils contiennent une grande quantité de gaz et de glaces, mais peu de matériaux rocheux. C'est pourquoi toutes les planètes géantes gazeuses du Système Solaire ont de faibles densités, malgré leurs énormes dimensions.

La planète qui affiche la plus faible densité est Saturne ($0,7 \text{ g/cm}^3$). La raison pour laquelle Saturne a une si faible densité est qu'elle est surtout composée de gaz, en particulier l'hydrogène et l'hélium. Elle ne possède qu'un petit cœur rocheux en son centre.

D'autres objets, y compris un grand nombre de petits satellites naturels et d'astéroïdes, possèdent de faibles densités car ce sont des amas faiblement agglomérés de décombres rocheux, ou des corps fortement poreux, c'est-à-dire qu'ils contiennent de nombreux espaces vides.

Les densités des planètes sont également un reflet de leur taille et de leur structure interne en couches successives. La Terre possède la plus forte densité de toutes les planètes du Système Solaire car elle est composée de matériaux denses et rocheux. À sa surface, les roches de la croûte ont des densités comprises entre $2,5$ et $3,5 \text{ g/cm}^3$. Cependant, la densité moyenne de la Terre est bien plus élevée ($5,5 \text{ g/cm}^3$).

C'est en partie parce que les éléments les plus denses, comme le fer et le nickel, ont sombré vers le centre de la planète tandis que les matériaux les moins denses ont remonté vers sa surface. Beaucoup de planètes ont ainsi vu leur intérieur se différencier tôt dans leur formation.

Les centres des planètes sont de surcroît comprimés par le poids de leurs matériaux périphériques. Dans le cas de la Terre, par exemple, la densité normale de ses roches, en l'absence de compression, est de $4,4 \text{ g/cm}^3$, mais le noyau central est comprimé au-delà de sa densité normale par ses couches successives supérieures.

Les planètes plus massives devraient subir des compressions plus fortes en leur centre, et par là des densités moyennes plus élevées, si elles étaient composées des mêmes matériaux rocheux et métalliques que la Terre. Et c'est l'inverse qui devrait s'appliquer aux planètes plus petites. Toutefois, la plus petite des planètes rocheuses, Mercure, possède en réalité une densité moyenne de $5,4 \text{ g/cm}^3$, à peine plus faible que celle de la Terre.

Mercure est dotée d'une densité étonnante de $5,3 \text{ g/cm}^3$ après correction des effets de sa compression interne – bien plus élevée que celle de la Terre. La seule façon de l'expliquer est de considérer que cette petite planète possède un énorme cœur de fer et de nickel qui occupe presque la moitié de sa structure (voir chapitre 5).

rapprochées accélèrent les plus petits de ces blocs rocheux, de la taille d'un astéroïde, et leur confèrent une vitesse de plus en plus élevée. Ils finissent par se déplacer si vite que, lorsqu'ils se percutent, ils se pulvérisent au lieu de s'agglomérer.

Pendant que les plus grandes protoplanètes continuent à grossir, le reste des planétésimaux rocheux se réduit en poussière par un processus d'abrasion mutuelle. Une part de cette poussière est collectée par les planètes survivantes, pendant que la majeure partie de ce qui reste est balayée hors du Système Solaire lorsque le Soleil évolue en une étoile « brûlant » de l'hydrogène (un nuage de particules de poussières, d'une taille proche du micron, existe encore aujourd'hui dans le plan de l'écliptique du Système Solaire. On l'appelle le **nuage zodiacal** ; il est composé de particules de silicates qui proviennent majoritairement des collisions entre les astéroïdes de la ceinture principale).

Un des problèmes à résoudre par les théoriciens du Système Solaire est l'explication de la composition riche en silicates et métaux des planètes telluriques, et de la prédominance de l'hydrogène et de l'hélium dans les planètes externes. Il est évident que la différence prononcée de la composition des planètes internes et externes doit être liée aux matériaux qui ont constitué les différentes régions du disque.

La composition dense et rocheuse de la Terre et ses voisines suggère qu'elles se sont simplement formées grâce à l'accrétion des grains de poussière de la nébuleuse solaire. Toutefois, l'étude des chondrites, des météorites primitives, révèle la présence de cavités (chondres) en forme de gouttelette de taille millimétrique, qui ont autrefois été liquides.

Il semble que, bien avant de s'amalgamer pour former les météorites, elles ont existé pendant une période brève en tant que

sphéroïdes indépendants, à une température supérieure à $1\ 500 \text{ }^\circ\text{C}$. Certains chondres semblent avoir inclus d'autres chondres, indiquant qu'ils ont été exposés à de hautes températures en plus d'une occasion (voir Chapitre 13). La source de cette chaleur est incertaine, mais on a envisagé des ondes de choc, la chaleur du Soleil, ou des collisions entre planétésimaux.

Les expériences de laboratoire montrent que ces globules en fusion se refroidissent très rapidement, pendant les dix millions d'années de la contraction du nuage moléculaire. La cause d'un refroidissement si soudain reste indéterminée. Ce qui semble certain, c'est que les chondres et la poussière ont commencé à s'accoler et grossir, formant des amas de matériau chondritique. La traînée du gaz dans la nébuleuse a incité les objets de la taille d'un caillou à se glisser vers l'intérieur, en accumulant toujours plus de matériaux.

Une fois que la population des grands planétésimaux a évolué, leur destin fut guidé principalement par le hasard. Une collision à haute vitesse, de plein fouet, fragmente les objets. Une rencontre lente, non violente, permet aux protagonistes de fusionner en un objet plus grand. De cette manière, les planètes telluriques ont grossi jusqu'à atteindre ce qui est à peu de choses près leur taille actuelle, et cela en quelques 10 millions d'années.

Les énormes quantités d'énergie cinétique relâchées par les planètes, au cours d'impacts massifs et fréquents, ont provoqué une fonte partielle ou totale, et ont créé des océans de magma. Cela a conduit à une différenciation interne, et les éléments les plus denses, comme le fer, ont coulé vers le cœur, tandis que les plus légers ont remonté vers la surface et formé des croûtes de silicates. Les atmosphères

Encadré 1.4 Étapes-clefs dans la formation des planètes rocheuses (d'après Kenyon et Bromley)

1. Un nuage moléculaire composé de gaz et de poussières commence à se contracter.
2. Une protoétoile entame sa formation au cœur de la nébuleuse en contraction.
3. Une nébuleuse en forme de disque, composée de poussières et de gaz en orbite, se développe dans le plan équatorial de la protoétoile.
4. Les grains de poussières du disque entrent en collision et fusionnent.
5. De gros grain (1 mm) de poussières s'accumulent en une fine strate poussiéreuse.
6. Des collisions produisent des planétésimaux d'un mètre à un kilomètre de large.
7. Davantage de collisions entre les planétésimaux produisent des embryons planétaires.
8. Des embryons planétaires attirent les planétésimaux résiduels.
9. Les planétésimaux entrent en collision puis se fragmentent.
10. Une succession de collisions réduisent les fragments en poussière.
11. Les planètes balayent une partie de la poussière.
12. Les radiations et un « vent » de particules chargées provenant de l'étoile centrale nettoient le reste du gaz et de la poussière.

primitives ont résulté du dégazage de molécules volatiles comme l'eau, le méthane, l'ammoniac, l'hydrogène, l'azote et le dioxyde de carbone. Un dernier bombardement massif, qui a pris fin il y a 3,8 milliards d'années, a laissé une empreinte évidente dans les accumulations des cratères lunaires ; on trouve ces traces dans les autres planètes et leurs satellites.

À l'occasion, un satellite s'est formé par le sous-produit d'un impact majeur. On pense que c'est le cas avec la Terre et la Lune. Des débris provenant d'une antique collision entre la jeune Terre et un planétésimal de la taille de Mars ont formé un anneau de débris qui se sont finalement assemblés pour créer la Lune. Une explication similaire a été mise en avant pour le système Pluton-Charon (voir Chapitres 3 et 12).

Géantes de gaz et géantes de glace

Dans les extensions en bordure de la nébuleuse solaire, les températures étaient assez basses pour permettre la formation de glaces. En fait, il semble que ces particules de glace étaient bien plus abondantes que les particules de poussières silicatées. Mais si cela avait été le cas, tout planétésimal né dans la zone externe gelée aurait ressemblé à une boule de glace sale, tout à fait comme les comètes que l'on voit aujourd'hui. Malheureusement, les principaux constituants de Jupiter et Saturne sont l'hydrogène et l'hélium, et non l'eau. Puisque les températures dans la nébuleuse ont dû être trop élevées pour que ces gaz se condensent, l'accrétion de l'hydrogène et de l'hélium en flocons de neige n'aurait pas pu avoir lieu. Une autre explication doit être trouvée.

Il semble qu'il existe deux possibilités. L'étude de l'intérieur des géantes gazeuses suggère que Jupiter et Saturne possèdent peut-être un cœur rocheux au moins aussi grand que la Terre. Par conséquent, il est possible que les premiers stades du développement de ces planètes aient été semblables à l'accrétion qui est survenue dans les régions internes du Système Solaire, avec la croissance de noyaux

massifs de glace et de poussière. Dès que ceux-ci sont devenus suffisamment grands, aux alentours de 5 à 15 fois la masse de la Terre, ils furent capables d'attirer et conserver même les plus légers des gaz du voisinage dans la nébuleuse solaire. À mesure que leur masse et leur attraction gravitationnelle augmentaient, leurs sphères devinrent davantage ballonnées.

D'un autre côté, elles ont simplement pu se développer à partir d'instabilités gravitationnelles à grande échelle dans la nébuleuse solaire. Puisque les régions externes du disque contenaient à la fois de la poussière et des glaces condensées, il existait une assez grande quantité de matériau brut pour que des planètes massives se développent et grossissent.

Toute théorie doit prendre en compte le fait que Jupiter et Saturne sont d'immenses planètes composées d'hydrogène et d'hélium, tandis qu'Uranus et Neptune sont notablement plus petites, et composées principalement d'éléments qui forment des glaces : oxygène, carbone et azote. Si ces deux dernières planètes sont nées à l'état de noyaux de glace, elles ont dû se développer particulièrement lentement dans l'environnement plus raréfié de la nébuleuse présolaire, approximativement au-delà de 15 unités astronomiques. À l'époque où elles étaient assez massives pour attirer de grandes quantités de gaz, la nébuleuse s'est dissipée et leur source s'est tarie.

Planètes migrantes

Notre portrait du jeune Système Solaire se complique par la probabilité que les planètes géantes aient migré sur de grandes distances avant d'atteindre leur position actuelle. De tels déplacements à grande distance sont confirmés par la découverte de nombreuses planètes extrasolaires de grande taille, dont l'orbite autour de leur étoile n'est que d'une fraction d'unité astronomique.

Dans le cas de notre Système Solaire, cette migration peut être expliquée par l'échange de moments angulaires orbitaux entre les planètes géantes et les innombrables planétésimaux. Un des modèles actuels (le modèle de Nice) envisage un Système Solaire jeune et chaotique où les planètes principales n'étaient pas éloignées de plus de 15 unités astronomiques environ (plus près que l'orbite actuelle d'Uranus). Jupiter peut avoir pris naissance un peu plus loin dans le Système Solaire qu'aujourd'hui, tandis que les autres géantes se situaient plus près du jeune Soleil qu'à présent. Au-delà des planètes s'étendait une région essaimée par des planétésimaux restants.

Alors que Jupiter était assez massive pour éjecter un grand nombre de planétésimaux vers les zones externes du Système Solaire, voire en-dehors, les trois autres géantes, plus modestes, en étaient incapables. Au lieu de cela, elles ont propulsé un nombre comparable de planétésimaux vers le Soleil, ou dans d'autres directions. À chaque fois qu'Uranus ou Neptune a ralenti un planétésimal proche, forçant l'objet à se déplacer plus près du Soleil, la planète a gagné une petite quantité de moment angulaire. L'accélération qui en a résulté l'a fait dériver plus loin du Soleil.

Avec le temps, après des milliards d'années d'interaction gravitationnelle, Jupiter a spiralé vers l'intérieur d'une faible distance, tandis que Saturne a dérivé vers l'extérieur. Quand Jupiter a atteint une distance de 5,3 UA (unités astronomiques) et que Saturne est arrivée à 8,3 UA, les deux planètes furent en résonance 2 : 1, de sorte que la durée de l'orbite de Saturne était précisément le double de celle de l'orbite de Jupiter. La traction gravitationnelle récurrente de Jupiter a forcé l'orbite de Saturne à s'allonger de plus en plus.

Saturne a commencé à produire des dégâts dans les orbites d'Uranus et Neptune, qui sont devenues plus elliptiques. Elles ont bientôt charrié

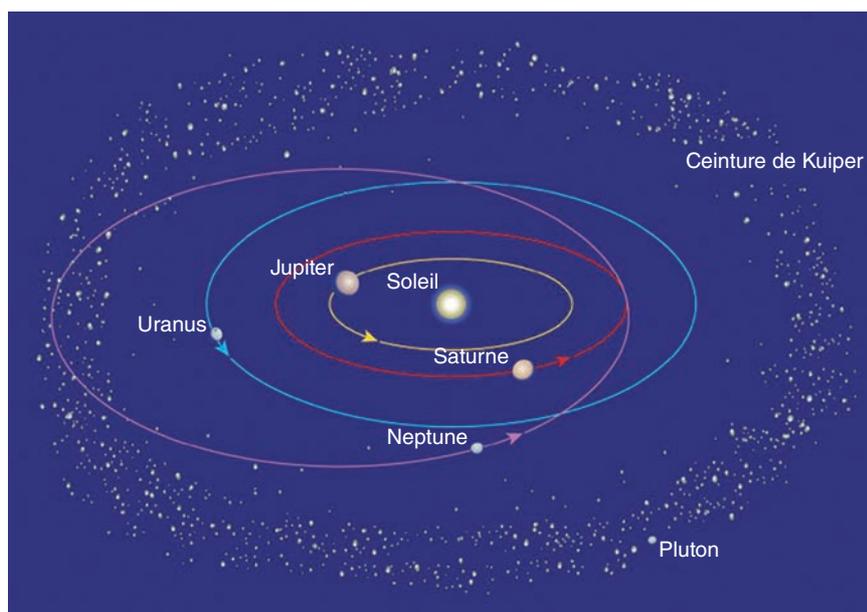


Figure 1.16 Selon un modèle récent, Saturne a expulsé Neptune au-delà d'Uranus, vers la Ceinture de Kuiper, à l'époque de la migration des planètes. L'interaction gravitationnelle de Neptune avec les planétésimaux glacés a déplacé des milliards d'objets de la Ceinture de Kuiper vers l'intérieur, en direction du Soleil. En conséquence, Neptune et Uranus ont migré vers l'extérieur jusqu'à leur orbite actuelle. Quelques KBO (objets de la Ceinture de Kuiper), comme Pluton, furent emprisonnés dans leur résonances orbitales avec Neptune (Nature)

l'essaim externe de planétésimaux, éparpillant des milliards d'entre eux dans toutes les directions. Au cours du temps, les planètes avaient nettoyé la plupart des intrus à leur portée, puis le Système Solaire s'est à nouveau calmé, Saturne avait migré à près de 9,5 UA. L'effet sur les deux dernières planètes fut encore plus extrême. Uranus s'était déplacée de 13 à 19 UA environ, tandis que Neptune avait été catapultée de 15 à 30 UA.

Une autre conséquence de ce redéploiement qui avait duré 500 millions d'années fut que les planétésimaux restants, peut-être 0,1 % des briques planétaires originelles, furent relégués au-delà de 30 UA, où ils résident désormais en tant qu'objets de la ceinture de Kuiper.

De plus, la ceinture d'astéroïdes avait été sévèrement perturbée pendant cette salve de migrations, à quoi il faut ajouter à la soudaine et massive redistribution de planétésimaux vers le Système Solaire interne. Comme le montrent leurs surfaces grêlées, la Lune et les planètes telluriques ont durement souffert durant le Grand Bombardement Tardif, il y a près de quatre milliards d'années.

Les satellites des planètes

Le Système Solaire contient plus de 170 satellites naturels, mais, comme on pourrait s'y attendre en considérant la grande variété de tailles et de compositions, ils semblent avoir suivi des destins différents.

Comme il a été mentionné précédemment, on pense que la Lune est née à l'occasion d'une énorme collision abrasive entre la Terre et un embryon planétaire de la taille de Mars. Le mélange des débris provenant de ces deux objets a constitué un anneau autour de la Terre balafnée, qui s'est finalement accréte en un grand satellite.

D'autres satellites ont pu également être créés lors d'impacts notables, tôt dans l'histoire du Système Solaire. Par exemple, le système Pluton-Charon a pu résulter d'une collision entre deux grands planétésimaux de glace il y a plus de quatre milliards d'années. Les simulations montrent que certains débris de la collision ont pu être propulsés

en orbite autour de la protoplanète survivante, pour finalement s'agglutiner et former Charon et plusieurs autres satellites plus modestes.

La plupart des grands satellites ont apparemment suivi un chemin moins bouleversé, s'accrétant progressivement à partir du disque protoplanétaire, bien plus à l'identique des planètes. L'exemple le plus flagrant est le système jovien, avec sa famille des quatre lunes galiléennes. Les deux satellites internes, Io et Europa, sont plus petits mais plus denses (avec une plus grande proportion de roches) que les deux autres externes, Ganymède et Callisto, riches en glace. Tous décrivent leur orbite autour de Jupiter dans le même sens, placés plus ou moins sur le même plan.

Ces caractéristiques peuvent s'expliquer si les lunes sont nées à partir d'un nuage sphérique de poussière et de gaz qui a été attiré vers l'intérieur à partir de la nébuleuse solaire par une planète à naître. Au cours du temps, le nuage s'est aplati en un disque autour du cœur protoplanétaire. Ce disque était plus chaud et plus dense en son centre, ce qui a permis la condensation et l'accrétion des matériaux les moins volatiles. Plus loin, les éléments volatiles glacés ont pu se condenser et s'accréter pour former Ganymède et Callisto.

Bien que la famille des satellites de Saturne soit dominée par Titan, qui est grand comme une planète, aucun de ses membres n'est particulièrement composé de roches, nombre d'entre eux étant à peine plus denses que l'eau. Titan lui-même est comparable en densité à Ganymède ou Callisto. Si la proto-Saturne était entourée d'un nuage en contraction, celui-ci ne possédait apparemment que le quart de la masse de celui de Jupiter. Cela laisse à penser que le nuage contenait moins de matériau silicaté (rocheux) et plus de glace que son homologue dans les régions plus chaudes de Jupiter.

Il est certainement advenu un accroissement de matière, en dimensions et en masse, partant de Saturne à destination de Titan, avec une diminution marquée de ces deux caractéristiques au-delà de Titan. Cela a conduit les théoriciens à suggérer que Titan a grossi assez vite pour récolter une part importante de matière provenant du disque

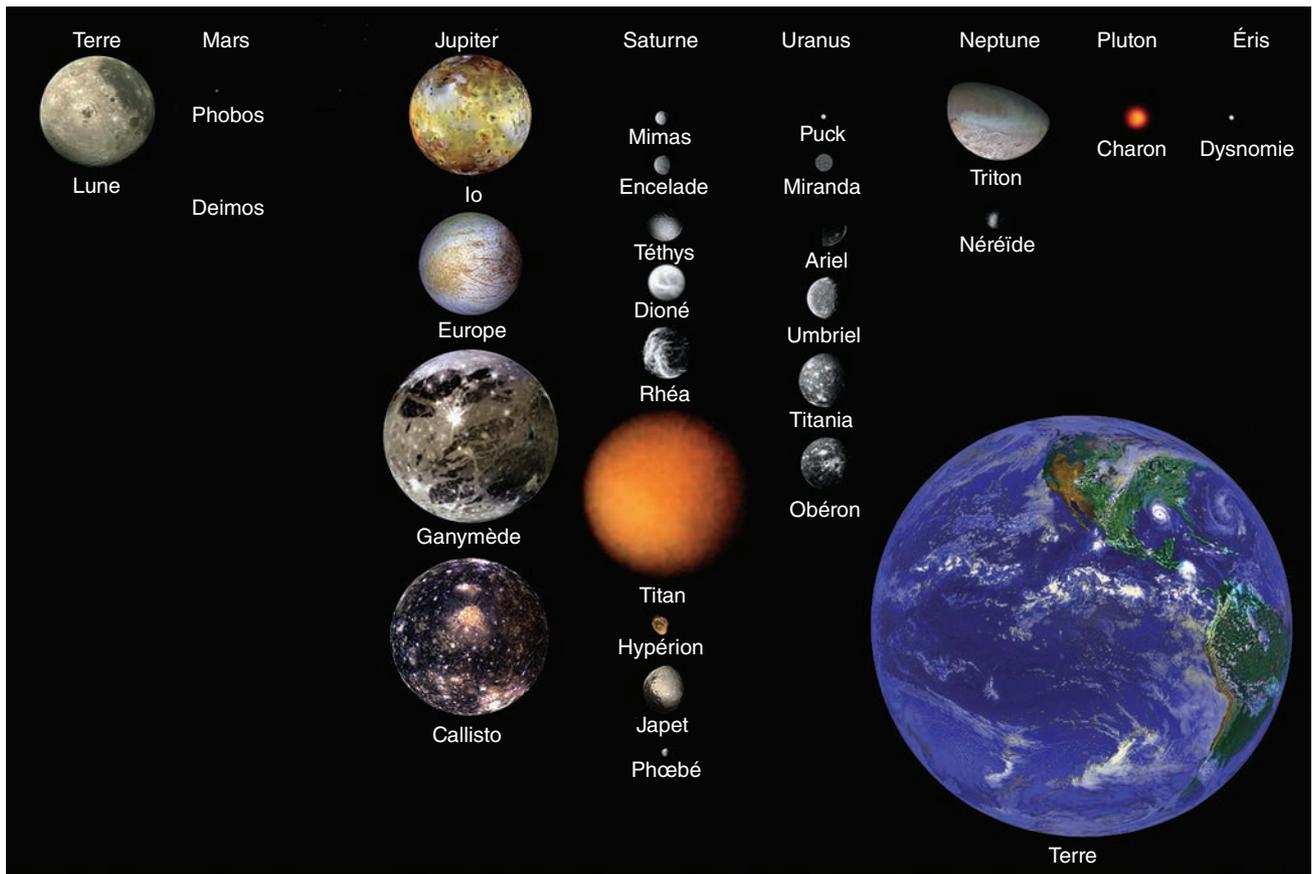


Figure 1.17 Les satellites les plus remarquables de notre Système Solaire sont montrés avec la Terre, en respectant leurs tailles relatives et leurs couleurs. Ganymède et Titan sont plus grands que Mercure et huit satellites sont plus grands que Pluton. La Lune est en cinquième position par la taille, avec un diamètre de 3476 km. On pense que la plupart d'entre eux se sont formés à partir d'un disque de gaz et de poussières en orbite autour de leur planète mère. Par ailleurs, on pense que Triton et un grand nombre des plus petits satellites (dont les lunes de Mars) sont des astéroïdes capturés, ou des objets de la Ceinture de Kuiper, qui se sont formés ailleurs dans le Système Solaire. On suppose que la formation de Lune et de Charon (ainsi que, peut-être, des lunes d'Uranus) résulte d'impacts majeurs. (NASA)

autour de Saturne, n'en laissant qu'une faible quantité que les satellites de dimensions moyennes ont accumulé.

Une version modifiée de ce scénario d'accrétion a été récemment proposée par Robin Canup et William Ward au Southwest Research Institute. Ils ont proposé que la gravitation croissante d'un satellite induit des ondes spiralées dans un disque de gaz environnant, à l'origine composé d'hydrogène. Les interactions gravitationnelles entre ces ondes et le satellite amènent la contraction de l'orbite de la lune. Cet effet devient plus fort à mesure que le satellite grandit, et plus le satellite est grand, et plus l'orbite du satellite spirale en s'approchant de la planète. Ils ont proposé que l'équilibre entre l'afflux de matière vers les satellites et la perte des satellites qui percutent la planète détermine une limite à la taille maximum pour un satellite d'une planète géante.

Les simulations numériques et analytiques amènent à estimer que la croissance et les pertes de satellites ont montré que de multiples générations de satellites étaient une chose probable, et que les satellites d'aujourd'hui sont la dernière génération survivante, qui s'est formée lorsque la croissance des planètes a cessé, et que le disque de gaz s'est dissipé.

L'origine des satellites d'Uranus (et de Neptune) est sujette à controverse. Les modèles suggèrent que les géantes de glace se sont développées plus lentement que leurs cousines plus grandes. Par le passé, elles

étaient assez imposantes pour se nourrir du disque de matière, l'essentiel du gaz et de la poussière s'est dispersé, probablement après que le jeune Soleil est entré dans sa phase T Tauri active. Si les satellites ordinaires d'Uranus et Neptune n'ont pu se former par une accrétion à grande échelle à partir d'un disque circumplanétaire, comment sont-ils arrivés là ?

Une possibilité est que les planètes étaient plus grandes et plus chaudes durant leur phase d'accrétion. Au moment où elles se sont substantiellement refroidies et contractées, elles ont abandonné un « disque de traîne » à partir duquel les petits satellites ont pu croître par accrétion.

Une difficulté est le fait que les orbites des satellites d'Uranus cerclent près de l'équateur de la planète, alors que cette dernière tourne couchée. L'axe de rotation de Neptune est, lui aussi, sensiblement incliné, de 30° par rapport à son plan orbital, pendant que les orbites de ses petits satellites sont circulaires et proches de l'équateur. Cela incite à penser que les planètes ont été impliquées dans des impacts majeurs tôt dans leur histoire, et que les satellites sont nés pendant ou après ces collisions.

Ce sont peut-être ces mêmes impacts avec des objets de taille planétaire qui ont soufflé des nuages de matériau chaud qui ont formé des disques en orbite autour des géantes de glace. Une fois que le matériau s'est refroidi et condensé, les ingrédients de roche glacés

sont devenus disponibles pour que les satellites de taille moyenne se constituent.

La grande exception est Triton, le plus grand satellite de Neptune. Un indice de son origine est que la majeure partie de ses propriétés essentielles est très similaire à celle de Pluton, un des plus grands corps connus de la Ceinture de Kuiper. De plus, contrairement aux autres lunes de Neptune, il suit une direction rétrograde qui est fortement inclinée par rapport à l'équateur de la planète. Cette orbite peu courante a conduit à spéculer que Triton était un objet de la Ceinture de Kuiper qui s'est aventuré trop près de Neptune et, d'une manière ou d'une autre, a été capturé.

L'héliosphère

Le mouvement du plasma extrêmement chaud au cœur du Soleil génère un puissant champ magnétique. L'atmosphère du Soleil s'étend dans l'espace interplanétaire en suivant le mouvement des particules électriquement chargées (principalement des électrons et des protons) du **vent solaire**, dont le flux s'éparpille dans toutes les directions à des vitesses comprises typiquement entre 400 et 7 500 km/s. Alors que les particules spiralent autour du Soleil, elles sculptent une bulle invisible qui s'étend vers l'extérieur sur des milliards de km. Bien que les atomes électriquement neutres, les rayons cosmiques et les particules de poussières puissent pénétrer dans cette bulle, pratiquement toutes les particules atomiques dans l'**héliosphère** trouvent leur origine dans le Soleil lui-même.

La région de l'espace dans laquelle le champ magnétique du Soleil et le vent de particules chargées (**vent solaire**) dominent le médium interstellaire est appelé héliosphère. La forme de l'héliosphère et la distance de l'héliopause sont déterminées par trois facteurs principaux : le mouvement du Soleil alors qu'il laboure le médium interstellaire, la densité du plasma interstellaire et la pression exercée sur son environnement par le vent solaire.

Grâce aux études théoriques et aux observations des sondes spatiales portant sur les magnétosphères des planètes et le vent solaire, on sait que la densité du vent solaire diminue en fonction inverse du carré de la distance au Soleil. En d'autres termes, la densité du vent solaire à 4 UA ne vaut plus que le quart de sa valeur à 2 UA. La force du champ magnétique du Soleil décroît aussi avec la distance, bien que d'une façon plus modérée. En définitive, la densité et l'influence magnétique du vent solaire diminuent tant que sa propagation à distance est entravée par le plasma parsemé du médium interstellaire.

L'héliopause agit comme une île dans un courant, déviant le plasma interstellaire autour d'elle. On pensait dans un premier temps que l'héliosphère était vraiment sphérique ; mais les deux sondes Voyager, qui se dirigent en ce moment même hors du Système Solaire dans deux directions différentes, ont observé ce qui semble être une héliogaine « écrasée ». Dans ce nouveau modèle, l'héliosphère ressemble à un immense têtard, ou à une manche à air, à l'image de la queue allongée d'une comète – qui est déformée par le mouvement du Soleil tandis qu'il se fraie un chemin à travers un nuage chaud et ténu de poussière et de gaz interstellaire. L'étude des trajectoires des étoiles proches montre que le Soleil traverse ce nuage à une vitesse de 25,5 km/s. Le médium interstellaire contraint le vent solaire à faire demi-tour, et à rester confiné dans l'héliosphère.

Ce tableau a dû être reconsidéré en 2009, lorsque les mesures de la sonde IBEX, et la sonde Cassini autour de Saturne, ont montré que l'héliosphère est, après tout, globalement sphérique – peut-être en forme de ballon allongé. Les instruments des sondes ont été utilisés pour cartographier l'intensité des atomes neutres énergétiques éjectés de l'héliogaine en raison de l'interaction du vent solaire avec le médium interstellaire. Les données ont révélé une ceinture de particules chaudes et à haute pression là où le vent interstellaire effleure l'héliosphère. Leur distribution indique que l'héliosphère ressemble à une immense bulle qui enfle et se contracte sous l'influence du champ magnétique interstellaire qui la balaie en la frôlant.

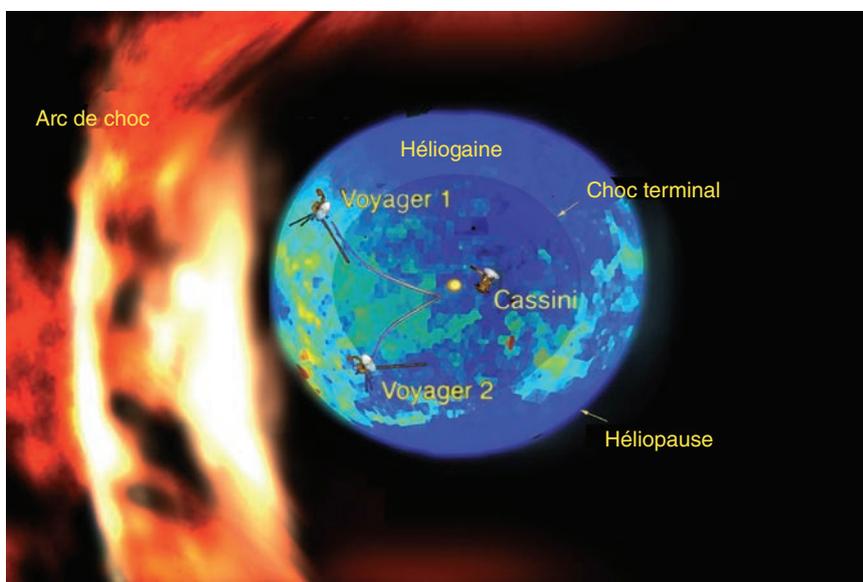


Figure 1.18 Pendant de nombreuses années, on pensait que la forme de l'héliosphère ressemblait à celle d'une comète, avec une « tête » émoussée et une queue allongée. Des observations récentes de sondes spatiales suggèrent qu'elle est plutôt en forme de ballon, ou de bulle, et allongée. Dans cette vue d'artiste, la bulle de différentes couleurs (bleue et verte) représente les mesures de Cassini concernant l'émission de particules identifiées comme des atomes neutres énergétiques. La première traversée dans l'espace interstellaire par Voyager 1 aura peut-être eu lieu aux environs de 2017. (NASA-JPL/JHU-APL)

Glossaire

- Accrétion** l'agglomération de gaz et de poussière qui finit par former les gros corps comme les étoiles, les planètes et les lunes.
- Achondrite** une météorite rocheuse dépourvue de chondres.
- Albédo** la proportion de lumière qui est réfléchiée par un corps.
- Amor** une classe d'astéroïdes dont les distances périhéliques sont comprises entre 1,017 et 1,3 UA.
- Angle de phase** l'angle de l'éclairement (en général l'éclairement par le Soleil) d'une planète ou de tout autre objet céleste, tel qu'il est vu par l'observateur.
- Anorthosite** une roche ignée granuleuse composée presque entièrement d'anorthite, un silicate riche en calcium.
- Anticyclone** une région d'une atmosphère planétaire où la pression s'accroît vers le centre.
- Aphélie** le point de l'orbite d'un objet lorsqu'il se trouve au plus loin du Soleil.
- Aplatissement** la déformation équatoriale d'une planète qui devrait être sphérique ; cette déformation est provoquée par sa rotation. Défini par la différence entre son rayon équatorial et son rayon polaire, divisée par le rayon équatorial.
- Apogée** le point de l'orbite d'un objet en orbite autour de la Terre, lorsqu'il se trouve au plus loin de la Terre.
- Apollo** une classe d'astéroïdes dont les demi grands axes sont supérieurs à 1,0 UA et les distances périhéliques sont inférieures à 1,017 UA.
- Arc de choc** une frontière nette et incurvée dans le vent solaire, en amont d'une magnétosphère planétaire ou d'une ionosphère cométaire ou planétaire, où une onde de choc apparaît lorsque le vent solaire ralentit soudainement et est dévié ; marquée par un échauffement, une compression et une déviation du vent solaire.
- Astéroïde géocroiseur** (anglais : NEO pour Near Earth Object) un astéroïde ou une comète dont l'orbite le fait parfois s'approcher de la Terre.
- Asthénosphère** la région la moins rigide du manteau, située immédiatement sous la lithosphère.
- Aten** une classe d'astéroïdes dont les demi grands axes sont inférieurs à 1,0 UA et les distances aphéliques sont supérieures à 0,983 UA.
- Aurore polaire** une luminescence colorée évolutive dans l'ionosphère d'une planète, provoquée par des atomes et ions excités par des collisions avec des particules énergétiques.
- Bar** une unité de pression égale à 0,987 atmosphère, la pression atmosphérique moyenne à la surface de la Terre.
- Barkhane** une dune de sable en forme de croissant.
- Barycentre** le centre de masse d'un système de corps célestes, comme le système Terre-Lune.
- Basalte** une roche volcanique ignée composée principalement de silicium, oxygène, fer, aluminium et magnésium.
- Biosphère** la zone qu'occupent les organismes vivants sur une planète.
- Bèche** (ou breccia) une roche composée de fragments rocheux brisés qui ont fusionné, collés par un ciment naturel constitué de matériau de plus fine granulométrie lors d'un impact.
- Caldeira** un grand cratère volcanique, résultant souvent d'un effondrement partiel du sommet d'un volcan bouclier ou d'une éruption explosive.
- Ceinture de Kuiper** une région en forme de disque au-delà de l'orbite de Neptune, qui contient des millions d'objets glacés ; la région d'origine des comètes à courte période.
- Ceintures de radiation de Van Allen** des régions en forme de tore autour de la Terre, découvertes par James Van Allen en 1958, où des particules chargées à haute énergie ont été piégées par le champ magnétique de la planète.
- Cellule de Ferrel** une circulation de latitude moyenne dans l'atmosphère de la Terre, dans laquelle l'air proche de la surface se déplace vers les pôles, puis s'élève et retourne vers des latitudes plus basses.
- Cellule de Hadley** la circulation dans l'atmosphère d'une planète, dans laquelle le gaz chauffé par le Soleil s'élève puis se déplace vers le pôle, puis retombe et retourne vers l'équateur.
- Centaure** un petit corps du Système Solaire externe qui a été déplacé de la ceinture de Kuiper vers le Système Solaire interne par des interactions gravitationnelles.
- Chaleur latente** chaleur libérée ou absorbée consécutivement à un changement de phase ou un changement d'état physique, comme par exemple le passage de la vapeur d'eau (un gaz) à l'eau liquide.
- Chasmata**¹ fossés profonds aux versants abrupts sur Vénus, qui représentent peut-être des exemples de vallées d'effondrement géantes.
- Chauffage par effet de marée** chauffage de l'intérieur d'une lune, en raison de la friction par effet de marée due au puissant champ gravitationnel de sa planète.
- Chenal d'écoulement** large chenal qui possède peu ou pas d'affluents, et dont on pense qu'il a été formé par d'énormes inondations.
- Chondres** petits grains sphériques habituellement composés de silicates de fer, aluminium et magnésium, que l'on trouve en abondance dans les météorites rocheuses primitives.
- Chondrites** une classe très commune de météorites rocheuses qui contiennent habituellement des chondres ; les chondrites carbonées contiennent en plus des composés de carbone.
- Chromosphère** la région de l'atmosphère solaire qui est située entre la photosphère et la couronne.
- Clathrate** un solide dans lequel les molécules d'un composé sont piégées dans des cavités d'une matrice cristalline faite d'un autre composé.
- Coma** l'enveloppe sphérique et gazeuse qui entoure le noyau d'une comète.
- Conjonction inférieure** quand une planète se situe entre la Terre et le Soleil.
- Conjonction supérieure** le point de l'orbite d'une planète inférieure (Mercure ou Vénus) lorsqu'elle est de l'autre côté du Soleil par rapport à la Terre.
- Conjonction** un alignement de deux objets qui semblent être approximativement dans la même position dans le ciel, vu de la Terre.

¹ NDT : Singulier : chasma.

- Mercury et Vénus peuvent se placer directement entre la Terre et le Soleil (**conjonction inférieure**), ou exactement à l'opposé de la Terre, de l'autre côté du Soleil (**conjonction supérieure**). Les planètes plus éloignées peuvent seulement se trouver en conjonction supérieure. Ce terme est également utilisé quand les planètes et la Lune apparaissent à quelques degrés les unes des autres dans le ciel.
- Constante solaire** la quantité totale d'énergie solaire irradiant une surface donnée ; à 1 UA, cette valeur est de 1 367 watts par mètre carré.
- Convection** le transport d'énergie calorifique par des mouvements verticaux atmosphériques ou fluides.
- Coriolis (effet)** la modification de la direction du vent provoquée par la force de Coriolis d'une planète.
- Coriolis (force)** la force qui dévie tout ce qui se déplace librement entre le pôle d'un objet en rotation et son équateur (par exemple les vents) ; produit des formations météorologiques cycloniques et anticycloniques sur la Terre.
- Corona** une formation circulaire de dorsales entourant une zone centrale au relief désordonné, sur Vénus.
- Cosmogonie** l'étude de la façon dont l'Univers et les objets qu'il contient (par exemple le Système Solaire) se sont formés.
- Couplage spin-orbite** une relation mathématique entre la période orbitale d'un objet et sa période de rotation. L'exemple le plus commun est le couplage 1 :1, qui fait que la Lune tourne en montrant toujours le même hémisphère à la Terre.
- Couronne** l'atmosphère chaude et fortement ionisée du Soleil.
- Cratère rayonnant** un cratère entouré de marques radiales laissées par du matériau éjecté autour de sa muraille.
- Cratère secondaire** un cratère d'impact produit par les éjectas d'un impact primaire.
- Croûte** la couche solide externe d'une planète.
- Cryovolcanisme** volcanisme impliquant des matériaux glacés à la place de la lave.
- Cuvette de déflation** une dépression de surface provoquée par l'abrasion de matériau par le vent.
- Cyclone** un vaste système atmosphérique caractérisé par une circulation centripète rapide d'air autour d'un centre de basse pression.
- Demi grand axe (a)** la distance orbitale moyenne entre un objet et l'objet autour duquel il est en orbite ; la moitié du grand axe (le grand diamètre) d'une ellipse.
- Densité de cratères** une mesure de la proximité dans la répartition des cratères d'impacts sur une surface planétaire, donnée généralement en nombre de cratères d'une taille spécifique par unité de surface.
- Dépôts polaires stratifiés** couches de poussière et de glace autour et au-dessous des calottes glaciaires permanentes de Mars.
- Dépression évaporitique** un dépôt de sel laissé sur place après qu'un lac à l'intérieur des terres a disparu par évaporation.
- Dépression** une tempête de latitude moyenne sur Terre, associée à une région de basse pression atmosphérique.
- Deutérium** un isotope lourd de l'hydrogène ; son noyau contient un proton et un neutron.
- Disque protoplanétaire** un disque de gaz et de poussière autour d'une jeune étoile, où un système planétaire est susceptible de se former.
- Dune seif** une dune de type longitudinal, généralement orientée dans une direction parallèle aux vents dominants.
- Dune transverse** une grande dune allongée, asymétrique, se tenant à angle droit de la direction du vent dominant.
- Dune** une élévation de sable, habituellement dans un désert ou une région côtière.
- Éclipse** un événement pendant lequel la lumière d'un objet céleste est partiellement ou totalement masquée par le passage d'un autre objet devant lui, par exemple une éclipse solaire, quand la Lune passe devant le Soleil. L'éclipse d'une étoile par un autre objet s'appelle une **occultation**.
- Écliptique** le plan moyen de l'orbite de la Terre autour du Soleil ; la trajectoire apparente du Soleil sur la sphère céleste.
- Effet de serre** le piégeage de la radiation infrarouge par des gaz dans l'atmosphère d'une planète, amenant une élévation de la température de surface.
- Éjecta** le matériau qui est propulsé lors de la formation d'un cratère impact.
- Éjection de masse coronale (CME)** une éruption en direction de l'espace de milliards de tonnes de plasma depuis la couronne solaire.
- Ellipse** une courbe symétrique fermée possédant deux axes perpendiculaires, l'un étant plus long que l'autre.
- Équinoxe** l'une des deux dates à laquelle le Soleil croise l'équateur céleste. À l'équinoxe vernal (ou équinoxe de printemps), le Soleil croise l'équateur du sud vers le nord aux environs du 21 mars chaque année. À l'équinoxe d'automne, le Soleil croise l'équateur du nord vers le sud aux alentours du 23 septembre. À ces dates, les durées du jour et de la nuit sont approximativement égales autour de la Terre (équinoxe signifie en latin « nuits égales »²).
- Érosion** la fragmentation *in situ* de roches par des facteurs météorologiques – la pluie, le vent, les changements de température, etc.
- Éruption solaire** une soudaine libération d'énergie dans ou à proximité de la photosphère solaire, qui accélère des particules chargées en direction de l'espace.
- Escarpement** une falaise formée par effondrement ou par érosion.
- Excentricité (e)** un des six éléments orbitaux képlériens, elle décrit la forme d'une orbite – en particulier la façon dont une orbite elliptique diffère d'un cercle. Lorsque $e=0$, l'orbite est un cercle. Lorsque e est proche de 1, c'est une ellipse très allongée et étroite. L'excentricité est calculée en divisant la distance entre le centre et le foyer de l'ellipse (c) par le demi grand axe de l'ellipse (a), autrement dit le ratio c/a . L'excentricité d'une ellipse est toujours inférieure à 1.
- Exoplanète / planète extrasolaire** une planète en orbite autour d'une autre étoile que le Soleil.
- Exosphère** soit la couche ténue la plus externe de l'atmosphère d'une planète qui se confond avec l'espace interplanétaire, soit l'intégralité de l'enveloppe gazeuse d'un objet planétaire dont l'atmosphère présente des caractéristiques similaires à celles d'une exosphère³.
- Extrémophiles** microbes qui vivent dans des environnements extrêmes tels que les glaces des mers, les cheminées hydrothermales des profondeurs marines⁴, les sources chaudes, et les lacs alcalins ou salés.
- Facula** (plur. **faculae**) une tache brillante à la surface d'une planète ou d'une lune, en particulier sur Ganymède.
- Facule** une région brillante sur la photosphère du Soleil.
- Faille transformante** un type de faille de la croûte où des blocs de croûte (ou plaques tectoniques) glissent l'un sur l'autre latéralement (par exemple la faille de San Andreas en Californie).
- Feldspath** un minéral silicaté riche en aluminium que l'on trouve dans les météorites et d'autres roches.
- Filament** une protubérance solaire vue en contre-jour par rapport au disque brillant du Soleil (c'est-à-dire vue à la verticale), apparaissant sous la forme d'une marque sombre traversant la photosphère.

² NDT : De *æquus et noctis*

³ NDT : Dans ce dernier cas, on précise parfois : exosphère de surface. Ses atomes ou molécules n'entrent pas en contact mutuel.

⁴ NDT : Souvent appelés « fumeurs noirs » et « fumeurs blancs ».

- Flux** la quantité de radiation ou le nombre de particules arrivant pendant une période de temps donnée.
- Géante rouge** une grosse étoile froide, qui s'est considérablement dilatée après avoir consommé tout l'hydrogène qui était nécessaire à la fusion nucléaire en son cœur.
- Graben** une dépression rectiligne en surface, délimitée à chaque bord (sur sa longueur) par des failles perpendiculaires, et provoquée par l'écartement de la croûte ; communément appelée vallée d'effondrement ou vallée de rift.
- Granulation** un effet moucheté sur la photosphère du Soleil, provoqué par des colonnes de gaz ascendant en raison de la convection.
- Héliopause** la limite externe de l'héliosphère, où la pression du vent solaire est égale à celle du médium interstellaire.
- Héliosismologie** l'étude de l'intérieur du Soleil par l'analyse des oscillations dans la zone convective solaire.
- Héliosphère** la région de l'espace dominée par le champ magnétique du Soleil et le vent solaire.
- Horst** un bloc de croûte qui a été soulevé entre deux failles parallèles, parfois appelé montagne-bloc.
- Hydrocarbure** un composé chimique fait d'atomes d'hydrogène et de carbone.
- Hypothèse de la nébuleuse primordiale** la théorie selon laquelle le Système Solaire s'est formé à partir d'une nébuleuse autour du Soleil.
- Inclinaison** l'angle entre le plan orbital d'un objet et un plan de référence, habituellement celui de l'écliptique (pour les orbites héliocentriques) ou celui de l'équateur d'une planète (pour les lunes).
- Insolation** quantité de radiation solaire reçue.
- Ion** un atome qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons, de sorte qu'il est devenu chargé électriquement.
- Ionopause** la limite inférieure de l'ionosphère.
- Ionosphère** la région supérieure de l'atmosphère d'une planète, où de nombreux atomes sont ionisés.
- Jet stream** (ou **courant-jet**) un mince ruban de vent circulant autour d'une planète à haute vitesse et haute altitude.
- Jour sidéral** la période de rotation de la Terre sur elle-même, par rapport à un arrière plan d'étoiles « fixes » (23 heures 56 minutes et 4 secondes).
- Jour solaire** le temps que met la Terre pour tourner sur elle-même par rapport au Soleil (24 heures).
- KREEP** acronyme pour le matériau basaltique lunaire riche en éléments radioactifs : K pour potassium, RRE pour terres rares⁵ (Rare Earth Elements), P pour phosphore.
- Lacunes de Kirkwood** régions vides dans la ceinture d'astéroïdes, où les périodes orbitales sont des fractions entières de la période orbitale de Jupiter.
- Libration** une légère oscillation, ou un mouvement de balancement apparent, que montre un satellite naturel tournant de façon synchrone le long d'une orbite légèrement excentrique (comme la Lune).
- Limite de Roche** la frontière imaginaire autour d'une planète, où une lune de type « empilement de gravats » peut être écartelée par les forces gravitationnelles. Dans cette région, les particules sont dans l'incapacité de coalescer pour former une lune à cause des effets perturbateurs des forces de marée. Située à 2,46 rayons planétaires pour les objets de faible cohésion interne, et à 1,44 rayon pour les petites lunes rocheuses.
- Lithosphère** couche externe rigide d'une planète, incluant la croûte et une partie du manteau supérieur.
- Lumière zodiacale** une faible lueur dans le ciel nocturne, venant de la diffusion de la lumière solaire par la poussière interplanétaire proche du plan de l'écliptique.
- Magma** matériau fluide, chaud et rocheux, situé sous la croûte, à partir duquel la roche ignée se forme.
- Magnétogaine** la région située entre l'arc de choc et la magnétopause d'une planète, dans laquelle le plasma du vent solaire s'écoule autour de la magnétosphère.
- Magnétopause** la frontière externe de la magnétosphère d'une planète.
- Magnétoqueue** la portion de la magnétosphère planétaire qui est étirée en aval par le vent solaire.
- Magnétosphère** la région de l'espace qui entoure une planète et dans laquelle le champ magnétique de la planète est prédominant par rapport au vent solaire.
- Magnitude absolue** la luminosité d'un objet du Système Solaire s'il était placé à 1 UA à la fois de l'observateur et du Soleil, et vu selon un angle de phase de 0° (totalement éclairé).
- Magnitude apparente** une mesure de la luminosité apparente d'une planète ou d'une étoile. Les objets très brillants, comme Vénus ou le Soleil, ont des magnitudes négatives.
- Manteau** la couche interne d'une planète, située entre sa croûte et son noyau.
- Mare** (latin, ou français : **mer**) une région de la Lune ou de Mars qui apparaît plus sombre et plus lisse que son environnement. Pluriel : *Maria* (latin).
- Mascon**⁶ concentration de masse souterraine qui provoque des anomalies de gravité à grande échelle sur la Lune et d'autres corps.
- Mésosphère** une région de l'atmosphère située entre la stratosphère et la thermosphère.
- Météore** une traînée lumineuse dans le ciel, qui apparaît quand une particule de poussière interplanétaire se consume dans l'atmosphère supérieure ; appelée familièrement « étoile filante ».
- Météorite** un objet rocheux / métallique d'origine naturelle qui survit à sa chute depuis l'espace vers la Terre.
- Météorites SNC** groupe de météorites (Shergotty-Nakhla-Chassigny) dont on pense qu'elles proviennent de Mars en raison de leur jeunesse, de leur composition basaltique, et de l'inclusion de gaz qui présentent la même composition que l'atmosphère martienne.
- Météoroïde** un petit corps d'origine naturelle en orbite autour du Soleil ; il peut être originaire d'une comète ou d'un astéroïde.
- Micrométéorite** une très petite météorite, ou une particule de météorite, de moins d'un millimètre de diamètre.
- Mois sidéral** la durée d'une révolution de la Lune autour de la Terre, par rapport à une étoile fixe.
- Mois synodique** la période entre deux phases identiques de la Lune.
- Naïve blanche** le reste d'une étoile, chaud et de très petite taille, une fois que l'étoile s'est effondrée après avoir consommé toutes ses sources possibles de « combustible » pour la fusion nucléaire.
- Naïve brune** un objet gazeux dont la masse est comprise entre 13 et 80 fois celle de Jupiter, trop petit pour amorcer une réaction de fusion thermonucléaire en son noyau.
- Naïve noire** une étoile morte qui n'est plus ni chaude, ni lumineuse.
- Nanoéruptions** petites explosions sur le Soleil.
- Nappe de courant** la surface bidimensionnelle à l'intérieur d'une magnétosphère, qui sépare les champs magnétiques de polarités opposées.
- Nébuleuse solaire** le nuage de gaz et de poussière, en forme de disque, où s'est formé le système Solaire (appelée également nébuleuse protosolaire ou nébuleuse protoplanétaire).
- Nébuleuse** une vaste région de gaz et de poussière interstellaires (le mot latin *Nebula* signifie « nuage »).
- Neutrino** une particule relativiste neutre, dont la masse au repos est extrêmement faible.
- Nœud** un des deux points sur une sphère céleste où une orbite croise un plan de référence, par exemple le plan équatorial.
- Noyau** le centre d'un objet massif comme le Soleil ou une planète.
- Noyau** le cœur solide d'une comète, composé d'un mélange de glaces, de silicates solides et de grains carbonés.

⁵ NDT : Des métaux comme l'yttrium ou le néodyme, aux nombreuses applications industrielles.

⁶ NDT : Abréviation de Mass Concentration.

Nuage d'Oort une région grossièrement sphérique, s'étendant à plus de 100 000 UA du Soleil, occupée par de petits corps glacés dont on estime que la population atteint jusqu'à mille milliards ; la région d'origine des comètes à longue période.

Nuée ardente un nuage de gaz chaud et luminescent, fait de gaz et de roches pulvérisées, qui s'étend en dévalant les pentes d'un volcan en éruption.

Obliquité angle entre le plan équatorial d'une planète et son plan orbital ; l'inclinaison de son axe de rotation. C'est la raison pour laquelle une planète a des saisons.

Occultation le passage d'un objet devant un autre objet présentant un plus petit diamètre angulaire apparent (par exemple quand un astéroïde ou une planète masque temporairement la vue d'une étoile).

Olivine un minéral riche en métal, vert, que l'on trouve dans des météorites et d'autres roches.

Ondes d'Alfvén ondes magnétiques capables de se propager à travers un fluide ou un plasma conducteur électrique dans un champ magnétique.

Opposition le moment où une planète en orbite au-delà de la Terre est en direction opposée au Soleil dans le ciel (c'est-à-dire lorsque son élongation est de 180°).

Orbite la trajectoire suivie par un petit objet situé dans le champ gravitationnel d'un objet plus gros.

Organique un composé complexe contenant du carbone, mais n'étant pas nécessairement associé à la vie.

Ozone une forme d'oxygène qui contient trois atomes au lieu de deux.

Palimpseste une tache grossièrement circulaire sur une lune glacée, qui, pense-t-on, marque l'emplacement d'un ancien cratère et sa muraille.

Parallaxe la distance angulaire à laquelle un objet céleste semble s'être déplacé par rapport à des objets plus lointains, lorsqu'il est observé depuis deux endroits considérablement éloignés entre eux. La valeur de la parallaxe peut être utilisée pour déterminer la distance d'un objet.

Périgée le point de l'orbite d'un objet tournant autour de la Terre lorsqu'il en est au plus près.

Périhélie le point de l'orbite d'un objet lorsqu'il est au plus près du Soleil.

Période sidérale la période orbitale d'une planète, ou d'un quelconque objet céleste, par rapport à une étoile en arrière plan ; la vraie période orbitale.

Permafrost zone proche de la surface dans laquelle les températures sont toujours au-dessous de 0 °C. Il peut contenir de la glace, sans que cela soit systématique.

Phase la fraction visible de la surface d'un objet éclairé (par exemple la Lune).

Photodissociation l'action de briser des molécules par l'absorption de lumière, en particulier par la lumière ultraviolette du Soleil.

Photométrie la branche de l'astronomie qui se consacre à la mesure de la luminosité d'un objet céleste à différentes longueurs d'onde.

Photosphère la surface visible du Soleil.

Photosynthèse un processus chimique au sein d'organismes comme les plantes et certaines bactéries, qui convertit le dioxyde de carbone en composés organiques, en particulier en sucres, en exploitant l'énergie de la lumière solaire.

Plagioclase un silicate minéral lithogénétique commun.

Planétésimal un corps primordial de taille intermédiaire, jusqu'à un kilomètre de large, qui s'est par la suite accrété en planète ou en astéroïde.

Plaque (voir **Tectonique des plaques**).

Plaque tectonique un vaste bloc de la lithosphère d'une planète, animé d'un mouvement indépendant.

Plasma gaz totalement ionisé, constitué d'électrons libres et de noyaux atomiques, où la température est trop élevée pour que des atomes puissent rester neutres.

Pluie de météores une période d'augmentation de l'activité météorique résultant du passage d'une planète (d'ordinaire au même moment tous les ans) à travers des particules éparpillées le long de l'orbite d'une comète.

Point chaud site à la verticale d'une colonne de matériau chaud en ascendance depuis le manteau, qui peut amener la formation de volcans en surface⁷.

Points de Lagrange cinq points, dans le plan orbital de deux corps massifs, où un troisième corps peut rester en équilibre, de sorte que les trois corps dessinent une configuration géométrique stable. Deux points de Lagrange (L4 et L5) forment des triangles équilatéraux avec les deux premiers corps et sont stables ; les trois autres sont instables et se situent sur la ligne reliant les deux premiers corps.

Polarisation le processus qui affecte des radiations, en particulier la lumière, de sorte que les vibrations électromagnétiques ne sont pas orientées au hasard.

Précession (1) un lent mouvement conique et périodique de l'axe de rotation d'un corps tournant sur lui-même, provoqué par des influences gravitationnelles externes. (2) Une rotation progressive de l'orbite elliptique d'une planète, se manifestant par un décalage de l'alignement de la ligne joignant l'aphélie et le périhélie.

Précession de l'ellipse (voir **Précession**)

Pression de radiation la pression exercée par les photons d'une radiation électromagnétique lorsqu'ils transfèrent leur quantité de mouvement à la matière.

Primordial existant au tout début, ou peu après le tout début du Système Solaire, il y a environ 4,6 milliards d'années.

Prograde mouvement orbital et rotationnel dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, vu depuis la verticale du pôle nord de la Terre. La plupart des planètes et le Soleil tournent sur eux-mêmes dans ce sens, et toutes les planètes ont des orbites progrades.

Protoplanètes les plus gros embryons planétaires qui croissent à partir du matériau de la nébuleuse solaire, et qui finissent par entrer en collision entre eux pour former les planètes.

Protubérance nom donné aux grandes structures évoquant des flammes que l'on voit dans la chromosphère et la couronne du Soleil.

Rainure (NDT : ou ang. *rille*, ou lat. *rima*) une vallée évoquant une tranchée, d'une longueur pouvant atteindre plusieurs centaines de km, large de 1 à 2 km, à la surface de la Lune ou de lunes d'autres planètes.

Rayons cosmiques noyaux atomiques (principalement des protons) de haute énergie en provenance de l'espace interstellaire, et qui entrent dans le Système Solaire.

Reconnexion magnétique la brisure et la reconnexion de lignes de champ magnétique, provoquant la libération d'énergie magnétique.

Réfractaire un élément qui se vaporise à haute température (par exemple l'aluminium, le calcium et l'uranium).

Région active zone perturbée du Soleil où de forts champs magnétiques émergent depuis l'intérieur, formant des protubérances, des taches solaires, des éruptions et autres phénomènes.

Régolite débris rocheux fragmentés, produits par de nombreux impacts de météorites, qui constituent la couche superficielle à la surface des planètes, lunes et astéroïdes.

Résonance la situation d'un objet en orbite qui est sujet à des perturbations gravitationnelles périodiques par un autre objet.

Résonance spin-orbite (voir **couplage spin-orbite**).

Rétrograde mouvement orbital et / ou rotationnel dans le sens des aiguilles d'une montre, vu à la verticale du pôle nord de la Terre. Les mouvements rétrogrades sont atypiques pour les planètes

⁷ NDT : Terme également utilisé pour des colonnes de gaz ascendant sur Jupiter.

- du Système Solaire, mais courants pour les comètes et les lunes irrégulières de petite taille.
- Rocher champignon** un rocher dont la base a été fortement érodée, le laissant perché sur un support étroit.
- Rotation synchrone** lorsque la période de rotation d'un corps céleste sur son axe est égale à sa période de rotation autour de son objet parent (par exemple la Lune).
- Saltation** un processus de transport de particules par le vent ou l'eau, qui implique une série de sauts. Après chaque saut, une particule peut en déloger d'autres et les mettre en mouvement à leur tour.
- Satellite berger** une lune qui maintient la structure d'un anneau planétaire par le biais de son influence gravitationnelle.
- Satellite irrégulier** une lune dont l'orbite est fortement inclinée et / ou fortement excentrique.
- Satellite régulier** un satellite naturel (une lune) tournant dans le sens prograde, dont l'orbite est faiblement excentrique et faiblement inclinée.
- Sismologie** la science étudiant les tremblements de terre.
- Solstice** le moment où le Soleil atteint sa position la plus au nord ou la plus au sud dans sa trajectoire annuelle le long du plan de l'écliptique. Aux moments des solstices, le Soleil atteint une déclinaison de 23,5°N ou 23,5°S. Le solstice d'été se situe aux alentours du 21 juin, et le solstice d'hiver arrive aux alentours du 22 décembre.
- Soulèvement isostatique** un très lent soulèvement local de la croûte en raison d'une disparition de matériau de surface (par exemple des plaques glaciaires).
- Sous-orage magnétique** un instabilité soudaine du plasma dans le champ magnétique de la Terre, déclenchée par l'accumulation d'énergie apportée par le vent solaire. Des événements de ce genre provoquent de spectaculaires augmentations d'intensité et d'activité des aurores polaires.
- Spectre** la répartition des longueurs d'onde d'une radiation électromagnétique émise ou réfléchi par un objet.
- Spectroscopie** l'étude de la lumière émise ou réfléchi par un corps (son spectre).
- Spicules** des structures à la forme pointue dans la chromosphère solaire, qui peuvent être observées au bord du limbe solaire.
- Stratosphère** la couche d'une atmosphère planétaire qui est située au-dessus de la troposphère et au-dessous de l'ionosphère ; sur Terre, sa température s'accroît avec l'altitude.
- Stratovolcan** un volcan constitué de couches de lave solidifiée et de cendres.
- Subduction** le processus par lequel une plaque de croûte est contrainte à passer sous une autre plaque.
- Super-rotation** la caractéristique d'une atmosphère lorsqu'elle tourne plus vite que sa planète (par exemple sur Vénus).
- Tache solaire** une région sombre et relativement froide dans la photosphère solaire.
- Tectonique des plaques** le mouvement de segments de la lithosphère sous l'influence de la convection du manteau.
- Télé-détection** toute technique visant à mesurer à distance les caractéristiques d'un objet.
- Terminateur** la frontière entre le jour et la nuit.
- Terrain chaotique** zones de la surface martienne où le sol s'est effondré, sans doute en raison d'un retrait d'eau ou de glace souterraine, qui a fini par former un paysage de blocs désordonnés et de collines isolées.
- Tesserae** (lat.) zones de terrains très irréguliers sur Vénus, qui montrent des traces de dorsales, fractures et vallées d'effondrement ayant subi une histoire complexe de déformations successives.
- Théorie géocentrique** une théorie selon laquelle la Terre stationnaire se tient au centre de l'Univers, tandis que le Soleil, la Lune, les étoiles et toutes les autres planètes tournent autour d'elle.
- Théorie héliocentrique** théorie selon laquelle le Soleil se tient au centre du Système Solaire, de sorte que toutes les planètes lui tournent autour.
- Thermosphère** la région de l'atmosphère où la température s'accroît en raison du chauffage ionosphérique.
- Tholin** un hydrocarbure complexe formé par la radiation ultraviolette dans un mélange de composés volatiles contenant du carbone, de l'hydrogène, de l'azote et de l'oxygène.
- Tore de plasma** un anneau de plasma, en forme de *donut*.
- Transit** le passage de Mercure ou de Vénus devant le disque visible du Soleil ; le passage d'une exoplanète devant le disque visible d'une étoile lointaine ; le passage d'une lune devant le disque de sa planète ; le passage d'une étoile ou d'un objet céleste qui croise le méridien de l'observateur en raison du mouvement diurne apparent de la sphère céleste (voir **occultation**).
- Tropopause** la frontière entre la troposphère et la stratosphère.
- Troposphère** la plus basse couche de l'atmosphère de la Terre, où se manifestent la plupart des phénomènes météorologiques, et la région dominée par la convection dans les autres atmosphères planétaires.
- Trou coronal** une région étendue de faible densité et de faible température dans la couronne solaire.
- Trou d'ozone** une région de la couche d'ozone de l'atmosphère supérieure de la Terre, lorsque la quantité de gaz ozone a été amoindrie par la pollution.
- Unité astronomique (UA)** 147 597 870 km, qui est approximativement la distance moyenne Soleil-Terre.
- Vent solaire** le flux à haute vitesse de particules énergétiques chargées (principalement des protons et des électrons) et de lignes de champ magnétique embarquées depuis la couronne solaire.
- Volatiles** éléments ou molécules à basse température de fusion (par exemple l'eau et l'ammoniac).
- Volcan bouclier** un grand volcan dont le large cratère sommital (caldeira) résulte d'un effondrement ; ses flancs présentent des pentes douces, formées principalement par la superposition d'écoulements de lave basaltique fluide.
- Volcan composite** un volcan composé à la fois de lave solidifiée et de cendres.
- Yardang** une vaste région de roche adoucies, érodées par l'action du vent dans une alternance de rides et de sillons, majoritairement parallèles à la direction du vent dominant.
- Zénith** le point à la verticale du lieu d'observation.
- Zodiaque** une ceinture de 12 constellations⁸ traversées par la trajectoire du Soleil dans le ciel – l'écliptique.
- Zone convective** une région à l'intérieur du Soleil où la convection est le processus principal de transfert d'énergie.
- Zone habitable** une région autour d'une étoile où l'on pense que la température est compatible avec l'évolution d'une vie comparable à celle de la Terre, sur un corps planétaire.
- Zone radiative** une région à l'intérieur du Soleil, où des photons à haute énergie entrent en collision avec des électrons et des ions, puis sont réémis sous forme de lumière et de chaleur.

⁸ NDT : 12 selon l'usage ; les constellations étant définies par l'Union Astronomique Internationale, le Soleil passe en réalité devant 13 d'entre elles (dont le Serpenteire, ou Ophiucus). Les planètes passent devant 15 d'entre elles (dont le Serpenteire, la Baleine et le Sextant).

Documentation complémentaire

- Beatty, J. Kelly, Peterson, C. C., & Chaiken, A. L. (1999). *The new Solar System* (4th ed.). Sky Publishing Corp. / Cambridge University Press.
- Greeley, R., & Batson, R. (2001). *The compact NASA atlas of the Solar System*. Cambridge University Press.
- Hartmann, W. K. (2005). *Moons & planets* (5th ed.). Thomson.
- Jones, B. W. (2004). *Life in the Solar System and beyond*. Springer-Praxis.
- Jones, B. W. (2007). *Discovering the Solar System* (2nd ed.). Wiley.
- JPL Solar System. À consulter sur : <http://www.jpl.nasa.gov/solar-system/index.cfm>
- Kluger, J. (1999). *Journey beyond Selene*. Simon & Schuster.
- Kraemer, R. S. (2000). *Beyond the Moon: Golden age of planetary exploration 1971–1978*, Smithsonian.
- Logsdon, J. M. (Ed.). (2001). *Exploring the unknown: selected documents in the history of the U.S. civil space program, volume v, exploring the cosmos*. (NASA SP-4407).
- Morrison, D., & Owen, T. (2003). *The planetary system* (3rd ed.). Addison Wesley.
- Murray, B. W. (1989). *Journey into space: The first thirty years of space exploration*. W. Norton & Co.
- Nicks, O. W. (1985). *Far travelers: The exploring machines*. (NASA SP-480).
- Planetary Society. À consulter sur : www.planetary.org/
- Sagan, C. (1980). *Cosmos*. MacDonal & Co.
- Sagan, C. (1995). *Pale blue dot*. Headline.
- Siddiqi, A. A. (2002). *Deep space chronicle: A chronology of deep space and planetary probes, 1958–2000*. (NASA Monograph in Aerospace History #24).
- Solar System Exploration. À consulter sur : <http://solarsystem.nasa.gov/index.cfm>
- Stephenson, D. J. (2002, November). Planetary oceans. *Sky & Telescope*, 104: 38–44.
- The 8 Planets. À consulter sur : <http://nineplanets.org/>
- Views of the Solar System. À consulter sur : <http://www.solarviews.com/eng/homepage.htm>
- Wilson, A. (1987). *Solar System Log*. Jane's Publications.

Chapitre 1 : Origines

- Alibert, Y., Broeg, C., Benz, W., et al. (2010, January). Origin and formation of planetary systems. *Astrobiology*, 10(1), 19–32.
- Bond, P. (2007). *Distant worlds: Milestones in planetary exploration*. Copernicus/Praxis.
- Doody, D. (2007). *Basics of interplanetary flight*. À consulter sur : <http://www.jpl.nasa.gov/basics>
- Jayawardhana, R. (2003, April). Planets in production: Making new worlds. *Sky & Telescope*, 105, 36.
- Krimigis, S. M., Mitchell, D.G., Roelof, E.C., et al. (2009, November). Re-imagining the heliosphere. [Special issue] *Science*, 326(5951), 959–971.
- Laughlin, G. P. (2007, June). From here to eternity: The fate of the sun and the earth. *Sky & Telescope*, 112, 32.
- Malhotra, R., & Minton, D. A. (2009, February). A record of planet migration in the main asteroid belt. *Nature*, 457, 1109–1111.
- Schilling, G. (1999, October). From a swirl of dust, a planet is born. *Science*, 286, 66–68.
- Scott, E. R. D. (2006, June). Meteoritical and dynamical constraints on the growth mechanisms and formation times of asteroids and Jupiter. *Icarus*. À consulter sur : <http://arxiv.org/ftp/astro-ph/papers/0607/0607317.pdf>
- Soter, S. (2007, January). What is a Planet? *Scientific American*, 296(1), 34–41.
- Stevenson, D. J. (1991). Giant planets and their satellites: What are the relationships between their properties and how they formed? *National Academies Press*. À consulter sur : <http://www.nap.edu/books/0309043336/html/163.html>
- Strom, R. G., Michels, J., Malhotra, R., et al. (2005, September). The origin of planetary impactors in the inner Solar System. *Science*, 309, 1847–1850.
- Taylor, G. J. (2003, May). Triggering the formation of the Solar System. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psrhawaii.edu/May03/SolarSystemTrigger.html>
- Taylor, G. J. (2006, January). Cosmochemistry from nanometers to light-years. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psrhawaii.edu/Jan06/protoplanetary.html>

- Taylor, G. J. (2006, November). Hit-and-run as planets formed. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Nov06/hit-and-run.html>
- Thommes, E. W., Matsumura, S., & Rasio, F. A. (2008, August). Gas disks to gas giants: simulating the birth of planetary systems. *Science*, 321, 814–817.
- Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., et al. (2005, May). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, 435, 459–461.
- Vinković, D. (2009, May). Radiation-pressure mixing of large dust grains in protoplanetary disks. *Nature*, 459, 227–229.
- Voyager – The interstellar mission. À consulter sur : <http://voyager.jpl.nasa.gov/>
- Walsh, K. J. (2009, February). Asteroids: when planets migrate. *Nature*, 457, 1091–1093.
- Wetherill, G. W. (1991). *Formation of the terrestrial planets from planetesimals*. National Academies Press. À consulter sur : <http://www.nap.edu/books/0309043336/html/98.html>
- Wood, J. A. (1999, January). Forging the planets. *Sky & Telescope*.
- Chapitre 2 : Le Soleil**
- A super solar flare. (2008, May). Science@NASA. À consulter sur : http://science.nasa.gov/headlines/y2008/06may_carringtonflare.htm
- Are sunspots disappearing? (2009, September). Science@NASA. À consulter sur : http://science.nasa.gov/headlines/y2009/03sep_sunspots.htm
- Bahcall, J. N. (2004, April). *Solving the mystery of the missing neutrinos*. À consulter sur : http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/articles/bahcall/
- Big Bear solar observatory. À consulter sur : <http://www.bbso.njit.edu/>
- De Pontieu, B., Erdélyi, R., & James, S. P. (2004, July). Solar chromospheric spicules from the leakage of photospheric oscillations and flows. *Nature*, 430, 536–539.
- Ehrenstein, D. (1997, September). SOHO traces the Sun's hot currents. *Science*, 277, 1438.
- Fleck, B., Müller, D., Haugan, S., Duarte, L. S., & Sili, T. (2006, May). 10 Years of SOHO. *ESA Bulletin* 126, 24–32. http://sohowww.nascom.nasa.gov/publications/ESA_Bull126.pdf
- Foukal, P., Fröhlich, C., Spruit, H. et al. (2006, September). Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate. *Nature*, 443, 161–166.
- Global Oscillation Network Group (GONG). À consulter sur : <http://gong.nso.edu/>
- Golub, L., & Pasachoff, J. M. (2002). *Nearest star: The surprising science of our Sun*. Harvard University Press.
- Gough, D. (2000, March). News from the solar interior. *Science*, 287, 2434–2435.
- Gough, D. O., Kosovichev, A. G., Toomre, J., et al. (1996, May). The seismic structure of the Sun. *Science*, 272, 1296–1300.
- Haisch, B., & Schmitt, J. (1999, October). The solar-stellar connection. *Sky & Telescope*. 98(4), 46–54.
- Hanson, B., & Hoss, D. (2008, December). Results from Hinode. [Special Issue]. *Science*, 318, 1572–1599.
- Hassler, D. M., Dammasch, I. E., Lemaire, P., et al, (1999). Solar wind outflow and the chromospheric magnetic network. *Science*, 283, 810–813.
- Hill, S., & Carlowicz, M. (2006). *The Sun*. Harry N. Abrams, Inc.
- Hinode (Solar-B) mission (JAXA). À consulter sur : <http://www.isas.jaxa.jp/e/enterp/missions/solar-b/index.shtml>
- Hinode (Solar-B) mission (NASA). À consulter sur : <http://solarb.msfc.nasa.gov/>
- Hudson, H. S. & Kosugi, T. (1999, August). How the Sun's corona gets hot. *Science*, 285, 849.
- James, C. R. (2007, July). Solar forecast: Storm ahead. *Sky & Telescope*. 114(1), 24.
- Jess, D. B., Mathioudakis, M., Erdélyi, R., et al. (2009, March). Alfvén waves in the lower solar atmosphere. *Science*, 323, 1582.
- Lang, K. R. (1998). *SOHO Reveals the secrets of the Sun*. Magnificent Cosmos – Scientific American Special, Springer.
- Lang, K. R. (2001). *The Cambridge encyclopedia of the Sun*. Cambridge University Press.
- Lang, K. R. (2006). *Sun, Earth and Sky* (2nd ed.). Springer.
- Lang, K. R. (2008). *The Sun from Space* (2nd ed.). Springer.
- Laughlin, G. P. (June, 2007). From here to eternity: The fate of the Sun and the Earth. *Sky & Telescope*. 112, 32.
- Lindsey C., & Braun, D.C. (2000, March). Seismic images of the far side of the Sun. *Science*, 287, 1799–1801.
- Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory. À consulter sur : <http://www.lmsal.com/>
- McComas, D. J., Elliott, H. A., Gosling, J.T., et al. (2006, May). Ulysses observations of very different heliospheric structure during the declining phase of solar activity cycle 23. *Geophysical Research Letters*, 33, L09102.
- Moran, T. G., & Davila, J. M., (2004, July). Three-dimensional polarimetric imaging of coronal mass ejections, *Science*, 305, 66–70.
- Mystery of the missing sunspots solved?* (2009, June). Science@NASA. À consulter sur : http://science.nasa.gov/headlines/y2009/01apr_deepsolarminimum.htm
- National Solar Observatory web site. À consulter sur : <http://www.nso.edu/>
- NOAA Space Environment Center. À consulter sur : <http://www.sec.noaa.gov/>
- Rempel, M., Schüssler, M., Cameron R. H., et al. (2009, July). Penumbra structure and outflows in simulated sunspots. *Science*, 325, 171–174.
- Schrifer, C. J. (2006, April). The science behind the solar corona. *Sky & Telescope*.
- Science from Hinode. (April 2008). [Special Issue]. *Astronomy and Astrophysics*, 481. À consulter sur : <http://www.aanda.org/index.php?option=toc&url=/articles/aa/abs/2008/13/contents/contents.html>
- Shepherd, D. (2007, June). Stellar origins: From the cold depths of space. *Sky & Telescope*.
- Smith, E. J., Marsden, R. G., & Page, D. E. (1995, May). Ulysses above the Sun's South Pole. *Science*, 268, 1005–1033.
- Smith, E. J., Marsden, R.G., Balogh, A., et al. (2003). The Sun and heliosphere at solar maximum, *Science*, 302(1), 1165–1169.
- SOHO mission. À consulter sur : <http://soho.nascom.nasa.gov/>
- Solar Physics Group, NASA Marshall Space Flight Center: À consulter sur : <http://solarscience.msfc.nasa.gov/index.html>
- Solar Wind Loses Power, Hits 50-year Low*. (2008, September). Science@NASA. À consulter sur : http://science.nasa.gov/headlines/y2008/23sep_solarwind.htm
- STEREO mission. À consulter sur : <http://stereo.jhuapl.edu/>
- Sudbury Neutrino Observatory. À consulter sur : <http://www.sno.phy.queensu.ca/>
- Swedish 1-meter Solar Telescope. À consulter sur : <http://www.solarphysics.kva.se/>
- Taylor, G. J. (2007, July). The Sun's crowded delivery room, PSR Discoveries. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/July07/iron-60.html>

Ulysses mission. À consulter sur : <http://helio.esa.int/ulysses/>
 Yohkoh mission. À consulter sur : <http://www.lmsal.com/YPOP/homepage.html>

Chapitre 3 : La Terre

Bintanja, R., & van de Wal, R. S. W. (2008, August). North American ice-sheet dynamics and the onset of 100,000-year glacial cycles. *Nature*, 454, 869–872.

Destination Earth (NASA). À consulter sur : <http://www.earth.nasa.gov/>

Donnadieu, Y., Godderis, Y., & Ramstein, G. (2004). Cracking continents caused ‘snowball Earth.’ *Nature*, 428, 303–306.

Durda, D. D. (2006, November). The most dangerous asteroid ever found. *Sky & Telescope*, 112(11), 29.

Earth impact database. University of New Brunswick. À consulter sur : <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/index.html>

Earth impact effects program. À consulter sur : <http://impact.ese.ic.ac.uk/>

Earth pages (Blackwell). À consulter sur : <http://www.earth-pages.com/default.asp>

Earth science world. À consulter sur : <http://www.earthscienceworld.org>

Earth's Fidgeting Climate: http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast20oct_1.htm?list153136

Encyclopedia of the Atmospheric Environment. À consulter sur : <http://www.ace.mmu.ac.uk/eae/english.html>

ESA Earth observation. À consulter sur : <http://www.esa.int/esaEO/>

Hays, J. D., Imbrie, J., & Shackleton, N. J., (1976). Variation in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, 194, 1121–1132.

Intergovernmental panel on climate change. À consulter sur : <http://www.ipcc.ch/>

James, C. R. (2007, July). Solar forecast: storm ahead. *Sky & Telescope*.

Kasting, J. F. (1993). Earth's early atmosphere. *Science*, 259, 920–926.

Kious, W. J., & Tilling, R. I. (1996). *This dynamic Earth: The story of plate tectonics*. USGS. À consulter sur : <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/dynamic.html>

Kring, D. A. (1999, December). Calamity at meteor crater. *Sky & Telescope*, 98(3), 48–53.

McPhaden, M. J., Zebiak, S.E., Glantz M.H. et al. (2006). ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science*, 314, 1740–1745.

NASA Earth observatory. À consulter sur : <http://earthobservatory.nasa.gov/>

NASA EOS IDS volcanology. À consulter sur : <http://eos.higp.hawaii.edu/>

NASA near Earth object program. À consulter sur : <http://neo.jpl.nasa.gov/>

NASA ozone hole watch. À consulter sur : <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/index.html>

Ocean surface currents (University of Miami). À consulter sur : <http://oceancurrents.rsmas.miami.edu/index.html>

Ocean surface topography from space (NASA). À consulter sur : <http://sealevel.jpl.nasa.gov/>

Pacchioli, D. (2001, April). Reflections from a warm little pond. *Astrobiology Magazine*. À consulter sur : <http://www.astrobio.net/news/article5.html>

Palaeos: The trace of life on earth. À consulter sur : <http://www.palaeos.com/Default.htm>

Paleomap project (Christopher R. Scotese). À consulter sur : <http://www.scotese.com/Default.htm>

Solar views – terrestrial volcanoes. À consulter sur : <http://www.solarviews.com/eng/tervolc.htm>

Tarduno, J. A., Duncan R.A., Scholl, D.W., et al. (2003). The emperor seamounts: Southward motion of the Hawaiian hotspot plume in Earth's mantle. *Science*, 301, 1064–1069.

USGS earthquake hazard program. À consulter sur : <http://earthquake.usgs.gov/>

USGS volcano hazards program. À consulter sur : <http://volcanoes.usgs.gov/>

Volcano World. À consulter sur : <http://www.volcanoworld.org/>

Walker, A. S. (2000). Deserts: Geology and resources. USGS. À consulter sur : <http://pubs.usgs.gov/gip/deserts/contents/>

Chapitre 4 : La Lune

Apollo image atlas. À consulter sur : <http://www.lpi.usra.edu/resources/apollo/>

Apollo lunar surface journal. À consulter sur : <http://www.hq.nasa.gov/alsj/>

Brandon, A. (2007, December). A younger moon. *Nature*, 450, 1169–1170.

Cameron, A. G. W. (1997). *The origin of the moon and the single impact hypothesis*. À consulter sur : <http://www.xtec.es/recursos/astronom/moon/camerone.htm>

Campbell, B.A., Campbell, D.B., Chandler, J.F., et al. (2003). Radar imaging of the lunar poles. *Nature*, 426, 137–138.

Cohen, B. A. (2001, January). Lunar meteorites and the lunar cataclysm. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.hawaii.edu/Jan01/lunarCataclysm.html>

Consolidated lunar atlas. À consulter sur : <http://www.lpi.usra.edu/resources/cla/>

Digital lunar orbiter photographic atlas of the moon. À consulter sur : http://www.lpi.usra.edu/resources/lunar_orbiter/?info1083

Foust, J. A. (1998, September). NASA's New Moon. *Sky & Telescope*.

Geologic history of the moon. À consulter sur : cgs.earth.northwestern.edu/GHM/ghm_hplates.html

Harland, D. M. (1999). *Exploring the Moon: The Apollo expeditions*, Springer Praxis.

Introduction to cratering studies, Planetary Science Institute, Tucson, Arizona. À consulter sur : <http://www.psi.edu/projects/mgs/cratering.html>

Investigating the Moon's far side (3 articles). (2009, February). *Science*, 323, 897–912.

LCROSS and Lunar Reconnaissance Orbiter. (2010, October). À consulter sur : http://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/main/oct_21_media_telecon.html

Lunar meteorites (Randy Korotev). À consulter sur : http://epsc.wustl.edu/admin/resources/moon_meteorites.html

Lunar photo of the day. À consulter sur : <http://www.lpod.org/>

Lunar Prospector results. (1998, September). *Science*, 281, 1475–1500.

Lunar Reconnaissance Orbiter mission. À consulter sur : <http://lunar.gsfc.nasa.gov/>

Martel, L. M. V. (1999, September). The Moon at its core. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.hawaii.edu/Sept99/MoonCore.html>

Martel, L. M. V. (2003, June). The Moon's dark, icy poles. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.hawaii.edu/June03/lunarShadows.html>

Martel, L. M. V. (2004, December). Composition of the Moon's crust. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.hawaii.edu/Dec04/LunarCrust.html>

Martel, L. M. V. (2004, September). Lunar crater rays point to a new lunar time scale. *PSR Discoveries*. <http://www.psr.hawaii.edu/Sept04/LunarRays.html>

- Martel, L. M. V. (2009, December). Celebrated Moon rocks. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Dec09/Apollo-lunar-samples.html>
- Masursky, H., Colton, G. W., & El-Baz, F. (Eds.). (1978). *Apollo over the Moon: A view from orbit*. (NASA SP-362). À consulter sur : <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/SP-362/contents.htm>
- Nozette, S., Lichtenberg, C.L., Spudis, P., et al. (1996). The Clementine Bistatic radar experiment. *Science*, 274, 1495–1498.
- Rocks and soils from the Moon (JSC-NASA). À consulter sur : <http://www.curator.jsc.nasa.gov/curator/lunar/lunar.htm>
- Selene (Kaguya) mission science reports. (2009, February). *Science*, 323, 897–912.
- Smart-1 mission. À consulter sur : <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=10>
- Spudis, P. D. (1996). *The once and future moon*. Smithsonian Institution Press.
- Spudis, P. D. (1996, December). Ice on the bone dry Moon. *PSR Discoveries*. <http://www.psr.d.hawaii.edu/Dec96/IceonMoon.html>
- Spudis, P. D. (2003, January). The new Moon. *Scientific American*.
- Taylor, G. J. (1997, October). Moonbeams and elements. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Oct97/MoonFeO.html>
- Taylor, G. J. (1998, December). Origin of the Earth and Moon. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Dec98/OriginEarthMoon.html>
- Taylor, G. J. (2000, August). A new Moon for the twenty-first century. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Aug00/newMoon.html>
- Taylor, G. J. (2000, December). Recipe for high-titanium lunar magmas. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Dec00/highTi.html>
- Taylor, G. J. (2000, June). The surprising Lunar Maria. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/June00/lunarMaria.html>
- Taylor, G. J. (2002, October). The Moon beyond 2002. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Oct02/moon.html>
- Taylor, G. J. (2004, October). New lunar meteorite provides its lunar address and some clues about early bombardment of the Moon. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Oct04/SaU169.html>
- Taylor, G. J. (2005, November). Gamma rays, meteorites, lunar samples, and the composition of the Moon. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Nov05/MoonComposition.html>
- Taylor, G. J. (2006, April). Finding basalt chips from distant maria. *PSR Discoveries*. <http://www.psr.d.hawaii.edu/April06/basaltFragments.html>
- Taylor, G. J. (2007, April). Two views of the Moon's composition. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/April07/Moon2Views.html>
- Terada, K., Anand, M., Sokol A.K., et al. (2007, December). Cryptomare magmatism 4.35 Gyr ago recorded in lunar meteorite Kalahari 009. *Nature*, 450, 849–852.
- Weitz, C. M. (1997, February). Explosive volcanic eruptions on the Moon. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Feb97/MoonVolcanics.html>
- Wilhelms, D. (1987). *Geologic history of the Moon*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1348. À consulter sur : <http://cgs.earth.northwestern.edu/GHM/>
- Wilhelms, D. E. (1993). *To a rocky Moon, a geologist's history of lunar exploration*. University of Arizona Press. À consulter sur : <http://www.lpi.usra.edu/publications/books/rockyMoon/>
- Wood, C. A. (2007). The Moon's far side: Nearly a new world. *Sky & Telescope*.

Chapitre 5 : Mercure

- BepiColombo web site. À consulter sur : <http://www.sci.esa.int/bepicolombo>
- Correia, A. C. M., & Laskar, J. (2004, June). Mercury's capture into the 3/2 spin-orbit resonance as a result of its chaotic dynamics. *Nature*, 429, 848–850.
- Dunne, J., & Burgess, E. (1978). *The voyage of Mariner 10*. (NASA SP-424).
- Harmon, J. K. (2001). Mercury radar imaging at Arecibo. *LPI abstract*. À consulter sur : www.lpi.usra.edu/meetings/mercury01/pdf/8001.pdf
- Ice on Mercury. NSSDC. À consulter sur : http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/ice/ice_mercury.html
- Kerr, R. A. (2005, January). Mercury's lively core. *Science Now*. *Mariner 10 archive project* (Mark Robinson, Northwestern University). À consulter sur : <http://cgs.earth.northwestern.edu/merc.html>
- Mariner 10 preliminary science report. (1974). *Science*, 185, 141–180.
- MESSENGER web site. À consulter sur : <http://messenger.jhuapl.edu>
- MESSENGER's first Mercury flyby. (2008, July). [Special issue]. *Science*, 321, 59–94.
- MESSENGER's second Mercury flyby. (2009, May). *Science*, 324, 613–621.
- MESSENGER's third Mercury flyby. (2010, August). *Science*, 329, 665–675.
- Robinson, M. S., & Lucey, P. G. (1997, January). Recalibrated Mariner 10 color mosaics: implications for mercurian volcanism. *Science*, 275, 197–200.
- Strom, R. (1987). *Mercury, the elusive planet*. Smithsonian Institution Press.
- Strom, R. G., & Sprague, A. L. (2003). *Exploring Mercury: The iron planet*. Springer-Praxis.
- Taylor, G. J. (1997, January). Mercury unveiled. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Jan97/MercuryUnveiled.html>
- Taylor, G. J. (2001, October). New data, new ideas, and lively debate about Mercury. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Oct01/MercuryMtg.html>
- The Atlas of Mercury*. (NASA SP-423). (NASA History Web site). À consulter sur : <http://history.nasa.gov/SP-423/mariner.htm>
- Vilas, F., Chapman, C. R., & Matthews, M. S. (Eds.). (1988). *Mercury*. The University of Arizona Press.
- Watters, T. R., Mark S. R., Bina C.R., et al. (2004). Thrusts faults and the global contraction of Mercury. *Geophysical Research Letters*, 31. À consulter sur : <http://www.earth.northwestern.edu/people/craig/publish/pdf/grl04.pdf>
- Watters, T. R., Schultz, R.A., Robinson, M.S., et al. (2002, June). The mechanical and thermal structure of Mercury's early lithosphere. *Geophysical research letters*, 29. À consulter sur : <http://www.mines.unr.edu/geo-eng/schultz/pdf%20reprints/Watters+Merc.GRL02.pdf>

Chapitre 6 : Vénus

- Bullock, M. A., & Grinspoon, D. H. (2003). Global climate change on Venus, new light on the Solar System. *Scientific American Special*.
- Cattermole, P. (1994). *Venus: The geological story*. London: UCL Press.
- Dunne, J., & Burgess, E. (1978). *The voyage of Mariner 10*. (NASA SP-424).
- Fimmel R., Colin, L., & Burgess, E. (1983). *Pioneer Venus*. (NASA SP-461).

- Fimmel R., Colin, L., & Burgess, E. (1995). *Pioneering Venus*, (NASA SP-518). À consulter sur : http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19960026995_1996055001.pdf
- Grinspoon, D. (1998). *Venus revealed*. New York: Perseus Publishing.
- Hansen, Vicki L., & Phillips, Roger J., (1993). Tectonics and volcanism of eastern Aphrodite Terra, Venus: No subduction, no spreading. *Science*, 260, 526–530.
- Hunten, D. M., Colin, L., Donahue, T. M., et al. (Eds.). (1993). *Venus*. University of Arizona Press.
- Kaula, W. M. (1990, March). Venus: A contrast in evolution to Earth. *Science*, 247, 1191–1196.
- Magellan at Venus, (1992, August). *Journal of Geophysical Research*, 97, 13,062–13,689.
- Magellan mission. À consulter sur : <http://www2.jpl.nasa.gov/magellan/>
- Malin, M. C. (1992). Mass movements on Venus: Preliminary results from Magellan Cycle I observations. *Journal of Geophysical Research*. 97 (E10) 16337–16352. À consulter sur : http://www.msss.com/venus/landslides/venus_paper.html
- Pettengill, G. H., Campbell, D. B., & Masursky, H. (1980, August). The surface of Venus. *Scientific American*, 243, 54–65.
- Prinn, R. (1990). The volcanoes and clouds of Venus. Exploring space. *Scientific American Special*.
- Sagdeev, R. Z., Linkin V. M., Kerzhanovich, V.V., et al. (1986). Overview of VEGA Venus balloon in situ meteorological measurements. *Science*, 231, 1411–1414.
- Sánchez-Lavega, A., Hueso, R., Piccioni, G., et al. (2008, July). Variable winds on Venus mapped in three dimensions. *Geophysical Research Letters*, 35, L13204.
- Saunders, R. S., Arvidson, R.E., Head, J.W. III., et al. (1991). Magellan: A first overview of Venus geology. *Science*, 252, 249–252.
- Schubert, G., & Covey, C. (1981, July). The atmosphere of Venus. *Scientific American*.
- Smrekar, Suzanne E., Stofan, E. R., et al. (2010). Recent hot-spot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data. *Science*, 328, 605–608.
- Solomon, S. C., Bullock, M. A., & Grinspoon, D. H. (1999). Climate change as a regulator of tectonics on Venus. *Science*, 286, 87–90.
- Solomon, S. C., Head, J.W., Kaula, W. M., et al. (1991, April). Venus tectonics: Initial analysis from Magellan. *Science*, 252, 297–312.
- Taylor, F. W., Read, P. L., Lewis S. R. *The Venusian environment*. À consulter sur : <http://www.atm.ox.ac.uk/user/fwt/WebPage/Venus%20Review%204.htm>
- The Soviet exploration of Venus (Don Mitchell). À consulter sur : http://www.mentallandscape.com/V_Venus.htm
- Transits of Venus and black drop effect. À consulter sur : <http://www.transitofvenus.info>
- Venus Climate Orbiter (Akatsuki). À consulter sur : http://www.jaxa.jp/projects/sat/planet_c/index_e.html
- Venus Express mission. À consulter sur : <http://sci.esa.int/venusexpress/>
- Venus Express special – The long-lost twin. (2007, November). *Nature*, 450, 629–662.
- Zuber, M. T., & Parmentier, E. M. (2002). Formation of fold-and-thrust belts on Venus by thick-skinned deformation. *Nature*, 377, 704–707.
- Andrews-Hanna, J. C., Zuber, M.T., & Banerdt, W. B. (2008, June). The Borealis basin and the origin of the martian crustal dichotomy. *Nature*, 453, 1212–1215.
- Bandfield, J. L., Hamilton, V. E., & Christensen, P. R. (2000, March). A global view of martian surface compositions from MGS-TES. *Science*, 287, 1626–1630.
- Barabash, S., Fedorov, A., Lundin, R., et al. (2007, January). Martian atmospheric erosion rates. *Science*, 315, 501–503.
- Beatty, J. Kelly. (1999, November). In search of martian seas. *Sky & Telescope*, 4, 38.
- Bell, J. (2003, December). Mineral mysteries and planetary paradoxes, *Sky & Telescope*, 34–40.
- Bell, J. (2009, July). Uncovering Mars's secret past. *Sky & Telescope*.
- Bibring, J-P. (2007, August). Coupled ferric oxides and sulfates on the martian surface. *Science Express*.
- Bibring, J-P, Brissaud, O., Schmitt, B., et al. (2004, April). Perennial water ice identified in the south polar cap of Mars. *Nature*, 428, 627–630.
- Bishop, J. L., Eldar, Z. N. D., McKeown, N. K., et al. (2008, August). Phyllosilicate Diversity and past aqueous activity revealed at Mawrth Vallis, Mars. *Science*, 321, 830–833.
- Carr, M. H. (1996). *Water on Mars*. New York: Oxford University Press.
- Christensen, P. R. (2003, March). Formation of recent martian gullies through melting of extensive water-rich snow deposits. *Nature*, 422, 45–48.
- Clifford, S. M. (2003, August). The iceball next door. *Sky & Telescope*.
- Committee on an astrobiology strategy for the exploration of Mars. (2007). *An astrobiology strategy for the exploration of Mars*, The National Academies Press. À consulter sur : http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11937
- Connerney, J. E. P., Acuña, M. H., Ness, N. F., et al. (2005, October). Tectonic implications of Mars crustal magnetism. *PNAS* 102(42). 14970–14975. À consulter sur : <http://www.pnas.org/content/102/42/14970.full>
- Corrigan, C. M. (2004, July). Carbonates in ALH84001: Part of the story of water on Mars. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.hawaii.edu/July04/carbonatesALH84001.html>
- Cull, Selby, (2007, January). Reverse Panspermia: Seeding life in the Solar System. *Sky & Telescope*.
- DiGregorio, B. E. (2004, February). Life on Mars? *Sky & Telescope*, 40–45.
- Ezell, E. C., & Ezell, L. N. (1984). *On Mars – exploration of the red planet 1958-1978*. NASA History Office. (NASA SP-4212). À consulter sur : <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/SP-4212/on-mars.html>
- Fenton, L. K., Geussker, P. E., Harberle, R. M. (2007, April). Global warming and climate forcing by recent albedo changes on Mars. *Nature*, 446, 646–649.
- Forget, F., Haberle, R. M., Montmessin, F., et al. (2006, January). Formation of glaciers on Mars by atmospheric precipitation at high obliquity. *Science* 311, 368–371.
- Golombek, M. P., Arvidson, R. E., Bell, J. F.III., et al. (2005, July). Assessment of Mars exploration rover landing site predictions. *Nature* 436, 44–48.
- Google Mars: À consulter sur : <http://www.google.com/mars/>
- Gurnett, D.A., Kirchner, D. L., Huff, R. L., et al., (2005, December). *Radar soundings of the ionosphere of Mars*. *Science*, 310, 1929–1933.
- Halevy, I., Zuber, M. T., Schrag, D. P. (2007, December). A sulfur dioxide climate feedback on early Mars. *Science*, 318, 1903–1907.
- Hartmann, W. K. (2003, July). Mysteries of Mars. *Sky & Telescope*.
- Herkenhoff, K. E., & Keszthelyi, L. P. (2010, January). MRO/HiRISE studies of Mars. *Icarus*, 205(1), 1–320.

Chapitre 7 : Mars

Andrews-Hanna, J. C., Phillips, R. J., & Zuber, M. T., (2007, March). Meridiani Planum and the global hydrology of Mars. *Nature*, 446, 163–166.

- Holt, J. W., & Smith, I. B., (2010, May). Onset and migration of spiral troughs on Mars revealed by orbital radar. *Nature*, 465, 450–453.
- Holt, J. W., Fishbaugh, K. E., Byrne, S., et al. (2010, May). The construction of Chasma Boreale on Mars. *Nature* 465, 446–449.
- Holt, J. W., Safaeinili, A., Plaut, J. J., et al. (2008, November). Radar sounding evidence for buried glaciers in the southern mid-latitudes of Mars. *Science*, 322, 1235–1238.
- Jaeger, W. L., Keszthelyi, L. P., McEwen, A. S., et al. (2007, September). Athabasca Valles. Mars: A lava-draped channel system. *Science*, 317, 1709–1711.
- Kraal, E. R., van Dijk, M., Postma, G., et al. (2008, February). Martian stepped-delta formation by rapid water release. *Nature*, 451, 973–977.
- Lefèvre, Franck, Bertaux, J.-L., Clancy, R. T., et al. (2008, August). Heterogeneous chemistry in the atmosphere of Mars. *Nature*, 454, 971–975.
- Lundin, R., Winningham, D., Barabash, S., et al. (2006, February). Plasma acceleration above martian magnetic anomalies. *Science*, 311, 980–983.
- Malin Space Science Systems – images of Mars and other features from Mars spacecraft. À consulter sur : http://www.msss.com/mars_images/index.html
- Malin, M. C., & Edgett, K. S. (1999). Oceans or seas in the martian northern lowlands: high resolution imaging tests of proposed coastlines. *Geophysical Research Letters*, 26(19), 3049–3052.
- Malin, M. C., & Edgett, K. S., (2000, June). Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars. *Science*, 288, 2330–2335.
- Malin, M. C., & Edgett, K. S., (2003, December). Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars. *Science*, 302, 1931–1934.
- Mamma, M. J., Villanueva, G. L., Novak, R.E., et al. (2009, February). Strong release of methane on Mars in northern summer 2003. *Science*, 323, 1041–1045.
- Mangold N., Quantin, C., Ansan, V., et al. (2004, July). Evidence for precipitation on Mars from dendritic valleys in the Valles Marineris area. *Science*, 305, 78–81.
- Mars Exploration Rovers web site. À consulter sur : <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/index.html>
- Mars Express web site. À consulter sur : http://www.esa.int/SPECIALS/Mars_Express/index.html
- Mars Global Surveyor web site. À consulter sur : <http://mars.jpl.nasa.gov/mgs/>
- Mars Odyssey Themis instrument web site. À consulter sur : <http://themis.asu.edu/>
- Mars Odyssey web site. À consulter sur : <http://mars.jpl.nasa.gov/odyssey/>
- Mars Pathfinder web site. À consulter sur : <http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/index1.html>
- Mars Phoenix web site. À consulter sur : <http://phoenix.lpl.arizona.edu>
- Mars Reconnaissance Orbiter (2007, September). [Special section]. *Science*, 317, 1705–1719.
- Mars Reconnaissance Orbiter HiRISE instrument web site. À consulter sur : <http://hirise.lpl.arizona.edu>
- Mars Reconnaissance Orbiter web site. À consulter sur : <http://mars.jpl.nasa.gov/mro/>
- Martel, L. M. V. (2001, June). Outflow channels may make a case for a bygone ocean on Mars. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/June01/MarsChryse.html>
- Martel, L. M. V. (2003, August). Gullied slopes on Mars. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Aug03/MartianGullies.html>
- Martel, L. M. V. (2003, July). Ancient floodwaters and seas on Mars. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/July03/MartianSea.html>
- Martel, Linda M. V. (2007, January). Did martian meteorites come from these sources? *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Jan07/MarsRayedCraters.html>
- McKay, D. S., Gibson, E. K., Thomas-Keprta, K. L., et al. (1996, August). Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in martian meteorite ALH84001. *Science*, 273, 924–930.
- Murray, John B., et al. (2005, March). Evidence from the Mars express high resolution stereo camera for a frozen sea close to Mars' equator. *Nature*, 434, 352–356.
- Mustard, J. F., Murchie, S. L., Pelkey, S. M., et al. (2008, July). Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument. *Nature*, 454, 305–330.
- Naeye, R. (2004, May). Red-Letter Days. *Sky & Telescope*, 107(5), 44.
- Neukum, G., Jaumann, R., Hoffmann, H., et al. (2004, December). Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars revealed by the High Resolution Stereo Camera. *Nature*, 432, 971–979.
- Okubo, C. H., & McEwen, A. S. (2007, February). Fracture-controlled paleo-fluid flow in candor chasma, Mars. *Science*, 315, 983–985.
- Perron, J. Taylor. (2007, June). Evidence for an ancient martian ocean in the topography of deformed shorelines. *Nature*, 447, 840–843.
- Phillips, R. J., Smrekar, S. E., Mellon, M. T., et al. (2008, May). Mars north polar deposits: stratigraphy, age, and geodynamical response. *Science*, 320, 1182–1185.
- Plaut, J. J., Picardi, G., Safaeinili, A., et al. (2007, April). Subsurface radar sounding of the south polar layered deposits of Mars. *Science*, 316, 92–95.
- Raeburn, P. (1998). Mars: Uncovering the secrets of the Red Planet. *National Geographic Society*.
- Safe on Mars: Precursor measurements necessary to support human operations on the martian surface. (2002). National Research Council. À consulter sur : <http://www.nap.edu/catalog/10360.html>
- Schofield, J. T., Barnes, J. R., Crisp, D., et al. (1997, December) The Mars pathfinder atmospheric structure investigation/meteorology (ASI/MET) experiment. *Science*, 278, 1752–1758.
- Schorghofer, N. (2007, September). Dynamics of ice ages on Mars. *Nature*, 449, 192–195.
- Solomon, S. C., Bridges, K., Catling, D.C., et al. (2005, February). New perspectives on ancient Mars. *Science*, 37, 1214–1219.
- Space Studies Board / Board on Life Sciences. (2007). An astrobiology strategy for the exploration of Mars. The National Academies Press. À consulter sur : http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=11937&page=23
- Squyres, S. (2005). *Roving Mars: Spirit, Opportunity, and the exploration of the red planet*. Hyperion.
- Squyres, S.W., Knoll, A. H., Arvidson, R. E., et al. (2006, September). Two years at Meridiani Planum: Results from the Opportunity Rover. *Science*, 313, 1403–1407.
- Taylor, G. J. (1996, October). Life on Mars? *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Oct96/LifeonMars.html>
- Taylor, G. J. (2000, May). Liquid water on Mars: The story from meteorites. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/May00/wetMars.html>
- Taylor, G. J. (2003, November). Hafnium, Tungsten, and the differentiation of the Moon and Mars. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Nov03/Hf-W.html>
- Taylor, G. J. (2004, June). The multifarious martian mantle. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/June04/martianMantle.html>
- Taylor, G. J. (2005, December). Magma and water on Mars. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Dec05/Magma-WaterOnMars.html>

- Taylor, G. J. (2005, January). Recent activity on Mars: Fire and ice. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Jan05/MarsRecently.html>
- Taylor, G. J. (2009, May). Mars crust: Made of basalt. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/May09/Mars.Basaltic.Crust.html>
- The Mars journal. À consulter sur : <http://themarsjournal.org/>
- The quarantine and certification of martian samples. (2002). Committee on planetary and lunar exploration, National Research Council. À consulter sur : <http://www.nap.edu/catalog/10138.html>
- Viking lander imaging team. (1978). *The martian landscape*. NASA History Office. (NASA SP-425). À consulter sur : <http://history.nasa.gov/SP-425/cover.htm>
- Viking orbiter imaging team, *Viking Orbiter views of Mars*. NASA History Office. (NASA SP-441). À consulter sur : <http://history.nasa.gov/SP-441/cover.htm>
- Viking web site. À consulter sur : <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/viking.html>
- Withers, P., & Smith, M. D. (2006, August). Atmospheric entry profiles from the Mars exploration Rovers Spirit and Opportunity. *Icarus*, 185, 133–142. Published online <http://sirius.bu.edu/aeronomy/wITHERSMERICARUS2006.pdf>
- Zuber, M. T. (2003, December). Mars: The inside story. *Sky & Telescope*.
- Zuber, M. T., Phillips, R.J., Andrews-Hanna, J. C., et al. (2007, September). Density of Mars' south polar layered deposits. *Science*, 317, 1718–1719.
- Chapitre 8 : Jupiter**
- Anderson, J. D. (2005, May). Amalthea's density is less than that of water. *Science*, 308, 1291–1293.
- Anderson, J. D., Schubert, G., Jacobson, R. A., et al. (1998, June). Distribution of rock, metals, and ices in Callisto. *Science*, 280, 1573–1576.
- Anderson, J. D., Lau, E. L., Schubert, G., et al. (1997, May). Europa's differentiated internal structure: Inferences from two Galileo encounters. *Science*, 276, 1236–1239.
- Burns, J. A., Showalter, M. R., Hamilton, D. P., et al. (1999, May). The formation of Jupiter's faint rings. *Science*, 284, 1146–1150.
- Cassini Jupiter millennium flyby. À consulter sur : <http://www.jpl.nasa.gov/jupiterflyby/>
- Galileo mission (NASA). À consulter sur : <http://www2.jpl.nasa.gov/galileo/>
- Greeley, R. (1997, December). The partially watery world of Europa, one of Jupiter's Moons. *Earth in Space*, 10, 5–8. À consulter sur : http://www.agu.org/sci_soc/greeley.html
- Harland, D. M. (2000). *Jupiter odyssey: The story of NASA's Galileo mission*. Springer-Praxis.
- Ingersoll, A. P. (1990). Jupiter and Saturn. Exploring space. *Scientific American Special*.
- Jewitt, D., Sheppard, S. S., & Kleyna, J. (2006, August). The strangest satellites in the Solar System. *Scientific American*. À consulter sur : <http://www.ifa.hawaii.edu/~jewitt/papers/2006/JSK06.pdf>
- Johnson, T.V. (2003). The Galileo Mission to Jupiter and its moons. New light on the Solar System. [Special edition] *Scientific American Special*, 54–63.
- Kivelson, M. G., Khurana, K. K., Russell, C. T., et al. (2000, August). Galileo magnetometer measurements: A stronger case for a subsurface ocean at Europa. *Science*, 289, 1340–1343.
- Malhotra R. (1999, September). Migrating planets. *Scientific American*.
- Marcus, P. S. (2004, April). Prediction of a global climate change on Jupiter. *Nature*, 428, 828–831.
- Martel, L. M. V. (1998, April). Big mountain, big landslide on Jupiter's moon, Io. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/April98/io.html>
- Martel, L. M. V. (2001, February). The Europa scene in the Voyager-Galileo Era. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Feb01/EuropaGeology.html>
- Martel, L. M. V. (2002, November). Bands on Europa. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Nov02/EuropeanBands.html>
- McCord, T. B., Hansen, G. B., & Hibbitts, C. A. (2001, May). Hydrated salt minerals on Ganymede's surface: Evidence of an ocean below. *Science*, 292, 1523–1525.
- McEwen A. S., Keszthelyi, L., Spencer, J. R., et al. (1998, July). High-temperature silicate volcanism on Jupiter's moon Io. *Science*, 281, 87–90.
- McEwen, A. S., Belton, M. J. S., Breneman, H. H., et al. (2000, May). Galileo: Io reports. *Science*, 288, 1193–1220.
- Morrison, D., & Samz, J. (1980). *Voyage to Jupiter*. (NASA SP-439).
- New Horizons at Jupiter. (2007, October). [Special section]. *Science*, 318, 215–243.
- Pappalardo, R. T., Head, J. W., Greeley, R. (2003, September). The hidden ocean of Europa. New light on the Solar System. [Special edition] *Scientific American Special*, 64–73.
- Porco, C. C., West, R. A., McEwen, A., et al. (2003, March). Cassini imaging of Jupiter's atmosphere, satellites and rings. *Science*, 299, 1541–1547.
- Reports on Comet Shoemaker-Levy 9 Collision with Jupiter. (1995, March). *Science*, 267, 1277–1323.
- Sánchez-Lavega, A., Orton, S. J., Hueso, R., et al. (2008, January). Depth of a strong Jovian jet from a planetary-scale disturbance driven by storms. *Nature*, 451, 437–440.
- Schenk, P. M., Mc Kinnon, W. B., Gwynn, D., et al. (2001, March). Flooding of Ganymede's bright terrains by low-viscosity water-ice lavas. *Nature*, 410, 57–60.
- Sheppard, S. S. & Jewitt, D. C., (2003, May). An abundant population of small irregular satellites around Jupiter. *Nature*, 423, 261–263.
- Showman, A. P., & Malhotra, R. (1999). The Galilean Satellites. *Science*, 286, 77–84.
- Soderblom, L. A. (1980, January). The Galilean moons of Jupiter. *Scientific American*.
- Stevenson, D. (2000, August). Europa's ocean – the case strengthens. *Science*, 289, 1305–1307.
- Taylor, G. J. (1998, September). Europa's salty surface. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Sept98/EuropaSalts.html>
- Taylor, G. J. (2000, February). Jupiter's hot, mushy moon. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Feb00/IoMagmaOcean.html>
- Voyager missions (NASA). À consulter sur : <http://voyager.jpl.nasa.gov/>
- Young, R. E., Smith M. A., & Sobeck, C. A. (1996, May). Galileo probes Jupiter's atmosphere. *Science*, 272, 837–860.
- Chapitre 9 : Saturne**
- 30-day reports from the Voyager 1 and Voyager 2 instrument teams. (1981, April). (1982, January). *Science*.
- Ádámkóvics, M., Wong, M. H., Laver, C., et al. (2007, October). Wide-spread morning drizzle on Titan. *Science Express*.
- Atreya, S. K. (2009, January). The mystery of methane on Mars and Titan. *Scientific American*.

- Bagenal, F. (2005, February). Saturn's mixed magnetosphere. *Nature*, 433, 695–696.
- Barnes, J. (2008, December). Titan: Earth in deep freeze. *Sky & Telescope*, 26–32.
- Batson, R. M. (1984). Voyager 1 and 2 Atlas of six saturnian satellites. (NASA SP-474) À consulter sur : http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19840027171_1984027171.pdf
- Bosh, A. S., & Rivkin, A. S. (1996). Observations of Saturn's inner satellites during the May 1995 ring-plane crossing. *Science*, 272, 518–521.
- Brown, R. H., et al. (2008, July). The identification of liquid ethane in Titan's Ontario Lacus. *Nature*, 454, 607–610.
- Brown, R., Lebreton, J-P, & Waite, H. (2009). *Titan from Cassini-Huygens*. Springer.
- Cassini at Enceladus. (2006, March). *Science*, 311, 1388–1428.
- Charnoz, S., Porco, C. C., Déau, E., et al. (2005, November). Cassini discovers a kinematic spiral ring around Saturn. *Science*, 310, 1300–1304.
- Coustonis, A., & Taylor, F. W. (2008). Titan: exploring an earthlike world. *World Scientific*.
- Cruikshank, D. P., Dalton, J. B., Dalle Ore, et al. (2007, July). Surface composition of Hyperion. *Nature*, 448, 54–56.
- Cuzzi, J. N., Burns, J. A., Charnoz, S., et al. (2010, March). An evolving view of Saturn's dynamic rings. *Science*, 327, 1470–1475.
- Dyudina, U. A., Ingersoll, P. A., Ewald, P. S., et al. (March, 2008). Dynamics of Saturn's south polar vortex. *Science*, 319, 1801.
- Elachi, C., Wall, S., Janssen, M., et al. (2006, June). Titan radar mapper observations from Cassini's T3 fly-by. *Nature*, 441, 709–713.
- ESA Huygens web site. À consulter sur : <http://sci.esa.int/huygens>
- Gehrels, T., & Matthews, M. S. (Eds.). *Saturn*. University of Arizona Press.
- Gombosi, T. I., & Ingersoll, A. P. (2010, March). Saturn: Atmosphere, ionosphere, and magnetosphere. *Science*, 327, 1476–1479.
- Greenberg, R., & Brahic, A. (Eds.). (1984). *Planetary rings*. University of Arizona Press.
- Griffith, C.A., Penteado, P., & Brown R. (2006, September). Evidence for a polar ethane cloud on Titan. *Science*.
- Hansen, C. J., Esposito, L. W., Stewart, A. I. F., et al. (2008, November). Water vapour jets inside the plume of gas leaving Enceladus. *Nature*, 456, 477–479.
- Hedman, M. M. (2007, August). The source of Saturn's G Ring. *Science*, 317, 653–656.
- Hueso, R., & Sánchez-Lavega, A. (2006, July). Methane storms on Saturn's moon Titan. *Nature*, 442, 428–431.
- Ingersoll, A. P. (1990). Jupiter and Saturn. Exploring Space. *Scientific American Special*.
- Initial Cassini Results. (2005, February). *Science*, 307, 1226–1251.
- Jewitt, D., Sheppard, S. S., & Kleyna, J. (2006, August). The strangest satellites in the Solar System. *Scientific American*. À consulter sur : <http://www.ifa.hawaii.edu/~jewitt/papers/2006/JSK06.pdf>
- Jones, G. H., Roussos, E., Krupp, N., et al. (2008, March). The dust halo of Saturn's largest icy moon, Rhea. *Science*, 319, 1380–1384.
- Kerr, R. A. (2006, January). How Saturn's icy moons get a (geologic) life. *Science*, 311, 29.
- Kieffer, S., & Jakosky, B. M. (2008, June). Enceladus—oasis or ice ball? *Science*, 320, 1432–1433.
- Krimigis, S. M., Sergis, N., Mitchell, D. G., et al. (2007, December). A dynamic, rotating ring current around Saturn. *Nature*, 450, 1050–1053.
- Lorenz, R. (2000, October). The weather on Titan. *Science*, 290, 467–468.
- Lorenz, R. D., Wall, S., Radebaugh, J., et al. (2006, May). The sand seas of Titan: Cassini RADAR observations of longitudinal dunes. *Science*, 312, 724–727.
- Lorenz, R., & Mitton, J. (2002). *Lifting Titan's veil: Exploring the giant moon of Saturn*, Cambridge University Press, New York.
- Murray, C. D., Beurle, K., Cooper, N. J., et al. (2008, June). The determination of the structure of Saturn's F ring by nearby moonlets. *Nature*, 453, 739–744.
- NASA Cassini web site. À consulter sur : <http://saturn.jpl.nasa.gov>
- New views of Titan. (2005, December). (Special issue). *Nature*, 438, 538–539 and 765–802.
- Nicholson, P. D., Showalter, M. R., Dones, L., et al. (1996). Observations of Saturn's ring-plane crossings in August and November 1995. *Science*, 272, 509–515, 1996
- Rannou, P., Montmessin, F., Hourdin, F., et al. (2006, January). The latitudinal distribution of clouds on Titan. *Science*, 311, 201–205.
- Schaller, E. L., Roe, H. G., Schneider, T., et al. (2009, August). Storms in the tropics of Titan. *Nature*, 460, 873–875.
- Schmidt, J. (2008, February). Slow dust in Enceladus' plume from condensation and wall collisions in tiger stripe fractures. *Nature*, 451, 685–688.
- Showalter, M. R. (2005, November). Saturn's strangest ring becomes curiouser and curiuser. *Science*, 310, 1287–1288.
- Soderblom, L. A., & Johnson, T. V. (1990). The moons of Saturn. Exploring space. *Scientific American Special*.
- Sohl, F. (2010, March). Revealing Titan's interior. *Science*, 327, 1338–1339.
- Spitale, J. N., & Porco, C. C. (2007, October). Association of the jets of Enceladus with the warmest regions on its south-polar fractures. *Nature*, 449, 695–697.
- Sremčević, M., Schmidt, J., Salo, H., et al. (2007, October). A belt of moonlets in Saturn's A ring. *Nature*, 449, 1019–1021.
- Thomas, R. C., Armstrong, J. W., Asmar, S. W., et al. (2007, July). Hyperion's sponge-like appearance. *Nature*, 448, 50–53.
- Tiscareno, M. S. (2007, February). Ringworld revelations. *Sky & Telescope*.
- Tiscareno, M. S., Burns, J. A., Hedman, M. M., et al. (2006, March). 100-metre-diameter moonlets in Saturn's A ring from observations of 'propeller' structures. *Nature*, 440, 648–650.
- Tobie, G., Lunine, J. I., & Sotin, C. (March, 2006). Episodic outgassing as the origin of atmospheric methane on Titan. *Nature*, 440, 61–64.
- Tokano, T., McKay, C. P., Neubauer, F. M., et al. (2006, July). Methane drizzle on Titan. *Nature*, 442, 432–435.
- Verbiscer, A. J., Skrutskie, M. F., & Hamilton, D. P. (2009, October). Saturn's largest ring. *Nature*, 461, 1098–1100.
- Verbiscer, A., French, R., Showalter, M., et al. (2007, February). Enceladus: Cosmic graffiti artist caught in the act. *Science*, 315, 815.
- Zarka, P., Lamy, L., Cecconi, B., et al. (2007, November). Modulation of Saturn's radio clock by solar wind speed. *Nature*, 450, 265–267.

Chapitre 10 : Uranus

- 30-day reports from the Voyager 2 instrument teams. (1989, December). *Science*, 233.
- Benedetti, L. R., Nguyen, J. H., Caldwell, W. A., et al. (1999, October). Dissociation of CH₄ at high pressures and temperatures: Diamond formation in giant planet interiors? *Science*, 286, 100–102.
- Bergstralh J. T., Miner E. D., & Matthews M. S. (Eds.). (1991). *Uranus*. University of Arizona Press.
- Cavazzoni, C., Chiarotti, G. L., Scandolo, S., et al. (1999, January). Superionic and metallic states of water and ammonia at giant planet conditions. *Science*, 283, 44–46.
- de Pater, I., Hammel, H. B., Gibbard, S. G., et al. (1996, April). New dust belts of Uranus: One ring, two ring, red ring, blue ring. *Science* 312, 92–94.

- de Pater, I., Hammel, H. B., Showalter, M. R., et al. (2007, September). The dark side of the rings of Uranus. *Science*, 317, 1888–1890.
- Desch, S. (2007, December). Mass distribution and planet formation in the solar nebula. *Astrophysical Journal*, 671, 878–893.
- Guillot, T. (1999, October). Interiors of giant planets inside and outside the Solar System. *Science*, 286, 72–77.
- Hubbard, W. B., Nellis, W. J., Mitchell, et al. (1991, August). Interior structure of Neptune: Comparison with Uranus. *Science* 253, 648–651.
- Infrared observations of Uranus and its rings. (Imke de Pater). À consulter sur : <http://astron.berkeley.edu/~newstar/Infrared/UranusAo/UranusAO.htm>
- Ingersoll, A. (1987). Uranus. *Scientific American*.
- Johnson T. V., Brown R. H. & Soderblom L. A. (1987, April). The Moons of Uranus. *Scientific American*.
- Laeser, R., McLaughlin, W., & Wolff, D. (1990). Engineering Voyager 2's encounter with Uranus. Exploring Science. *Scientific American Special*.
- Littmann, M. (1990). (Revised edition). *Planets beyond: Discovering the outer Solar System*. John Wiley.
- Miner, E. D. (1998). *Uranus*. (2nd ed.). Wiley-Praxis.
- O'Donel, A. (1965). *The planet Uranus: A history of observation, theory and discovery*. Faber & Faber.
- Showalter, M. R., & Lissauer, J. J. (2006, February). The second ring-moon system of Uranus: Discovery and dynamics. *Science*, 311, 973–977.
- Stanley, S., & Bloxham, J. (2004, March). Convective-region geometry as the cause of Uranus' and Neptune's unusual magnetic fields. *Nature*, 428, 151–153.
- Taylor, G. J. (2001, August). Uranus, Neptune, and the mountains of the Moon. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.hawaii.edu/Aug01/bombardment.html>
- Thommes, E. W., Duncan, M. J., & Levison H. F. (1999, December). The formation of Uranus and Neptune in the Jupiter-Saturn region of the Solar System. *Nature*, 402, 635–638.
- Thommes, E. W., Duncan, M. J., & Levison H. F. (2002, May). The formation of Uranus and Neptune among Jupiter and Saturn. *The Astronomical Journal*, 123, 2862–2883.
- Voyager missions web site: <http://voyager.jpl.nasa.gov/>
- Holman, M. J., Kavelaars, J. J., Grav, T., et al, (2004, August). Discovery of five irregular moons of Neptune. *Nature*, 430, 865–867.
- Hubbard W. B. (1997, February). Neptune's deep chemistry. *Science*, 275, 1279–1280.
- Hubbard, W. B., Brahic, A., Sicardy, B., et al. (1986, February). Occultation detection of a Neptunian ring-like arc. *Nature*, 319, 636–640.
- Hubbard, W. B.; Nellis, W. J., Mitchell, A. C., et al. (1991, August). Interior structure of Neptune: Comparison with Uranus. *Science*, 253, 648–651.
- Kinoshita, J. (1990). *Neptune*. Exploring science. *Scientific American Special*.
- Lellouch, E., de Bergh, C., Sicardy, B., et al. (2010, March-April). Detection of CO in Triton's atmosphere and the nature of surface-atmosphere interactions. *Astronomy & Astrophysics*, 512, L8
- Miner, Ellis, & Wessen, R. R. (2002). *Neptune: The planet, rings and satellites*. Springer-Praxis.
- Moore, P. (1996). *The planet Neptune: An historical survey before Voyager*. (2nd ed.). Wiley-Praxis.
- Porco, C.C. (1991, August). An explanation for Neptune's ring arcs. *Science*, 253, 995–1001.
- Roddier F., Roddier C., Graves J. E., et al. (1998). Neptune's cloud structure and activity: Ground-based monitoring with adaptive optics. *Icarus*, 168–172, 1998
- Sheehan, W., Kollerstrom, N., & Waff, C. B. (2004, December). The Case of the Pilfered Planet. *Scientific American*.
- Sicardy B., Roddier F., Roddier C., et al. (1999, August). Images of Neptune's ring arcs obtained by a ground-based telescope. *Nature*, 400, 731–733.
- Stanley, S., & Bloxham, J. (2004, March). Convective-region geometry as the cause of Uranus' and Neptune's unusual magnetic fields. *Nature* 428, 151–153.
- Thommes, E. W., Duncan, M. J., & Levison H. F. (1999, December). The formation of Uranus and Neptune in the Jupiter-Saturn region of the Solar System. *Nature*, 402, 635–638.
- Thommes, E. W., Duncan, M. J., & Levison H. F. (2002, May). The formation of Uranus and Neptune Among Jupiter and Saturn. *The Astronomical Journal*, 123, 2862–2883.
- Triton – Reports from Voyager instrument teams. (1990, October). *Science*, 250, 410–443.

Chapitre 11 : Neptune

- 30-day reports from the Voyager 2 instrument teams. (1989, December). *Science*, 246.
- Agnor, C. B., & Hamilton, D. P. (2006, May). Neptune's capture of its moon Triton in a binary-planet gravitational encounter. *Nature*, 441, 192–194.
- Cruikshank D. P. (Ed.). (1994). *Neptune and Triton*, University of Arizona Press.
- Cruikshank, D. P., Roush, T. L., Owen, T. C., et al. (1993, August). Ices on the surface of Triton. *Science*, 261, 742–745.
- de Pater, I., Gibbard, S., Chiang, E., et al. (2004, September). The dynamic Neptunian ring arcs: Evidence for a gradual disappearance of liberte and resonant jump of courage. *Icarus*.
- Desch, S. (2007, December). Distribution and planet formation in the solar nebula. *Astrophysical Journal*, 671, 878–893.
- Dumas, C., Terrile, R. J., Smith, B. A., et al. (1999, August). Stability of Neptune's ring arcs in question. *Nature*, 400, 733–735.
- Dumas, C., Terrile, R., Smith, B. A., et al. (2002, March). Astrometry and near-infrared photometry of Neptune's inner satellites and ring arcs. *The Astronomical Journal*, 123, 1776–1783.
- Elliot, J. L., Hammel, H. B., Wasserman, L. H., et al. (1998, June). Global warming on Triton. *Nature*, 293, 785–787.

Chapitre 12 : Pluton et la ceinture de Kuiper

- Bertoldi, F., Altenhoff, W., Menten, K. M., et al. (2006, April). Comment on the recent Hubble Space Telescope size measurement of 2003 UB313 by Brown et al. À consulter sur : <http://www.astro.uni-bonn.de/~bertoldi/ub313/>
- Bertoldi, F., Altenhoff, W., Weiss, A., et al. (2006, February). The trans-Neptunian object UB313 is larger than Pluto. *Nature*, 439, 563–564.
- Binzel, R., Tholen, D. J., Tedesco, E. F., et al. (1985, June). The detection of eclipses in the Pluto-Charon system. *Science*, 228, 1193–1195.
- Brown M. E. & Schaller E. L. (2007, June). The mass of dwarf planet Eris. *Science*, 316, 1585.
- Brown, M. E. (2004, August). Discovery of a candidate inner Oort Cloud planetoids. *Astrophysical Journal Letters*. À consulter sur : <http://www.gps.caltech.edu/%7Embrown/papers/ps/sedna.pdf>
- Brown, M. E., & Calvin, W. M. (2000, January). Evidence for crystalline water and ammonia ices on Pluto's satellite Charon. *Science*, 287, 107–109.
- Brown, M. E., van Dam M. A., Bouchez, A. H., et al. (2006, March). Satellites of the largest Kuiper Belt objects. *The Astrophysical Journal*, 639, L43–L46.
- Brown, M.E., Schaller E. L., Roe, H. G., et al. (2006, May). Direct measurement of the size of 2003 UB313 from the Hubble Space

- Telescope (preprint). *The Astrophysical Journal*, 643, L61–L63. À consulter sur : <http://www.gps.caltech.edu/%7Embrown/papers/ps/xsize.pdf>
- Buie, M. W., Grundy, W. M., Young, E. F., et al. (2010). Pluto and Charon with the Hubble Space Telescope: II. Resolving changes on Pluto's surface and a map for Charon. *The Astronomical Journal*, 139, 1128–1143. À consulter sur : <http://www.boulder.swri.edu/~buie/biblio/pub073.html>
- Buie, M.W., Grundy, W. M., Young, E. F., et al. (2005, December). Orbits and photometry of Pluto's satellites: Charon, S/2005 P1 and S/2005 P2. À consulter sur : http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0512/0512491.pdf
- Canup, R. M. (2005, January). A giant impact origin of Pluto-Charon. *Science*, 307, 546–550.
- Clyde Tombaugh web site. À consulter sur : <http://www.klx.com/clyde/index.html>
- Cook, J. C., Desch, S. J., Roush, T. L., et al. (2007, July). Near-infrared spectroscopy of Charon: possible evidence for cryovolcanism on Kuiper Belt objects. *Astrophysical Journal*, 663, 1406–1419.
- Davies, J. (2001). *Beyond Pluto: Exploring the outer limits of the Solar System*. Cambridge University Press.
- Distant EKO's – The Kuiper Belt electronic newsletters. À consulter sur : <http://www.boulder.swri.edu/ekonews>
- Elliot, J. L., Ates, A., Babcock, B. A., et al. (2003, July). The recent expansion of Pluto's atmosphere. *Nature*, 424, 165–168.
- Exploring the trans-Neptunian Solar System. Committee on Planetary and Lunar Exploration, National Research Council (1998). À consulter sur : <http://www.nap.edu/catalog/6080.html>
- Gingerich, O. (2006, November). Losing it in Prague: The inside story of Pluto's demotion. *Sky & Telescope*.
- Gladman, B. (2005, January). The Kuiper Belt and the Solar System's comet disk. *Science*, 307, 71–75.
- Goldreich, P., Lithwick, Y., & Sari, R. (2002, August). Formation of Kuiper-Belt binaries by dynamical friction and three-body encounters. *Nature*, 420, 643–646.
- Haumea (Mike Brown web site). À consulter sur : <http://web.gps.caltech.edu/~mbrown/2003EL61/>
- Jewitt, D.C., & Luu, J. (2004, December). Crystalline water ice on the Kuiper Belt object (50000) Quaoar. *Nature*, 432, 731–733.
- Kenyon, S. J., & Bromley, B.C. (2004, December). Stellar encounters as the origin of distant Solar System objects in highly eccentric orbits. *Nature*, 432.
- Kuiper Belt (David Jewitt). À consulter sur : <http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/jewitt/kb.html>
- Levison, H. F., & Morbidelli, A. (2003, November). The formation of the Kuiper Belt by the outward transport of bodies during Neptune's migration. *Nature*, 426, 419–421.
- Levy, D. H. (1992). *Clyde Tombaugh: Discoverer of planet Pluto*. University of Arizona Press.
- Littmann, M. (2007). Dark beasts of the trans-Neptunian zoo. *Sky & Telescope*.
- Littmann, M. (2007, September). From chaos to the Kuiper Belt. *Sky & Telescope*.
- Luu, J., & Jewitt, D. C. (2002). Kuiper Belt objects: Relics from the accretion disk of the Sun. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 40, 63–101.
- Minor Planet Center. À consulter sur : <http://www.minorplanetcenter.org/iau/mpc.html>
- New Horizons mission. À consulter sur : <http://pluto.jhuapl.edu/>
- Owen, T., Roush, T. L., Cruikshank, D. P., et al. (1993, August). Surface ices and the atmospheric composition of Pluto. *Science*, 261, 745–748.
- Petit, J.-M., Kavelaars, J. J., Gladman, B. J., et al. (2008, October). The extreme Kuiper Belt binary 2001 QW322. *Science*, 322, 432–434.
- Pluto Today web site. À consulter sur : <http://www.plutotoday.com/>
- Rabinowitz, D. L., Barkume, K., Brown, M. E., et al. (2006, March). Photometric observations constraining the size, shape, and albedo of 2003 el61, a rapidly rotating, Pluto-sized object in the Kuiper Belt. *The Astrophysical Journal*, 639, 1238–1251.
- Schaller, E. L., & Brown, M. E. (2007, April). Volatile loss and retention on Kuiper Belt objects. *The Astrophysical Journal*, 659, L61–L64.
- Sicardy B., Widemann, T., Lellouch, E., et al. (2003, July). Large changes in Pluto's atmosphere as revealed by recent stellar occultations. *Nature*, 424, 168–170.
- Stern, A., & Mitton, J. (2005). *Pluto and Charon*. (2nd ed.). Wiley-VCH.
- Stern, S. A. (2003, August). The evolution of comets in the Oort Cloud and Kuiper Belt. *Nature*, 424, 639–642.
- Stern, S. A. (2003, November). The 3rd zone: exploring the Kuiper Belt. *Sky & Telescope*.
- Stern, S. A. (2003, September). Journey to the farthest planet, new light on the Solar System. *Scientific American Special Edition*.
- Stern, S. A., Weaver, H. A., Steffl, A. J., et al. (2006, February). A giant impact origin for Pluto's small moons and satellite multiplicity in the Kuiper Belt. *Nature*, 439, 946–948.
- The Discovery of 2003 UB313 (Mike Brown web site). À consulter sur : <http://www.gps.caltech.edu/~mbrown/planetlila/>
- The Pluto portal. À consulter sur : <http://www.plutoportal.net/>
- Tombaugh, C., & Moore, P. (1981). Out of the darkness: The planet Pluto. *New American Library*.
- Two new satellites of Pluto. À consulter sur : <http://www.boulder.swri.edu/plutomoons/>
- Ward, W. R., & Hahn, J. M.. (1998, June). Neptune's eccentricity and the nature of the Kuiper Belt. *Science* 280, 2104–2106.
- Ward, W.R., & Canup, R. M. (2006, June). Forced resonant migration of Pluto's outer satellites by Charon. Science Express web site.
- Wetterer, M. K. (1996). *Clyde Tombaugh and the search for Planet X*. Carolrhoda Books, 1996.
- Young, E. (2000, January). Charon's first detailed spectra hold many surprises. *Science*, 287, 53–54.
- Young, E. F., Binzel, R. P., & Crane, K. (2001, January). A two-color map of Pluto's sub-Charon hemisphere. *The Astronomical Journal*, 121, 552–561. À consulter sur : http://www.boulder.swri.edu/recent/pluto_map.pdf

Chapitre 13 : Les comètes, les astéroïdes et les météorites

- Arctic Asteroid! (Tagish Lake meteorite). À consulter sur : http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast01jun_1m.htm
- Asteroid and comet impact hazards. À consulter sur : <http://impact.arc.nasa.gov/>
- Beatty, J. K. (2006, September). The falcon's wild ride. *Sky & Telescope*.
- Bland, P. A., Spurny, P., Towner, M. C., et al. (2009, September). An anomalous basaltic meteorite from the innermost main belt. *Science*, 325, 1525–1527.
- Boehnhardt, H. (2001, May). The death of a comet and the birth of our solar system. *Science*, 292, 1307–1309.
- Bottke, W. F. (2007, March). Spun in the Sun. *Nature*, 446, 382–383.
- Bottke, W. F., & Martel, L. M. V. (2006, July). Iron meteorites as the not-so-distant cousins of Earth. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/July06/asteroidGatecrashers.html>
- Bottke, W. F., Bottke, W. F., Vokrouhlicky, D., et al. (2007, September). An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor. *Nature*, 449, 48–53.

- Chiron. À consulter sur : <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/chiron.html>
- Comet Shoemaker-Levy Collision with Jupiter. (NASA-JPL web site). À consulter sur : <http://www2.jpl.nasa.gov/sl9/>
- Comets (David Jewitt). À consulter sur : <http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/jewitt/comet.html>
- Dawn mission. À consulter sur : <http://dawn.jpl.nasa.gov/>
- Deep Impact mission. À consulter sur : <http://deepimpact.jpl.nasa.gov/home/index.html>
- Deep Impact special section (2005, October). *Science*, 310, 258–283.
- Deep Space 1 mission. À consulter sur : <http://nmp.jpl.nasa.gov/ds1/>
- Festou, M. C., Keller, H. U., & Weaver, H. A. (Eds.). (2005). *Comets II*. University of Arizona Press.
- Floss, C. (2003, January). QUE 93148: A part of the mantle of asteroid 4 Vesta? *PSRD Discoveries*. <http://www.psrhawaii.edu/Jan03/QUE93148.html>
- Giotto mission. À consulter sur : <http://sci.esa.int/giotto/>
- Hayabusa special issue. (August, 2011). Dust from Itokawa. *Science*, 333, 1113–1131.
- Hayabusa special section. (2006, June). *Science*, 312, 1330–1353.
- Jenniskens, P., Shaddad, M. H., Numan, D., et al. (2009, March). The impact and recovery of asteroid 2008 TC3. *Nature*, 458, 485–488.
- Jewitt, D., & Hsieh, H. (2006, October). Physical observations of 2005 UD: A mini-Phaethon. *The Astronomical Journal*, 132. <http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/jewitt/papers/2006/JH06.pdf>
- Kring, D. A. (1998). *Meteorites and their properties*. Lunar and Planetary Laboratory, Department of Planetary Sciences. University of Arizona. À consulter sur : <http://meteorites.lpl.arizona.edu/index.html>
- Kuiper Belt (David Jewitt). À consulter sur : <http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/jewitt/kb.html>
- Küppers, M., Bertini, I., Fornaiser, S., et al. (2005, October). A large dust/ice ratio in the nucleus of comet 9P/Tempel 1. *Nature*, 437, 987–990.
- Li, A. (2009, May). Cosmic crystals caught in the act. *Nature*, 459, 173–176.
- LINEAR NEO program. À consulter sur : <http://www.ll.mit.edu/mission/space/linear/>
- Lisse, C. M., VanCleve, J., Adams, A. C., et al. (2006, August). Spitzer spectral observations of the Deep Impact ejecta. *Science*, 313, 635–640.
- Main belt comets. À consulter sur : <http://www.ifa.hawaii.edu/~hsieh/mbcs.html>
- Marchis, F. (2006, February). A low density of 0.8 g cm⁻³ for the Trojan binary asteroid 617 Patroclus. *Nature*, 439, 565–567.
- Marcus R., Melosh, H. J., & Collins, G. Earth impact effects program. À consulter sur : <http://www.lpl.arizona.edu/impaceteffects/>
- Martel, L. M. V. (2001, November). Meteorites on ice. *PSRD Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psrhawaii.edu/Nov01/metsOnIce.html>
- Martel, L. M. V. (2002, February). Searching Antarctic ice for meteorites. *PSRD Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psrhawaii.edu/feb02/meteoriteSearch.html>
- Martel, L.M. V. (2002, June). Using chondrites to understand the inside of asteroid 433 Eros. *PSRD Discoveries*. <http://www.psrhawaii.edu/June02/ErosPorosity.html>
- Martel, L.M. V. (2007, November). Getting to know Vesta. *PSRD Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psrhawaii.edu/Nov07/HEDs-Vesta.html>
- Marzari, F. (2006, July). Puzzling Neptune Trojans. *Science*, 313, 451–452.
- Meech, K. J. (1997, February). Apparition of comet Hale-Bopp. *PSRD Discoveries*. <http://www.psrhawaii.edu/Feb97/Hale-Bopp.html>
- Meteor showers (American Meteor Society). À consulter sur : <http://www.amsmeteors.org/showers.html>
- Meteor showers online (Gary W. Kronk). À consulter sur : <http://meteorshowersonline.com/>
- Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., et al. (2005, May). Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System. *Nature*, 435, 462–465.
- Nakamura, T., Noguchi, T., Tsuchiyama, A., Ushikubo, T., Kita, T. N., Valley, J. W., Zolensky, M. E., et al. (2008, September). Chondrule-like objects in short-period comet 81P/Wild 2. *Science*, 321, 1664–1667.
- NASA 2006 Near-Earth object survey and deflection study – final report. À consulter sur : http://www.hq.nasa.gov/office/pao/FOIA/NEO_Analysis_Doc.pdf
- NASA-JPL Near Earth object program. (2005, May). À consulter sur : <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/>
- Near-Earth object survey and definition – analysis of alternatives. Report to Congress, NASA, March 2007. À consulter sur : http://www.nasa.gov/pdf/171331main_NEO_report_march07.pdf
- NEAR-Shoemaker mission. À consulter sur : <http://near.jhuapl.edu/>
- NEAR-Shoemaker special edition. (2000, September). *Science*, 289, 2085–2105.
- Paolicchi, P. (2004, March). Solar-powered asteroids. *Nature*, 428, 400–401.
- Radar observations of near-Earth asteroids. À consulter sur : <http://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/>
- Reports on Comet Shoemaker-Levy 9. (1995, March). *Science*, 267, 1277–1323.
- Rosetta mission. À consulter sur : <http://sci.esa.int/rosetta/>
- Russo, N. D., Vervack, R. J., Weaver, H. A., et al. (2007, July). Compositional homogeneity in the fragmented comet 73P/Schwassmann–Wachmann 3. *Nature*, 448, 172–175.
- Ruzicka, A., & Hutson, M. (2005, September). Portales valley: Not just another ordinary chondrite. *PSRD Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psrhawaii.edu/Sept05/PortalesValley.html>
- Schmidt, B. E., Thomas, P. C., Bauer, J. M., et al. (2009, October). The Shape and surface variation of 2 Pallas from the Hubble Space Telescope. *Science*, 326, 275–278.
- Schmidt, B.E., Thomas P. C., Bauer, J. M., et al. (2008, March). *Hubble takes a look at Pallas: Shape, size, and surface*. 39th Lunar and Planetary Science Conference (XXXIX, 2008). À consulter sur : <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2008/pdf/2502.pdf>
- Scott, E. R. D. (2006, June). Meteoritical and dynamical constraints on the growth mechanisms and formation times of asteroids and Jupiter. *Icarus*. À consulter sur : <http://arxiv.org/ftp/astro-ph/papers/0607/0607317.pdf>
- Sheppard, S. S., & Trujillo, C. A. (2006, June). A thick cloud of Neptune Trojans and their colors. Science Express web site.
- Soderblom, L. A., Becker T. L., Bennet, G., et al. (2002, May). Observations of comet 19P/Borrelly by the miniature integrated camera and spectrometer aboard Deep Space 1. *Science*, 296, 1087–1091.
- Srinivasan, G. (2007, July). The crystallization age of eucrite zircon. *Science*, 317, 345–347.
- Stardust mission. À consulter sur : <http://stardust.jpl.nasa.gov/>
- Stardust special section*. (2006, December). *Science*, 314, 1707–1739.
- Stern, A., & Campins, H. (1996, August). Chiron and the Centaurs: Escapees from the Kuiper Belt. *Nature*, 382, 507–510.
- Stern, S. A. (2003, August). The evolution of comets in the Oort Cloud and Kuiper Belt. *Nature*, 424, 639–642.
- Sungrazing comets. À consulter sur : <http://sungrazer.nrl.navy.mil/>
- Sunshine, J. M., A'Hearn, M. F., Groussin, O., et al. (2006, March). Exposed water ice deposits on the surface of comet Tempel 1. *Science*, 311, 1453–1455.

- Sunshine, J. M., Connolly, H. C., McCoy, T. J., et al. (2002, May). Observations of comet 19P/Borrelly by the miniature integrated camera and spectrometer aboard Deep Space 1 (2008, April). Ancient asteroids enriched in refractory inclusions. *Science*, 320, 514–517.
- Taylor, G. J. & Martel, L. M. V. (2008, December). Wee rocky droplets in comet dust. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Dec08/cometDust.html>
- Taylor, G. J. (1999, August). Honeycombed asteroids. *PSR Discoveries*. <http://www.psr.d.hawaii.edu/Aug99/asteroidDensity.html>
- Taylor, G. J. (2002, February). The composition of asteroid 433 Eros. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/feb02/eros.html>
- Taylor, G. J. (2003, April). Asteroidal lava flows. *PSR Discoveries*.
- Taylor, G. J. (2005, May). Making sense of droplets inside droplets. *PSR Discoveries*. <http://www.psr.d.hawaii.edu/May05/chondrulesCAIs.html>
- Taylor, G. J. (2006, August). Wandering gas giants and lunar bombardment. *Nature*, 435, 462–465.
- Taylor, G. J. (2006, May). Interstellar organic matter in meteorites. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/May06/meteoriteOrganics.html>
- Taylor, G. J. (2007, January). Organic globules from the cold far reaches of the proto-solar disk. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/Jan07/organicGlobules.html>
- Taylor, G. J. (2009, June). The complicated geologic history of Asteroid 4 Vesta. *PSR Discoveries*. À consulter sur : <http://www.psr.d.hawaii.edu/June09/Vesta.granite-like.html>
- The Meteoritical Society. À consulter sur : <http://www.meteoriticalsociety.org/>
- Thomas P. C., Parker, J. Wm., McFadden, L. A., et al. (2005, September). Differentiation of the asteroid Ceres as revealed by its shape. *Nature*, 437, 224–226.
- Thomas, P. C., Binzel, R. P., Gaffey, M. J., et al. (1997, September). Impact excavation on asteroid 4 Vesta: Hubble Space Telescope results. *Science*, 277, 1492–1495.
- Vernazza, P., Binzel, R. P., Rossi, A., et al. (2009, April). Solar wind as the origin of rapid reddening of asteroid surfaces. *Nature*, 458, 993–995.
- Vernazza, P., Vernazza, P., Binzel, R. P., et al. (2008, August). Compositional differences between meteorites and near-Earth asteroids. *Nature*, 454, 858–860.
- Vinković, D. (2009, May). Radiation-pressure mixing of large dust grains in protoplanetary disks. *Nature*, 459, 227–229.
- Walsh, K.J., Richardson, D.C., & Michel, P. (2008, July). Rotational breakup as the origin of small binary asteroids. *Nature*, 454, 188–191.
- Weissman, P. (2003). The Oort Cloud. *Scientific American Special Edition*.
- Weissman, P. (2006, February). A comet tale. *Sky & Telescope*.
- Corot mission. À consulter sur : <http://smc.cnes.fr/COROT/index.htm>
- Davies, P. (2004, June). New hope for life beyond Earth. *Sky & Telescope*.
- Deming, D., & Seager, S. (2009, November). Light and shadow from distant worlds. *Nature*, 462, 301–306.
- DiGregorio, B. E. (2004, April). Life on Mars? *Sky & Telescope*.
- ESO Exoplanet media kit. À consulter sur : <http://www.eso.org/public/products/presskits/exoplanets/>
- Exoplanet Education Articles. (2010, January). [Special issue]. *Astrobiology*, 10(1), 5–126.
- Extrasolar Planets Encyclopedia. À consulter sur : <http://exoplanet.eu>
- Gaidos, Eric, Nader Haghighipour, N., Agol, E., et al. (2007, October). New worlds on the horizon: Earth-sized planets close to other stars. *Science*, 318, 210–213.
- Gaudi, B. S., Gaudi, B. S., Bennett, D. P., et al. (2008, February). Discovery of Jupiter/Saturn analog with gravitational microlensing. *Science*, 319, 927–930.
- Greaves, J. S. (2005, January). Disks around stars and the growth of planetary systems. *Science*, 307, 68–71.
- Jakosky, B. M. (1998, Spring). Searching for life in our Solar System. *Magnificent Cosmos – Scientific American Special*.
- JPL PlanetQuest. À consulter sur : <http://planetquest.jpl.nasa.gov/>
- Kepler mission. À consulter sur : <http://www.kepler.arc.nasa.gov/>
- Laughlin, G., Derming, D., Langton, J., et al. (2009, January). Rapid heating of the atmosphere of an extrasolar planet. *Nature*, 457, 562–564.
- Lissauer, J. J., Fabrycky, D. C., Ford, E. B., et al. (2011, February). A closely packed system of low-mass, low-density planets transiting Kepler-11. *Nature*, 470, 53–58.
- Lovis, C., Ségransan, D., Mayor, M., et al. (2010, August). The HARPS search for southern extra-solar planets. XXVII. Up to seven planets orbiting HD 10180: probing the architecture of low-mass planetary systems. *Astronomy & Astrophysics* manuscript no. HD10180. À consulter sur : <http://www.eso.org/public/archives/releases/sciencepapers/eso1035/eso1035.pdf>
- Malhotra R. (1999, September). Migrating planets. *Scientific American*.
- Marcy, G. W., & Butler, R. P. (1998, Spring). Giant Planets Orbiting Faraway Stars. *Magnificent Cosmos – Scientific American Special*.
- Masses and orbital characteristics of extrasolar planets. À consulter sur : <http://exoplanets.org/almanacframe.html>
- Naeye, R. (2005, January). Planetary harmony. *Sky & Telescope*.
- Naeye, R. (2009, December). Amateur exoplanets. *Sky & Telescope*.
- Naeye, R. (2009, March). Exoplanets imaged at last. *Sky & Telescope*.
- NASA Astrobiology Institute. À consulter sur : <http://nai.arc.nasa.gov/>
- NASA Astrobiology magazine. À consulter sur : <http://www.astrobio.net/>
- Planetary Society catalog of exoplanets. À consulter sur : <http://www.planetary.org/exoplanets/>
- Planets around pulsars. À consulter sur : http://www.astro.psu.edu/users/alex/pulsar_planets_text.htm
- Raymond, S. N., Mandel, A. V., Sigurdsson, S. (2006, September). Exotic Earths: Forming habitable worlds with giant planet migration. *Science*, 313, 1413–1416.
- Rivera E.J., Lissauer, J. J., Butler, R. P., et al. (2005). A 7.5 Earth-mass planet orbiting the nearby star, GJ 876: Technical figures and table. *Astrophysical Journal*, 634, 625–640.
- Schilling, G. (1999, October). From a swirl of dust, a planet is born. *Science*, 286, 66–68.
- Seager, S. (2006, February). Unveiling distant worlds. *Sky & Telescope*.
- Seager, S. (2008, January). Alien Earths from A to Z. *Sky & Telescope*.

Chapitre 14 : Les exoplanètes

- Boss, A. (2009, March). Brave new worlds. *Physics World Online*. À consulter sur : <http://physicsworld.com/cws/article/print/37980>
- California & Carnegie Planet Search. À consulter sur : <http://exoplanets.org/>
- Carlisle, C. M. (2009, January). The race to find alien Earths. *Sky & Telescope*.
- Charbonneau, D., Berta, Z. K., Irwin, J., et al. (2009, December). A super-Earth transiting a nearby low-mass star. *Nature*, 462, 891–894.

- Seager, S. (2010, October). The hunt for super-Earths. *Sky & Telescope*. SETI Institute. À consulter sur : <http://www.seti.org/>
- Setiawan, J., Henning, Th., Launhardt, R., et al. (2008, January). A young massive planet in a star-disk system. *Nature*, 451, 38–41.
- Shiga, D. (2004, April). Imaging exoplanets. *Sky & Telescope*.
- Silvotti, R., Schuh, S., Janulis, R., et al. (2007, September). A giant planet orbiting the 'extreme horizontal branch' star V391 Pegasi. *Nature*, 449, 189–191.
- Snellen, I. A. G. (2009, May). The changing phases of extrasolar planet CoRoT-1b. *Nature*, 459, 543–545.
- The search for life. (2011, February). *Astronomy & Geophysics special issue*, Wiley-Blackwell.
- Thommes, E. W., Matsumura, S., & Rasio, F. A., (2008, August). Gas disks to gas giants: Simulating the birth of planetary systems. *Science*, 321, 814–817.
- Tinetti, Giovanna, Vidal-Madjar, A., Liang, M-C., et al. (2007, July 12). Water vapour in the atmosphere of a transiting extrasolar planet. *Nature*, 448, 169–171.
- Tingley, B. (2008, May). The first Earth-size exoplanet. *Sky & Telescope*.
- Vogel, G. (1999, October). Expanding the habitable zone. *Science*, 286, 70–71.
- Vogt, Steven S., Bulter, R. P., Rivera, E. J., et al. The Lick-Carnegie exoplanet survey: A 3.1M_J Planet in the habitable zone of the nearby M3V Star Gliese 581. *Astrophysical Journal*. À consulter sur : http://www.ucolick.org/%7Evogt/ms_press-1.pdf and <http://arxiv.org/abs/1009.5733>
- Weinberger, A. J. (2008, November). Building planets in disks of chaos. *Sky & Telescope*.
- Wolszczan, A. (1994, April). Confirmation of earth-mass planets orbiting the millisecond pulsar PSR B1257 + 12, *Science*, 264, 538–542.

Index

- A-Train, 56
- Acheron Fossae (Mars), 165
- Acidalia Planitia (Mars), 164
- Adams, John Couch, 298
- Adonis, 371
- Adrastée, 238, 241
- Afrique, 63, 73, 143
- Akna Montes (Vénus), 142
- Alabama, 62
- Alba Patera (Mars), 167
- Aldrin, Edwin (Buzz), 94
- Alexandrie, 69
- Alfvén, Hannes, 35
- Algérie, 358
- ALH 84001, 201, 204–205
- Allan Hills, 109, 201
- Allen Telescope Array, 409
- Alpes (Lune), 93
- Alpha Regio (Vénus), 144, 148, 149
- Amalthée, 236–237, 238, 239, 241
- amas globulaire, 409
- amas globulaire M13, 409
- Amazonis Planitia (Mars), 161
- Amérique du Nord, 64, 66, 70
- Amérique du Sud, 70, 73
- Amirani (Io), 226–227
- Ananké, 238
- Andes, 70, 74
- Angelina, 340
- Angleterre, 355
- anneaux, 238, 241, 244, 250, 251, 252, 253, 254, 255–260, 261, 273, 277, 279, 280, 282, 283, 284, 287, 293–295, 296
- Antarctique, 58–59, 64, 66, 70, 74, 109, 138, 172, 201, 357
- Anthée, 256
- Antiope, 341
- Apennins (Lune), 93
- Aphrodite Terra (Vénus), 142, 143, 144, 145, 146
- Apollinaris Patera (Mars), 168
- Apollo 8, 96
- Apollo 11, 94, 110
- Apollo 12, 96, 110
- Apollo 14, 93, 110
- Apollo 15, 100, 103, 104, 110
- Apollo 16, 59, 96, 102, 103, 110
- Apollo 17, 95, 99, 100, 102, 103, 110
- Apollo Lunar Surface Experiments Package (ALSEP), 110
- Apophis, 354, 355
- Aqua, 56
- Arabia Terra (Mars), 177, 191, 200
- arachnoïdes (voir Vénus)
- Arctique, 62, 67, 84, 186, 229
- Arden Corona (Miranda), 291
- Ares Vallis (Mars), 179, 180, 199
- Argentine, 408
- Ariel, 20, 287, 290–291, 297
- Aristarchus (Aristarque) (Lune), 99, 102
- Aristarque, 3, 4
- Arizona, 400
- Armstrong, Neil, 102
- Arram Chaos (Mars), 179
- Arrhenius, Svante, 139
- Arsia Mons (Mars), 168, 169
- Artemis Chasma (Vénus), 148
- Artemis Corona (Vénus), 148, 149
- Aschera, 340
- Ascraeus Mons (Mars), 165, 168, 169, 178
- Asie, 66, 164, 355
- Assyriens, 185, 243
- astéroïdes, 9, 10, 209, 239, 331, 335–357, 358, 359, 369, 370, 380, 383, 384, 393, 400, 401, 403, 407
 - Ceinture Principale, 9, 336, 337, 338, 343, 344, 348, 349, 351
 - composition, 340, 344, 347, 349, 351, 359
 - densité, 337, 339, 341, 343, 344, 347, 349, 352
 - désignation, 337
 - distances, 340
 - familles, 339–341, 346, 349, 350
 - formes, 338, 342, 344
 - géocroiseur, 336, 342–343, 346, 351–357
 - lacunes de la Ceinture Principale, 340–341
 - lunes, 341, 343–344, 346, 351

- orbites, 339–341, 346, 347, 350–351, 353–354, 393
 origine, 337–338
 prévention des impacts, 356–357
 programmes de recherche, 336–337
 retour d'échantillons, 342–343
 rotation, 342, 343, 344, 346, 347, 349, 352
 surfaces, 339, 352
 tailles, 341, 342, 343, 344, 347, 349, 350, 351, 352
 types, 340
 astéroïdes Achille, 351
 astéroïdes Amor, 353, 354
 astéroïdes Apheles, 353–354
 astéroïdes Apollo, 346, 353, 354, 361, 371
 astéroïdes Aten, 353, 354
 astéroïdes Eos, 340
 astéroïdes Flora, 340
 astéroïdes géocroiseurs (voir astéroïdes)
 astéroïdes Hilda, 340, 341
 astéroïdes Koronis, 340
 astéroïdes Patrocle, 351
 astéroïdes Thémis, 340
 astéroïdes Veritas, 341
 Aston, Francis, 27
 Astrée, 336, 340
 astrométrie, 388
 astronomie grecque, 3, 4, 69, 362
 Aswan, 69
 Athabasca Valles (Mars), 179
 Atla Regio (Vénus), 143, 149
 Atlas, 260, 279–280
 aurores, 49, 83–84, 154, 247, 248, 252, 253, 286, 287, 289, 306, 380
 aurores de Mars et Jupiter, 200–201, 221–222, 253
 Australie, 142, 164, 343, 359, 360
 avion U2, 363
 2002 AW197, 333

 Babylone, 112
 Baghdad Sulcus (Encelade), 274
 Baltis Vallis (Vénus), 147
 Barbara, 341
 Barnard, Edward Emerson, 236
 bassin Beethoven (Mercure), 125
 bassin Caloris (Mercure), 116, 119, 122, 123, 126–127
 bassin d'Argyre (Mars), 161, 162, 163, 166, 186
 bassin d'Hellas (Mars), 161, 162, 165, 166, 177, 178, 186, 189, 190,
 191, 192, 198, 199
 bassin Gilgamesh (Ganymède), 231
 bassin Imbrium (bassin des Pluies) (Lune), 101, 106, 107
 bassin Isidis (Mars), 165, 166
 bassin Nectaris (du Nectar), 106, 107
 bassin Newton (Mars), 183
 bassin Rembrandt (Mercure), 125
 bassin South Pole-Aitken (Lune), 90, 92, 94, 96, 104, 161
 bassin Tolstoï (Mercure), 122, 123, 125
 bassins d'impacts et cratères d'impacts, 80, 81, 83, 90–94, 95, 96, 97,
 98–99, 101, 106, 107, 112, 119, 121, 122, 123, 124–127, 128, 129,
 130, 143, 146, 148, 158, 160, 161–164, 228, 231, 233, 234, 235,
 236, 237, 238, 270, 271, 273, 275, 276, 277, 278, 279
 Beagle 2, 202
 Bélinda, 296, 297
 Bêta Pictoris, 379, 381, 382, 393
 Bêta Regio (Vénus), 144, 145, 149, 150
 Bételgeuse, 24
 Bianca, 296

 Bond, William, 264
 Bondone, Giotto di, 365
 Bopp, Thomas, 364
 Boston University, 117
 Bottke, William, 346
 Brahé, Tycho, 6
 Brown, Mike, 8, 329
 Brucia, 336
 Burney, Venetia, 315
 Butler, Paul, 379

 Caliban, 297
 California Institute of Technology, 329
 Californie, 63, 72, 74, 329, 341, 379, 408, 409
 Callisto, 15, 19, 20, 224, 231, 232, 234–236, 237, 239, 265, 306, 344
 Calypso, 280
 Cambridge University (Royaume-Uni), 298
 Canada-France-Hawaii Telescope, 297, 344
 55 Cancri, 400
 Candor Chasma (Mars), 171
 Canup, Robin, 19
 Carme, 238
 Cassini, Giovanni Domenico, 6, 253, 264, 278
 Cassini Regio (Japet), 278
 Castalia, 338
 Caucase (Lune), 93
 Cavendish Laboratory, 27
 Ceinture d'Edgeworth-Kuiper (voir Ceinture de Kuiper),
 Ceinture de Kuiper, 6, 9–10, 11, 19, 20, 89, 279, 309, 314, 316, 323,
 324, 325–334, 337, 370, 371, 374, 377, 378, 402, 404
 atmosphères, 331
 binaires, 333–334
 compositions, 323–324, 329, 330, 331, 333
 couleurs, 328, 329
 formation, 324–325, 328, 333
 luminosité, 333
 lunes, 329, 330, 331, 333
 orbites, 328–329, 330, 332, 333, 334
 tailles, 330, 331, 333
 températures, 333
 types, 328–329
 cellules de Ferrel, 59, 60
 cellules de Hadley, 59, 60, 138, 139, 197, 199
 Centaures, 369–370, 375
 Centauri Montes (Mars), 184
 Ceraunius Tholus (Mars), 165
 Cerberus Fossae (Mars), 179, 184
 Cerberus Palus (Mars), 179
 Cérès, 7, 8, 9, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 344–345, 347, 348, 349
 chaîne de cratères (catena) Abulfeda (Lune), 97
 chaîne de cratères (catena) Davy (Lune), 97
 Challis, James, 298
 champs magnétiques, 21, 28, 33, 36–40, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 83–84,
 103–104, 110, 119, 120–121, 131, 153–154, 160, 165–167,
 200–201, 210, 219, 220–222, 223, 228, 231, 236, 243, 247,
 250–252, 253, 265, 266, 271, 273, 282, 286–287, 288, 289, 291,
 300, 305–306, 363
 Chandra X-ray Observatory, 104
 Chandrayaan-1, 105
 Charon, 20, 89, 309, 316, 317, 318, 320, 321, 322, 323–324, 325, 326,
 327, 331, 333
 Chasma Boreale (Mars), 173, 174
 CheshireCat, 337
 Chili, 63, 345, 386, 398, 400

- Chine, 70, 78, 111
 Chiron, 369–370
 chondrites, 17, 209, 287, 339, 340, 343, 359, 360, 374
 chondrites enstatites, 360
 Christy, James, 323
 chromosphère (voir Soleil)
 Chryse Planitia (Mars), 164, 179, 195
 CloudSat, 56, 63
 Colette Patera (Vénus), 142
 Colomb, Christophe, 69
 Colombo, Giuseppe (Bepi), 114
 Columbia Hills (Mars), 186, 187, 188
 coma (voir comètes)
 comète Biela, 368
 comète Borrelly, 366, 367
 comète Churyumov-Gerasimenko, 356, 367–368
 comète de Halley, 141, 151, 362, 366, 370, 371, 373, 375–376, 393
 comète de la Grande Marche, 363
 comète Encke, 364, 372, 373, 376
 comète Grigg-Skjellerup, 365
 comète Hale-Bopp, 363, 364, 366
 comète Hartley 2, 366, 367
 comète Holmes, 369
 comète Hyakutaké, 363, 364
 comète Ikeya-Seki, 372
 comète Linear (C/1999 S4), 368–369
 comète Machholz, 363
 comète McNaught, 366
 comète Schwassman-Wachmann 3, 368
 comète Shoemaker-Levy 9, 22, 239, 356, 368, 369, 373
 comète SOHO-614, 372
 comète Tempel 1, 366, 367, 374–375, 376
 comète Tempel-Tuttle, 362
 comète Wild 2, 366, 372–374
 comète Wilson-Harrington, 371
 comètes, 9, 10, 130, 140, 325, 333, 335, 338, 351, 355, 356, 361, 362–378, 383, 384, 393, 407
 albédo, 367
 Ceinture Principale, 371, 372
 coma, 362, 365, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374
 composition, 362, 364–365, 366, 367, 369, 370, 371, 372, 374, 375
 courtes périodes, 9, 365, 369, 371, 373, 375–377
 densité, 367, 375
 désintégration, 368–369
 distances, 377
 extinction, 351, 370–371
 famille Jupiter, 376
 famille Kreutz, 371–372
 formation, 372, 374
 héliorasantés, 42, 363, 371–372
 longue période, 10, 355, 356, 370, 377
 noms, 373
 noyaux, 362, 364, 365, 366, 367, 368–369, 370, 372, 374–375
 orbites, 363, 365, 366, 371, 373, 375–377, 393
 premières observations, 375–376
 queues, 362–364, 370, 372
 taille, 364, 365, 366, 367
 Conamara Chaos (Europe), 228, 229
 Congrès américain, 355
 Cook, James, capitaine, 6
 Copernicus, Nicolaus (Nicolas Copernic), 6
 Cordelia, 294
 Cornell University, 409
 coronae (voir Vénus et Miranda)
 CoRoT-1b, 393
 CoRoT-3b, 399, 400
 CoRoT-9b, 387
 couronne (voir Soleil)
 1995 CR, 353
 2000 CR105, 332
 cratère Alphonsus (Alphonse) (Lune), 99, 102
 cratère Apollodorus (Mercure), 127
 cratère Archimedes (Archimède) (Lune), 93, 106
 cratère Asgard (Callisto), 235
 cratère Bach (Mercure), 125
 cratère Bacolor (Mars), 177
 cratère Barringer (voir Meteor crater)
 cratère Bonneville (Mars), 207
 cratère Cabeus (Lune), 106
 cratère Callanish (Europe),
 cratère Chao Meng-Fu (Mercure), 130
 cratère Cleopatra (Vénus), 142, 151
 cratère Copernicus (Copernic) (Lune), 97, 101, 106, 107
 cratère Dawes (Lune), 99
 cratère de Chicxulub (Terre), 84
 cratère Debussy (Mercure), 122
 cratère Eagle (Mars), 187, 206
 cratère Eberswalde (Mars), 182
 cratère Endeavour (Mars), 208
 cratère Endurance (Mars), 207
 cratère Eratosthenes (Ératosthène) (Lune), 106
 cratère Erebus (Mars), 207
 cratère Gaea (Amalthée), 236
 cratère Grimaldi (Lune), 102
 cratère Gusev (Mars), 186, 187, 188, 193, 206
 cratère Hamlet (Obéron), 289
 cratère Hermite (Lune), 105
 cratère Herschel (Mimas), 275, 276
 cratère Hokusai (Mercure), 122
 cratère Jason (Phoébé), 279
 cratère Képler (Kepler) (Lune), 107
 cratère Kuiper (Mercure), 122
 cratère Maskelyne (Lune), 94
 cratère Mead (Vénus), 143, 146
 cratère Mozamba (Triton), 308
 cratère Odysseus (Téthys), 275, 276
 cratère Pan (Amalthée), 236
 cratère Peary (Lune), 105
 cratère Piazzi, 344
 cratère Plato (Platon) (Lune), 93, 106
 cratère Psyché (Éros), 352, 353
 cratère Pwyll (Europe), 228, 229
 cratère Rachmaninov (Mercure), 125, 127
 cratère Rozhdestvensky (Lune), 105
 cratère Shackleton (Lune), 105
 cratère Shorty (Lune), 95
 cratère Stickney (Phobos), 208–209
 cratère Swift (Deimos), 209
 cratère Tirawa (Rhéa), 277
 cratère Tsiolkovsky (Lune), 96
 cratère Tycho (Lune), 91, 97, 106, 107
 cratère Van de Graaff (Lune), 93
 cratère Victoria (Mars), 163, 208
 cratère Voltaire (Deimos), 209
 cratère Wunda (Umbriel), 291
 cratères Messier (Lune), 97
 CryoSat, 63

- cryovolcanisme, 228, 234, 266, 270–271, 275, 276–277, 289, 291, 307, 308, 327, 329
 Cupidon, 295, 296
 cycle du méthane, 266
 cycle solaire (voir Soleil, cycle des taches)
 cyclones, 60–61, 218, 303
- D'Arrest, Heinrich, 7, 298
 Dactyl, 20, 341, 344
 Dali Chasma (Vénus), 143
 Damascus Sulcus (Encelade), 274
 Damoclès, 371
 Damocloïdes, 371
 Danu Montes (Vénus), 142
 Daphnis, 257, 258, 259, 279
 Dark Spot 2 (D2) (Neptune), 303
 Datura, 341
 décalage (effet) Doppler, 31, 62, 114, 135, 216, 385–386
 Deccan, 74, 83
 Deep Space 1, 366
 Deep Space Network, 300
 Deimos, 20, 202, 205, 209, 339
 demi grand axe, 8, 14
 Dérive Nord-Atlantique, 63
 désert du Sahara, 78, 357
 Despina, 310, 311
 Devana Chasma (Vénus), 145
 Diana Chasma (Vénus), 142, 143
 dinosaures, 351, 354
 Dioné, 20, 254, 261, 263, 264, 265, 274, 275–277, 280
 Dione Regio (Vénus), 155
 disques circumstellaires, 379, 381–385, 392, 393
 disques protoplanétaires, 13, 16, 19, 382, 383
 division d'Encke, 255, 255, 257, 258, 260, 279
 division de Cassini, 253, 256, 257–8
 division de Keeler, 257, 279
 division de Maxwell, 260
 division de Roche, 260
 dômes Gruithuisen (Lune), 97
 2000 DP107, 341, 343
 Drake, Frank, 405, 408, 409
 Drakonia, 340
 dunes, 77–78, 143, 161, 270, 271
 Dyce, Rolf, 114
 Dynamics Explorer, 84
 Dysnomie, 329
- Earth Observing System, 56
 échelle de Palerme, 354
 échelle de Turin, 354
 Echus Chasma (Mars), 171
 éclipses (de Lune ou de Soleil), 4, 30–31
 éclipses (voir éclipses de Lune)
 Eddington, Arthur, 27
 Edgeworth, Kenneth, 325, 328
 effet Yarkovsky, 346, 353, 358
 effet YORP, 343–344, 346
 effet Zeeman, 36
 Égéon, 263
 Église Catholique Romaine, 7
 Einstein, Albert, 27, 113–114
 Eistla Regio (Vénus), 147
 éjection de masse coronale (CME) (voir Soleil)
 El Niño (voir Terre)
- éléments orbitaux, 8, 14
 Elliot, James, 292
 Elsinore Corona (Miranda), 291
 Elysium (Mars), 167, 178, 179, 184, 200
 Elysium Mons (Mars), 165
 Encelade, 20, 247, 251, 254, 255, 256, 261, 263, 264, 265, 271, 273–275, 276, 277, 296
 Encke, Johann, 298
 énergie nucléaire, 44, 327
 Envisat, 56, 62
 Epiméthée, 256, 262, 263, 280
 Équateur, 64
 équation de Drake, 405, 409
 équinoxes, 53, 54, 159, 282, 317, 318
 Ératosthène (Eratosthenes), 4, 69
 Erech Sulcus (Ganymède), 234
 Éris, 8, 9, 316, 329–330, 331, 333, 371
 Éros, 6, 336, 339, 340, 352–353
 ERS-2, 63
 éruptions solaires (voir Soleil)
 États-Unis d'Amérique, 362
 étoile à neutrons, 379, 380, 392
 Étoile de Barnard, 379
 Euboea Montes (Io), 227
 Eugénie, 341, 344
 Euréka, 351
 Europa, 15, 19, 20, 212, 222, 228–230, 231, 239, 308
 Europe, 63, 64, 66, 389
 European Southern Observatory (ESO), 341, 345, 381, 382, 386
 European Space Agency (ESA), 44, 56, 63, 83, 104, 111, 154, 356, 365, 388
 Eve Corona (Vénus), 142
 Evpatoria, 410
 excentricité des orbites, 8, 14
 exoplanètes, 9, 379–408
 atmosphères, 395–396, 397, 399, 408
 composition, 387, 392–393, 394–397, 398, 399, 401
 densités, 387, 392–393, 397, 398
 détection, 379, 380, 385–392
 distances, 387, 392, 395, 396, 397, 398, 400, 401–402, 403, 404
 formation, 379, 380
 Jupiters chaudes, 393–398
 lunes, 404–406
 masses, 380, 387, 393, 396, 398, 399, 400, 401–402, 403, 404
 météorologie, 394
 missions, 379, 389–392
 orbites, 379, 380, 387, 389, 393, 394, 395, 396, 398, 399, 400, 401–402, 403
 super-Terre, 392, 398–399, 401, 406, 408
 systèmes multiples, 387, 400–404
 tailles, 379, 386–387, 389, 393, 396, 397, 398, 406
 températures, 379, 389, 393, 394, 396, 397, 398, 399, 406, 407, 408
 Extremely Large Telescope, 388
- faculae (voir Soleil)
 familles Hirayama, 340
 Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (voir sonde FUSE)
 Ferdinand, 297
 Flagstaff, 314
 Flamsteed, John, 281
 fleuve Mississippi, 179
 Floride, 62
 Fomalhaut b, 387–388, 404
 force de Coriolis, 60, 199, 211, 244, 245

- Fortuna Regio (Vénus), 148
 Fosse des Mariannes, 70
 Fra Mauro, 93, 101, 107
 Frail, Dale, 379
 Francisco, 297
 Freyja Montes (Vénus), 142
- Galatée, 310, 311, 313
 Galaxie (voir Voie Lactée)
 galaxie d'Andromède, 22
 Galilei, Galileo (Galilée), 6–7, 222–223, 239, 253, 255
 Galileo Regio (Ganymède), 230–231, 233, 234
 Galle, Johann, 298
 Gange (fleuve), 76
 Ganges Chasma (Mars), 187
 Ganymède, 15, 19, 20, 116, 222, 223, 224, 230–231, 236, 237, 239, 240, 265, 306, 344
 Ganymède, 353
 Gaspra, 339
 Gauss, Carl, 335
 géante rouge, 397
 Geneva Observatory, 379
 George III, 281
 Geostationary Operational Environmental Satellites (voir GOES)
 geysers, 175, 225, 273–275, 308
 GJ 1214b, 398–399, 406
 Global Oscillation Network Group, 29, 31
 GOES (satellites), 45, 47, 56
 Goldstone, 341, 345
 Golfe du Mexique, 62, 63
 Gondwana, 72–73, 80
 GONG (voir Global Oscillation Network Group)
 Grand Bombardement Tardif, 19, 97, 101, 123, 129, 160, 335
 Grand Canyon, 78, 170
 Grande Tache Rouge (voir Jupiter)
 Grande Tache Sombre (voir Neptune)
 gravité, 7, 82, 89–90, 215, 298, 299, 323, 337, 339, 341, 351, 360, 377, 380, 388–389
 Green Bank Telescope, 408
 Groenland, 66, 67, 172
 Guinevere Planitia (Vénus), 142
 Gulf Stream, 63
- Hadriaca Patera (Mars), 167
 Hale, Alan, 364
 Halimède, 310
 Hall, Asaph, 205
 Halley, Edmond, 373, 375–376
 HARPS, 386, 398
 Hauméa, 330, 331, 333
 Hawaï, 73–74, 145, 167, 168, 227, 326, 336, 344
 Hayabusa, 339, 342–343
 HD 10180, 400, 401–402
 HD 149026b, 394–395
 HD 189733b, 394, 395
 HD 209458, 386
 HD 80606b, 387, 393
 HD 80607, 394
 Hektor, 351
 Hélène, 280
 héliogaine, 22
 héliopause, 22
 héliosismologie, 29–32, 33, 40, 42
 héliosphère, 21, 42
- Herbig Haro 30, 16
 Hermès (astéroïde), 337
 Hermès (planète), 3
 Hero Rupes (Mercure), 129
 Herschel, Caroline, 281
 Herschel, Sir John
 Herschel, Sir William, 7, 25, 264, 281, 282, 287, 335
 Hesperia Planum (Mars), 161, 191
 Hesperus, 3
 Hey, James, 25
 Hi'iaka, 331
 Hi'iaka Patera (Io), 227
 High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher (voir HARPS)
 Highlands d'Écosse, 74
 Himalaya, 66, 70, 73, 74, 76
 Himalia, 238
 Himéros (Éros), 352, 353
 Hinode (sonde), 32, 33, 34, 35, 39, 43, 47, 48–49, 50
 Hipparchus (Hipparque), 4
 Hirayama, Kiyotsugo, 340
 Hiroshima, 355
 Home Plate (Mars), 207
 Homer, 351
 Hooke, Robert, 216
 Hooker telescope, 350
 Hubble Space Telescope, 173, 198, 219, 223, 224, 245, 249, 252, 283, 293, 294, 295, 302, 303, 304, 309, 312, 313, 316, 318, 319, 320, 323, 324, 338, 341, 344, 347, 349, 350, 366, 368, 369, 381, 382, 387, 388, 396
 Husband Hill (Mars), 207
 Huygens (sonde), 261, 269, 272–273
 Huygens, Christiaan, 253, 255, 256
 Hydra, 324, 325
 Hypérion, 20, 261, 264, 265, 277, 278, 310
 hypothèse de la nébuleuse primordiale, 10
- Icare, 353
 Ida, 20, 239, 341, 344
 Idunn Mons (Vénus), 155
 îles Canaries, 386
 Iliade, 351
 Imdr Regio (Vénus), 155
 Inde, 70, 74, 76, 83, 111
 Index
 Indonésie, 64, 70
 interférométrie, 341, 388, 391
 International Cometary Explorer (ICE), (see ISEE-3)
 International Sun-Earth Explorer, (see ISEE-3)
 International Ultraviolet Explorer (IUE), 286
 Inverness Corona (Miranda), 291, 293
 Io, 15, 19, 20, 98, 221–222, 223, 224–228, 234, 236, 239
 Ioffe, 350
 Irwin, James, 100
 Ishtar Terra (Vénus), 142–143, 144
 Islande, 70, 74
 Italie, 63, 354
 Ithaca Chasma (Téthys), 275
 Itokawa, 339, 340, 342–343
 Ius Chasma (Mars), 171
 Ixion, 328
- James Webb Space Telescope, 405
 Janus, 256, 262, 263, 280
 Japet, 20, 264, 265, 278–279

- Japon, 70, 74, 91, 111, 131, 154, 300, 339, 342–343, 389
 Jason (satellite), 62
 Jet Propulsion Laboratory, 379
 jet streams (courants-jets), 57–58, 59, 138, 191, 192, 199, 211, 212,
 216, 243, 244, 245, 246, 248, 285, 301
 Jewitt, David, 280, 329
 2004 JG6, 354–355
 Junon, 7, 336, 340, 350
 Jupiter, 5, 10, 12, 15, 18, 24, 44, 53, 101, 156, 210–242, 243, 244, 246,
 247, 248, 249, 250, 251, 253, 283, 285, 287, 301, 302, 323, 327,
 335, 336, 337, 338, 340, 341, 350, 351, 356, 368, 369, 377, 379,
 387, 393, 400, 401, 402, 403, 404, 407, 408
 anneaux, 238, 241
 atmosphère, 215, 219, 240, 248
 aurores, 221–222, 253
 ceintures de radiations, 210, 224, 236
 champ magnétique, 210, 219, 220–222, 223, 236, 247, 251
 composition, 212, 214, 215, 219–220, 250, 285
 densité, 210, 285
 distance, 210, 211
 éclairs, 212, 216, 217
 émissions radioélectriques, 220, 247
 forme, 210, 212
 Grande Tache rouge, 212, 213, 214, 216–218, 219, 247
 gravité, 215, 337, 338
 intérieur, 210, 219–220, 249–250
 ionosphère, 222, 223
 lunes, 6–7, 210, 212, 221, 222–231, 232, 233, 234–238, 239, 241
 mission Voyager 1, 217, 224, 232–233
 mission Voyager 2, 213, 232–233
 nuages, 211–212, 214, 216–218, 219, 248
 orbite, 10, 15, 18, 210
 premières observations, 210
 Red Spot Junior, 218–219
 rotation, 210, 212, 243
 taille, 210, 212, 400
 température, 12, 214, 216, 219, 220, 250
 tempêtes, 212, 213, 216–219, 247, 302
 troyens, 351
 vents, 212, 216, 218, 244, 301
- Kasei Valles (Mars), 171, 177
 Katrina (cyclone), 62
 Kawelu Planitia (Vénus), 142
 Keck telescopes, 227, 250, 284, 295, 323, 329, 344, 387
 Kepler (Képler), Johannes, 6, 14–15, 113, 255
 Képler 9b, 387
 Képler 11 system, 400–401
 Kirkwood, Daniel, 340
 Kitt Peak Observatory, 376
 Kleyna, Jan, 280
 Kowal, Charles, 369
 Kozyrev, Nikolai, 102
 Kraken Mare (Titan), 269
 Kreutz, Heinrich, 371
 Ksa crater (Titan), 270
 Kuiper, Gerard, 287, 309, 315, 325, 328
 Kuiper Airborne Observatory, 292
- La Niña (voir Terre)
 La Silla, 386, 398
 lac Baïkal, 355
 lacunes de Kirkwood, 340–341, 351
 Lakshmi Planum (Vénus), 142, 144, 149
- lanceur Atlas V – Centaur, 327
 Landsat, 56, 78
 Laomédie, 310
 Larissa, 310, 311
 Lassell, William, 264, 287, 306
 Latona Corona (Vénus), 149
 Laurasia, 72–73
 Le Verrier, Urbain Jean Joseph, 113, 298
 Libya Linea (Europe), 229
 Libye, 358
 limite de Roche, 256, 262, 295, 311
 Lincoln Laboratory, 336
 Lissauer, Jack, 296
 loi de Bode, 335
 Londres, 355
 Louisiane, 62
 Louros Valles (Mars), 171
 Lowell, A. Lawrence
 Lowell, Percival, 314, 315, 316
 Lowell Observatory, 102, 314, 315, 376
 Lowry, Stephen, 346
 Lucey, Paul, 122
 Lucifer, 3
 lumière zodiacale, 370
 Lunae Planum (Mars), 165
 Lunar Prospector, 92, 96, 106, 111
 Lunar Reconnaissance Orbiter, 111
 Lunar Roving Vehicle, 102, 109, 110
 Lune, 3, 4, 5, 6, 10, 19, 20, 30–31, 82, 86–111, 114, 122, 123, 128,
 156, 168, 215, 224, 287, 316, 318, 324, 329, 337, 351, 359,
 360–361, 405, 406
 activité volcanique, 93, 94, 96, 97, 99–100, 101, 128, 168
 âge, 101, 106
 albédo, 88, 91, 318
 atmosphère, 106, 110
 champ magnétique, 103–104, 110
 densité, 89, 107, 120
 distance, 4, 6, 30, 82, 86–87
 eau, 96, 104, 105–106
 éclipses, 87, 88–89, 90
 formation, 19, 106, 107–108, 329, 405
 formations d'impacts, 90, 91, 93–94, 97, 98–99, 101, 105, 106
 forme, 86
 glace, 105–6
 gravité, 89–90, 92, 93, 215
 inclinaison axiale, 87
 intérieur, 94, 103, 106
 libration, 86, 87
 maria (mers), 90, 91, 93, 94–95, 96, 104, 106, 122, 125
 mascons, 91–93
 météorites, 109, 359, 360–361
 montagnes, 93, 94
 orbite, 7, 15, 30–31, 87, 107, 324
 phases, 30, 87–88
 phénomènes lunaires transitoires, 102
 plateaux, 90, 91, 92, 95–97, 101, 104, 106, 118, 121, 361
 premières observations, 3, 4, 90
 rainures, 94–95, 100, 102
 régolithe, 102, 104, 110
 rotation, 86, 114–116, 119
 taille, 4, 20, 91, 317
 tectonique, 96
 température, 89
 topographie, 90–91, 93, 94, 96

- tremblements de Lune (séismes lunaires), 103
types de roches, 95–96, 99, 100, 103, 104, 106
lunes bergers, 260, 261, 262, 289, 294, 311
lunes galiléennes, 222–231, 234, 236, 237, 238, 264, 287, 306, 323, 404
Luu, Jane, 326, 329
- 2M1207b, 387, 401
Ma'adim Vallis (Mars), 206
Maat Mons (Vénus), 143, 144, 146
Mab, 295, 296
Magellan (sonde), 141, 142, 144, 145, 151, 154, 155
Magnya, 340
Mahilani Plume (Triton), 308
Makémaké, 330, 331
Mangala Valles (Mars), 181
Marcy, Geoffrey, 379
Marduk volcano (Io), 225
Mare Crisium (Mer des Crises), 94
Mare Fecunditatis (Mer de la Fécondité), 97
Mare Humorum (Mer des Humeurs), 94, 95
Mare Imbrium (Mer des Pluies), 93, 94, 96, 97, 101, 106, 107, 109
Mare Marginis (Mer Marginale), 87
Mare Moscoviense (Mer de Moscou), 93
Mare Nectaris (Mer du Nectar), 94, 106
Mare Nubium (Mer des Nuages), 93, 94, 95
Mare Orientale (Mer Orientale), 93, 94, 106
Mare Serenitatis (Mer de la Sérénité), 94
Mare Smythii (Mer de Smyth), 94
Mare Tranquillitatis (Mer de la Tranquillité), 93, 94, 101
marées, 82, 86–87, 103, 129, 135–136, 185, 205, 208, 224, 227, 234, 274, 275, 276, 277, 279, 309, 310, 341, 368, 377, 393, 394, 396, 398, 406, 408
Margaret, 297
Mariner 4, 202
Mariner 9, 170, 191, 202
Mariner 10, 117, 118, 119, 122, 126, 127, 136, 137
Mars, 5, 6, 9, 10, 12, 96, 101, 112, 143, 156–209, 317, 332, 335, 336, 337, 348, 350, 351, 353, 359, 360–361, 380, 402, 406, 407
activité volcanique, 160, 161, 164, 165, 166, 167–169, 174, 187, 188, 194, 201, 202
âges glaciaires, 158, 177
atmosphère, 10, 163, 166, 172, 184, 188, 190, 191, 192, 195–199, 200, 204, 361, 406
aurores, 200–201
calottes polaires, 158, 172–175, 183, 191, 195, 196, 199
canaux, 170, 314
canyons, 170–171, 172, 174, 187, 202
champ magnétique, 160, 165–167, 200–201
chenaux, 161, 171, 178–179, 180, 181–182, 183, 184, 188, 206
composition, 158, 180, 186–188, 201, 206
cratères d'impacts, 101, 160, 161–163, 164, 172, 175–176, 177, 178, 182, 187, 189, 194
densité, 158
déserts, 188–190
distance, 156, 196
dunes, 161, 168, 172, 173, 189, 194, 195, 202
dust devils, 172, 189, 193, 195
eau, 161, 162, 171, 175, 176, 179, 180, 181–182, 183–188, 199, 201, 203, 204, 206, 207, 209
forme, 158
glaciation, 160, 161, 162, 170, 174, 176–178
gravité, 158, 164
histoire géologique, 160–161, 187, 188
inclinaison axiale, 10, 157–158, 185
intérieur, 158, 160, 165
ionosphère, 166, 199–200
lunes, 202, 205, 208–209
météorites, 167, 186, 201, 359, 360–361, 407
montagnes, 164
nuages, 173, 191, 196, 197, 198, 199
océan, 161, 183–186, 197, 200
orbite, 15, 156, 157
permafrost, 161, 175, 199, 203
plaines, 160, 161, 164, 168, 172, 183, 184, 186
plateaux, 160, 161, 164, 172, 179, 183, 184, 206
polygones, 170, 182, 183
précipitations, 177, 197
premières observations, 3, 5, 6, 156, 189
radiation, 195
ravines, 182–183, 184, 202
rotation, 156
saisons, 10, 156–157, 159, 172, 191, 192, 196
taille, 9, 116, 159
tectonique, 164–165, 171
température, 12, 116, 156, 172, 191, 192, 193, 196, 197, 199
tempêtes de poussière, 159, 172, 191–192, 195, 199, 202
topographie, 161, 162, 164, 185, 199
troyens, 351
vents, 162, 168, 174, 190, 191–193, 196, 197, 199
vie sur Mars, 156, 187, 189, 194, 200, 201, 202, 203–205, 406, 407
Mars (sonde soviétique), 180
Mars Exploration Rovers (voir également rover Spirit et rover Opportunity), 189, 193, 206–208
Mars Express, 165, 171, 189, 191, 200, 202–203
Mars Global Surveyor, 166, 177, 183, 185, 186, 189, 192, 198, 200, 201, 202
Mars Observer, 202
Mars Odyssey, 170, 177, 186, 196, 202
Mars Pathfinder, 179, 186, 199
Mars Phoenix (voir mission Phoenix)
Mars Reconnaissance Orbiter, 164, 174, 178, 186, 203, 209
Marte Vallis (Mars), 179
Massachusetts, 336, 409
Massachusetts Institute of Technology (MIT), 336
Massif Nord (Lune), 10
Mathilde, 339, 352
Mauna Loa, 73–74, 145
Maxwell, James Clerk, 144, 255
Maxwell Montes (Vénus), 142, 144, 149, 151
Mayor, Michel, 379
Medusae Fossae (Mars), 168
Menrva crater (Titan), 270
mer Caspienne, 269
Mer du Nord, 185
Mer MUSES (Itokawa), 342
Mer Rouge, 70
Mercure, 3, 5, 9, 10, 12, 17, 50, 84, 96, 112–132, 168, 224, 380, 386, 393, 399, 402
activité volcanique, 122, 123, 125, 126, 127, 128, 130, 168
atmosphère, 10, 117, 130, 131
bassins d'impacts, 125–127
champ magnétique, 119, 120–121, 131
composition, 119, 120, 121, 122, 125, 130, 132
cratères, 121, 123, 124–125, 126, 127, 128, 129
densité, 17, 117
escarpements, 123, 128–129
formation, 117, 119–120
glace d'eau, 129–130, 132

- inclinaison axiale, 10
 intérieur, 117, 120, 121
 montagnes, 127
 orbite, 112–113, 114–116
 phases, 113, 114
 plaines, 122, 123, 128, 129
 premières observations, 112
 rotation, 114–116, 129
 taille, 9, 117, 119, 129, 224
 température, 12, 116
 transits, 114, 386
 Meridiani Planum (Mars), 188, 190, 206
 Merline, William, 341
 Meteor crater (Terre), 81
 météores, 102, 199, 361–362, 363, 368, 370, 371
 météores Andromédides, 368
 météores Capricornides-Sagittarides, 371
 météores Geminides, 371
 météores Léonides, 362
 météorite d'Allende, 359, 360
 météorite de Lost City, 359
 météorite de Murchison, 359
 météorite de Neuschwanstein, 359
 météorite de Peekskill, 358
 météorite de Pribram, 358
 météorite Hoba, 358
 météorites, 17, 96, 102, 104, 109, 116, 121, 130, 140, 143, 201, 203,
 209, 287, 335, 340, 343, 351, 357–361, 363, 374
 météorites achondrites, 360
 météorites chondrites carbonées, 359–360
 météorites ferreuses, 360
 météorites mixtes roche-fer, 360
 météorites pallasites, 360
 météorites SNC, 201, 361
 Meteosats, 56
 Méthone, 256
 Métis, 238, 241
 Mexique, 351, 359, 360
 Microlensing Follow-Up Network (MicroFUN), 400
 Microlensing Observations in Astrophysics (voir MOA)
 microlentille gravitationnelle, 388–389
 micrométéorites, 363
 migration des orbites planétaires, 18–19, 282, 316, 325, 338, 341, 351,
 393, 398
 Milankovitch, Milutin, 66
 Millis, Robert, 292
 Mimas, 20, 154, 257–258, 263, 264, 265, 275, 276
 Minimum de Maunder, 40
 Minor Planet Center, 337
 Minovich, Michael
 Miranda, 287, 289, 291–293, 295, 296
 mission Bepi-Colombo, 131–132
 mission Cassini-Huygens, 21, 22, 212, 240, 245, 246, 247, 248, 250,
 251, 252, 253, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 267, 268,
 269, 270, 271, 272, 273, 274, 276, 277, 279
 mission CoRoT, 389–390, 398
 mission Dawn, 344, 345, 347, 348, 349
 mission Deep Impact, 367, 374–375
 mission Don Quijote, 356
 mission Gaia, 356, 388
 mission IBEX, 21
 mission Kaguya (Kaguya/Selene), 91, 111
 mission LCROSS, 106, 111
 mission MESSENGER, 117, 120, 121, 122, 123, 130–132
 Mission NEAR Shoemaker, 339, 340, 352–353
 mission New Horizons, 327
 mission Phoenix, 170, 197, 208
 mission Stardust, 367, 372–374, 375
 Mississippi, 62
 MOA, 389
 MOA-2003-BLG-53Lb, 389
 MOA-2007-BLG-192Lb, 389
 Mont Everest, 70, 142, 168, 227, 278, 292
 Mont Fuji, 74
 Mont Haleakala, 336
 Mont Pinatubo, 74, 75
 Mont St. Helens, 74
 montagnes, 69, 70, 93, 94, 127, 142, 148, 149, 151, 152, 164, 227,
 270, 278–279
 Montes Cordillera (Lune), 93
 Monts Appalaches (Terre), 74, 270
 monts Cascade, 70
 monts Rook (Lune), 93
 Morabito, Linda, 225
 mu Arae (voir HD 1606910 system)
 Mur Droit (Lune), 95

 Naïade, 310, 311
 naine blanche, 387
 naine brune, 9, 383, 387, 389, 399–400
 naine rouge, 386, 387, 389, 399, 401, 406, 405, 407, 408
 Namaka, 331
 Namibie, 358
 Naples, 63
 NASA, 35, 50, 56, 63, 84, 105, 108, 111, 130, 135, 136, 152, 154, 180,
 194, 202, 204, 239, 300, 327, 336, 337, 341, 344, 348, 349, 352,
 355, 356, 366, 372, 381, 390, 391, 408
 National Radio Astronomy Observatory, 379
 National Solar Observatory, 40
 navette spatiale, 44, 75, 239
 Nébuleuse d'Orion, 13, 16, 381, 382, 383
 nébuleuse de l'Oeil de chat, 50
 nébuleuse solaire, 13, 16, 19, 23, 107, 117, 119, 141, 158, 214, 285,
 328, 337, 359, 374, 375
 Neptune, 7–8, 12, 20, 113, 116, 220, 232, 244, 247, 248, 283, 285, 286,
 298–313, 314, 316, 324, 325, 326, 328, 329, 330, 332, 334, 338,
 370, 371, 376, 377, 386, 392, 398, 401, 408
 anneaux, 300, 306, 309, 311–313
 atmosphère, 244, 299, 300–304
 aurores, 306
 champ magnétique, 247, 300, 305–306
 composition, 299, 301, 302
 découverte, 7–8, 298
 densité, 299
 distance, 298
 formation, 285
 forme, 299
 Grande Tache Sombre, 300, 302, 303, 304
 inclinaison axiale, 10, 299
 intérieur, 220, 305, 306
 luminosité, 299
 lunes, 300, 306–310,
 mission Voyager 2, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 305, 306,
 307, 308, 310, 311, 312
 nuages, 299, 301–304, 309
 orbite, 298, 299, 338
 rotation, 299
 saisons, 299, 303

- taches, 283, 284, 300, 302–304
 taille, 299
 température, 12, 248, 286, 299, 301, 305, 306
 troyens, 351
 vents, 301–302
 Néréide, 20, 309–310
 Neso, 310
 Newton, Sir Isaac, 7, 113, 215, 356
 Nil (fleuve), 147
 Nili Fossae (Mars), 187
 Nilosyrtris (Mars), 191
 Nix, 324, 325
 NOAA, 45
 Noachis Terra (Mars), 161
 Noctis Labyrinthus (Mars), 168, 171
 NORC, 337
 Norvège, 63
 Nouveau-Mexique, 336
 Nouvelle-Zélande, 389
 Nuage d'Oort, 10, 11, 332, 334, 370, 371, 376, 377–378
 nuage zodiacal, 17, 370
- O' Keefe, J. A., 347
 Obéron, 20, 282, 287, 289, 290, 297
 objets géocroiseurs (NEOs), 354–355 (voir également astéroïdes géocroiseurs)
 observatoire d'Arecibo, 114, 144, 341, 379, 380, 408, 409
 Observatoire de Palomar, 329
 Observatoire du Mont Wilson, 117, 350
 occultations, 6, 265, 292, 293, 307, 316, 318, 320, 321, 323
 Océan Atlantique, 64, 65, 70, 73
 Océan Indien, 65, 66
 Océan Pacifique, 64, 65, 70
 océans, 22, 61, 63–65, 70, 74, 86, 140, 151, 161, 183–186, 197, 200, 228–230, 231, 234–235, 236, 265, 266, 269, 322, 323, 399, 405, 406, 407, 408
 Oceanus Procellarum (Océan des Tempêtes), 94, 96, 101, 102
 OGLE, 389
 OGLE-2003-BLG-235, 389
 OGLE-2005-BLG-390Lb, 389
 Olbers, Wilhelm, 335
 Old Faithful, 225
 Oljato, 371
 Olympus Mons (Mars), 145, 161, 166, 168, 169, 191
 ondes d'Alfvén, 35–36, 43, 49
 2000 OO67, 332
 Oort, Jan, 377
 Ophélie, 294
 Ophiuchus (le Serpente), 385
 Optical Gravitational Lensing Experiment (voir OGLE)
 optical SETI, 409
 2007 OR10, 331
 Orcus, 328, 331
 Orientale Basin (Bassin Oriental), 106
 ouragans (voir Terre, tempêtes)
 Oval BA (voir Jupiter, Red Spot Junior)
 Ovda Regio (Vénus), 143, 149
- Paddack, S. J., 347
 Palermo Observatory, 315, 335
 Pallas, 7, 335–336, 337, 349–350
 Pallène, 262, 263
 Pan (lune), 257, 258, 259, 260, 279–280
 Pan-STARRS, 336
- Pandore, 260, 280
 Pantheon Fossae (Mercure), 127
 parallaxe, 5–6
 Parga Chasma (Vénus), 145
 Parkes Telescope, 300, 408
 Pasiphaë, 238
 Pavonis Mons (Mars), 167, 168, 169
 PECO, 391
 51 Pegasi, 379
 Perdita, 295, 296
 Pérou, 63, 64
 Perth Observatory, 292
 Petit-Prince, 341, 344
 Pettengill, Gordon, 114
 2000 PH5, 346
 Phaëthon, 338, 351, 353, 361, 371
 phase T Tauri, 13, 20, 119
 Philae, 368
 Philippines, 70, 74, 75
 Phobos, 20, 202, 205, 208–9
 Phoébé, 20, 255, 256, 261, 263, 264, 265, 279, 280
 Phoebe Regio (Vénus), 150
 Pholus, 370
 Phosphorus, 3
 photosphère (voir Soleil)
 photosynthèse, 56
 Piazzini, Giuseppe, 7, 335
 Piazzia, 337
 Picard, Jean, 6
 Pickering, William, 264
 pilote de masse, 357
 Pioneer 10, 224, 410
 Pioneer 11, 251, 254, 260, 410
 Pioneer 12 (voir Pioneer Venus)
 Pioneer 13 (voir Pioneer Venus)
 Pioneer Venus, 137, 138, 142, 144, 152–153
 plage (voir Soleil)
 plaine Nullarbor, 359
 plan de l'écliptique, 3, 5, 10, 133, 253, 282, 300, 314, 317, 332, 350, 370
 planètes extrasolaires (voir exoplanètes)
 planètes, définition, 7–9
 formation, 9–10, 13, 16–18, 335, 337, 344, 348, 359, 362, 378, 383–385, 395, 404
 migration (voir migration des orbites planétaires)
 planètes naines, 8–9, 314, 330, 331, 344
 planétésimaux, 9, 13, 17–19, 107, 108, 123, 282, 286, 309, 325, 328, 337, 338, 362, 371, 383
 plateau Descartes (Lune), 109
 Pléiades, 5
 Plutinos, 328, 330
 Plutoïdes, 331
 Pluton, 8, 9, 12, 15, 20, 300, 306, 307, 309, 314–325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 371, 376, 387
 albédo, 317, 318, 321
 atmosphère, 315, 320, 321, 322, 327
 composition, 320, 322–323, 330
 découverte, 314–315
 densité, 322
 distance, 316, 387
 éclipses, 316, 318, 321
 inclinaison axiale, 317, 318
 intérieur, 322–323
 lunes, 20, 89, 309, 316, 317, 318, 320, 321, 322, 323–324, 325, 326, 327, 331, 333

- océan, 322, 323
 orbite, 15, 316, 321
 origine, 324–325, 326
 rotation, 317
 saisons, 317–318, 319, 320
 taille, 9, 315–316, 324, 329, 331, 332
 température, 12, 320, 321, 322, 323–324
 points de Lagrange, 280, 350, 351
 Polydeuces, 280
 Pope, Alexander, 297
 Portia, 295
 Porto Rico, 341, 379, 380, 408, 409
 poussière interplanétaire, 363
 précession, 54, 113, 136
 programme Apollo, 86, 96, 97, 101, 102, 108–109, 110, 361
 programme Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR)
 (voir programme LINEAR)
 programme LINEAR, 336
 programme Luna, 3, 86, 90, 109
 programme spatial soviétique, 108, 109, 152, 180, 191, 365
 programme Surveyor, 108, 109
 programme Venera, 137, 138, 143, 146, 150–151
 programme Viking, 163, 165, 181, 185, 186, 192, 193, 194–195, 197,
 199, 202, 203–204, 361
 programme Voyager, 21, 22, 213, 214, 217, 224, 225, 232–233, 245, 247,
 248, 251, 254–255, 260, 265, 266, 269, 274, 275, 277, 282, 283, 287,
 288–289, 293, 294, 295, 296, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 305, 306,
 307, 308, 310, 311, 312, 410, 411
 Projet OZMA, 408
 Projet Phoenix, 408
 Prométhée (lune), 260, 261, 280
 Promethei Terra (Mars), 177, 193
 proplyds (voir disques protoplanétaires)
 propulsion ionique, 111, 342, 343, 348
 Prospero, 297
 Protée, 310
 protoplanètes, 13, 16, 19, 344, 348, 349
 protubérances (voir Soleil)
 PSR B1257 + 12, 379, 380
 Psyché, 340
 Puck, 20, 296
 pulsars, 379, 380, 410
 Pupil-mapping Exoplanet Coronagraphic Observer (voir PECO)
- 1992 QB1, 326, 329
 2001 QT297, 333
 Quaoar, 323, 328, 330–331, 337
 Queen's University, Belfast, 346
 Queloz, Didier, 379
- R/2004 S1, 260
 R/2004 S1, 260
 radar, 6, 62–63, 105, 111, 116, 121, 129, 130, 135, 141–142, 143, 144,
 145, 146, 147, 148, 152, 154, 155, 174, 178, 203, 261, 269, 270,
 341, 343, 345
 Radzievskii, V. V., 347
 raies de Fraunhofer, 26, 32
 Ramsey, W., 285
 rayons cosmiques, 44, 132, 266, 320, 322, 329, 360, 407
 rayons gamma, 25, 27, 28, 110, 132, 150, 186, 348, 352, 353, 356
 rayons X, 25, 26, 27, 34, 40, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 104, 110, 132, 151,
 180, 194, 352, 356, 364, 407
 Relativité, Théorie de la Relativité Générale, 113–114
 Rémus, 343, 345
- résonances (orbitales), 18, 114–115, 129, 237, 257–258, 274, 277,
 294, 311, 316, 324, 328, 341
 Rhea Mons (Vénus), 145
 Rhea Sylvia, 343
 Rhéa, 20, 254, 261, 263, 264, 277
 Richer, Jean, 6
 Rima Ariadaeus (Lune), 100, 102
 Rima Hadley (Lune), 95, 100, 109
 Rima Sirsalis (Lune), 101
 Ritter, Johann, 25
 Robinson, Mark, 122
 Roche, Edouard, 256
 rocher Barnacle Bill (Mars), 180
 rocher Yogi (Mars), 180
 Romulus, 343, 345
 Rosalinde, 295
 ROSAT, 364
 Rosetta, 340, 356, 367–368
 rotation synchrone, 86, 206, 208, 236, 287, 310, 317, 394
 rover Opportunity, 187, 188, 190, 192, 196, 206–208
 rover Sojourner, 180
 rover Spirit, 186, 188, 193, 196, 197, 199, 206–208
 rovers Lunokhod, 110, 111
 Royal Greenwich Observatory, 41
 1996 RQ20, 328
 RT-70 telescope, 410
 Ruach Planitia (Triton), 309
 Rupes Discovery (Mercure), 128, 129
 Rupes Recti (voir Mur Droit)
 Rutherford, Ernest, 27
 1997 RX9, 328
- S/2004 S6, 262
 S/2011 P1 (P4), 324, 325
 Sacajawea Patera (Vénus), 143
 Sagan, Carl, 194
 saltation, 76–77, 139, 190
 Samuel Oschin Telescope, 329
 San Andreas, 72
 San Francisco State University, 379
 Sandia National Laboratories, 356
 Santa Maria Rupes (Mercure), 129
 Sao, 310
 Saturne, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 18, 53, 210, 220, 221, 232, 243–280, 283,
 285, 287, 301, 311, 323, 351, 370, 392, 401, 402, 407, 408
 anneaux, 244, 250, 251, 252, 253, 254, 255–260, 261, 273, 277,
 279, 280, 296
 atmosphère, 244, 245, 246, 248, 249, 250
 aurores, 247, 248, 252, 253
 ceintures de radiations, 252–253, 287
 champ magnétique, 243, 247, 250–252, 253, 265, 266, 273
 composition, 243, 246, 249–250, 251
 densité, 17, 243, 249, 285
 distance, 5, 6, 243
 éclairs, 248
 forme, 243
 Inclinaison axiale, 10, 243, 244, 248
 intérieur, 220, 245, 249–250
 lunes, 19, 247, 251, 264–280, 311
 nuages, 244–246, 248, 253, 261
 orbite, 15, 18, 243
 premières observations, 243, 255, 256
 rotation, 244, 247
 saisons, 243, 244, 245, 248, 253, 256, 265–266, 267–268

- signaux radioélectriques, 247, 248, 251, 253
 spokes, 254, 259–260
 taches, 243, 245, 246, 247, 248
 taille, 9, 243, 244
 température, 12, 243–244, 245, 248, 250, 251, 257
 tempêtes, 245, 246–248, 249
 vents, 243, 244–246, 248, 301
 Voyager 1, 247, 254
 Voyager 2, 247, 254–255, 265, 272
 Schröter, Johann, 335
 Schwabe, Heinrich, 39
 Search for Extraterrestrial Intelligence (voir SETI)
 Sedna, 11, 331, 332, 378
 Selk crater (Titan), 270, 271
 SERENDIP, 408
 Sétébos, 297
 SETI, 408–410
 SETI Institute, 408
 Shakespeare, William, 297
 Sheppard, Scott, 280
 Shoemaker, Eugene, 352
 Showalter, Mark, 296
 Sibérie, 81, 83, 84, 355
 Sierra Nevada, 74
 Sikhote-Alin, 355
 SIM Lite, 391
 Sinus Aestuum (Golfe Torride) (Lune), 99
 Sippar Sulcus (Ganymède), 234
 Sirenum Terra (Mars), 183
 Sirius, 112
 Sisyphé, 353
 SMART-1, 104, 111
 Smith, Bradford A., 379
 Smithsonian Astrophysical Observatory, 337
 Socorro, 336
 Solar and Heliospheric Observatory (see SOHO)
 Solar Dynamics Observatory, 35, 50
 Solar Terrestrial Relations Observatory (see STEREO)
 Soleil, 3, 23–51, 67, 82, 113, 114, 115, 116, 119, 133, 134, 140, 197, 247, 250, 266, 359, 363, 364, 372, 380,
 champ magnétique, 21, 28, 33, 36–40, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 363
 chromosphère, 28, 32–33, 34, 39
 composition, 26–27, 28, 250, 359
 couronne, 25, 28, 30, 31, 34–36, 37, 40, 42, 43, 45, 48, 49, 372
 cycle solaire, 32, 37–38, 40, 41, 44, 48, 303
 densité, 28, 29
 échauffement coronal, 33, 35–36, 42, 48
 éclipses du, 30–31
 éjections de masse coronale, 42, 43, 45, 46, 47, 49–50, 364
 éruptions, 25, 33, 35, 42, 43–47, 48
 faculae, 32, 38
 formation, 23
 fusion nucléaire, 26–27, 50
 granulation, 32
 inclinaison axiale, 24,
 intérieur, 27–29, 41
 masse, 7, 10
 photosphère, 32, 36, 37, 38, 43, 46, 47
 plage, 32–33, 38
 protubérances, 25, 30, 35,
 rayons gamma, 43
 rayons X, 25, 34, 40, 43, 45, 46, 47, 48, 49
 rotation, 10, 24, 247
 spectre, 25–26
 spicules, 33–34, 35
 stade de géante rouge, 22, 50–51, 407
 stade de naine blanche, 22, 51
 stade de naine noire, 51
 stade de nébuleuse planétaire, 22, 50
 taches solaires, 32, 37–41, 42, 47, 49
 taille, 4, 9, 24, 50–51
 température, 25, 28, 29, 34, 50
 solstices, 53–54, 69, 159, 197, 267, 282, 317
 sonde Akatsuki (voir Venus Climate Orbiter)
 sonde Chang'e, 111
 sonde Clementine, 94, 104, 105, 111
 sonde Convection, Rotation and planetary Transits (voir mission CoRoT)
 sonde FUSE, 381
 sonde Galileo, 91, 137, 214, 216, 217, 218, 220, 225, 226, 227, 228, 229, 231, 233, 234, 236, 239–240, 241, 344
 sonde Giotto, 365
 sonde Kepler, 379, 387, 390–391, 405
 sonde Lunar Orbiter, 93, 108
 sonde Ranger, 108
 sonde SOHO, 5, 25, 29, 31, 33, 34, 35, 36, 39, 42, 43, 45, 46, 49, 363, 372
 sonde STEREO, 49–50, 130, 364
 sonde TRMM, 63
 sonde Ulysses, 44–45, 363
 sonde VEGA, 141, 151, 365
 sonde WISE, 337, 356
 Sotra Facula (Titan), 270, 271
 Soudan, 359
 Southwest Research Institute, 341, 346
 Space Interferometry Mission, 391
 spicules (see Sun)
 Spitzer Space Telescope, 263, 264, 366, 368, 369, 375, 383, 384, 385, 394, 395, 405
 Stanford University, 204
 Steins, 340
 Stephano, 297
 Suisse, 379
 Sumer, 112
 supernova, 380
 Swedish Solar Telescope, 34
 Sycorax, 297
 Syène, 69
 Sylvia, 343, 345
 Syrtis Major (Mars), 187
 système CoRoT-7, 389, 392, 398, 399
 système d'Epsilon Eridani, 402–404
 système Gliese 581, 400, 401, 402, 407, 408, 410
 système Gliese 876, 388
 système HD 160691, 400
 système HR 8799, 387, 400, 404
 système V 391 Pegasi, 397
 tectonique, 69, 70–73, 76, 84, 128, 129, 143, 145, 147, 148–149, 152–153, 164–165, 171, 227, 271, 273, 275–277, 408
 Telescopio Nazionale Galileo, 386
 Telesto, 280
 Terre-Neuve, 63
 Terre, 4, 10, 12, 15, 17, 20, 24, 43, 45, 49, 50, 52–85, 88–89, 90, 95, 98, 99, 103, 106, 107, 108, 109, 110, 117, 121, 128, 133, 136, 138, 140, 141, 145, 147, 148, 157, 158, 174, 177, 181, 183, 186, 188, 189, 190, 193, 196, 199, 204, 210, 215, 217, 221, 225, 227, 229, 239, 251, 253, 266, 267, 269, 299, 306, 307, 316, 324, 328, 329, 335, 341, 346, 353, 354, 357, 359, 360, 363, 378, 380, 401, 402, 406, 407, 408

- âges glaciaires, 53, 66, 67, 407
 albédo, 56
 atmosphère, 10, 54, 56–61, 307, 408
 aurores, 49, 83–84, 253
 biosphère, 78–80
 ceintures de radiations, 84
 champ magnétique, 45, 49, 83–84, 103, 153, 221, 306
 cycle de l'eau, 77
 densité, 17, 67, 117
 déserts, 76–78, 357–358
 distance au Soleil, 6, 52
 El Niño, 62, 64–65
 équinoxes, 53, 54
 exosphère, 57, 59
 extinctions, 81, 83, 335, 351, 354, 355, 356
 forme, 4, 69, 82
 impacts, 80–81, 83, 351, 354–357
 inclinaison axiale, 10, 52–53, 66
 intérieur, 67–69, 70, 71, 73
 ionosphère, 43, 59
 La Niña, 64–65
 marées, 82
 montagnes, 69, 70, 148, 149, 151, 152
 mousson, 66
 nuages, 267
 océans, 61, 63–65, 70, 74, 86, 151, 229
 orbite, 15, 52, 53, 54, 66, 324, 407
 réchauffement global, 66–67
 rotation, 52, 82
 saisons, 53–54
 solstices, 53–54
 stratosphère, 57, 58, 79
 taille, 4, 9, 20, 24, 67, 69, 210, 217
 tectonique des plaques, 69, 70–73, 76, 84, 152, 153, 408
 température, 12, 53–56, 60, 63, 66–67, 76
 tempêtes, 56, 60–61, 63, 196
 tremblements de terre (séismes), 67–68, 71
 troposphère, 57–58, 138
 trou d'ozone, 58–59
 végétation, 56, 78–80
 vents, 59–60, 65, 66
 volcans, 56, 63, 70, 73–74, 128
 Terrestrial Planet Finder, 391–392
 Terrile, Richard, 379
 Téthys, 20, 254, 255, 263, 264, 265, 274, 275, 280
 Texas, 172, 359
 Thalassa, 310, 311
 Tharsis (Mars), 161, 164, 165, 166, 168, 170, 171, 176, 178, 191, 200
 Thébé, 238, 241
 Theia Mons (Vénus), 145
 Themis Regio (Vénus), 155
 Thémisto, 238
 théorie géocentrique, 4
 théorie héliocentrique, 6, 156
 Thera Macula (Europe), 229
 Thêta Orionis C, 381, 382, 383
 Thetis Regio (Vénus), 143, 149
 Thrace Macula (Europe), 229
 Tibet, 142
 Titan, 19, 20, 116, 251, 253, 154, 255, 261, 264–273, 277, 306, 307, 404
 Titania, 20, 282, 287, 289–290, 291, 297
 Tombaugh, Clyde, 314–315, 325
 Toro, 353
 Toutatis, 338, 341, 345, 353
 TRACE, 34
 tracteur gravitationnel, 357
 Tractus Catena (Mars), 165
 Tractus Fossae (Mars), 165
 Trans-atlantic Exoplanet Survey (TrES), 397
 transits, 6, 114, 133–135, 386–387, 394, 395, 398, 405
 TrES 4, 392, 397
 Trincolo, 297
 Triton, 20–21, 300, 306–309, 310, 325
 Tropical Rainfall Measuring Mission (voir TRMM)
 troyens (astéroïdes et lunes), 280, 336, 340, 350–351
 Tunguska, 354, 355–356
 Tvashtar Catena (Io), 225, 226
 Twin Peaks (Mars), 180
 Tyrrhena Patera (Mars), 167
 Ukraine, 410
 Ultraviolet Explorer, 366
 Umbriel, 20, 297, 290, 291, 297
 Union Astronomique Internationale (International Astronomical Union) (IAU), 8, 9, 282, 297, 323, 331, 354, 373
 unité astronomique (UA), 6, 336
 University of Arizona à Tucson, 379
 University of California à Berkeley, 379, 408, 409
 University of Hawaii Telescope, 326, 329
 Uranus Tholus (Mars), 165
 Uranus, 7, 9, 10, 12, 25, 116, 215, 220, 232, 244, 247, 281–297, 298, 299, 300, 301, 305, 311, 314, 316, 317, 323, 328, 335, 338, 369, 377, 398, 402, 404, 408
 anneaux, 282, 283, 284, 287, 293–295, 311
 atmosphère, 244, 282–284, 285, 288
 aurores, 286, 287, 289
 ceintures de radiations, 287
 champ magnétique, 247, 282, 286–287, 288, 289, 291, 305
 composition, 283, 284–286, 288
 découverte, 7, 25, 281
 densité, 285–286
 distance, 282
 formation, 285
 forme, 282
 inclinaison axiale, 10, 281, 282, 286
 intérieur, 220, 284–286, 287, 305
 lunes, 20, 282, 287–297, 311
 nuages, 283–284, 288
 orbite, 15, 18, 281, 299, 300, 314, 338
 rotation, 282, 288, 317
 saisons, 282, 287
 signaux radioélectriques, 286, 288
 sonde Voyager 2, 282, 283, 284, 287, 288–289, 293, 294, 295, 296
 taille, 9, 281–282
 température, 12, 281, 282–283, 286, 288, 301, 305
 tempêtes, 281, 283
 vents, 284, 285, 288, 301
 Uruk Sulcus (Ganymède), 231, 233
 US Air Force, 336
 US Naval Observatory, 323
 Utah, 372
 Utopia Planitia (Mars), 164, 166, 177, 195, 197
 Valhalla (Callisto), 231, 235, 236
 vallée Taurus-Littrow (Lune), 95, 100, 109, 110
 Valles Marineris (Mars), 161, 165, 168, 170–171, 187, 188
 VB 10b, 388

- vent solaire, 21, 42–43, 44, 45, 49, 83, 102, 110, 130, 153, 166, 199, 200–201, 221, 222, 251, 253, 287, 300, 334, 363, 364, 365
- Vénus, 3, 5, 6, 9, 10, 12, 15, 51, 53, 112, 113, 114, 133–155, 156, 239, 317, 361, 380, 386, 406
- activité volcanique, 136, 140, 141, 143, 144, 145–148, 149, 150, 151, 154, 155
- arachnoïdes, 144, 148
- atmosphère, 10, 135, 136–141, 147, 150, 155
- aurores, 154
- champ magnétique, 153–154
- chasmata, 149, 151
- chenaux, 147
- composition, 147, 148, 150, 155
- coronae, 143, 148, 149
- cratères d'impacts, 143, 146, 148
- densité, 141
- dunes, 143
- éclaircs, 150
- effet de goutte noire, 134–135
- effet de serre, 140–141
- formation, 141
- forme, 133
- inclinaison axiale, 10, 136
- intérieur, 141, 149
- ionosphère, 154
- luminosité, 133
- montagnes, 142, 149, 151
- novae, 148
- nuages, 135, 136–137, 138, 140, 141, 154
- océan, 140
- orbite, 15, 113, 133
- phases, 6, 133, 134, 136
- premières observations, 139
- rotation, 135–136, 144, 317
- taille, 9, 133
- tectonique, 143, 145, 147, 148–149, 152–153
- température, 12, 139, 140–141, 143, 145, 147, 150, 155
- tesserae, 141, 149
- topographie, 141, 142, 144, 155
- transits, 6, 133–135, 386
- vents, 135, 136, 138–139, 141, 143, 145, 150
- Venus Climate Orbiter, 154, 155
- Venus Express, 147, 154, 155
- Verona Rupes (Miranda), 291, 292
- Very Large Telescope (VLT), 341, 345, 381, 382
- Vesta, 7, 336, 337, 340, 345, 347–349, 350, 359
- Vésuve, 74
- vie dans d'autres systèmes planétaires, 391, 394, 399, 406–408
- vie dans le Système Solaire, 23, 78–81, 83, 156, 187, 189, 194, 200, 201, 202, 203–205, 229, 230, 266, 355, 359, 406, 407
- Virginie-Occidentale, 408
- Vladivostok, 355
- Voie Lactée, 22, 23–24, 377, 389, 390, 391, 400, 409, 410
- voile solaire, 357
- volcan Babbar Patera (Io), 226
- volcan Lei-Kung Fluctus (Io), 225
- volcan Loki (Io), 225–226
- volcan Pelé (Io), 224, 225, 226
- volcan Pillan Patera (Io), 225, 226
- volcan Pinatubo, 74, 75
- volcan Prometheus (Io), 226
- volcans, 56, 63, 70, 73–74, 93, 94, 96, 97, 99–100, 101, 128, 143, 144, 145–148, 164, 165, 167–168, 169, 224–228, 230, 237
- Ward, William, 19
- WASP-12b, 396–397
- WASP-14b, 393
- WASP-17b, 398
- Wegener, Alfred, 70
- Weywot, 330, 331
- Whipple, Fred, 365–366
- Wide Area Search for Planets (WASP), 398
- Wide Field Infrared Survey Explorer (see WISE spacecraft)
- Wildt, Rupert, 219, 249, 283, 285
- Witt, Gustav, 353
- Wolf, Max, 336
- Wolszcan, Aleksander, 379, 380
- Woomera, 343
- 1998 WW31, 333, 334
- Wyoming, 360
- Xanadu (Titan), 268
- XO-3, 393
- 2004 XR190, 332–333
- Yale University, 249
- yardangs, 77, 190, 191
- Yarkovsky, Ivan, 347
- Yellowstone National Park, 225
- Yohkoh, 48–49
- Young, John, 59, 102
- Yucatan, 351
- Zach, Franz Xavier von, 335
- zodiaque, 3, 5
- zone habitable, 12, 54, 401, 402, 405, 406–408

Bond

L'exploration du système solaire

Édition française revue et corrigée

Exploration du système solaire est la première traduction actualisée et corrigée en français d'Exploring the Solar System. Le traducteur a collaboré avec l'auteur pour apporter plus de 70 mises à jour dont 7 nouvelles images.

Beau comme un livre d'art

Les nombreuses illustrations en couleur montrent la vie quotidienne des mondes étranges et fascinants de notre petit coin de l'Univers. À partir des plus récentes découvertes de l'exploration du Système Solaire, Peter Bond offre un panorama exhaustif et exemplaire des planètes, lunes et autres petits corps en orbite autour du Soleil et des étoiles proches.

Une exploration surprenante

Le texte, riche mais limpide, est ponctué d'anecdotes sur les hasards des découvertes, les trésors d'ingéniosité pour dépanner des sondes spatiales à un milliard de kilomètres, l'opiniâtreté des astronomes exploitant le moindre indice pour découvrir bien plus que ce qu'ils imaginaient.

La planétologie à vivre comme un roman policier

Destiné aux lecteurs et étudiants ne possédant que peu ou pas de connaissances scientifiques, cet ouvrage très richement illustré prouve que la planétologie peut être racontée comme un roman policier, pratiquement sans mathématiques.

Entre mille autres exemples, on y apprend :

Où se placer pour admirer deux couchers de Soleil par jour sur Mercure, la planète de roche et de fer, brûlante d'un côté et congelée de l'autre ; comment détecter un océan d'eau salée sur une lune de Saturne, protégé de l'espace par une banquise qui, sans cesse, se fracture, laisse fuser des geysers, puis regèle ; pourquoi Vénus tourne à l'envers ; comment on déduit qu'une planète autour d'une autre étoile possède une surface de goudron percée de montagnes de graphite.

Ici, une banale analyse de météorite devient une enquête étonnante pour retrouver son astéroïde d'origine.

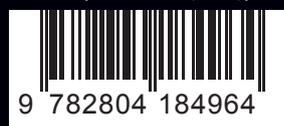
Traduction de l'édition anglaise

Peter Bond est l'auteur de 10 livres et de centaines d'articles en astronomie et sciences de la Terre. Membre de la Royal Astronomical Society et de la British Interplanetary Society, il a longtemps été consultant pour l'Agence Spatiale Européenne.

Nicolas Dupont-Bloch se consacre régulièrement à la vulgarisation en astronomie. Co-auteur de *À l'affût des étoiles*, ses photographies et contributions sont publiées dans *Astronomie Magazine* et *Lunar Picture Of the Day*.

- Un site compagnon : www.wiley.com/go/bond/solarsystem (en anglais)
- Plus de 70 mises à jour
- Des centaines d'illustrations en couleurs
- Des anecdotes sur la recherche en astronomie et l'astronautique
- Peter Bond explique les planètes avec le talent d'un auteur de romans policiers

ISBN : 978+2-8041-8496-4



BOND



de boeck

www.deboeck.com