

INTRO
UNE
INTRODUCTION
À
DUCC
TION

LES
PLANÈTES
les nôtres et
les autres

Thérèse Encrenaz

Préface de James Lequeux



Collection « Une Introduction à »
dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac

Les planètes

Les nôtres et les autres

De la Terre aux Exoplanètes

Thérèse Encrenaz

Préface de James Lequeux



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Imprimé en France.

© 2010, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf,
91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 978-2-7598-0444-3



Thérèse Encrenaz, née en 1946, est directrice de recherche au CNRS et travaille au LESIA (Laboratoire d'Études Spatiales et Instrumentales en Astrophysique) à l'Observatoire de Paris. Elle est spécialiste de l'étude des atmosphères planétaires, en particulier par sondage à distance, à partir d'observations depuis le sol ou les sondes spatiales. Elle a été impliquée dans les missions spatiales *Vega*, *Phobos*, *Galileo*, *Mars Express*, *Venus Express* et *Rosetta*. Elle est l'auteur d'environ 200 articles à comité de lecture et d'une dizaine d'ouvrages de vulgarisation. Elle a reçu la médaille d'argent du CNRS en 1998, la médaille Janssen de la Société Astronomique de France en 2007, et la médaille David Bates de l'Union Géophysique Européenne en 2010.

Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcmf 'igh'dncpm

Remerciements

Je tiens à remercier Fabienne Casoli et Athena Coustenis qui ont bien voulu relire ce manuscrit. Merci aussi à Marc Ollivier et à Athena pour leur aide dans la réalisation des figures. Enfin je remercie tous les collègues qui m'ont permis d'utiliser des documents leur appartenant pour la réalisation de cet ouvrage.

Vj k'ɪr ci g'kɔvɔpɔkɔpcɪŋ 'ɪghv'dɪɪpɪm

Table des matières

Remerciements	3
Préface	7
Introduction	9
1 Comment explorer les planètes ?	15
1.1 La Terre dans l'espace	15
1.2 L'observation au télescope	17
1.3 L'observation depuis l'espace	21
1.4 À la recherche des exoplanètes	28
2 La naissance des planètes	33
2.1 Une formation au sein d'un disque	33
2.2 Un scénario courant dans l'Univers	34
2.3 Quel est l'âge du système solaire ?	37
2.4 Les grandes étapes de la formation planétaire	40
2.5 Planètes telluriques et planètes géantes	42
2.6 Entre les planètes : comètes et astéroïdes	44
2.7 La famille de Pluton	46
3 À la découverte de la planète Terre	49
3.1 Roches et métaux : une structure interne différenciée	51
3.2 Une singularité terrestre : la tectonique des plaques	55
3.3 Formation des reliefs terrestres : le principe de l'isostasie	56
3.4 Notre milieu naturel : l'atmosphère terrestre	57
3.5 Le cycle de l'eau : une autre spécificité terrestre	62
3.6 Entre la Terre et l'espace, la magnétosphère	65
3.7 Une brève histoire du climat terrestre	66
3.8 Le couple Terre-Lune : un système double	69
3.9 La Terre, une planète unique.	71

4	Les voisines de la Terre	75
4.1	Au plus près du Soleil, Mercure	76
4.2	Une Lune qui ressemble à Mercure	79
4.3	Vénus, la fournaise	82
4.4	Mars, un monde désertique	88
4.5	Évolution comparative des planètes telluriques : le rôle de l'eau	98
5	Un peu plus loin, les planètes géantes	101
5.1	Deux classes de planètes géantes	102
5.2	De Jupiter à Neptune : trois décennies d'exploration	118
5.3	Les satellites extérieurs	125
6	Exoplanètes, les nouveaux mondes	133
6.1	Une longue quête semée d'échecs	134
6.2	Quinze ans plus tard, état des lieux	147
6.3	La formation des systèmes planétaires	157
6.4	Comment classer les exoplanètes ?	162
6.5	De la détection à la caractérisation	165
7	À la recherche de mondes habitables	169
7.1	Une nouvelle discipline, l'exobiologie	169
7.2	La vie ailleurs dans le système solaire ?	173
7.3	La vie dans les exoplanètes ?	181
7.4	À la recherche de mondes habités	183
	Annexe	185

Préface

Le livre de Thérèse Encrenaz est un des tout premiers d'une nouvelle série, « Introduction à . . . », destinée à faire le point sur une question scientifique dans un langage simple et accessible, loin du jargon des spécialistes. Cette question, qui est ici la nature, l'origine et l'évolution des planètes, est d'une actualité brûlante puisque nous connaissons maintenant près de 450 planètes autour d'étoiles proches, qui s'ajoutent aux huit modestes planètes de notre Système solaire.

L'astronomie planétaire est une science presque aussi ancienne que la civilisation, puisque déjà les Babyloniens et les Assyriens connaissaient le mouvement des planètes. À partir de Newton, la mécanique céleste, qui étudie et prédit ce mouvement, s'est développée pour atteindre un degré de raffinement qui en a fait « la reine des sciences exactes » ; les développements récents de cette discipline, dont on pensait pourtant qu'elle avait atteint son aboutissement, sont étonnants et spectaculaires. À l'inverse, faute de moyens d'observation appropriés, les progrès de l'étude physique des planètes ont été très lents après la moisson de découvertes faites au XVII^e siècle par Galilée, Huygens et Cassini. Il y a seulement un demi-siècle, on ne savait encore à peu près rien de la nature des planètes et de leur atmosphère, sans parler de leurs satellites. Puis, grâce aux grands télescopes, aux radiotélescopes, aux télescopes en orbite et aux sondes spatiales d'exploration directe, nos connaissances ont littéralement explosé. Une nouvelle discipline, la planétologie comparée, est née des découvertes, souvent inattendues et surprenantes, faites au cours de ces cinquante dernières années : elle nous offre des horizons passionnants sur l'origine et l'évolution des planètes et de notre Terre elle-même. De surcroît, la découverte des planètes extrasolaires, qui est un des grands triomphes de l'astronomie actuelle, ouvre une nouvelle dimension dans l'étude des planètes, et des perspectives prometteuses pour la recherche de la vie ailleurs que sur la Terre. Cependant, nos connaissances foisonnantes sont loin d'être définitives : la variété des planètes et des satellites, et celle des systèmes planétaires lointains où l'on rencontre des astres sans équivalent dans notre système solaire, posent bien des problèmes qui ne sont pas encore résolus.

Il pourrait paraître impossible de faire tenir en si peu de pages un exposé simple et complet d'une matière aussi complexe et aussi riche. C'est pourtant ce qu'a réussi

Thérèse Encrenaz, qui joint des dons pédagogiques remarquables à une profonde connaissance du sujet : il faut dire qu'elle est une des quelques scientifiques qui ont développé l'astronomie planétaire au point de placer notre pays au premier plan dans cette discipline. La richesse d'information et la profondeur des analyses que contient son livre sont si considérables qu'il passionnera non seulement le grand public cultivé, mais les spécialistes eux-mêmes. Son assimilation sera facile pour peu qu'on prenne le temps de lire attentivement un texte dense mais toujours très clair, illustré par de splendides images issues des sondes spatiales et des grands télescopes. Un sujet fondamental, magistralement traité, voilà qui devrait assurer à cet ouvrage un succès durable.

James LEQUEUX
Astronome émérite à l'Observatoire de Paris

Introduction

Qu'est-ce qu'une planète ? La question peut paraître étrange tant sa réponse paraît de prime abord aller de soi. Pourtant, la définition d'une planète a évolué au cours des siècles. Les Grecs avaient donné le nom de « planètes », c'est-à-dire d'« astres errants », aux objets célestes dont la position évoluait par rapport à celle des étoiles, dites « fixes », de la sphère céleste. Les Anciens ne connaissaient que les planètes visibles à l'œil nu, dont la traduction latine nous est restée : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne. Au XVI^e siècle, suite à la révolution copernicienne, les planètes furent définies comme les astres en orbite autour du Soleil, et leur liste inclut donc la Terre. Celle-ci s'allongea avec la découverte d'Uranus en 1781. La découverte des plus gros astéroïdes, au tout début du XIX^e siècle, bouscula quelque peu le paysage. Les astronomes comprirent vite qu'une nouvelle classe d'objets était découverte, celle des astéroïdes de la ceinture principale, situés entre Mars et Jupiter. Ces objets, appelés à être découverts en nombre toujours croissant, furent appelés « astéroïdes » ou « petites planètes », et ainsi exclus de la liste des planètes officielles. Après la découverte de Neptune en 1846, la liste des planètes du système solaire comprenait donc huit planètes.

Nouvelle surprise en 1930 : un objet lointain, en orbite autour du Soleil, est découvert au-delà de l'orbite de Neptune et baptisé Pluton. Tout naturellement, on lui attribue le statut de neuvième planète. Statut qui va durer jusqu'en 2006, date à laquelle l'Union astronomique internationale (UAI) décide de retirer à Pluton le label de planète. Que s'est-il passé entretemps ? C'est que, depuis 1992, suite à une longue traque menée à partir de télescopes de plus en plus puissants dédiés à ce programme, une nouvelle classe d'objets a été découverte : celle des objets transneptuniens (*Trans Neptunian Objects* ou TNOs). Ils sont situés au-delà de l'orbite de Neptune (d'où leur nom), dans une région du système solaire appelée ceinture de Kuiper. Leur existence était suspectée depuis plusieurs dizaines d'années, grâce aux travaux théoriques des astronomes K. Edgeworth et G. Kuiper ; elle explique, en particulier, l'origine des comètes à faible inclinaison et courte période. À mesure que les découvertes s'accumulent, il apparaît que Pluton n'est que l'un des membres les plus massifs de cette nouvelle famille, ce qui lui a valu d'être découvert bien avant les autres. Preuve de cette origine : de nombreux objets transneptuniens sont

peu à peu découverts avec la même période de révolution que Pluton. Or celle-ci se trouve être exactement une fois et demi celle de Neptune : on dit que Pluton est en résonance 3 : 2 avec Neptune ; il en est de même pour tous les nouveaux objets détectés avec la même période, désormais appelés « Plutinos ».

En 2003 est arrivé le coup de grâce pour Pluton : un objet trans-neptunien plus massif a été découvert, Éris. Il est plus éloigné du Soleil que Pluton, ce qui explique que sa détection n'ait pas été possible plus tôt. Désormais l'évidence s'impose : la ceinture de Kuiper contient des milliers d'objets dont la plupart restent à découvrir, et dont la masse, dans certains cas, doit dépasser celle de Pluton. Impossible, dès lors, de garder Pluton dans la liste des planètes « officielles » du système solaire, à moins de courir le risque d'avoir à allonger la liste à l'infini. C'est pourquoi, très logiquement, la liste des planètes a été ramenée, de manière sans doute définitive, aux huit planètes connues avant 1930. Les objets trans-neptuniens les plus massifs, quant à eux, se sont vu attribuer, avec l'astéroïde Cérès, le label de « planète naine » (voir encadré et annexe).

Nos huit planètes se divisent en deux classes bien distinctes, de natures très différentes. À proximité du Soleil, à moins de 2 unités astronomiques, ou UA (l'UA étant la distance moyenne Soleil-Terre), les quatre planètes telluriques se caractérisent par un diamètre relativement petit mais une forte densité ; on les appelle aussi les planètes rocheuses. À plus de 5 UA, on trouve les quatre géantes, très volumineuses mais de faible densité, aussi caractérisées par un système d'anneaux et un impressionnant cortège de satellites. Nous verrons plus loin comment cette différence fondamentale entre planètes telluriques et géantes trouve son explication à la lumière du scénario de formation du système solaire.

Nous n'en avons pourtant pas terminé avec la définition d'une planète. Celle-ci, intuitivement, paraissait simple ; avec la découverte des planètes extrasolaires, où « exoplanètes », ce n'est plus le cas. La détection, depuis 1995, de plusieurs centaines d'exoplanètes autour d'étoiles proches de type solaire a constitué pour les astronomes une véritable révolution. Le système solaire n'est plus un phénomène unique, même si les systèmes planétaires observés à ce jour sont très différents de celui que nous connaissons. Du coup, il nous faut revoir la notion de « système stellaire » et par conséquent de « planète ». La définition donnée par l'UAI en 2006 n'est pas très claire pour le profane (voir encadré). L'objet, en orbite autour d'une étoile, doit avoir fait le vide de la matière entourant sa trajectoire (ceci pour exclure les objets de type astéroïdes ou objets de Kuiper). Peut-être cette définition évoluera-t-elle encore dans le futur, à mesure que de nouveaux cas exotiques seront découverts. Essayons, quant à nous, de définir ce que sont, à nos yeux, les caractéristiques essentielles d'une planète, celles qui font sa spécificité.

Au centre d'un système planétaire, l'étoile. Celle-ci possède une source d'énergie thermonucléaire. À mesure que l'étoile évolue, elle transforme son hydrogène

(entièrement produit dans le Big Bang, dans ce que l'on appelle la synthèse primordiale) en hélium, puis se forment les éléments C, N et O, puis les éléments plus lourds jusqu'à certains métaux, en particulier le fer. Ce sont ces réactions nucléaires qui sont à l'origine du rayonnement du Soleil et des étoiles. Les planètes, en revanche, ne disposent pas de cette source d'énergie, parce que leur masse et la température de leur cœur ne sont pas suffisantes pour permettre en leur sein le démarrage du cycle thermonucléaire. Les modèles nous permettent de contraindre la masse critique en-deçà de laquelle le phénomène ne peut se produire : c'est environ 13 fois la masse de Jupiter. Si la masse de l'objet est supérieure à 80 fois la masse de Jupiter (soit 0,08 masse solaire), elle tombe dans le domaine des étoiles. Entre 13 et 80 fois la masse de Jupiter, l'objet appartient à une classe intermédiaire dite « naine brune ». Sa masse est suffisante pour le démarrage du premier cycle thermonucléaire qui transforme l'hydrogène en deutérium ; la température centrale est alors de quelques millions de degrés. Mais celle-ci n'est pas suffisante pour la suite du processus et la formation de l'hélium ; il faudrait une température de dix millions de degrés. Les naines brunes sont donc des étoiles « avortées » en quelque sorte, qui ont interrompu très tôt leur cycle thermonucléaire.

Dénuées de source thermonucléaire, les planètes n'en disposent pas moins d'autres sources d'énergie interne, mais celles-ci, en termes d'intensité, sont sans commune mesure. Il s'agit, pour les planètes géantes, de l'énergie gravitationnelle accumulée lors de la phase d'accrétion, qui est évacuée ensuite lors de la phase de contraction et de refroidissement de l'objet ; dans le cas des planètes telluriques, les éléments radioactifs contenus à l'intérieur fournissent une énergie interne qui peut se manifester sous forme de volcanisme ou de tectonique des plaques. Mais ces sources d'énergie ne font que s'ajouter à la source principale, qui provient de l'absorption et/ou la réflexion par la planète de l'énergie du Soleil ou, dans le cas des exoplanètes, de l'étoile autour de laquelle elles sont en orbite.

Au-delà des définitions d'experts, la première caractéristique d'une planète s'impose donc à nous : la lumière visible qu'elle émet ne provient pas de son intérieur ; c'est une fraction de la lumière de son astre central (Soleil ou étoile) qu'elle réfléchit, soit au niveau de sa surface (c'est le cas de la Terre et de Mars), soit au niveau d'une couche nuageuse (comme dans le cas de Vénus et des planètes géantes). Notons que, dans le cas des planètes du système solaire, seule une fraction de la lumière solaire – environ un tiers – est réfléchiée par la planète. L'autre partie est absorbée par la surface et l'atmosphère et contribue à leur chauffage. Comme tout objet dans l'Univers, les planètes ont un rayonnement propre (dit rayonnement du corps noir) associé à leur température ; celle-ci étant au maximum de quelques centaines de Kelvin¹, ce

¹ L'échelle des degrés Kelvin (notés K) se déduit de celle des degrés Celsius par une simple translation : $T(K) = T(^{\circ}C) + 273,3$.

rayonnement est maximum dans l'infrarouge. Il s'établit ainsi un équilibre entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement thermique correspondant à la température des couches externes de la planète ; entre aussi en ligne de compte, le cas échéant, la contribution de l'énergie interne (radioactivité des éléments du noyau pour les planètes rocheuses, contraction gravitationnelle pour les planètes géantes). Plus la planète est proche du Soleil, plus son chauffage est efficace ; sa température décroît à mesure que l'on s'éloigne vers l'extérieur du système solaire. Prenons maintenant le cas d'une exoplanète. Pour une étoile donnée, il existe une distance pour laquelle la température des couches extérieures de l'exoplanète sera comprise entre 0 et 100 °C, permettant ainsi à l'eau, si celle-ci est présente, d'être sous forme liquide. Et c'est ici que les exoplanètes nous intéressent le plus : si l'eau peut y être sous forme liquide, pourraient-elles ressembler à la Terre et abriter la vie ? C'est la grande question qui motive notre intérêt pour les planètes, les nôtres et les autres, les solaires et les extrasolaires.

Le but de cet ouvrage est de tenter de caractériser les planètes, à la fois dans leur globalité et dans leur spécificité. En partant de notre planète, la Terre, puis en passant en revue la diversité des planètes du système solaire, nous tenterons de montrer comment quelques paramètres essentiels (distance à l'étoile, masse, densité, obliquité, période de rotation . . .) déterminent leurs propriétés physico-chimiques (composition chimique, structure thermique et nuageuse, circulation atmosphérique, effets saisonniers, climat . . .). Nous serons ainsi mieux à même d'explorer le nouveau champ qui s'offre à nous, celui des exoplanètes, qui reste encore à explorer. À partir de l'expérience acquise auprès des planètes du système solaire, nous tenterons d'imaginer leur composition et leur structure, à partir des quelques paramètres dont nous disposons. Avec en tête, toujours, la quête d'une vie extraterrestre : celle-ci pourrait-elle exister ou avoir existé, dans le système solaire et au-delà ? Si certaines exoplanètes peuvent abriter la vie, comment repérer ces perles rares et comment mettre en évidence d'éventuelles formes de vie ? Cette quête du Graal constitue, pour toute la communauté scientifique et bien au-delà, un enjeu majeur pour le siècle à venir.

Encadré. La définition des planètes de l'UAI – Les résolutions de 2006.

RÉSOLUTION 5A

Les planètes et autres objets du système solaire, à l'exception des satellites, sont classés en trois catégories distinctes de la manière suivante :

- (1) Une « planète » est un objet céleste qui (a) est en orbite autour du Soleil, (b) a une masse suffisante pour être en équilibre hydrostatique (et donc acquérir une forme approximativement ronde), et (c) a éliminé la matière environnante autour de son orbite.
- (2) Une « planète naine » est un objet céleste qui (a) est en orbite autour du Soleil, (b) a une masse suffisante pour être en équilibre hydrostatique (et donc acquérir une forme approximativement ronde), (c) n'a pas éliminé la matière environnante autour de son orbite et (d) n'est pas un satellite.
- (3) Tous les autres objets, à l'exception des satellites, en orbite autour du Soleil, sont collectivement appelés « objets du système solaire ».

RÉSOLUTION 6A

De part la définition précédente, Pluto est une « planète naine » et est reconnu comme le prototype d'une nouvelle catégorie d'objets trans-neptuniens.

Selon les définitions énoncées ci-dessus, le système solaire compte donc huit planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. La liste des planètes naines compte actuellement quatre membres : le plus gros des astéroïdes, Cérès, et trois objets trans-neptuniens : Pluton, Eris et Makemake.

Vj k'ir ci g'kpvgpvkqpcmf 'ighv'dnc pm

Comment explorer les planètes ?

Si l'observation des planètes – ces « astres errants » – remonte à l'Antiquité, permettant ainsi l'étude de leur mouvement, leur exploration en tant qu'objets physiques débute au début du XVII^e siècle avec Galilée et sa lunette astronomique.

1 La Terre dans l'espace

Parmi les nombreuses conséquences de l'avènement de l'ère spatiale qui a marqué la seconde moitié du XX^e siècle, il en est une qui concerne la conception même de notre propre planète. Avec les premières images de la Terre vue de l'espace s'est imposé le concept de la Terre en tant que planète du système solaire ; ces images ont pu être comparées à celles des autres planètes telluriques, puis à celles des planètes géantes, elles aussi photographiées par des engins spatiaux dans les années 1970 et 1980. Ainsi est née la « planétologie comparative » visant à étudier globalement toutes les planètes du système solaire pour en faire émerger les similitudes et les différences.

Nous savons depuis plus de quatre siècles que la Terre tourne autour du Soleil. À l'exception de quelques précurseurs tels qu'Aristarque de Samos (310 – env. 230 av. J.-C.), les Anciens, et en particulier Aristote, plaçaient la Terre au centre de l'Univers. Pour rendre compte du mouvement particulier des planètes sur la sphère céleste et de cette conception géocentrique, ils devaient faire appel à un système géométrique complexe à base de mouvements circulaires ; le plus abouti fut celui de Ptolémée (II^e siècle ap. J.-C.), qui faisait appel à une combinaison incluant déférents et épicycles pour décrire les mouvements apparemment irréguliers de Mercure, Vénus et

Mars. Le système de Ptolémée resta en vigueur jusqu'à la révolution copernicienne du XVI^e siècle.

Reprenant les idées émises au siècle précédent par un autre précurseur, Nicolas de Cuse, Nicolas Copernic (1573-1543), dans un ouvrage posthume entré dans l'histoire, énonça les principes fondateurs du système héliocentrique : les planètes tournent toutes dans le même sens autour du Soleil ; les dimensions du système solaire sont négligeables en comparaison de la distance qui sépare le Soleil des étoiles voisines. La théorie de Copernic, mal accueillie au départ car en opposition avec le dogme religieux dominant de l'époque, s'imposa peu à peu grâce aux travaux ultérieurs de Kepler (1571-1630), Galilée (1564-1642) puis Newton (1642-1727). Johannes Kepler, poursuivant les observations de l'astronome Tycho Brahé dont il était l'élève, énonça les trois lois célèbres de Kepler qui décrivent le mouvement des planètes comme celui d'une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Galilée, premier astronome à utiliser la lunette qui depuis porte son nom, ouvrit l'ère de l'observation astronomique ; il découvrit notamment les cratères lunaires, les phases de Vénus et les quatre satellites qui gravitent autour de Jupiter, appelés depuis « galiléens ». Enfin Isaac Newton, en énonçant les lois de la gravitation universelle, confirma définitivement le système héliocentrique en lui apportant le support théorique qui lui faisait initialement défaut.

Le système solaire comprenait alors, en plus de la Terre, cinq planètes, toutes visibles à l'œil nu : les trois telluriques, Mercure, Vénus et Mars, et les deux géantes les plus proches et les plus brillantes, Jupiter et Saturne. Deux autres planètes géantes furent découvertes ultérieurement. On doit la première découverte, celle d'Uranus, en 1781, par William Herschel (1738-1822), à la construction de « grands » télescopes (dotés d'un miroir d'une quinzaine de centimètres de diamètre) qui améliorèrent sensiblement la limite de détection des astres. La seconde découverte illustre le succès grandissant de la mécanique céleste, capable de calculer avec une grande précision les orbites des planètes, en prenant en compte les perturbations gravitationnelles dues aux autres astres. À partir de l'analyse précise de la trajectoire d'Uranus, il apparut que celle-ci devait être perturbée par un corps plus éloigné qui restait à découvrir. C'est ainsi qu'en 1846, de manière simultanée, John Adams en Angleterre et Urbain le Verrier en France déterminèrent la position de cette huitième planète ; celle-ci fut immédiatement trouvée par Johannes Galle à la position annoncée par Le Verrier.

Voici notre système solaire doté de huit planètes. Ce n'est pourtant pas la fin de l'aventure : pendant des décennies, les astronomes vont rechercher sans succès une neuvième planète dont ils soupçonnent l'existence sur la base d'anomalies gravitationnelles inexplicables dans les orbites d'Uranus et de Neptune. Ces anomalies trouveront plus tard leur explication dans les incertitudes liées au calcul de ces trajectoires. En attendant, la traque planétaire débouchera en 1930 sur la découverte

de Pluton, aussitôt baptisé neuvième planète. Mais celle-ci n'est pas assez massive pour expliquer les prétendues anomalies gravitationnelles des planètes géantes, et la recherche de la fameuse « planète X » se poursuit. Dans les années 1940, Kenneth Edgeworth puis Gerard Kuiper postulent l'existence d'une famille d'objets au-delà de l'orbite de Neptune ; leur argument est basé sur la distribution de matière dans le disque protoplanétaire qui devrait naturellement se prolonger au-delà de 30 UA. Il faudra attendre 1992 pour que les premiers objets transneptuniens soient identifiés. Il apparaît alors que Pluton n'est que l'un des plus gros représentants de cette famille et l'Union astronomique internationale entérine officiellement ce constat en 2006, en retirant à Pluton le label de planète. Notre système planétaire est donc complet : par ordre de distance au Soleil, la Terre est la troisième planète ; elle est aussi la plus grande et la plus massive des planètes telluriques.

2 L'observation au télescope

2.1 Dessine-moi une planète. . .

Ainsi commence l'observation astronomique : les observateurs dessinent, le plus fidèlement possible, ce qu'ils découvrent à l'oculaire de leur instrument. Avec sa lunette, Galilée découvre, sans pouvoir l'expliquer, la présence d'« anses » autour de la planète Saturne, et leurs variations temporelles. L'explication du phénomène sera apportée en 1659 par Christiaan Huygens : il s'agit d'un système d'anneaux très mince qui apparaît depuis la Terre sous une inclinaison variable. Jean-Dominique Cassini, fondateur et premier directeur de l'Observatoire de Paris, découvre la division qui sépare les deux anneaux principaux et qui depuis porte son nom. Ses dessins de Jupiter sont d'une étonnante précision ; la structure en bandes et en zones y est présente de même que la Grande Tache Rouge, toujours présente plus de trois siècles plus tard ; Cassini peut ainsi en déduire la période de rotation de la planète, étonnamment courte pour un corps aussi grand et massif (moins de dix heures).

Pendant près de trois siècles, la cartographie des planètes sera réalisée à partir de l'observation visuelle et du dessin, avec un incontestable succès. Toutefois, on ne peut passer sous silence la limitation de la méthode associée aux possibles illusions d'optique qui affectent les observations à l'œil nu ; celle-ci est pleinement illustrée par la mésaventure des « canaux » de Mars. Dans les années 1870, l'astronome Schiaparelli annonce la découverte de structures linéaires à la surface de Mars, baptisées « canaux ». On sait à l'époque que l'atmosphère de Mars est très sèche, et certains astronomes attribuent à ces canaux une origine extraterrestre. Une vaste controverse s'ensuit au sein de la communauté des astronomes, opposant les partisans de la vie sur Mars aux sceptiques. L'arrivée des premières sondes spatiales

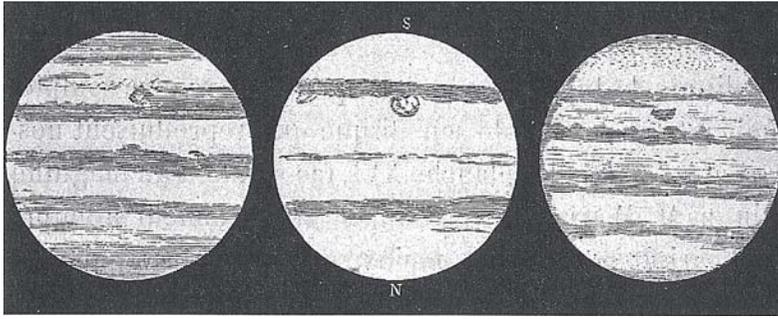


Figure 1.1. Les premiers dessins de Jupiter par J.-D. Cassini, premier directeur de l'Observatoire de Paris. La structure en zones et en bandes est déjà identifiée ainsi que la Grande Tache Rouge (sur le dessin du centre, en haut). (©L. de Selva, Tapabor).

martiennes, à la fin des années 1960, prouvera que les fameux « canaux » n'étaient qu'une illusion d'optique (voir chapitre 7, paragraphe 2.1).

2.2 De la plaque photographique à la caméra numérique

Les premières observations photographiques planétaires datent de la fin du XIX^e siècle. Pourtant, ce n'est que vers les années 1950 que cette nouvelle technique va se généraliser. Elle présente, par rapport à l'observation visuelle, un avantage considérable puisqu'elle permet à l'observateur de s'affranchir de toute subjectivité. La plaque, puis le film photographique constitueront l'outil de base de l'imagerie planétaire jusqu'à l'avènement des caméras numériques au début des années 1980. L'utilisation des caméras à transfert de charge, dites CCD, constitue pour l'observation astronomique une véritable révolution, comparable à celle de l'emploi des caméras digitales du commerce qui ont peu à peu détrôné la photographie argentique traditionnelle. Les caméras numériques sont plus simples d'emploi et plus fiables, leur sensibilité et leur dynamique sont accrues ; enfin et surtout, les données numérisées sont directement exploitables pour le traitement et l'analyse quantitative des données. Parmi les premiers succès astronomiques de la CCD, on peut citer la redécouverte de la Comète de Halley au Mont Palomar en 1982, à moins de dix secondes d'arc de sa position calculée ; la comète était alors à 11 UA du Soleil.

L'imagerie planétaire est essentielle pour étudier la morphologie des disques planétaires et son évolution temporelle, ainsi que pour déterminer précisément l'orbite des petits corps (comètes, satellites, astéroïdes). De plus, la plaque photographique puis la caméra CCD permettent d'accéder à un autre type de mesure : la photométrie. Il s'agit de déterminer précisément la quantité de lumière reçue en chaque point de l'image, ce que l'œil humain ne peut pas faire. Une application particulièrement

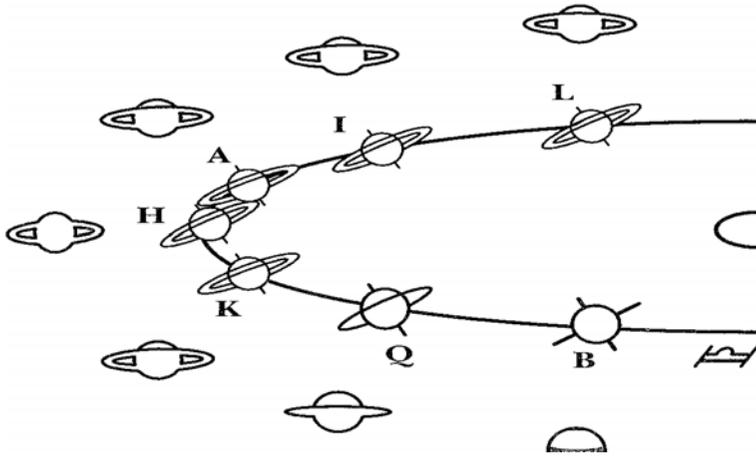


Figure 1.2. Ce dessin illustre la première interprétation correcte de la nature des anneaux de Saturne, apportée par Christiaan Huygens en 1659 dans « *Systema Saturnum* ». Il y montre que les « anses » observées par Galilée sont un anneau très mince vu depuis la Terre sous un angle qui varie avec le temps, en fonction de la position de la Terre par rapport au plan des anneaux (d'après C. Sagan, *Cosmos*, Mazarine, Paris, 1981).

intéressante de cette technique est l'observation des occultations stellaires, lorsque d'aventure un objet du système solaire passe devant une étoile. Si l'objet est une planète dotée d'une atmosphère, la baisse progressive du signal au début du transit, puis sa remontée à la fin de l'événement, nous renseignent sur les propriétés de la haute atmosphère. Dans le cas d'Uranus et de Neptune, ce type d'observation a permis la découverte d'anneaux, plus tard confirmée par la sonde spatiale *Voyager 2* et par le télescope spatial Hubble.

2.3 Des hautes énergies aux ondes radio

Comment déterminer la nature chimique des atmosphères et des surfaces planétaires ? Les images, aussi belles soient-elles, ne nous fournissent pas de réponse. Un outil s'impose : la spectroscopie, c'est-à-dire l'analyse du rayonnement en fonction de la longueur d'onde. Nous savons que la lumière visible peut être décomposée, à l'aide d'un prisme par exemple, en composantes recouvrant toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. De même, il est possible d'analyser le rayonnement lumineux, invisible à l'œil nu, provenant de longueurs d'onde plus élevées (ce sont les domaines ultraviolet, X et gamma) ou plus faibles (ce sont les domaines infrarouge, sub-millimétrique, millimétrique et radio). Pour chaque domaine de longueur d'onde, il faut disposer d'une instrumentation spécialisée incluant le détecteur, qui capte le signal, et le spectromètre, qui le disperse en fonction de la longueur d'onde. Les instruments modernes

allient aujourd'hui la capacité d'imagerie à celle de la spectroscopie : utilisant des récepteurs à deux dimensions, ils permettent, par technique de balayage par exemple, de construire des cartes à trois dimensions (deux dimensions spatiales et la troisième spectrale). L'avantage de cette technique est que, dans de nombreux cas, l'observation à différentes longueurs d'onde permet de sonder, dans les atmosphères planétaires, des niveaux d'altitude différents. Ainsi le rayonnement ultraviolet, capable de dissocier et d'ioniser les molécules, permet de sonder les régions atmosphériques élevées des planètes (leur stratosphère et leur thermosphère), tandis que le rayonnement infrarouge et millimétrique, de moindre énergie, sonde principalement les couches plus profondes (leur basse stratosphère et leur troposphère). On peut ainsi accéder à une cartographie 3D. Autre avantage majeur : la spectroscopie permet de déterminer la minéralogie d'une surface, ou l'abondance d'un composant atmosphérique. On peut ainsi réaliser des cartes minéralogiques ou une cartographie des abondances atmosphériques, qui sont autant d'outils précieux pour la compréhension du climat ou l'évolution de la planète.

2.4 Observer depuis la Terre

Bien entendu, les progrès réalisés dans le domaine de l'instrumentation astronomique doivent aussi beaucoup à l'augmentation de la taille des télescopes, dont les diamètres atteignent aujourd'hui la dizaine de mètres pour le miroir primaire. Utiliser un télescope de grande taille présente deux avantages : d'une part, le flux collecté est plus important et la mesure est donc plus sensible ; d'autre part, sa limite de diffraction¹ – c'est-à-dire sa capacité à distinguer deux points très rapprochés – est plus faible ; il est donc possible d'observer des détails plus fins. À titre d'exemple, un télescope de 2 m de diamètre (il s'agit du diamètre de son miroir primaire) a, dans le domaine visible, une limite de diffraction inférieure au dixième de seconde d'arc. Les diamètres apparents des planètes sont respectivement, en moyenne, de 40 et 15 secondes d'arc pour Jupiter et Saturne. Dans le cas de Vénus et de Mars, les valeurs varient fortement en fonction de leur distance à la Terre ; elles peuvent atteindre 60 et presque 20 secondes d'arc respectivement. On voit que des images d'une très grande précision pourraient être obtenues avec un télescope de la classe de 2 mètres si la qualité de l'image correspondait à la limite de diffraction. Malheureusement, la turbulence de l'atmosphère terrestre (liée au mouvement des masses d'air au-dessus du télescope) limite fortement la qualité des images : si l'atmosphère est stable, celle-ci est de l'ordre de 0,5 à 1 seconde d'arc (ce qui est le cas des meilleurs sites astronomiques, placés dans les zones désertiques), mais elle peut atteindre plu-

¹ La limite de diffraction d'un télescope est la plus petite distance angulaire détectable. Exprimée en seconde d'arc, elle est égale à $1,22 \lambda/5D$, λ étant la longueur d'onde en micromètres et D le diamètre du télescope en mètres.

sieurs secondes d'arc dans des conditions très instables. La qualité des images est ainsi dégradée d'un facteur supérieur à 10.

3 L'observation depuis l'espace

3.1 Observer en orbite terrestre

Voilà donc, pour les astronomes, une première raison d'aller dans l'espace : s'affranchir de la turbulence atmosphérique. C'est ce qu'a réalisé le télescope spatial Hubble (*Hubble Space Telescope*, HST), en orbite autour de la Terre depuis 1989. Sa caméra nous a transmis des images d'une qualité inégalée des disques de Mars, Jupiter et Saturne, ainsi que des anneaux d'Uranus. Mais le HST avait une autre raison de s'affranchir de l'atmosphère terrestre : c'était d'avoir accès à de nouveaux domaines de longueur d'onde, d'abord l'ultraviolet et plus tard l'infrarouge avec l'installation de nouveaux instruments.



Figure 1.3. La planète Mars photographiée par le HST (©NASA).

L'extension du domaine spectral constitue en effet à elle seule une raison majeure pour l'observation astronomique depuis l'espace (Fig. 1.4). En effet, certains gaz de l'atmosphère terrestre rendent l'atmosphère opaque à certaines longueurs d'onde. Il s'agit principalement de la vapeur d'eau, mais aussi, dans une moindre mesure, du gaz carbonique, du méthane, de l'ozone... Une fenêtre est épargnée, celle du

domaine visible, dont la longueur d'onde s'étend d'environ 0,4 à 0,8 micromètre ; c'est celui pour lequel l'œil humain est optimisé. À plus courte longueur d'onde, du côté des hautes énergies, l'atmosphère est complètement opaque aux rayonnements UV, X et γ . Le rayonnement UV est absorbé par la couche d'ozone qui préserve ainsi la vie sur les continents. Dans le domaine infrarouge, quelques fenêtres existent et sont utilisées pour les observations au sol ; c'est aussi le cas du domaine millimétrique et radio. Cependant, même dans ces fenêtres, il est extrêmement difficile de rechercher, dans les atmosphères planétaires, des gaz présents dans l'atmosphère terrestre.

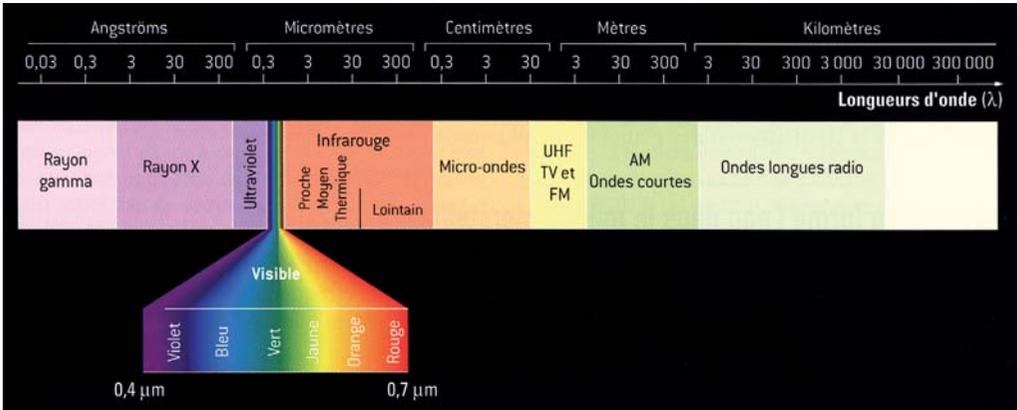


Figure 1.4. Décomposition de la lumière selon le spectre électromagnétique (© T. Encrenaz, À la recherche de l'eau dans l'Univers, Belin 2004).

Le domaine infrarouge est particulièrement adapté à l'étude des atmosphères planétaires, car les molécules qui y sont présentes ont des signatures spectrales facilement identifiables, associées à leurs mouvements de vibration et de rotation. De plus, le rayonnement thermique des planètes est maximum dans ce domaine spectral. C'est pourquoi la planétologie a tiré grand profit de la mission ISO (*Infrared Space Observatory*) lancée par l'Agence Spatiale européenne (ESA) en 1995 et en opération en orbite terrestre jusqu'en 1998. Nous verrons que les spectromètres infrarouges de ISO ont réalisé des découvertes de premier plan concernant les planètes géantes.

3.2 S'approcher d'une planète. . .

Certes, l'observation en orbite terrestre apporte des avantages certains par rapport aux observations depuis la Terre. Cependant, l'objet de l'étude est encore bien loin. Pour étudier de plus près la nature d'une planète, la meilleure méthode consiste à s'en approcher. C'est toute la motivation de la stratégie d'exploration planétaire qui s'est mise en place au cours des cinquante dernières années. Mettons de côté



Figure 1.5. Le *Very Large Telescope* de l'ESO à Cerro Paranal, Chili (© ESO).

l'exploration habitée de la Lune dont les objectifs n'étaient pas déterminés en premier lieu par la science (même si celle-ci a su en profiter, en particulier pour la datation du système solaire). L'exploration spatiale planétaire s'est déroulée suivant plusieurs étapes : d'abord les survols, ensuite les missions en orbite, ensuite les atterrisseurs (« *landers* ») et les sondes de descente, enfin les engins de surface mobiles (« *rovers* »). Nous sommes actuellement arrivés à ce stade. La prochaine étape sera le retour d'échantillons planétaires qui pourrait, dans le cas de Mars, se situer à l'horizon des années 2025.

Précisons que ce programme ne concerne que l'exploration robotique planétaire. Certains pensent, à plus long terme, à une mission habitée vers Mars ou, pourquoi pas, à aller plus loin... Les motivations pour une telle entreprise sont multiples, mais il est important de mentionner que la justification scientifique est loin d'être une raison majeure. Prenons l'exemple du retour des échantillons lunaires : les sondes robotisées soviétiques l'ont réalisé en même temps que les missions Apollo, et l'envoi d'un homme sur la Lune n'était pas indispensable à la réussite du programme scientifique. Sur les planètes du système solaire et autour d'elles, les sondes robotisées ont réalisé des performances extrêmes, rendues possible par la haute technologie et la miniaturisation des instruments embarqués.

Commencée dans les années 1960, l'exploration des planètes telluriques a été un long cheminement semé d'embûches. Dans le cas de Mars, en particulier, les échecs

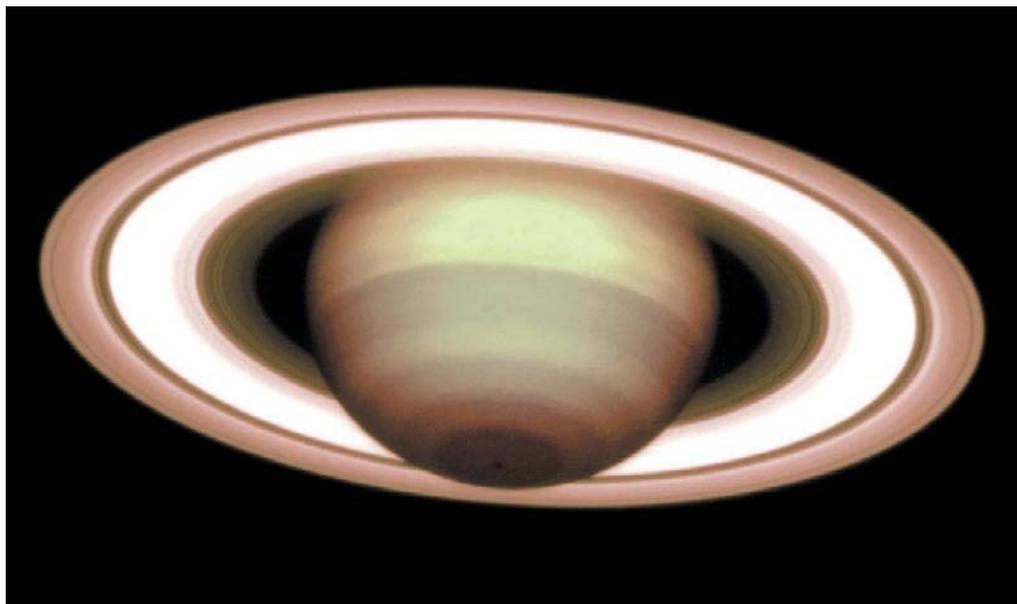


Figure 1.6. La planète Saturne observée par l'instrument d'optique adaptative NAOS-CONICA au VLT à l'ESO, Chili (©ESO).

ont été multiples. Dans les premiers temps, certaines sondes ont manqué leur cible, d'autres se sont écrasées sur le sol de la planète. Plus tard, d'autres échecs sont intervenus soit au décollage de la fusée, soit à l'arrivée en orbite planétaire, soit au moment de la descente au sol. L'exploration spatiale est une école de patience ! En dépit de ces difficultés, des succès spectaculaires ont été obtenus. Dans le cas de Mars, on retiendra, dans les années 1970, les missions américaines *Mariner 9* et surtout *Viking*. Avec le recul, la mission *Viking*, constituée de deux orbiteurs et de deux *landers* identiques, apparaît comme une prouesse technologique exceptionnelle ; elle a aussi apporté une mine de résultats qui servent de référence encore aujourd'hui. Après une interruption de près de dix ans, l'exploration de Mars a repris tout à la fin du XX^e siècle avec du côté NASA le rover *Pathfinder*, les sondes *Mars Global Surveyor* et *Mars Odyssey*, puis les rovers *Spirit* et *Opportunity*, puis le *lander Phoenix*, puis l'orbiteur *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO). L'ESA, qui est entrée dans l'exploration planétaire dès 1986 avec le survol de la comète de Halley par la mission *Giotto*, effectue un retour réussi avec la mission *Mars Express*, lancée en 2003. D'autres projets martiens de rovers et d'orbiteurs sont à l'étude pour la décennie à venir, avec du côté américain le rover *Mars Science Laboratory*, puis l'orbiteur *MAVEN*, et du côté européen le projet *ExoMars*.

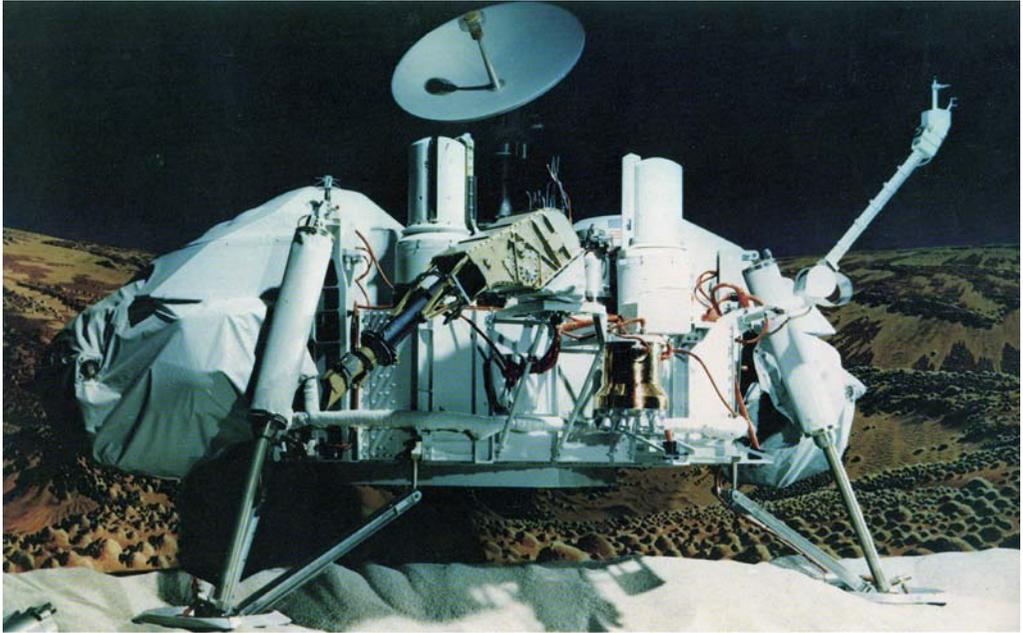


Figure 1.7. Le module de descente de la mission Viking (©NASA).

La planète Vénus a été la cible privilégiée de l'Union Soviétique avec les missions *Venera*, équipées d'orbiteurs et de sondes de descente. C'est seulement la quatrième sonde de la série *Venera* qui a pu pénétrer l'atmosphère très dense et toxique de Vénus. Les premières images de la surface de Vénus nous ont été envoyées en 1982 par la sonde *Venera 13*. Parallèlement, la NASA a entrepris l'exploration de Vénus avec *Pioneer Venus* puis, au début des années 1990, l'orbiteur *Magellan* équipé d'un radar qui a réalisé une cartographie complète de la surface. En 2005, l'ESA envoie la sonde *Venus Express* en orbite autour de la planète, pour une étude approfondie de son effet de serre et de ses phénomènes atmosphériques. Quant à Mercure, difficilement observable du fait de sa proximité au Soleil, elle a été observée dans les années 1970 par la sonde américaine *Mariner 10* à l'occasion de plusieurs survols. L'exploration de Mercure par la NASA a repris en 2008 avec la sonde *Messenger* et sera suivie par la mission européenne *Bepi Colombo* à l'horizon 2018.

Du côté des planètes géantes, la NASA a connu d'emblée le succès dans les années 1970 avec le survol de Jupiter et Saturne par les sondes *Pioneer 10* et *Pioneer 11*. Ensuite la mission *Voyager*, constituée de deux sondes identiques, a connu un succès historique avec le survol successif des quatre planètes géantes entre 1979 et 1989 ; les données de cette mission servent encore de référence aujourd'hui et, dans le cas d'Uranus et de Neptune, le seront encore pour au moins une décennie. Avec la



Figure 1.8. Le volcan martien Olympus Mons photographié par l'orbiteur Viking (©NASA).

mission *Galileo*, lancée en 1989 et destinée à l'étude du système de Jupiter, la NASA est passé à l'étape de l'exploration de longue durée avec un orbiteur et une sonde de descente. La sonde a pénétré en 1995 dans l'atmosphère de Jupiter et l'orbiteur a survolé de manière répétée les satellites galiléens jusqu'en 2003. Enfin, dernier chapitre de la saga, la mission *Cassini-Huygens*, menée conjointement par l'ESA et la NASA, explore le système de Saturne depuis 2004. La sonde européenne *Huygens* s'est posé avec succès sur le sol de Titan le 14 janvier 2005. Quant à l'orbiteur de *Cassini*, opéré par la NASA, il continuera d'explorer Saturne, ses anneaux et ses satellites, jusqu'à l'horizon 2017... D'autres ambitieux projets sont à l'étude, impliquant à la fois la NASA, l'ESA et d'autres agences, pour poursuivre l'exploration des systèmes de Jupiter et de Saturne.

Qu'avons-nous appris de l'exploration planétaire ? Une multitude d'informations concernant les surfaces, la structure et la composition des atmosphères, les magnétosphères... tout ceci à partir de deux types d'instruments. Les sondes de survol et les orbiteurs sont équipés d'instruments de sondage à distance, comme les télescopes au sol : il s'agit de caméras, de photomètres et de spectromètres opérant à différentes longueurs d'onde (X, gamma, UV, IR). Les *landers* et les *rovers* sont dotés d'instruments « in situ » pour l'analyse d'échantillons prélevés sur place ; on trouve

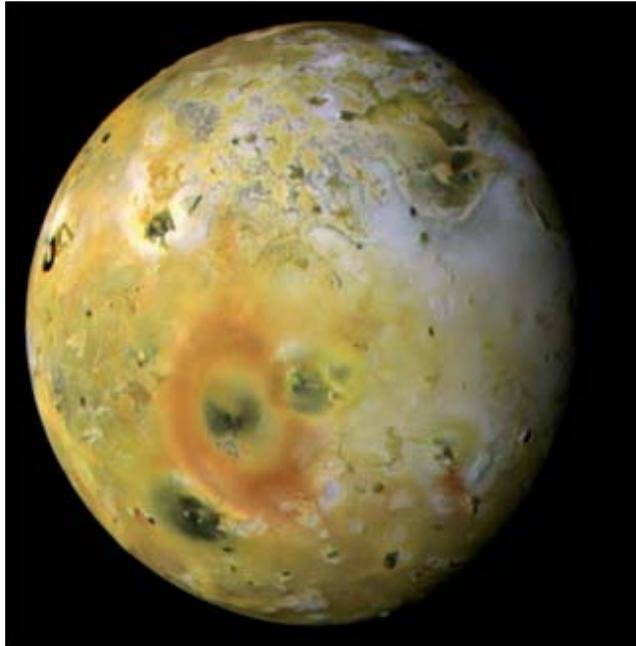


Figure 1.9. Le satellite Io photographié par la sonde *Galileo* (©NASA).

en particulier des chromatographes pour l'étude des nuages et des spectromètres de masse, pour les espèces chimiques neutres et ionisées. À cette palette s'ajoutent des instruments de physique des plasmas : récepteurs radio et plasma, analyseurs de particules, magnétomètres ainsi que d'autres équipements plus spécifiques. Une condition essentielle : la fiabilité, car une fois que la sonde a décollé, il n'est plus question d'intervenir, sauf par télémétrie. Une autre contrainte forte : la masse, qui doit être aussi limitée que possible. De multiples efforts ont été réalisés pour miniaturiser au maximum les instruments spatiaux. Après plusieurs décennies d'exploration spatiale robotique, une conclusion saute aux yeux et force l'admiration : l'extraordinaire fiabilité de l'instrumentation spatiale. Il arrive – malheureusement – qu'une mission soit perdue au décollage de la fusée, mais il est exceptionnel qu'un instrument tombe en panne au cours d'une mission.

Après ce bref tour d'horizon, un dernier commentaire s'impose. L'exploration spatiale planétaire rend-elle inutile l'exploration au télescope ? Absolument pas, et ceci pour plusieurs raisons. La première est que les missions spatiales, du fait de leur coût, restent limitées ; à titre d'exemple, il n'y a pas actuellement de perspective d'une nouvelle exploration spatiale pour Uranus et Neptune ; les observations au sol restent donc indispensables. Deuxième raison, l'instrumentation spatiale est

nécessairement simple car elle doit être fiable et légère ; les instruments utilisés au sol peuvent être beaucoup plus sophistiqués et bénéficier des derniers développements technologiques. Enfin, les observations au sol permettent une surveillance continue des phénomènes sur de longues échelles de temps ; elles permettent aussi d'obtenir des images globales et instantanées des disques planétaires, ce que les missions spatiales ne peuvent pas faire du fait de leur proximité à la planète. Toutes ces raisons montrent que l'astronomie au sol et l'astronomie spatiale sont complémentaires, et pas seulement dans le domaine de la planétologie. L'étude des planètes utilise pleinement les moyens au sol les plus performants, aussi bien dans les domaines optique et infrarouge, avec en particulier le VLT, que dans le domaine millimétrique avec l'IRAM. Elle tirera le plus grand bénéfice de l'utilisation des grands instruments du futur, avec en optique et infrarouge l'ELT et, dans les domaines millimétrique et submillimétrique, le réseau d'antennes ALMA, actuellement en construction au Chili.

4 À la recherche des exoplanètes

Existe-t-il, en dehors du système solaire, des planètes analogues à la nôtre, susceptibles elles aussi d'abriter la vie ? Cette question, nos ancêtres se la sont posée depuis l'Antiquité, et les progrès de l'astronomie du XX^e siècle n'ont fait que confirmer sa pertinence : le Soleil n'est qu'une étoile très banale de notre Galaxie qui en compte plus de cent milliards. Pourquoi le système solaire serait-il unique ? Cette simple question a suscité, depuis les dernières décennies, de multiples programmes de recherche. Les astronomes ont vite compris qu'une détection directe était extrêmement difficile, la lumière issue de l'hypothétique exoplanète étant noyée dans celle de son étoile-hôte. Ils ont d'abord privilégié l'astrométrie précise des étoiles, espérant mettre en évidence de petits mouvements périodiques qui seraient la signature de la présence d'un compagnon, à la manière de ce qui est observé dans le cas de systèmes stellaires doubles ; c'est ainsi que le mathématicien allemand Friedrich Bessel fut le premier, au XIX^e siècle, à découvrir un compagnon autour de l'étoile Sirius. Cependant, les techniques astrométriques n'avaient pas la précision requise pour la détection d'exoplanètes (voir chapitre 6, paragraphe 1.1).

Entre-temps, de grands progrès ont été réalisés dans notre connaissance des premières étapes de la formation des étoiles et des planètes. On sait aujourd'hui que les étoiles se forment suite à l'effondrement en un disque d'un fragment de nuage interstellaire en rotation. Au centre, la matière se concentre pour former l'étoile, et des planètes peuvent se former au sein du disque (voir chapitre 6, paragraphe 3). Raison de plus pour rechercher les fameuses exoplanètes... Depuis la première découverte, en 1983, d'un disque de poussières autour de l'étoile Vega par le satellite *IRAS* (*InfraRed Astronomical Satellite*), les astronomes ont accumulé les observations

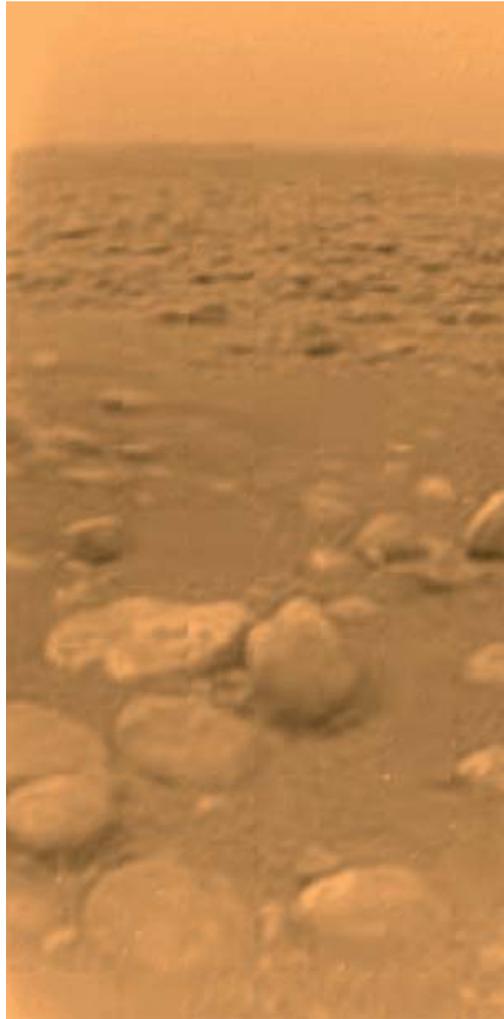


Figure 1.10. La surface de Titan, vue par la sonde *Huygens* le 14 janvier 2005 (©ESA).

de disques autour d'étoiles jeunes, qu'il s'agisse de disques protoplanétaires ou de disques de débris, plus anciens (voir chapitre 2, paragraphe 2). Ce sont surtout les observations infrarouges et millimétriques, réalisées depuis le sol par interférométrie et aussi grâce au satellite infrarouge américain *Spitzer*, qui ont permis d'étudier les propriétés physiques et géométriques de ces disques, et aussi de déterminer leur âge.

En 1992, nouvelle surprise : l'astronome polonais Alexander Wolszczan annonce la découverte de deux planètes autour d'une étoile très particulière, le pulsar PSR 1257+12. Les pulsars sont des étoiles arrivées au tout dernier stade de leur vie.

Suite à une sorte d'implosion, elles se sont transformées en étoiles à neutrons, de densité extrêmement élevée, en rotation très rapide sur elles-mêmes. C'est le rayonnement radio périodique qu'elles émettent qui permet leur identification, et ce sont les perturbations apportées à cette courbe par d'éventuelles planètes qui permettent de détecter celles-ci (voir chapitre 6, paragraphe 1.2). Voici donc les deux premières exoplanètes découvertes, mais reconnaissons qu'il est difficile d'imaginer la présence de vie dans des milieux aussi extrêmes.

D'autres campagnes d'observation se concentrent, en revanche, sur des étoiles de type solaire. La méthode mise en avant est cette fois la vélocimétrie, c'est-à-dire la mesure du mouvement de l'étoile-hôte par rapport à la Terre. Cette méthode, basée sur la mesure de l'effet Doppler (c'est-à-dire le décalage spectral) des raies observées dans le spectre de l'étoile, a l'avantage d'être bien plus facile à mettre en œuvre du sol que l'astrométrie, mais elle repose sur le même principe : observer de petites perturbations du mouvement d'une étoile dues à la présence d'une planète. Et, après des années de patientes recherches, l'annonce de la première découverte, en 1995, fait l'effet d'une bombe : Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève, ont découvert, à l'Observatoire de Haute Provence, la première exoplanète en orbite autour d'une étoile de type solaire (voir chapitre 6, paragraphe 1.3).

Pendant toute une décennie, la vélocimétrie sera la méthode privilégiée de détection des exoplanètes. Elle peut être menée depuis le sol avec des télescopes de taille modeste, de 2 à 4 mètres de diamètre ; elle nécessite seulement un spectromètre très performant fonctionnant sous vide, permettant des mesures extrêmement stables. Plus l'exoplanète est massive, plus elle perturbe le mouvement de l'étoile-hôte et sa détection en est facilitée d'autant. À titre d'exemple, la présence de Jupiter induit sur le Soleil un mouvement périodique de 12 m/s ; or les instruments les plus performants atteignent aujourd'hui la limite du m/s. Mi-2009, plus de 350 exoplanètes ont été détectées, la plupart par vélocimétrie.

D'autres méthodes vont cependant voir le jour et s'avérer complémentaires. La première est la mesure des transits planétaires (voir chapitre 6, paragraphe 1.4). Elle consiste à mesurer avec précision la lumière émise par les étoiles d'un champ en fonction du temps. Si d'aventure une étoile est dotée d'une planète dont l'orbite est telle que, vue de la Terre, elle passe devant l'étoile, la lumière de l'étoile est partiellement occultée pendant le passage ; l'observation répétée du phénomène permet de détecter la planète sans ambiguïté et aussi de déterminer son rayon. Cette information, couplée à celle de la vélocimétrie, permet alors de déterminer la densité de l'objet. Une planète comme Jupiter, passant devant le Soleil ou son équivalent, induit une baisse de 1 % du flux stellaire ; une telle variation est mesurable depuis la Terre. En revanche, le passage de la Terre, environ dix fois plus petite que Jupiter, ne diminue le flux solaire que d'un facteur 10^{-4} . Cette fluctuation est trop faible pour être mesurée depuis le sol ; la mesure nécessite une stabilité qui ne peut être

atteinte que dans l'espace. C'est pourquoi, en décembre 2006, la mission spatiale française *CoRoT* a été lancée par le CNES avec pour objectif affiché la détection des « super-Terres » ; plusieurs exoplanètes ont déjà été découvertes, dont certaines très exotiques, et des dizaines d'autres sont en phase de confirmation. La découverte du zoo des planètes extrasolaires ne fait que commencer et de nouvelles surprises nous attendent. . .

Mentionnons aussi que même l'imagerie directe, qui paraissait hors de portée il y a dix ans, devient aujourd'hui possible lorsque l'on considère non pas des étoiles de type solaire mais des étoiles naines, moins brillantes, pour lesquelles le contraste entre le flux planétaire et le flux stellaire est plus favorable (voir chapitre 6, paragraphe 2.8.5). Enfin, une méthode originale dite de « microlentille gravitationnelle » (voir chapitre 6, paragraphe 1.4) a permis elle aussi la détection de quelques exoplanètes, dont un objet très peu massif. Il s'agit de la recherche systématique de phénomènes d'occultation qui se produisent lorsqu'une étoile dotée d'une planète, vue de la Terre, passe devant un objet éloigné. Le temps du passage, le flux de l'objet éloigné se trouve magnifié par un effet de lentille selon une courbe caractéristique et, si une planète est présente, la courbe de lumière montre une signature caractéristique.

Face à l'explosion de ce nouveau champ de recherche, les projets instrumentaux abondent. Au sol, on développe les projets d'imagerie directe qui reposent sur l'optique adaptative et la coronagraphie ; c'est le cas en particulier de l'instrument SPHERE qui équipera le *Very Large Telescope* de l'ESO. Un instrument similaire, EPICS, est déjà à l'étude pour son successeur, l'*Extremely Large Telescope* (ELT), dont le diamètre atteindra la quarantaine de mètres. Des projets spatiaux sont aussi à l'étude du côté de l'ESA comme de la NASA. Les analyses privilégient d'une part l'imagerie coronographique directe dans le domaine de l'infrarouge proche, d'autre part l'interférométrie dans l'infrarouge thermique, ceci pour diminuer le contraste de luminosité entre la planète et son étoile. La recherche et la caractérisation des exoplanètes sera, avec l'exploration planétaire et la cosmologie, l'un des grands enjeux de l'astronomie spatiale du XXI^e siècle.

Vj ku' r ci g' k p v g p v k q p c m (' i g h ' d r e p m

2

La naissance des planètes

Comment s'est formée la planète Terre, et quel est son âge ? La question est posée depuis l'Antiquité puisque l'on trouve des propositions de solution dans toutes les mythologies ainsi que dans la Bible ; une datation avait été ainsi établie par les docteurs de l'Église, qui fixaient l'âge de la Terre à quelque milliers d'années. Avec l'avènement du système héliocentrique, la question a naturellement évolué vers celle de l'origine et de l'âge du système solaire dans son ensemble.

1 Une formation au sein d'un disque

À la fin du XVII^e siècle, les mouvements et les orbites des six planètes alors identifiées – il manque encore Uranus et Neptune – sont bien connues. Un fait observationnel saute aux yeux : les planètes tournent toutes dans le même sens autour du Soleil, sur des orbites quasiment coplanaires, circulaires et concentriques. Ce simple constat est à l'origine de l'intuition prémonitoire du philosophe Immanuel Kant (1724-1804), puis, quelques décennies plus tard, du physicien Pierre Simon de Laplace (1749-1827) : le système solaire est né d'une nébuleuse qui, sous l'effet de sa gravité, s'est effondrée en un disque. La rotation, s'accélégrant, a entraîné l'effondrement de la nébuleuse en un disque. Au centre, la matière s'est concentrée pour former le futur Soleil ; au sein du disque, à partir d'inhomogénéités, la matière s'est agglomérée localement pour grossir de plus en plus et finalement former les planètes.

Ce qui frappe dans l'énoncé de ce simple scénario, proposé il y a plus de trois siècles, c'est son extraordinaire actualité. Il décrit en effet dans ses grandes lignes le scénario généralement accepté actuellement pour la formation du système solaire. À la base de ce scénario, les mêmes observations simples : les orbites de toutes

les planètes sont proches du plan de l'orbite terrestre, appelé plan de l'écliptique ; elles sont toutes quasi-circulaires avec au centre le Soleil. Mais à l'époque, ce scénario n'est pas validé par le calcul ni par une modélisation physique, et il est loin de recueillir l'unanimité d'aujourd'hui. D'autres modèles verront le jour, depuis la théorie des vortex proposé par René Descartes au XVII^e siècle, la théorie du filament de matière arraché au Soleil par le passage d'une étoile voisine, voire d'une comète : on ignore alors l'origine de ces objets mystérieux dont la nature sera dévoilée par l'astronome Edmund Halley en 1849. Toujours est-il que jusqu'au milieu du XX^e siècle, le modèle de la nébuleuse primitive ne fait pas l'unanimité. Une énigme, en particulier, suscite la perplexité. La rotation du Soleil est de 27 jours, alors que selon le modèle de Laplace, par conservation du moment cinétique, elle devrait être beaucoup plus rapide. Dans le système solaire, près de 99 % du moment cinétique est contenu dans les planètes géantes, surtout Jupiter. Comment le Soleil a-t-il pu transférer son moment cinétique aux planètes ? Le simple modèle d'effondrement de Laplace ne permet pas de répondre à cette question. Nous savons aujourd'hui que ce transfert de moment cinétique s'est opéré par interaction avec le disque protoplanétaire, très turbulent, et aussi par le champ magnétique solaire et l'éjection de matière sous forme de vent solaire.

2 Un scénario courant dans l'Univers

À partir des années 1980, un autre phénomène observationnel a été peu à peu révélé : il s'agit de l'existence de disques autour d'étoiles jeunes. Auparavant, on ne connaissait les disques circumstellaires qu'autour d'étoiles évoluées. C'est en 1983 que le satellite IRAS (*InfraRed Astronomical Satellite*) a créé la surprise en détectant un excès de lumière infrarouge autour de l'étoile Vega. Le rayonnement infrarouge lointain sonde la matière froide, ce qui a permis de l'attribuer à un disque de poussières autour de l'étoile. Vega n'est pas à proprement parler une étoile jeune, mais, de type spectral A, elle est plus jeune que le Soleil. Le disque en question n'est pas un disque protoplanétaire mais un disque plus âgé dit « disque de débris ». On pense aujourd'hui qu'il est le résidu laissé par l'étoile après sa phase d'accrétion ou par les planètes après leur formation. Avec l'avènement de l'astronomie infrarouge, de nombreux autres exemples de disques de débris ont été découverts.

Autre étape décisive : la découverte, par coronographie depuis le sol, en 1984, d'un disque autour de l'étoile Beta Pictoris. Là encore, il s'agit d'un disque de débris mais l'étoile est cette fois beaucoup plus jeune. Sur cette étoile, des chercheurs français, autour de A. Vidal-Madjar, vont faire une découverte retentissante : ils observent, dans le spectre de l'étoile, des phénomènes transitoires qu'ils attribuent sans ambiguïté à la chute d'objets tombant devant l'étoile, à la manière des comètes



Figure 2.1. Le satellite infrarouge IRAS (*InfraRed Astronomical Satellite*). Lancé en 1983, il a réalisé, depuis l'orbite terrestre, un sondage profond du ciel à quatre longueurs d'onde de l'infrarouge moyen et lointain (12, 25, 60 et 100 microns) (©NASA/NIVR/SERC).

proches du Soleil qui sont happées par celui-ci. Très récemment, une planète a été découverte à proximité de l'étoile. L'analogie avec un système planétaire commence à se faire jour.

Parallèlement à ces recherches, le scénario de formation stellaire s'affine peu à peu, grâce à l'étude d'objets très jeunes à différents stades de leur évolution : objets de Herbig-Haro, caractérisés par la présence d'un puissant jet bipolaire ; étoiles de types T-Tauri ou Fu-Orionis, caractérisés par des vents stellaires extrêmement violents. Des disques protoplanétaires sont mis en évidence par les observations du HST ; leurs propriétés sont étudiées par les interféromètres millimétriques ainsi que par le satellite infrarouge américain *Spitzer*. Accompagnant ces observations, la modélisation numérique du phénomène d'accrétion permet de rendre compte des premières étapes de la formation d'une étoile : celle-ci commence avec le fractionnement, au sein du milieu interstellaire, d'un nuage moléculaire froid dont la densité augmente à mesure qu'il se contracte. Au-delà d'une masse critique, ce nuage s'effondre en un disque perpendiculaire à son axe de rotation ; on retrouve le schéma de Kant et Laplace. Les modèles d'aujourd'hui prennent en compte le champ magnétique de la proto-étoile ainsi que la forte turbulence régnant au sein du disque

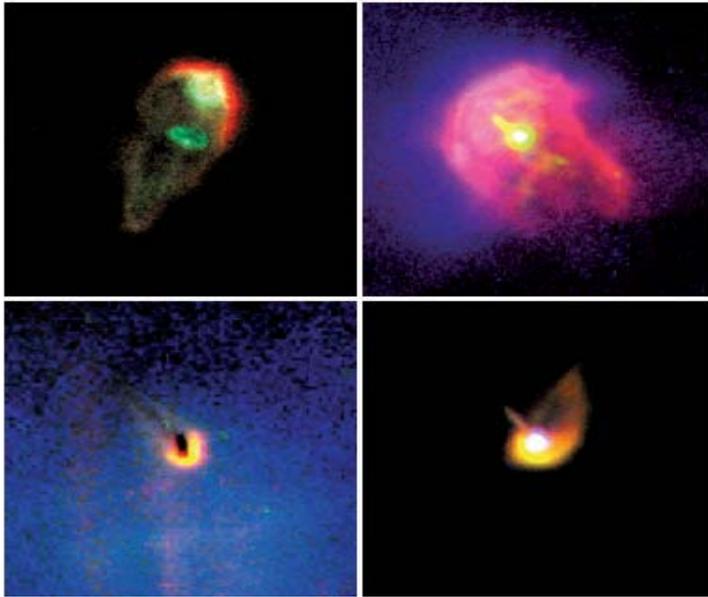


Figure 2.2. Exemples de disques protoplanétaires observés par la caméra du HST (©NASA).

protoplanétaire ; ils sont maintenant ainsi capables de rendre compte en détail des observations.

Ainsi, à l'aube du XXI^e siècle, les astronomes ont acquis la conviction que le modèle de formation stellaire par effondrement d'un nuage en rotation, suivi de la formation d'un disque perpendiculaire à son axe de rotation, est un phénomène courant dans l'Univers. Les planètes, si elles existent, doivent se former au sein de ce disque selon des processus qui restent à mieux définir. Un fait est certain : la durée de vie de ces disques est courte, de l'ordre d'une dizaine de millions d'années, voire moins ; c'est en effet l'âge maximum des disques protoplanétaires observés, et c'est aussi l'âge des étoiles T-Tauri. Or celles-ci, grâce à leur vent stellaire très violent, se débarrassent des poussières et du gaz contenus dans le disque en l'éjectant vers l'extérieur. Si des planètes se forment au sein du disque, elles doivent donc se former très vite, en moins d'une dizaine de millions d'années. Dans ce scénario, que sont les disques de débris ? Ils pourraient être l'équivalent de la ceinture de Kuiper dans notre système solaire. Il existe cependant une différence de taille : les disques de débris sont comparativement beaucoup plus massifs que la ceinture de Kuiper. Il existe une explication possible : la ceinture de Kuiper aurait pu être majoritairement éjectée du système solaire suite à un mouvement de migration modéré des planètes géantes – un scénario bâti à partir de simulations numériques sur lequel nous reviendrons (voir chapitre 5, paragraphe 1.3).

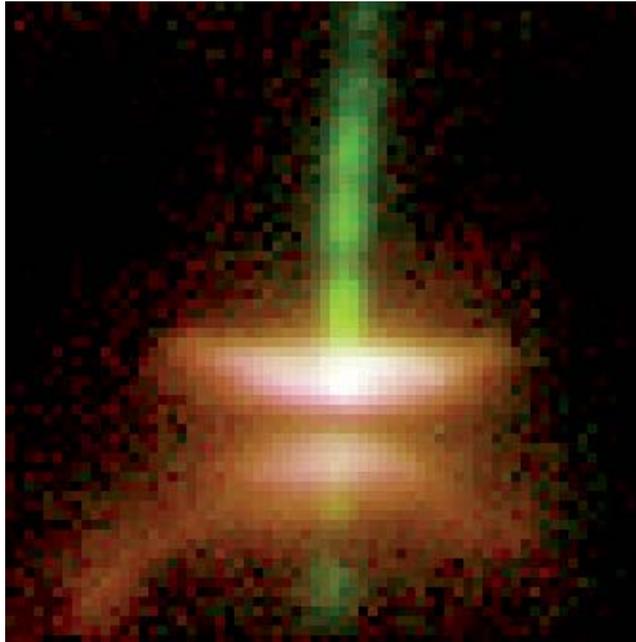


Figure 2.3. Disque protoplanétaire observé avec le HST : l'objet de Herbig-Haro HH30. Le disque, de couleur sombre, apparaît en absorption devant la lumière de l'étoile naissante. On voit, perpendiculairement au plan du disque un violent jet bipolaire (ici représenté en vert) (©NASA).

3 Quel est l'âge du système solaire ?

Pour comprendre l'origine et l'histoire des objets du système solaire, une chronologie est essentielle. Nous la connaissons depuis les années 1970, suite à l'analyse des échantillons lunaires rapportés par les astronautes des missions Apollo ainsi que par les missions robotisées soviétiques.

3.1 La chronologie des échantillons lunaires

Comment peut-on dater un échantillon de roche, terrestre ou extraterrestre ? Par l'analyse de l'abondance des espèces radiogéniques, comparées à celle de leur isotope stable. Plusieurs couples d'éléments se prêtent à l'exercice, avec des durées de vie qui vont du milliard d'années au million d'années, voire moins dans certains cas. Pour la datation du système solaire, on utilise en particulier le couple rubidium-strontium qui a une durée de vie de 47 milliards d'années. L'analyse des échantillons lunaires a permis de montrer que la Lune, comme la Terre et les corps parents des météorites,

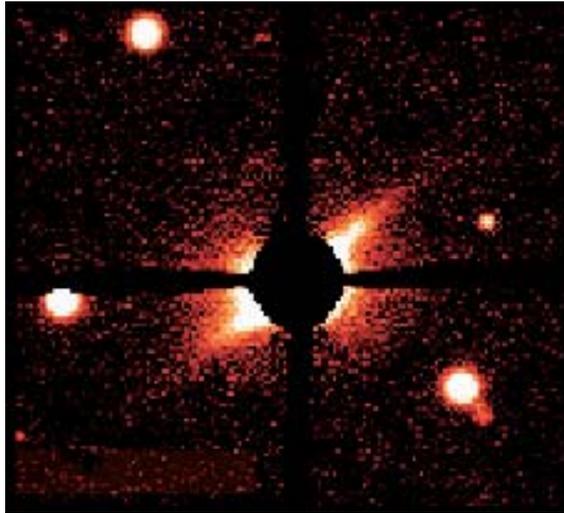


Figure 2.4. Disque de débris autour de l'étoile AU Mic (©P. Kalas, 2004).

se sont formées simultanément, à dix millions d'années près, il y a 4,56 milliards d'années.

3.2 Quel est l'âge du Soleil ?

Cet âge est aussi celui du Soleil, étoile de type G parvenue aujourd'hui à la moitié de sa vie. Depuis de nombreuses décennies, la physique solaire, par l'étude d'étoiles de types et d'âges variés, a réussi à reconstruire avec une grande précision des scénarios de vie et de mort des étoiles, le paramètre essentiel étant leur masse initiale. Plus l'étoile est massive, plus sa durée de vie est courte ; il s'agit d'abord des étoiles O et B, puis des étoiles A comme Vega. Le Soleil, étoile « moyenne » a une durée de vie programmée de dix milliards d'années. Les naines, de type M, ont une durée de vie plus longue. L'évolution des différents types d'étoiles est représenté dans un diagramme célèbre dit de Hertzsprung-Russell (Fig. 2.5) du nom de ses inventeurs, qui trace la luminosité absolue des étoiles en fonction de leur température (c'est-à-dire de leur type spectral). Le Soleil est actuellement dans la phase où il transforme son hydrogène en hélium, ce qui va encore se poursuivre pendant plusieurs milliards d'années. Quand ce processus sera achevé, la nucléosynthèse se poursuivra avec la synthèse des éléments plus lourds que sont le carbone, l'azote et l'oxygène. Le Soleil deviendra alors une géante rouge. Son rayon va se dilater jusqu'à atteindre l'orbite de la Terre. . . Celle-ci se sera bien sûr volatilisée au cours de cette transformation, ainsi que toutes les planètes et aussi, à plus grande distance, la ceinture de Kuiper.

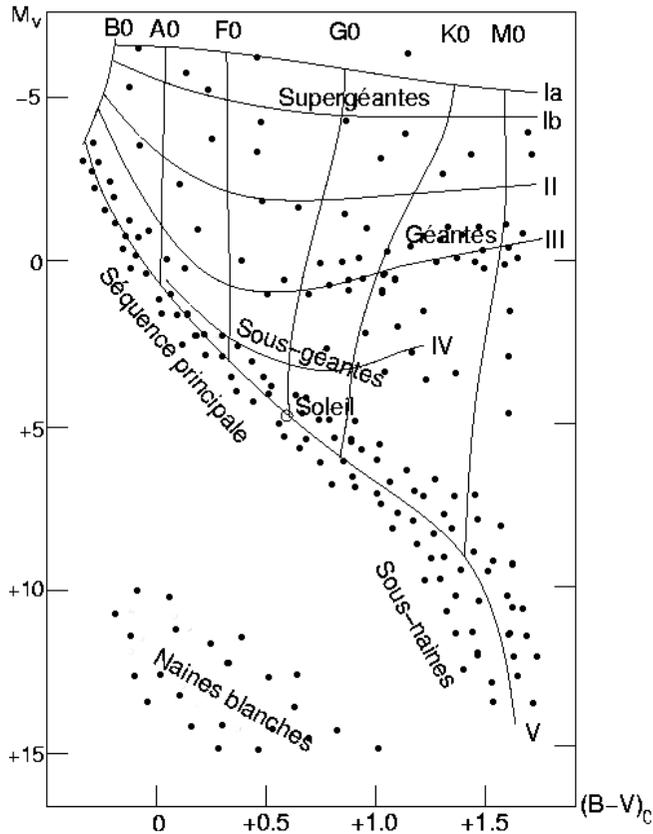


Figure 2.5. Le diagramme Hertzsprung-Russell de classification des étoiles. L'échelle en ordonnée indique la magnitude M_v de l'étoile. La quantité $(B-V)_c$ est portée en abscisse ; elle indique la différence de magnitude de l'étoile dans les bandes (B) et (V) du spectre optique et est une fonction décroissante de la température.

La sublimation de celle-ci devrait produire au passage une grande émission de vapeur d'eau, puisque l'eau (actuellement sous forme de glace) est le constituant majeur des objets du système solaire extérieur ; il semble d'ailleurs qu'un tel excès de vapeur d'eau ait déjà été observé sur certaines étoiles en fin de vie, ce qui pourrait être la signature de ce phénomène. Quant au Soleil, il terminera son existence sous forme de naine blanche, de très petite taille mais de densité extrêmement élevée. Voilà ce qu'est l'avenir qui nous attend... dans quelque cinq milliards d'années !

3.3 Datation des surfaces par comptage de cratères

Il existe une autre méthode pour dater les objets du système solaire, celle qui consiste à compter les cratères d'impact provenant de bombardements météoritiques à la

surface de ces objets. Ceux qui sont dénués d'atmosphère, comme la Lune, Mercure ou les satellites extérieurs, sont les plus faciles à dater, car les traces d'impact n'ont subi aucune altération depuis leur formation. La planète Mars, dont l'atmosphère est très ténue, se prête aussi à l'exercice. Plus une surface est ancienne, plus elle est cratérisée. Grâce à la datation absolue des terrains lunaires réalisée à partir de la collecte des échantillons, il a été possible de tracer la courbe indiquant l'âge d'une surface en fonction de son taux de cratères d'impact. Cette courbe illustre que dans les premières étapes de l'histoire du système solaire, le bombardement météoritique a été beaucoup plus intense qu'aujourd'hui, ce qui est en cohérence avec ce que l'on sait des premiers épisodes agités de la vie de l'étoile et du disque. Plus précisément, il apparaît qu'un maximum de bombardement météoritique a eu lieu environ 800 millions d'années après la formation planétaire ; nous n'avons pas d'information sur ce qui a pu se passer avant cette date. Ce pic de bombardement tardif trouve lui aussi son explication dans les modèles de simulation numérique (voir chapitre 5, paragraphe 1.3).

Quoi qu'il en soit, le comptage des cratères permet de déterminer l'âge des surfaces. On sait ainsi que celles de la Lune et de Mercure sont très anciennes, ce qui indique l'absence d'activité interne, ou son arrêt très tôt dans l'histoire de ces objets. Venus, en revanche, est dotée d'une surface recouverte de volcans et relativement jeune : le volcanisme a remodelé sa surface au cours des derniers 500 millions d'années. Mars présente deux hémisphères très différents : au sud, des terrains très cratérisés et donc plus anciens ; au nord, des plaines dénuées de cratères, recouvertes plus récemment par des laves volcaniques. Dans le cas de la Terre, le fond des océans est renouvelé sur une échelle de 200 millions d'années par la tectonique des plaques. La croûte continentale, en revanche, présente des régions vieilles de plus de 4 milliards d'années (voir chapitre 3, paragraphe 2).

4 Les grandes étapes de la formation planétaire

Reprenons notre scénario de formation planétaire. Nous sommes en présence d'un disque constitué essentiellement de gaz, dont le plus abondant est de loin l'hydrogène, et aussi de poussières. Celles-ci sont constituées de silicates, d'oxydes métalliques et autres composés réfractaires. Si la température est suffisamment basse (c'est-à-dire inférieure à environ 180 K), les glaces (H_2O , NH_3 , CH_4 , CO_2 ...) sont aussi présentes et dominant en masse la composition de la phase solide. Les particules solides tendent à se regrouper dans le plan médian du disque, alors que le disque de gaz est plus épais. Particules et molécules gazeuses sont toutes entraînées dans un mouvement de rotation autour du jeune Soleil ; les mouvements relatifs entre les particules, situées sur des orbites voisines dotées de vitesses orbitales



Figure 2.6. Exemple de surface très ancienne : le sol cratérisé de Mercure, ici photographié par la sonde *Messenger* (©NASA).

comparables, sont donc faibles. Les particules entrent fréquemment en collision et se collent entre elles par collision électrostatique : on peut ainsi former, par coagulation, des grains de quelques centimètres. L'observation des particules interplanétaires collectées dans la stratosphère suggère que ces particules se coagulent selon une structure fractale. Selon les simulations numériques, cette première phase pourrait être achevée en quelques milliers d'années, un temps très court au regard de la formation planétaire. Les modèles, en revanche, peinent à reproduire la phase suivante qui, à partir d'embryons centimétriques, va permettre la formation des « planétésimaux » de taille kilométrique. Le mécanisme à l'œuvre dans ce processus est encore mal compris. Quelle qu'en soit la raison, certains planétésimaux de taille kilométrique (un très petit nombre d'entre eux) peuvent ensuite croître grâce à l'interaction gravitationnelle qui favorise collisions, destruction et accrétion. Les simulations numériques

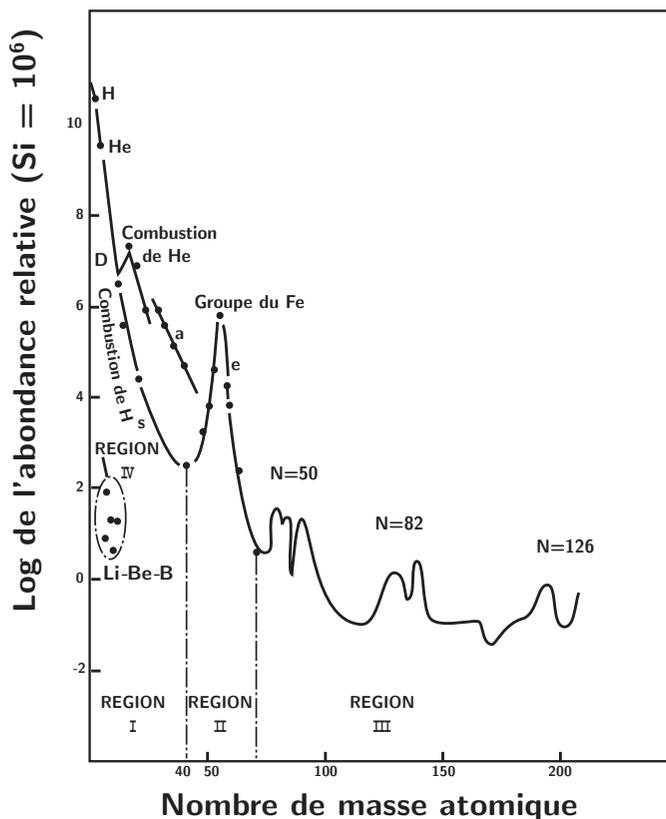


Figure 2.7. Abondances cosmiques des éléments. D'après H. Reeves, J. de Phys., 1969.

montrent qu'au terme de ce scénario dominé par les collisions multiples, un très petit nombre de corps émerge, au terme de quelques millions d'années. Ces protoplanètes vont elles aussi entrer en collision, comme en témoignent les impacts géants observés à la surface de Mercure, de la Lune ou des satellites extérieurs. Le système solaire actuel est le résultat de ce jeu de billard géant. . . Nous verrons que ce scénario est aussi privilégié pour la formation des exoplanètes (voir chapitre 6, paragraphe 3.2).

5 Planètes telluriques et planètes géantes

Les planètes se forment, nous l'avons vu, à partir de particules solides. Leur taux de croissance et leur composition va donc dépendre de la composition des particules solides disponibles au moment de l'accrétion. Or cette composition dépend de manière critique de la température du milieu.

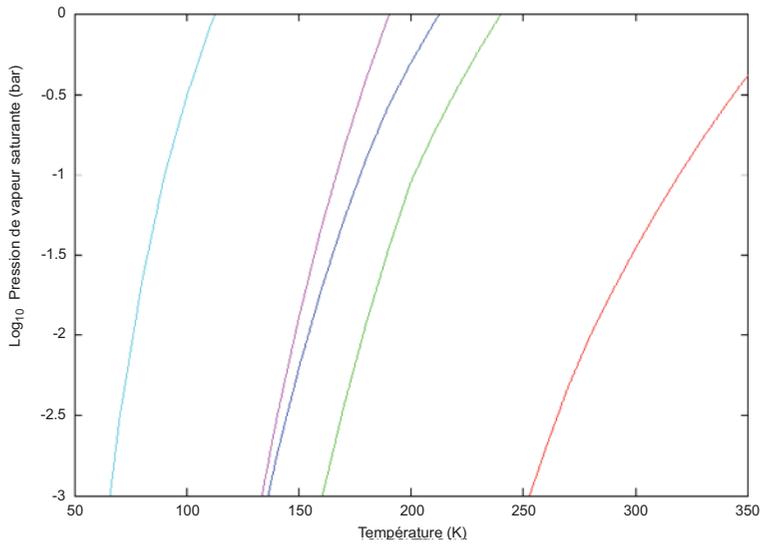


Figure 2.8.

sous forme solide. Comme ils sont peu abondants, les planètes formées à partir de leur embryons sont de masse et de rayon limités ; la Terre est la plus grosse d'entre elles. En revanche, elle sont denses : ce sont les planètes rocheuses, aussi appelées telluriques. L'atmosphère qui les entoure ne constitue qu'une infime fraction de leur masse totale.

En revanche, à de plus grandes distances du Soleil, la température est suffisamment basse pour que les molécules soient sous forme de glace. La quantité de masse solide disponible dans le disque protosolaire est alors suffisante pour que les noyaux atteignent une masse d'environ dix masses terrestres. Les modèles théoriques montrent alors que leur champ de gravité est suffisant pour attirer la matière environnante. Or celle-ci est surtout constituée d'hydrogène et d'hélium. L'effondrement de ce gaz sur le noyau de glace conduit à la formation de planètes à la fois très volumineuses et peu denses : ce sont les planètes géantes.

Où se situe la ligne de démarcation entre ces deux classes de planètes ? C'est la frontière au-delà de laquelle les molécules hydrogénées passent de l'état de vapeur à celui de glace. Parmi ces molécules, l'eau joue un rôle prédominant. D'une part, c'est la molécule la plus abondante, du fait des abondances cosmiques élevées de l'hydrogène et de l'oxygène. D'autre part, lorsque la température décroît, la molécule d'eau est la première à condenser, bien avant les autres (voir Fig. 2.8). C'est donc la condensation de l'eau qui marque la limite de la frontière entre planètes telluriques et géantes ; c'est ce que l'on appelle la « ligne des glaces ».

Où se situe la ligne des glaces ? Aujourd'hui, la limite de condensation de l'eau se situe aux environs de 2 UA. Au moment de la formation des planètes, la température du disque protoplanétaire était plus élevée. On estime que la ligne des glaces devait se situer entre 4 et 5 UA. Ceci explique que Jupiter, la planète géante la plus proche du Soleil, aujourd'hui située à 5,2 UA, soit aussi la plus massive : formée juste au-delà de la ligne des glaces, elle a pu bénéficier d'un réservoir considérable de glace pour la formation de son noyau.

6 Entre les planètes : comètes et astéroïdes

Comment expliquer le vide qui existe entre Mars, la plus éloignée des planètes telluriques, et Jupiter, la plus proche des géantes ? Dès le XVIII^e siècle, les astronomes Titius et Bode ont observé que les rayons orbitaux des planètes connues à l'époque obéissaient à une progression géométrique, selon la formule $r = 0,4 + 0,3 \times 2^n$, n prenant la valeur $-\infty$ pour Mercure, 0 pour Vénus, 1 pour la Terre, 2 pour Mars, 4 pour Jupiter, 5 pour Saturne. Ils avaient donc noté qu'il manquait une planète correspondant à $n = 3$. Depuis, la loi de Titius-Bode, moins bien suivie dans le cas d'Uranus et de Neptune, s'est trouvée invalidée par les travaux de simulation



Figure 2.9. La comète Hale-Bopp. Particulièrement brillante et volumineuse, cette comète nouvelle est apparue en 1997 (© cliché M. de Muizon).

numérique, et on ne lui reconnaît plus de signification physique. Il n'empêche que le vide entre Mars et Jupiter est bien réel. Quelle en est la raison ?

On connaît la réponse à cette question depuis le début du XIX^e siècle, avec la découverte des premiers astéroïdes. Après Cérès, Pallas, Junon et Vesta, des centaines d'autres objets ont été découverts à des distances du Soleil voisines de 2,7 UA ; ce sont de petits corps rocheux dont le diamètre est de quelques centaines de kilomètres qui peuplent la ceinture principale des astéroïdes. D'autres populations d'astéroïdes ont aussi été découvertes, certaines plus proches de la Terre, d'autres au-delà de l'orbite de Jupiter. On en a répertorié aujourd'hui plus de 20 000.

Quelle est l'origine des astéroïdes de la ceinture principale ? On pense aujourd'hui que ce sont les vestiges de planétésimaux qui n'ont pu s'accréter en une planète à cause du puissant champ de gravité de leur voisine Jupiter, la plus massive des planètes géantes.

Formées au-delà de l'orbite de Jupiter, les comètes sont aussi des planétésimaux, cette fois glacés, qui ont été laissés pour compte dans la formation planétaire. Leur taille moyenne n'excède pas la dizaine de kilomètres. Situées sur des trajectoires très elliptiques, elles peuvent occasionnellement s'approcher du Soleil et de la Terre. Leur surface s'échauffe alors sous l'effet du rayonnement solaire et la glace se sublime, entraînant un nuage de poussière qui forme la chevelure (ou « coma ») et la queue. Celle-ci peut revêtir dans le ciel un aspect très spectaculaire (ce fut le cas, par exemple, de Hale Bopp en 1997). Ces apparitions imprévues furent la cause de maintes terreurs et superstitions au cours de l'histoire, jusqu'à ce que l'astronome anglais Edmund Halley apporte, en 1859, l'explication du phénomène.

Les comètes semblent provenir de deux « réservoirs » distincts, que l'on peut reconnaître à partir de leurs caractéristiques orbitales. Au niveau des orbites d'Uranus

et de Neptune, après la formation de celles-ci, les planétésimaux résiduels ont été éjectées aux confins du système solaire, dans une vaste coquille appelée nuage de Oort, du fait des perturbations gravitationnelles induites par Jupiter et Saturne. Épisodiquement, une comète du nuage de Oort peut être réinjectée vers le centre du système solaire et, sous le jeu de nouvelles perturbations planétaires, s'y trouver stabilisée : c'est le cas notamment de la célèbre comète de Halley dont la période est de 76 ans. Le second réservoir des comètes se situe au-delà de l'orbite de Neptune (voir ci-dessous, chapitre 2, paragraphe 7).

7 La famille de Pluton

Dès le milieu du XX^e siècle, des voix s'étaient élevées pour suggérer l'existence d'une population d'objets au-delà de l'orbite de Neptune. L'argument avancé par Kenneth Edgeworth puis par Gerard Kuiper était la chute brutale de densité moyenne de matière dans le disque impliquée par l'absence de planète au-delà de cette distance. Après les tentatives infructueuses de recherche d'une hypothétique dixième planète, les deux astronomes proposaient l'existence d'une population de petits objets répartis à proximité du plan de l'écliptique à la manière d'un tore, et trop petits pour être détectés avec les moyens de l'époque : ils les ont nommés « objets transneptuniens », en anglais TNOs (*trans-neptunian objects*). Ils ont aussi suggéré que cette ceinture, appelée par la suite « ceinture de Kuiper » pouvait être le réservoir des comètes à courte période dont l'orbite est caractérisée par une faible inclinaison.

Il restait à détecter les fameux objets. C'est ce qu'ont fait les astronomes américains David Jewitt and Jane Luu, au terme d'un programme de longue haleine d'observation systématique du plan de l'écliptique. Le travail consiste à enregistrer systématiquement des champs stellaires donnés en fonction du temps avec une caméra visible, puis de comparer des images du même champ séparées dans le temps pour rechercher des objets susceptibles de s'être déplacés par rapport aux étoiles voisines (la même technique est utilisée pour rechercher les comètes et les astéroïdes). Après plusieurs années de recherche infructueuse, le premier objet a été découvert en 1992. Suite à cette détection, les découvertes se sont multipliées ; on compte aujourd'hui plus de 1200 TNOs.

Il est apparu rapidement que les TNOs, en fonction de leurs propriétés orbitales, se divisaient en trois catégories. La plupart d'entre eux, appelés « objets classiques », ont des orbites quasi-circulaires de faible excentricité avec une inclinaison inférieure à 30°. Ils se situent principalement entre 42 et 47 UA. La seconde catégorie qui regroupe environ 12 % du total, est particulièrement intéressante : ce sont des objets dont la période est exactement celle de Pluton (elle correspond à une ellipse de demi-grand axe 39,5 UA). Ils sont tous en résonance 3: 2 avec Neptune, c'est-à-dire qu'ils

effectuent 2 révolutions autour du Soleil lorsque Neptune en fait 3 ; les objets en résonance ont une configuration orbitale particulièrement stable, ce qui explique le nombre d'objets de cette population qui ont par ailleurs des excentricités et des inclinaisons plus élevées que les TNOs classiques. On les appelle les « Plutinos », ou TNOs « résonants ». Voilà bien la preuve que Pluton est bien un objet trans-neptunien... Il est seulement le plus gros de cette famille, ce qui lui a valu d'être découvert plus de soixante ans avant les autres.

Enfin la troisième catégorie, celle des objets les plus éloignés, ne cesse de nous surprendre. On distingue les « objets dispersés », très elliptiques et en forte interaction avec Neptune, et les objets « détachés », eux aussi dotés d'une orbite très elliptique, mais sans interaction avec Neptune. Certains objets s'éloignent du Soleil jusqu'à des distances supérieures à 1000 UA... D'autres découvertes nous attendent, et les frontières du système solaire ne feront que reculer.

Vj ku'ŕ ci g'kpvgrkqpcm{ 'igh'ðrɛ pm

3

À la découverte de la planète Terre

Plusieurs facteurs jouent un rôle décisif dans la nature d'une planète. Certains sont liés à son orbite, d'autres à ses propriétés physiques.

L'orbite de la planète détermine sa distance au Soleil (ou, dans le cas d'une exoplanète, de son étoile centrale), qui elle-même fixe la quantité de flux lumineux qu'elle reçoit. Dans le cas du Soleil, celui-ci est maximum dans le domaine visible. Une partie de ce flux est absorbée et convertie en énergie thermique qui rayonne dans l'infrarouge et contribue à son chauffage ; les planètes sont donc logiquement d'autant plus froides qu'elles sont éloignées du Soleil ou de leur étoile.

L'effet du Soleil ou de l'étoile centrale se manifeste aussi sous la forme d'un « vent », solaire ou stellaire. Ce flux de particules énergétiques, essentiellement constitué d'électrons et de protons, interagit avec la planète. Cette interaction se traduit par l'existence d'une magnétosphère particulièrement complexe si la planète est dotée d'un champ magnétique et d'une atmosphère ; c'est le cas de la Terre et des planètes géantes.

L'inclinaison de la planète sur le plan orbital, aussi appelée obliquité, est un autre facteur important qui détermine les effets saisonniers et climatiques ; ceux-ci sont très marqués dans le cas de la Terre et de Mars, dont l'obliquité est très voisine (proche de 24°). Ils se traduisent par une circulation atmosphérique intense et par l'existence de calottes saisonnières de glace aux pôles.

Parmi les paramètres physiques, le plus important est la masse de la planète, qui détermine son champ de gravité, et donc sa capacité à s'entourer ou non d'une atmosphère stable. La masse influe aussi sur la quantité d'énergie interne provenant de la décomposition des éléments radiogéniques contenus dans le noyau. Celle-ci peut se manifester, à la surface de la planète, par une activité volcanique ou tectonique.

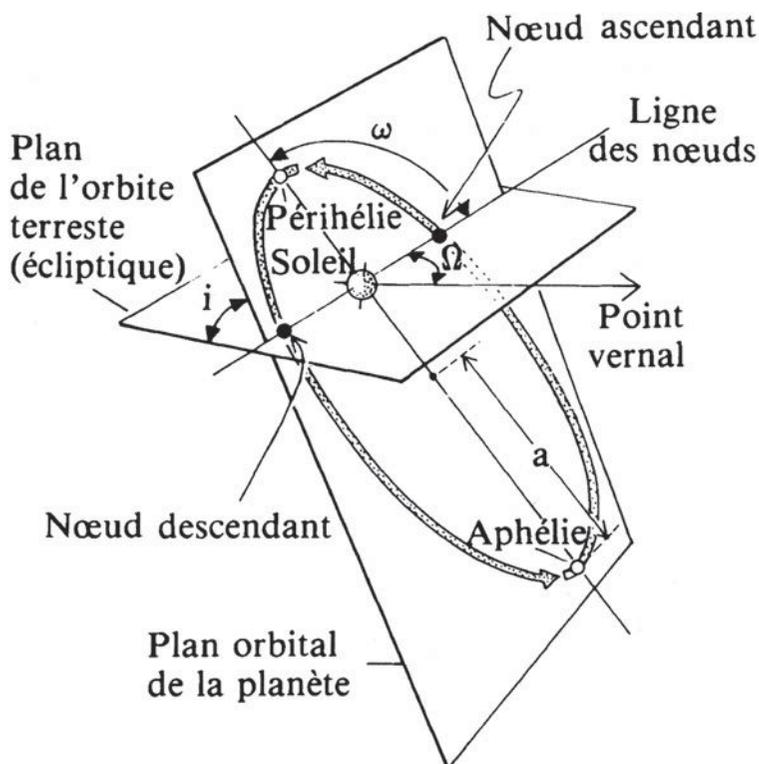


Figure 3.1. Schéma d'une orbite planétaire (d'après T. Encrenaz *et al.*, Le système solaire, EDP-Sciences/CNRS-Éditions, 2003).

La densité de la planète est liée à sa composition chimique. De la composition de la surface (ou des nuages) dépend l'albédo, c'est-à-dire le pourcentage de flux solaire réfléchi vers l'extérieur par la surface ou par les couches nuageuses de l'atmosphère.

Enfin, la période de rotation de la planète autour de son axe joue un rôle important dans l'existence d'un champ magnétique interne : si la rotation est rapide, un champ peut être généré dans l'intérieur fluide par effet dynamo. Notons cependant l'existence de certains paradoxes. Les deux planètes Vénus et Mercure ont une vitesse de rotation très lente. Vénus est dénuée de champ magnétique, ce qui peut s'expliquer partiellement par l'absence d'effet dynamo, mais Mercure, en revanche, en est dotée ; son origine est encore un mystère à ce jour.

Nous allons maintenant passer en revue les différentes composantes du système Terre : la structure interne, l'atmosphère et l'hydrosphère, et enfin la biosphère, qui représente une singularité de la Terre dans l'Univers, puisque notre planète est la seule connue à ce jour à abriter la vie.

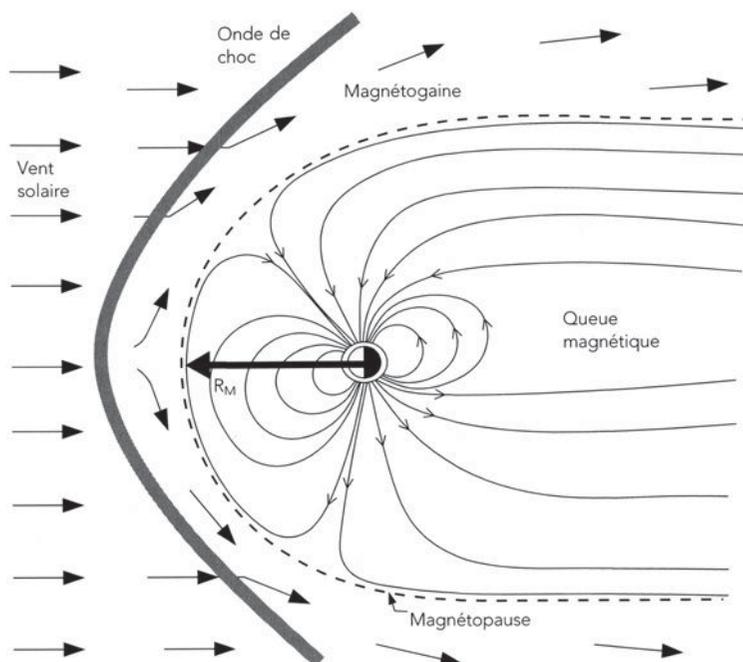


Figure 3.2. Exemple d'une magnétosphère planétaire (d'après T. Encrenaz *et al.*, Le système solaire, *ibid.*).

1 Roches et métaux : une structure interne différenciée

Commençons par la taille et la masse de la Terre. Si le rayon terrestre (proche de 6400 km) est connu depuis l'Antiquité grâce aux travaux d'Ératosthène, environ 200 ans av. J.-C., la masse de notre planète n'a pu être déterminée que suite aux travaux de Newton à la fin du XVII^e siècle. D'autres mesures sont réalisées quelques décennies plus tard par Pierre Bouguer qui étudie la forme de la Terre à partir de son champ de gravité. La densité qui en résulte est de $5,5 \text{ g/cm}^3$, la valeur la plus élevée dans le système solaire. Notons que cette densité est mesurée directement comme le rapport de la masse de la planète à son volume : compte tenu des facteurs de compression qui interviennent en profondeur, elle est plus élevée que la densité des matériaux qui la composent.

Notre connaissance de la structure interne terrestre a connu une étape décisive au cours du XX^e siècle, avec d'abord l'étude des ondes sismiques, puis, dans la seconde moitié du XX^e siècle, la découverte de la dérive des continents et de la tectonique des plaques.

Les ondes sismiques nous renseignent sur la structure interne du globe terrestre. Elles peuvent être de deux types : les ondes internes ou volumiques, qui se propagent

à l'intérieur, avec des vitesses qui dépendent du milieu rencontré, et les ondes superficielles, qui se propagent à la surface à vitesse constante. Les ondes sismiques internes peuvent être des ondes de pression, qui se déplacent longitudinalement, ou des ondes de cisaillement, qui se déplacent transversalement. Ces dernières permettent de déterminer les propriétés élastiques des matériaux (rigidité, incompressibilité) et ne se propagent pas dans les fluides.

Dès le début du XX^e siècle, les physiciens ont compris l'intérêt de l'étude des ondes sismiques émises lors des tremblements de terre pour déterminer la structure interne de notre planète, et un réseau de sismomètres s'est mis en place à l'échelle globale, couvrant toute la gamme de fréquence d'émission des ondes, depuis le millième de Hertz à quelques dizaines de Hertz. En 1935, le géophysicien Richter proposa de calibrer les magnitudes des tremblements de terre selon la fameuse échelle qui depuis porte son nom.

À partir de l'ensemble des informations collectées par les sismomètres autour du globe sur les séismes très éloignés, il ressort que l'intérieur de la Terre peut être divisé en trois grandes régions : le manteau, qui surmonte le noyau externe liquide, qui surmonte lui-même le noyau interne solide ou graine. Le manteau et le noyau externe sont séparés par la discontinuité de Gutenberg, à une profondeur de 2900 km ; les noyaux externe et interne sont séparés par la discontinuité de Lehmann, à une profondeur de 5000 km. L'étude des séismes proches nous a fourni des informations sur les couches internes plus proches de la surface. Ces études ont mis en évidence, à une profondeur d'une centaine de kilomètres, une discontinuité, dite de Mohorovicic, entre la croûte (dans laquelle les ondes se propagent plus lentement) et le manteau. Quelle est l'origine de ces discontinuités ? Elle tient à la nature chimique et minéralogique des éléments présents dans le globe terrestre. Comme les autres planètes telluriques, le globe terrestre est majoritairement constitué de silicates et de minéraux. Cette composition résulte du fait qu'à l'origine, lorsque la planète s'est formée, ces éléments se sont condensés par équilibre thermochimique à partir des éléments lourds présents dans le disque protosolaire (voir ci-dessus, chapitre 2, paragraphe 5).

Les silicates peuvent prendre des formes multiples, combinant les atomes de silicium, d'oxygène, et d'autres éléments (aluminium, potassium, calcium, fer. . .). Ils peuvent aussi s'associer à H₂O pour former des silicates hydratés. Ces combinaisons chimiques donnent naissance à une très grande variété de minéraux. À côté des silicates, d'autres minéraux sont également abondants : les oxydes (du fait de l'abondance élevée de l'oxygène dans l'Univers), en particulier l'oxyde de fer Fe₂O₃. Il faut citer aussi le carbonate de calcium CaCO₃ que l'on trouve en abondance au fond des océans.

Pour comprendre la structure interne terrestre, il faut compléter la minéralogie par une classification géologique des roches. On distingue trois grandes familles,

en fonction des processus physiques (température, pression) auxquels elles ont été soumises. Le premier groupe est celui des roches ignées (ou magmatiques) formées en profondeur, qui proviennent de la cristallisation des magmas lors de la fusion partielle des roches du manteau. Le second groupe est celui des roches sédimentaires, formées à la surface de la Terre par érosion superficielle ou précipitation d'eau liquide. Enfin les roches métamorphiques sont transformées en profondeur à partir des roches sédimentaires, à haute température et à haute pression.

Notre connaissance de la nature des couches internes est basée sur plusieurs types d'observations : déformations dans les roches plissées, sondages profonds de la croûte terrestre (jusqu'à 15 km) ou de la croûte océanique (jusqu'à 3 km) ; études des laves, pouvant provenir d'une profondeur de quelques centaines de kilomètres. Pour étudier les régions plus profondes, nous disposons des météorites, dont certaines proviennent d'astéroïdes différenciés, pouvant présenter une composition proche de celle du noyau terrestre. Des expériences de laboratoire permettent également de reconstituer des conditions de température et de pression élevées (5000 °C, 10² GPa, soit 1 Mbar) et de simuler le comportement des minéraux à l'intérieur de la Terre. À partir de toutes ces informations, nous pouvons tenter de décrire dans ses grandes lignes la structure interne terrestre.

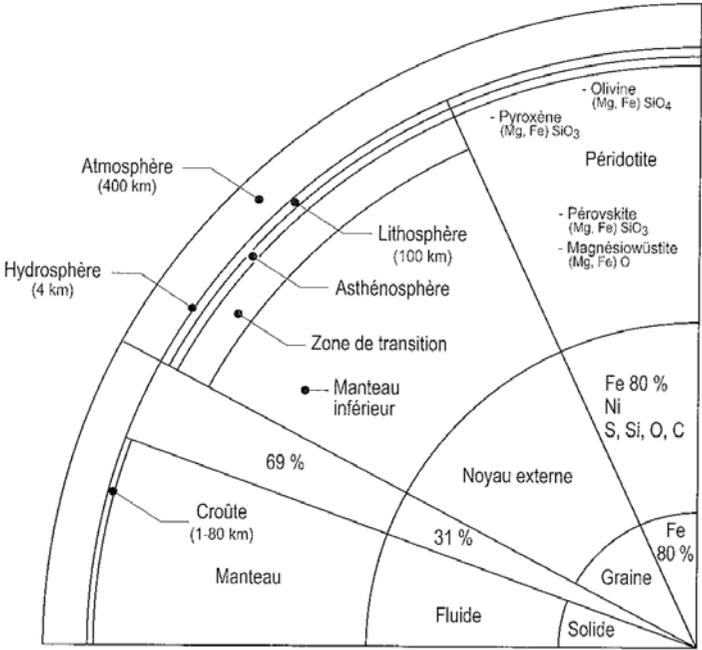


Figure 3.3. Schéma de la structure interne de la Terre (©C. Sotin *et al.*, Planétologie, Dunod, 2009).

La croûte est de composition basaltique (c'est-à-dire volcanique) dans les océans, granitique (métamorphique) sur les continents. L'épaisseur de la croûte océanique est de 5 à 8 km, tandis que la croûte continentale est plus épaisse (environ 30 km). C'est la nature de la composition chimique qui différencie la croûte du manteau qu'elle surmonte. Avec près des trois quarts de la masse totale du globe, celui-ci représente la majeure partie de l'intérieur terrestre, et est constitué essentiellement d'olivines et de pyroxènes. Dans le manteau supérieur, à une profondeur d'environ 100 à 200 km, la transition entre la lithosphère et l'asthénosphère correspond à la température de fusion de ces matériaux.

À 2900 km de profondeur, la discontinuité de Gutenberg sépare le milieu silicaté, faiblement conducteur, d'un milieu métallique, très dense et bon conducteur. Celui-ci est constitué essentiellement d'un alliage fer-nickel. C'est au sein de ce noyau externe fluide, animé de mouvements convectifs et soumis à la rotation du globe, que prend naissance, par effet dynamo, le champ magnétique terrestre. C'est dans le noyau liquide que les points chauds qui sont à l'origine des volcans océaniques prendraient leur source. Enfin, sous la transition de Lehmann, la graine solide est de composition chimique indentique à celle du noyau liquide, mais, dans les conditions de pression du milieu (365 GPa), la température (5500 °C) est inférieure à la température de fusion.

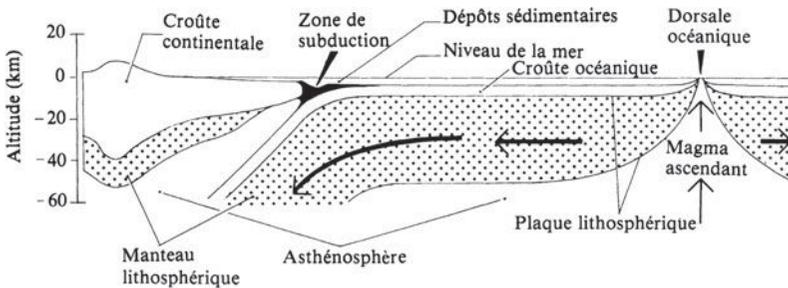


Figure 3.4. Schéma de la tectonique des plaques : coupe d'une portion de la lithosphère terrestre (d'après B. W. Jones, *The solar system*, Pergamon Press, 1984 ; © T. Encrenaz *et al.*, *Le système solaire*, *ibid.*).

La structure interne différenciée de la Terre est-elle susceptible d'être transposée aux autres planètes telluriques ? Oui, pour la composition chimique globale, à base de silicates et de métaux, car les conditions initiales étaient comparables pour les quatre planètes. Cependant, les différences dans les distances héliocentriques ont entraîné des modifications sensibles ; ainsi Mercure est globalement plus dense que la Terre (sa densité est supérieure à celle de la Terre si l'on prend en compte le facteur de compression de celle-ci). La masse de la planète est aussi un facteur important car elle influence les conditions de pression et de température en son centre. On sait

que le noyau de Mars a une composition différente de celle du noyau terrestre, mais les causes en sont encore mal comprises.

2 Une singularité terrestre : la tectonique des plaques

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, le principe de la fixité des continents sur le globe n'a pas été remise en cause. Pourtant, deux types d'observations s'accordaient mal à ce principe : l'étrange similitude du tracé des côtes de part et d'autre de l'Atlantique Sud et de l'océan indien ; l'identité de formations géologiques mise en évidence sur des continents aujourd'hui très éloignés. Au début du XX^e siècle, le géophysicien Édouard Suess émet l'idée que les continents terrestres ont été antérieurement regroupés en un seul, le Gwondana, et que les parties manquantes ont sombré dans les océans. Un peu plus tard, le géophysicien Alfred Wagener reprend cette idée en la modifiant : les continents, dont la croûte a une densité inférieure à celle de la croûte océanique, n'ont pas pu s'enfoncer, mais ont dérivé jusqu'à la position qu'ils occupent actuellement. Outre l'argument du tracé des côtes, Wagener appuyait son hypothèse sur la présence de certains fossiles d'espèces animales rares sur des continents aujourd'hui séparés, ainsi que sur la répartition sous les tropiques de certaines séquences glaciaires de l'ère secondaire.

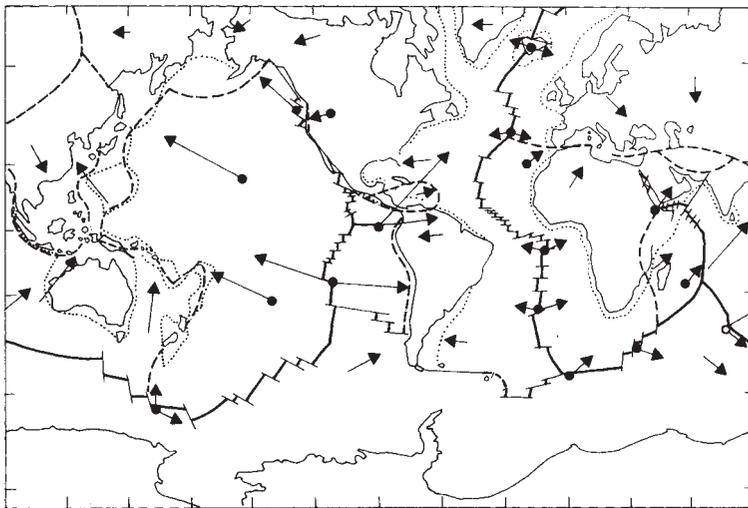


Figure 3.5. Carte décrivant le mouvement des principales plaques par rapport au repère fixe des points chauds (d'après C. Allègre, L'écume de la Terre, 1983 ; © T. Encrenaz *et al.*, Le système solaire, *ibid.*).

L'intuition visionnaire de Wagener reposait sur des observations incontournables, mais il manquait à l'époque l'explication physique de l'origine du phénomène,

c'est-à-dire l'identification de la source d'énergie capable de générer la dérive des continents. C'est pourquoi il fallut attendre la seconde moitié du XX^e siècle pour que la théorie de Wagoner puisse s'imposer. Dans les années 1960, le géologue Harry Hess émit l'hypothèse que les dorsales sous-marines mises en évidence par les sous-marins lors de la seconde guerre mondiale étaient l'endroit par lequel les matériaux du manteau remontaient pour former la lithosphère océanique, tandis qu'une quantité équivalente de celle-ci plonge dans le manteau au niveau des fosses océaniques, sous la croûte continentale. Le phénomène est globalement régi par un mouvement de convection au sein du manteau supérieur. La lithosphère est découpée en cinq grandes plaques séparées par des zones instables où se produisent séismes et volcanisme.

Depuis les travaux de Wagoner et Hess, de multiples observations ont permis d'étayer et de préciser les mécanismes de la tectonique des plaques. Celles-ci portent sur les mesures du champ magnétique fossilisé dans les roches, qui nous renseignent sur l'orientation et l'intensité de celui-ci lors de leur formation. Ainsi les mesures réalisées dans les trapps du Deccan ont permis de mettre en évidence la mobilité récente de l'Inde qui se déplace vers le nord. Les inversions magnétiques imprimées dans la croûte océanique peuvent s'expliquer par la remontée de matière magmatique au niveau des dorsales, et nous ont permis de retracer l'histoire de la croûte océanique, dont l'âge ne dépasse pas 200 millions d'années. Enfin, le modèle de la dérive des continents fournit une explication simple à l'origine de la chaîne des volcans d'Hawaï : ceux-ci proviennent de la dérive de leur plaque lithosphérique au-dessus d'un point chaud, sorte de cheminée verticale dont l'origine est fixe au sein du manteau, dont l'activité intermittente déclenche la formation d'un volcan. Une chaîne de volcans se forme au fur et à mesure que la plaque se déplace.

C'est le mouvement convectif du manteau supérieur qui est à l'origine de la tectonique des plaques sur la Terre. Pouvons-nous rencontrer le même phénomène sur d'autres objets du système solaire ? Si des signes d'activité tectonique ont été observés sur de nombreuses surfaces de planètes ou de satellites, aucun système comparable à celui de la Terre n'a été observé. Celui-ci nécessite une source interne importante qui provient surtout du rayonnement des éléments radiogéniques ; peut-être la Terre est-elle la seule planète à disposer d'une masse suffisante. Il semble aussi que le mécanisme soit favorisé par la présence de l'eau liquide qui favorise la convection au niveau du manteau supérieur.

3 Formation des reliefs terrestres : le principe de l'isostasie

Quelle est l'origine des reliefs terrestres que nous connaissons ? Les mouvements horizontaux des plaques lithosphériques sont à l'origine de mouvements verticaux de

moindre ampleur, en particulier lors de la rencontre de deux plaques continentales qui peut engendrer un plissement local de la croûte continentale. C'est ainsi que sont nés, en Europe, le plissement hercynien à l'ère primaire, puis le plissement alpin à l'ère tertiaire. De même, l'Himalaya a surgi suite à la subduction de l'Inde sous la plaque eurasiennne. Une autre source de relief est le volcanisme, issu lui aussi de la collision entre plaques, en particulier à la frontière entre plaques océaniques et continentales : c'est le cas de la cordillère des Andes. Un autre type de volcanisme est associé, comme nous l'avons vu, aux volcans hawaïens formés à partir d'un « point chaud » qui prend naissance à plus grande profondeur dans le manteau.

Cependant, il existe une altitude limite que les sommets terrestres ne peuvent pas dépasser. En effet, la croûte continentale flotte sur le manteau lithosphérique, et le poids que celui-ci peut supporter obéit au principe d'Archimède. En cas de surcharge, la croûte s'enfonce ; c'est le principe de l'isostasie. Ce principe fixe l'altitude maximale que peuvent atteindre les reliefs. Celle-ci dépend du champ de gravité terrestre et de la densité respective des croûtes et du manteau. Sur la Terre, les croûtes continentale et océanique ont des densités respectives de 2,7 et 2,9 g/cm³, et flottent sur le manteau supérieur de densité 3,2 g/cm³. À partir de ces valeurs, le contraste attendu entre les sommets les plus élevés et les fosses marines est d'environ 6000 mètres. La valeur observée est supérieure puisque l'Himalaya culmine à plus de 6000 mètres et que la fosse marine la plus profonde, celle des Mariannes, a une profondeur de 11 000 mètres. Cette forte différence est partiellement expliquée par la présence des îles volcaniques du Pacifique, et aussi par le fait que certains reliefs récents, dans les Alpes en particulier, n'ont pas encore atteint leur équilibre isostatique.

Sur chaque planète ou satellite, il existe de même une altitude limite que les reliefs ne peuvent pas dépasser. L'activité volcanique est d'autant plus importante que la planète est massive ; en revanche, dans le cas d'une planète peu massive, dont le champ de gravité est moindre, le rapport de l'altitude maximale au rayon planétaire est plus élevé. Ainsi la planète Mars, dix fois moins massive que la Terre, a des volcans dont l'altitude, mesurée par rapport aux points les moins élevés, atteint la trentaine de kilomètres ; ce sont les reliefs les plus élevés connus dans le système solaire.

4 Notre milieu naturel : l'atmosphère terrestre

Avec ses variations saisonnières, l'atmosphère terrestre, interface entre la surface et l'intérieur d'une part, et le milieu interplanétaire d'autre part, influe de manière directe sur notre vie quotidienne. Les paramètres principaux en sont les champs de température et de pression, qui déterminent les vents, les changements d'état entre

les phases solide, liquide et vapeur de l'eau ; en découlent la formation des glaces, les systèmes nuageux et le réseau fluvial.

Que savons-nous de l'atmosphère qui nous entoure ? Du grec « *atmos* » (vapeur) et « *sphaira* » (ballon), le terme désigne l'enveloppe gazeuse entourant un corps céleste. L'atmosphère terrestre est un objet d'étude depuis plus de trois mille ans. Les Chinois, puis les Grecs, dont Thalès puis plus tard Aristote, se sont livrés à des observations météorologiques. Il faut attendre Galilée, au début du XVII^e siècle, pour que soient réalisées les premières mesures (d'ailleurs imprécises) de la densité de l'air. Un peu plus tard, Torricelli, en 1643, effectue les premières mesures de la pression atmosphérique. Puis apparaissent de nouveaux instruments : hygromètre pour mesurer la quantité de vapeur d'eau, anémomètre pour la mesure des vents, thermomètre pour celle de la température. C'est à la fin du XVIII^e siècle qu'est déterminée la composition chimique de l'atmosphère terrestre, avec près de 78 % d'azote moléculaire et 21 % d'oxygène moléculaire ; les composants mineurs tels que la vapeur d'eau et le gaz carbonique, plus facilement détectables, ont été quant à eux identifiés antérieurement. À la même époque plusieurs physiciens (Charles, Avogadro, Gay-Lussac, Dalton) mettent en évidence la loi des gaz parfaits qui détermine la relation entre la pression d'un gaz, sa température et son volume. Les premières mesures en altitude, menées notamment au Mont Blanc, permettent de déterminer l'évolution de la température et de la pression en fonction de l'altitude. Des radio-sondes permettent, au début du XX^e siècle, d'accéder à des altitudes plus élevées, puis, dans la seconde moitié du XX^e siècle, l'avènement de la recherche spatiale permet le sondage de l'atmosphère terrestre jusqu'à son interface avec la magnétosphère.

Parallèlement, les astronomes, observant les planètes voisines, découvrent que celles-ci, à l'exception de Mercure, sont aussi entourées d'atmosphères. Le gaz carbonique est identifié sur Mars et Vénus dont il constitue le composant atmosphérique majoritaire. Sur Jupiter et Saturne, le méthane et l'ammoniac sont détectés dès 1932. Ces constituants sont pourtant très minoritaires sur les planètes géantes ; mais leur spectre est plus facilement identifiable que celui de l'hydrogène, qui ne sera identifié qu'en 1960. Après cette date, l'exploration spatiale prendra le relais et nous fournira une description complète de l'atmosphère des planètes qui nous entourent.

Commençons par situer les traits principaux de l'atmosphère terrestre comparativement à celle de ses deux voisines. Notons déjà que Mercure, très proche du Soleil, ne dispose pas d'une atmosphère stable : son champ de gravité est insuffisant pour retenir les molécules gazeuses, même les plus lourdes, car elles sont soumises à des vitesses d'agitation thermique élevées du fait de leur proximité au Soleil. L'atmosphère terrestre apparaît comme intermédiaire entre celles de Vénus et de Mars, dont les températures et les pressions de surface atteignent des valeurs extrêmes : sur Vénus, la pression de surface frise les 100 bars et la température y est de 730 K (457 °C) ; sur Mars, en revanche, la pression de surface moyenne est inférieure au

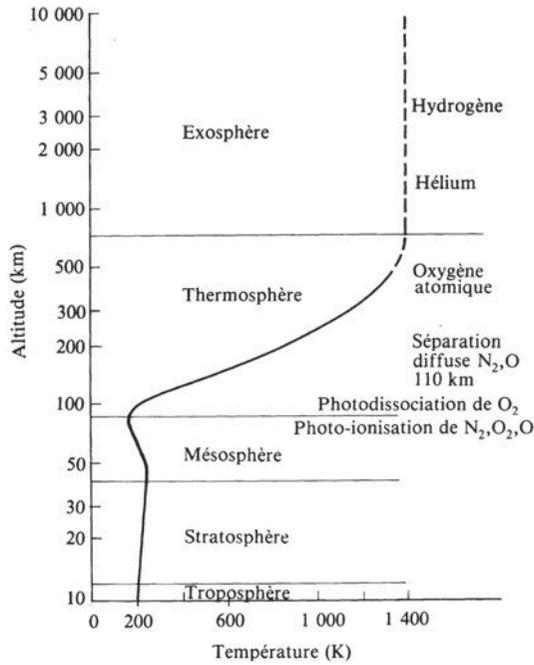


Figure 3.6. Schéma du profil thermique de l'atmosphère terrestre (©T. Encrenaz *et al.*, Le système solaire, *ibid.*).

centième de bar et la température moyenne, très variable selon les saisons, y est d'environ 210 K ($-63\text{ }^{\circ}\text{C}$). Autre surprise, les compositions atmosphériques de Vénus et de Mars sont très voisines avec un constituant majoritaire, le gaz carbonique (environ 95 % de la pression totale), auquel s'ajoute l'azote moléculaire au niveau de quelques pourcents, et d'autres constituants à l'état de traces. Il est vraisemblable que la Terre primitive a été dotée à l'origine d'une composition similaire, avec au départ de grandes quantités d'eau. Mais ici est intervenu un élément décisif : sur la Terre, la température a été telle que l'eau est restée sous forme liquide, et le gaz carbonique a été piégé au fond des océans sous forme de carbonate de calcium. L'oxygène moléculaire est ensuite apparu dans l'atmosphère suite à l'apparition de la vie, ce qui a conduit finalement à l'atmosphère riche en azote et en oxygène que nous connaissons. Quelles sont les causes des destins divergents de Vénus et de Mars ? Répondre à cette question constitue l'un des défis majeurs de la planétologie d'aujourd'hui (voir chapitre 4, paragraphe 5).

Comment pouvons-nous décrire l'atmosphère terrestre ? Comme celle de nos planètes voisines, elle est soumise à un certain nombre de lois qui déterminent l'évolution de sa pression et de sa température en fonction de l'altitude. La première est la « loi hydrostatique », qui exprime l'équilibre entre la pression (c'est-à-dire le

pois de la colonne de gaz située au-dessus du niveau considéré) et la gravité (liée à la masse de la Terre). À mesure que l'altitude augmente, la pression décroît selon une loi qui, en première approximation, est exponentielle. Sur la Terre, la pression diminue d'un facteur e ($e = 2,7$) quand l'altitude augmente de 8 km. Sur Mars, cette quantité, appelée échelle de hauteur, est de 10 km ; elle est de 14 km à la surface de Vénus. L'échelle de hauteur est inversement proportionnelle à la gravité et la masse moléculaire ; elle est aussi proportionnelle à la température atmosphérique, exprimée en Kelvin.

Dans la plus grande partie de l'atmosphère, les différents constituants atmosphériques sont uniformément mélangés, quelle que soit leur masse moléculaire : c'est l'homosphère qui s'étend sur Terre jusqu'à une altitude de 90 km. À ce niveau, l'homopause sépare l'homosphère de l'hétérosphère qui la surmonte ; la pression y est de quelques microbars. Dans l'hétérosphère, les constituants se séparent sous l'effet de la gravité, chacun suivant la loi exponentielle correspondant à sa propre échelle de hauteur, déterminée par sa masse moléculaire.

L'évolution de la température de l'atmosphère terrestre en fonction de l'altitude est complexe et obéit à différents facteurs. Comme dans le cas de Mars et de Vénus, la température commence par diminuer à mesure que l'altitude augmente ; nous sommes dans la troposphère. Le sol est chauffé par le rayonnement solaire et la chaleur se transmet dans l'atmosphère par convection. La température sur Terre décroît d'environ 6 K/km, ce qui correspond au gradient adiabatique. Ce régime prévaut jusqu'à la tropopause, à environ 12 km d'altitude ; à ce niveau, la température passe par un minimum à 217 K (-56 °C). Au-dessus d'une région isotherme, à une altitude de 25 km, la température augmente à nouveau suite à l'absorption du rayonnement ultraviolet solaire par l'oxygène moléculaire qui, dissocié, forme la couche d'ozone : c'est la stratosphère. Au-dessus s'étend la mésosphère, où la température décroît à nouveau jusqu'à un second minimum de 170 K, ou environ -100 °C (Fig. 3.6). Cette région est surmontée à son tour par la thermosphère dans laquelle la température s'élève à nouveau fortement avec l'altitude, suite à l'interaction des atomes avec les particules énergétiques du vent solaire : c'est le domaine où se forment les aurores polaires.

Pourquoi la température varie-t-elle ainsi avec l'altitude ? La cause principale en est l'absorption du rayonnement solaire par les différentes couches atmosphériques, en fonction des constituants chimiques qui y sont présents. Le rayonnement ultraviolet, très énergétique, a pour effet d'ioniser les atomes et de dissocier les radicaux présents dans la haute atmosphère, tandis que le rayonnement dans l'infrarouge proche excite les molécules neutres, à plus basse altitude. C'est ainsi que sur Terre s'est formée la couche d'ozone stratosphérique par absorption de l'UV solaire. Cette couche n'a pas d'équivalent sur Vénus et sur Mars car l'oxygène n'est présent qu'à l'état de traces infimes. En revanche, on la trouve dans les planètes géantes, où l'UV

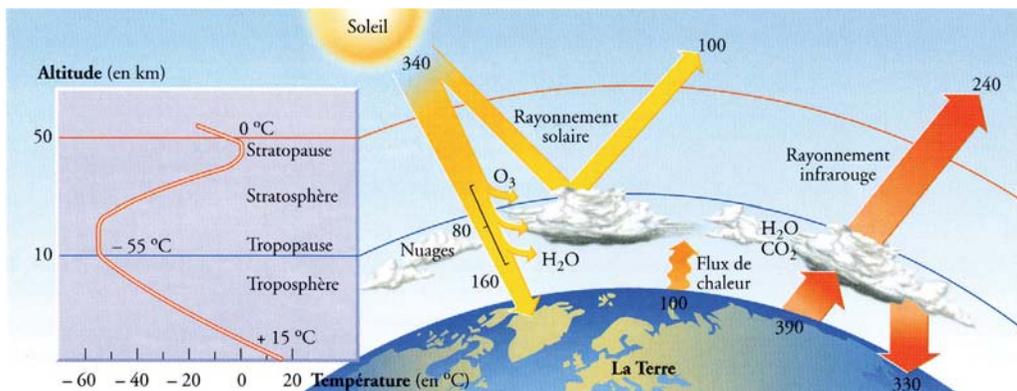


Figure 3.7. Schéma de l'effet de serre : le rayonnement solaire visible traverse l'atmosphère terrestre et vient chauffer la surface. Celle-ci rayonne en infrarouge vers la basse atmosphère. Certains gaz atmosphériques (CO_2 , H_2O , CH_4) absorbent ce rayonnement, ce qui a pour effet de chauffer la basse atmosphère et la surface, et le mécanisme tend à s'accélérer (©T. Encrenaz, Les atmosphères planétaires, Belin, 2000).

solaire dissocie le méthane pour produire des radicaux puis, par recombinaison, une large gamme d'hydrocarbures.

Dans la troposphère, le chauffage de l'atmosphère provient du rayonnement infrarouge de la surface, elle-même chauffée par le rayonnement visible solaire. Le rayonnement atmosphérique infrarouge chauffe à son tour la surface pour en élever la température et le mécanisme s'accélère : c'est l'effet de serre (Fig. 3.7). Son efficacité dépend de la nature des gaz présents dans l'atmosphère. La vapeur d'eau, le gaz carbonique et le méthane ont un spectre infrarouge particulièrement riche qui leur permet d'absorber le rayonnement infrarouge : ce sont des gaz à effet de serre très efficace. En revanche, l'azote et l'oxygène moléculaires sont peu efficaces. Sur Vénus, dont l'atmosphère primitive a dû être riche en gaz carbonique et en vapeur d'eau, l'effet de serre a été très actif, d'où la température de surface très élevée observée aujourd'hui (voir chapitre 4, paragraphe 3.2). Sur Mars, dont l'atmosphère est extrêmement ténue, l'effet de serre est très limité. Sur la Terre, l'effet de serre est modeste car l'eau est sous forme liquide, et la majeure partie du gaz carbonique a été dissous dans les océans.

La différence de température entre le sol et la troposphère est la cause d'un mouvement de convection qui assure le transport de l'énergie vers les altitudes plus élevées. Des masses gazeuses chaudes s'élèvent, se refroidissent à plus haute altitude puis redescendent plus froides à des latitudes différentes, en un cycle relativement stable, dit « de Hadley » ; on en retrouve les grandes lignes sur les autres planètes. En l'absence de rotation de la Terre sur elle-même, une seule cellule convective s'installerait sur chaque hémisphère et les masses d'air se déplaceraient depuis l'équateur

jusqu'aux plus hautes latitudes ; c'est ce que l'on observe sur Vénus, dont la vitesse de rotation est quasiment nulle. Dans le cas de la Terre, la rotation de la planète engendre une force de Coriolis qui a pour effet de fragmenter chaque cellule hémisphérique en trois composantes. Les mouvements ascendants s'accompagnent de la formation de nuages de vapeur d'eau et de précipitations ; c'est ce que l'on observe dans les régions équatoriales. Les masses d'air plus sèches redescendent au niveau des tropiques où se trouvent les régions désertiques (Fig. 3.8).

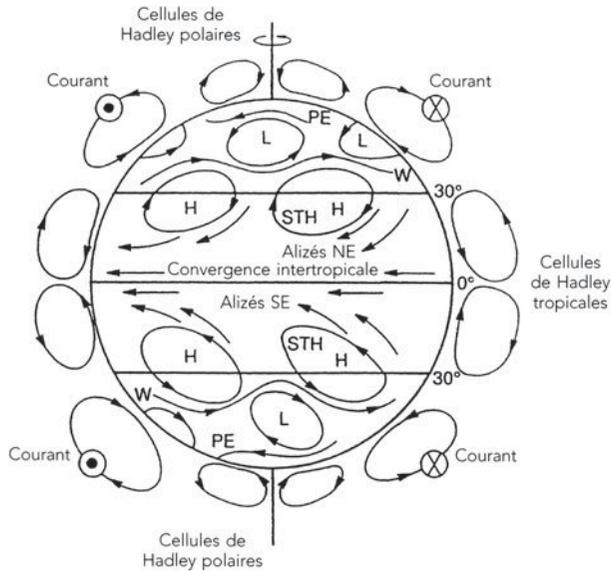


Figure 3.8. La circulation atmosphérique terrestre, dite de Hadley, est formée de plusieurs cellules convectives symétriques par rapport à l'équateur. À l'équateur, où l'ensoleillement est maximum, l'air chaud s'élève et forme des nuages. Il est transporté jusqu'aux tropiques, où il redescend dans les régions sèches. D'autres cellules convectives se forment à plus haute latitude du fait des forces de Coriolis associées à la rotation de la planète (© Encrenaz *et al.*, *Le système solaire, ibid.*).

5 Le cycle de l'eau : une autre spécificité terrestre

Sur la Terre, l'eau existe sous ses trois états, liquide, solide et vapeur ; cette particularité de notre planète est, à ce jour, unique dans l'Univers. En effet, si la molécule H_2O est omniprésente dans les astres, depuis les planètes du système solaire jusqu'aux galaxies éloignées, on ne l'a jamais trouvée que sous forme de vapeur ou de glace. Il semble toutefois que l'eau liquide ait été présente sur Mars dans l'histoire passée de la planète (voir chapitre 4, paragraphe 4.2) ; de même, l'eau liquide pourrait exister

à l'intérieur de certains satellites du système solaire extérieur. Mais la coexistence en un même milieu des trois états de l'eau apparaît comme une singularité de notre planète.

La présence d'eau liquide sur la Terre a été d'une importance fondamentale pour l'évolution de notre planète : c'est elle qui a permis de réduire l'effet de serre en faisant disparaître au fond des océans la quasi-totalité du gaz carbonique, et de réguler ainsi la température atmosphérique au cours de son histoire. L'eau liquide a sans doute joué un rôle clé dans l'apparition de la vie et elle est aujourd'hui indispensable à son maintien. Sur le plan géophysique, la présence des océans a des conséquences multiples et fondamentales. Les trois états de l'eau s'échangent en un cycle qui englobe la planète entière. La surface des océans s'évapore et la vapeur d'eau est transportée par les vents jusqu'à ce qu'elle condense en pluie ou en glace au-dessus des continents, pour former des glaciers et des rivières qui reconduisent l'eau vers la mer. L'eau des océans est salée, conséquence de l'apport des dorsales océaniques et des eaux continentales qui se sont enrichies en sel au contact des sols et des roches. En s'évaporant, l'eau de mer se libère de ses sels et précipite sous forme d'eau douce. Les océans terrestres sont le siège d'une circulation superficielle commandée par le vent et couplée à la circulation atmosphérique (surtout dans l'hémisphère sud, où les continents sont plus rares), mais aussi d'une circulation profonde qui dépend de la température et de la salinité du milieu.

Le cycle de l'eau a une incidence directe sur le relief et la topographie du sol. D'une part, la glace s'accumule sous la forme de calottes polaires : au nord, il s'agit de la banquise, dont l'extension est saisonnière, tandis qu'au sud, elle recouvre en permanence le continent antarctique. Les précipitations neigeuses alimentent aussi les glaciers qui creusent la surface de la Terre en de larges vallées. D'autre part, les précipitations liquides alimentent les réseaux fluviaux qui eux aussi marquent la surface terrestre. Ainsi on trouve dans les déserts terrestres, au Sahara ou au Yémen, la trace de tels réseaux actuellement desséchés, indices de conditions climatiques antérieures différentes ; de nombreuses traces d'érosion glaciaire jusqu'aux latitudes moyennes attestent de la période de glaciation correspondant au quaternaire. Fait remarquable, des traces d'érosion fluviale et glaciaire ont été mises en évidence à la surface de Mars, ce qui renforce l'hypothèse selon laquelle l'eau liquide a coulé à la surface de Mars (voir chapitre 4, paragraphe 4.2). Il semble donc que dans le passé, les trois états de l'eau aient coexisté sur la planète Mars, mais nous ne savons pas actuellement dater avec certitude cette période ni évaluer combien de temps elle a pu perdurer, de même que nous ignorons les raisons pour lesquelles elle a pris fin (voir chapitre 4, paragraphe 4.3).

Si le cycle de l'eau dans ses trois états observé sur Terre est aujourd'hui unique dans l'Univers, il existe sur le satellite Titan de Saturne une situation analogue, dans laquelle le méthane CH_4 joue le rôle de l'eau. La température y est très basse (93 K en

surface, soit $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais l'atmosphère de Titan présente certaines analogies avec la Terre : elle est composée majoritairement d'azote moléculaire et sa pression de surface est de 1,5 bars ; le méthane est présent au niveau de quelques pourcents. La température atmosphérique est d'environ 70 K, donc inférieure à la température de condensation du méthane. On sait par ailleurs, grâce aux images de la sonde *Cassini Huygens*, que les traces d'érosion fluviatile sont très nombreuses à la surface de Titan. Des galets, très vraisemblablement constitués de glace d'eau, apparaissent fortement érodés, la cause probable étant le mélange d'hydrocarbures, probablement à base de méthane, qui a coulé dans ces vallées. De plus, les mesures radar de la sonde *Cassini* ont montré que le satellite est partiellement recouvert de lacs de méthane à haute latitude. Il est très probable qu'il existe sur Titan un cycle au cours duquel le méthane s'échappe de l'intérieur puis condense au niveau de la troposphère supérieure pour précipiter à plus hautes latitudes, selon un cycle saisonnier un peu analogue à celui que nous connaissons sur la Terre. Quant aux galets de glace d'eau, ils seraient l'équivalent de nos roches silicatées. . .

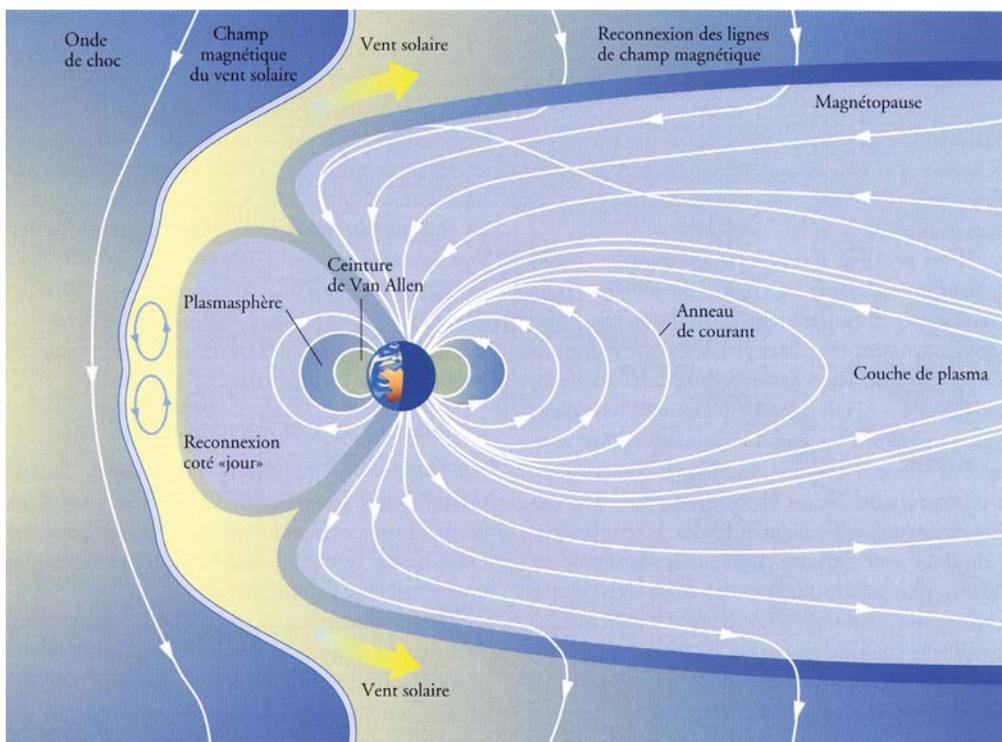


Figure 3.9. Schéma de la magnétosphère terrestre. Celle-ci est particulièrement active du fait de l'amplitude du champ magnétique terrestre et de sa proximité au Soleil (© T. Encrenaz, Atmosphères planétaires, Belin, 2000).

6 Entre la Terre et l'espace, la magnétosphère

Dans la haute atmosphère terrestre, les phénomènes auroraux découlent de l'interaction entre le vent solaire et le champ magnétique engendré par effet dynamo au sein du noyau liquide, composé de fer et de nickel. Ce champ peut être représenté par un dipôle faiblement incliné (14°) par rapport à l'axe de rotation du globe. La magnétosphère résulte de l'interaction du champ magnétique avec les ions et les protons du vent solaire, issus de la couronne solaire et accélérés à des vitesses supersoniques.

Le champ magnétique terrestre peut être considéré comme un obstacle qui dévie le vent solaire et creuse une cavité magnétique, la magnétosphère. Située à une dizaine de rayons terrestres dans la direction du Soleil, la magnétopause marque la limite entre le vent solaire et la magnétosphère. En amont sur l'axe Soleil-Terre apparaît une autre surface de discontinuité, l'onde de choc, où le vent solaire est comprimé, décéléré et dévié de part et d'autre de la magnétosphère. La magnétosphère présente globalement une symétrie de révolution par rapport à l'axe Soleil-Terre mais est fortement dissymétrique par rapport au centre du globe : une queue magnétosphérique de plusieurs dizaines de rayons terrestres se développe dans la direction antisolaire. Enfin, la magnétosphère joue un rôle important comme interface entre la haute atmosphère et le milieu interplanétaire : en faisant écran au vent solaire, elle protège l'atmosphère en rendant moins efficaces les mécanismes d'échappement.

Dans l'ionosphère terrestre, les atomes sont ionisés par le rayonnement ultraviolet et X du Soleil, mais aussi par les particules énergétiques issues du vent solaire. Les particules, accélérées le long des lignes de champ magnétique, précipitent vers les régions polaires en deux cornets symétriques. Ces régions sont le siège des aurores polaires, générées par le rayonnement émis dans le domaine visible par les atomes et les molécules excités par les particules énergétiques. Autre manifestation de la magnétosphère terrestre, les ceintures de Van Allen, situées à quelques rayons terrestres dans le plan équatorial, sont un réseau de lignes de champ reliant les hémisphères nord et sud à hautes latitudes.

Existe-t-il des magnétosphères autour des autres planètes du système solaire ? La réponse est oui, pour certaines d'entre elles. L'exemple le plus proche du nôtre est la magnétosphère de la planète Jupiter, dotée, comme la Terre, d'un champ magnétique intense (lui aussi lié à sa rotation rapide) et d'une atmosphère dense (voir chapitre 5, paragraphe 1.6). Les autres planètes géantes présentent aussi des magnétosphères, chacune ayant ses caractéristiques propres ; Uranus et Neptune, par exemple, ont leur axe magnétique très incliné par rapport à leur axe de rotation.

L'interaction entre le vent solaire et les planètes revêt des formes différentes, selon que la planète a ou non une atmosphère stable, et selon la présence ou non d'un champ magnétique. La Lune est un exemple de corps dénué à la fois de ces deux composantes. Nous avons vu que la planète Mercure est dénuée d'atmosphère mais

que, curieusement, elle possède un champ magnétique, ce qui est inattendu vu sa rotation très lente (voir chapitre 4, paragraphe 1). Vénus, elle aussi en rotation très lente, est – logiquement – dénuée de champ magnétique mais son atmosphère génère un troisième type de magnétosphère. Autre particularité, la planète Mars n'a pas de champ magnétique aujourd'hui, mais ses roches les plus anciennes ont gardé la trace d'un magnétisme fossile qui plaide pour l'existence d'un champ magnétique – et donc d'un effet dynamo – au début de l'histoire de la planète. Comment et pourquoi ce champ a-t-il disparu ? La question reste ouverte (voir chapitre 4, paragraphe 4.3). Il est fort possible que la disparition de la magnétosphère martienne ait entraîné l'échappement de l'atmosphère primitive, ce qui expliquerait la très faible pression au sol actuelle. On le voit, l'étude des champs magnétiques planétaires présente une grande variété de cas, qui nous fournissent autant d'indices sur l'histoire passée et présente des planètes du système solaire.

7 Une brève histoire du climat terrestre

Si nous voulons tenter de comprendre l'origine et l'évolution des planètes du système solaire, il nous faut en premier lieu fouiller les archives climatiques de notre propre planète afin de déchiffrer son histoire. De quels éléments disposons-nous ? Tout d'abord, des mesures de composition chimique, élémentaires et isotopiques, réalisées sur les roches continentales les plus anciennes, mais aussi sur des échantillons extraits de carottages glaciaires profonds ou prélevés au fond des océans. Une autre source de renseignement provient de l'inversion périodique du champ magnétique terrestre, fossilisé dans certaines roches magmatiques et sédimentaires qui peuvent ainsi être datées.

Que savons-nous de l'histoire de la Terre ? Sa naissance, contemporaine de celle des autres planètes, remonte à 4,56 milliards d'années. Nous avons vu (chapitre 2) que les planètes du système solaire se sont formées par l'accrétion de particules solides en rotation au sein d'un disque. Un premier embryon se forme puis grossit sous l'effet de multiples collisions, puis grâce à son propre champ de gravité. Les premières centaines de millions d'années sont marquées par le bombardement permanent de la jeune planète par des corps célestes de toutes tailles. La température s'élève, provoquant une activité volcanique intense. Une baisse progressive de la température entraîne ensuite la condensation des océans ; les continents apparaissent il y a environ quatre milliards d'années.

À l'origine de son histoire, le Soleil était vraisemblablement sensiblement moins lumineux qu'aujourd'hui ; c'est ce que nous apprend l'observation des étoiles jeunes. La température, plus basse qu'aujourd'hui, aurait entraîné une glaciation globale si l'atmosphère primitive n'avait pas comporté une quantité massive de gaz carbonique,

comme sur la Terre et Mars. L'effet de serre qui en a résulté a permis à la Terre de conserver son eau liquide. À son tour, la présence d'eau liquide a permis d'éviter l'emballement de l'effet de serre que nous avons observé sur Vénus. En effet, le gaz carbonique s'est progressivement dissous dans les océans pour former du carbonate de calcium, c'est-à-dire du calcaire. Ce mécanisme a permis à la Terre de conserver une température « relativement » constante au cours de son histoire.

Les premiers signes de vie sous-marine sont apparus il y a plus de 3,5 milliards d'années ; les mécanismes, endogène ou exogènes, qui ont permis l'apparition de la vie sont encore aujourd'hui un mystère. Les archives terrestres témoignent de deux périodes de glaciation, l'une vers 2,5 milliards d'années, l'autre vers 0,8 milliard d'années. Lorsque la Terre se gèle progressivement, son albédo (celui de la glace) est de plus en plus élevé, ce qui signifie que la part d'énergie solaire qu'elle absorbe est de plus en plus faible ; le phénomène ne peut donc que s'amplifier, pour conduire à une glaciation totale du globe. On peut imaginer que c'est grâce à une activité volcanique intense, libérant massivement des gaz à effet de serre comme la vapeur d'eau et le gaz carbonique, qu'à deux reprises la Terre a pu échapper à une glaciation définitive.

L'apparition de la vie au fond des océans se traduit par une augmentation progressive de la quantité d'oxygène moléculaire dans l'atmosphère. La première conséquence est l'oxydation des roches ; on trouve ainsi des oxydes de fer datés de 1,8 milliards d'années. Autre conséquence que nous avons déjà évoquée : l'oxygène atmosphérique est dissocié par le rayonnement UV solaire pour former la couche d'ozone. Celle-ci est d'une importance fondamentale pour l'évolution de la vie terrestre : en bloquant le rayonnement UV solaire, capable de détruire toutes les molécules organiques, la couche d'ozone permet à la vie de se développer sur les continents. Cette transition fondamentale se situe il y a environ 540 millions d'années.

L'augmentation progressive du flux solaire, qui compense la diminution de l'effet de serre liée au piégeage du CO₂ dans les océans, assure une certaine stabilité des conditions climatiques. Nous entrons dans l'ère secondaire, caractérisée par une température relativement élevée, qui se traduit par l'apparition de plantes géantes, d'amphibiens, d'insectes et de reptiles. À l'époque du Carbonifère (de -360 à -295 millions d'années) se forment les grandes réserves fossiles de carbone, provenant de la décomposition des végétaux dans les marécages. Les continents sont réunis en un seul élément, la Pangée. Suite à la fonte des glaces et à l'élévation du niveau des mers, les grands bassins sédimentaires se forment. Le Crétacé marque la fin de l'ère secondaire ; l'élévation progressive de la température a conduit à l'apparition de nouvelles espèces végétales et animales, dont les dinosaures et les oiseaux. Cette époque voit aussi l'ouverture progressive de l'Atlantique puis de l'océan indien.

Ici intervient, il y a 65 millions d'années, la fameuse transition crétacé-tertiaire, marquée par une catastrophe écologique, la disparition des dinosaures et de

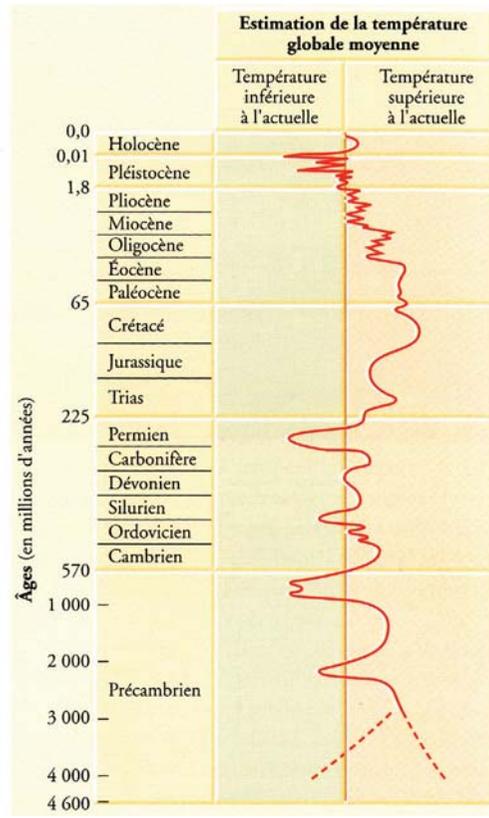
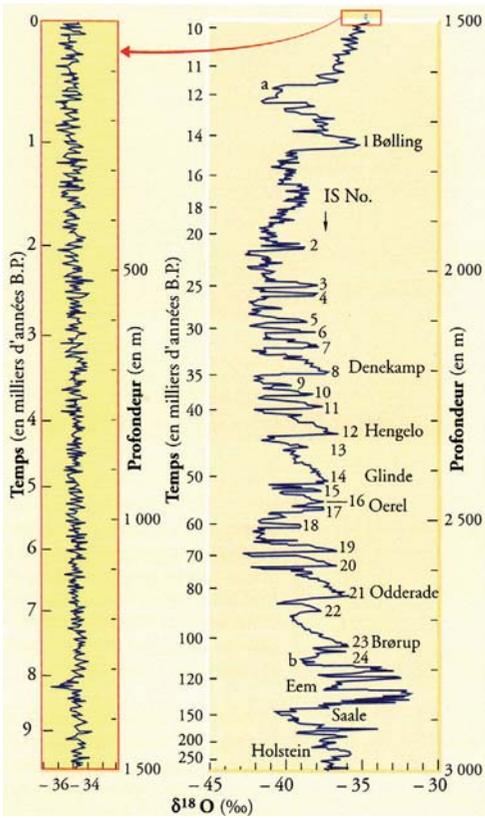


Figure 3.10. Évolution de la température au cours de l'histoire de la Terre, reconstituée à partir d'observations géologiques (d'après S. Jousseau, *Climats d'hier à demain*, CNRS-Éditions/CEA, 1993).

nombreuses autres espèces animales. Il est aujourd'hui largement admis que la chute d'une météorite géante, d'une dizaine de kilomètres de diamètre, dans le bassin de Chixchulub au Mexique, a été à l'origine de cette catastrophe ; il n'est pas exclu qu'une activité volcanique intense y ait parallèlement contribué.

Au cours de l'ère tertiaire, la dérive des continents se poursuit : l'Australie se sépare de l'Antarctique, puis, il y a environ 40 millions d'années, l'Inde va s'encaster sous la plaque eurasiennne pour former la chaîne de l'Himalaya. Les mammifères évoluent et se diversifient, (ancêtres des chevaux, mammoths) jusqu'à l'apparition des premiers hominidés, il y a plusieurs millions d'années. Alors intervient, il y a environ 2 millions d'années, une nouvelle période de refroidissement : nous entrons dans l'ère quaternaire, marquée par une série de glaciations successives. La dernière, il y a environ dix mille ans, s'est étendue depuis les hautes latitudes jusqu'au centre de la France. L'alternance de ces glaciations successives a pu être expliquée par le

mathématicien Milankovitch, qui l'a associée à une variation des paramètres orbitaux de la Terre (excentricité, obliquité, précession des équinoxes), eux-mêmes influencés par les perturbations gravitationnelles liées aux planètes voisines avec des périodes de quelques dizaines de milliers d'années. Cependant, les variations à plus petite échelle restent mystérieuses. Entre -8000 et -6000 ans la température moyenne augmente à nouveau, provoquant le développement de la végétation au Sahara. Puis, il y a 5000 ans, la chute des températures entraîne sa désertification. Plus récemment, un autre « petit âge glaciaire » intervient entre le XV^e et le XIX^e siècles, mettant fin à l'« optimum climatique médiéval » qui avait notamment permis la colonisation du Groenland par les Vikings.

Ce qui frappe dans l'histoire du climat terrestre, comparativement à celui de Vénus et de Mars, c'est la relative stabilité de sa température. On sait en effet que l'atmosphère de Vénus s'est considérablement réchauffée au cours de son histoire, tandis que celle de Mars s'est au contraire refroidie et dissipée dans l'espace. Quels sont les facteurs qui sont à l'origine de cette stabilité ? Le premier est sans conteste la présence d'un océan liquide : la Terre étant située juste à bonne distance du Soleil pour garder sa température de surface entre 0 et 100 °C. Mais ce facteur en lui seul n'était sans doute pas suffisant : l'équilibre entre le flux solaire croissant et la disparition progressive du CO₂ atmosphérique aura sans doute assuré l'équilibre nécessaire. Peut-être la planète Vénus a-t-elle, au tout début de son histoire, abrité un océan liquide ; mais sa présence rapprochée du Soleil aura, dans ce cas, provoqué son évaporation, d'où un effet de serre renforcé par les grandes quantités de CO₂ et H₂O gazeux.

8 Le couple Terre-Lune : un système double

Un autre facteur essentiel pour la stabilité du climat terrestre a sans doute été la présence de la Lune. Les calculs de mécanique céleste ont en effet montré que la présence de notre satellite a eu pour effet de stabiliser l'obliquité de l'axe de rotation terrestre. En l'absence de satellite, celui-ci aurait oscillé périodiquement ; les calculs réalisés dans le cas de Mars montrent que cette obliquité peut atteindre 60°. Si l'axe de la Terre avait connu de telles oscillations, les fluctuations climatiques induites auraient sans nul doute été considérables.

Le couple Terre-Lune est unique dans le système solaire. La taille de la Lune et sa densité la différencient des autres satellites et la rapprochent de la classe des planètes telluriques ; en ce sens, on peut considérer l'ensemble Terre-Lune comme un système double. Observée depuis l'Antiquité, étudiée depuis Galilée, la Lune a fait l'objet d'une intense campagne d'exploration spatiale dans les années 1960 et 1970, menée par les États-Unis (avec le programme Apollo d'exploration habitée de

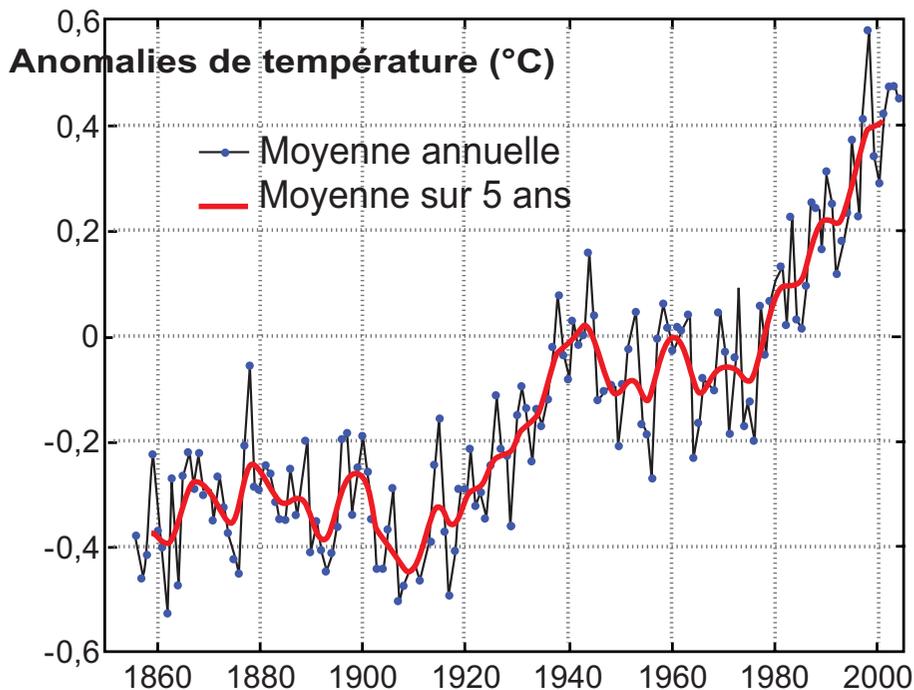


Figure 3.11. Élévation de température en fonction du temps au cours des 150 dernières années (© Globalwarming, 2007 & GIEC AR4).

la Lune) et l'Union soviétique (avec le programme robotique de collecte d'échantillons). Les enjeux étaient alors surtout politiques, mais la science a su en tirer le plus grand profit. Le résultat scientifique majeur est sans doute la datation des échantillons lunaires, rapportés sur Terre pour une analyse chimique et minéralogique. Les mesures in situ ont aussi permis la détermination de la composition minéralogique de la surface, une mesure de son champ magnétique (très faible), un sondage de sa structure interne et enfin une mesure de la composition du vent solaire (ces particules énergétiques émises par le Soleil ayant été piégées sur des feuilles d'aluminium déposées sur le sol lunaire et ramenées ensuite sur Terre).

Nous avons vu (chapitre 2) que le scénario de formation des planètes du système solaire ne favorise pas la formation de satellites autour des planètes telluriques, car la phase d'accrétion du noyau rocheux n'est pas suivie d'une phase d'effondrement en un disque équatorial de la matière environnante (comme c'est le cas pour les planètes géantes). Quelle est alors l'origine de la Lune ? Outre sa masse relativement élevée, le scénario de sa formation doit pouvoir rendre compte de sa densité ($3,3 \text{ g/cm}^3$), sensiblement plus faible que celle de la Terre. Plusieurs modèles ont été proposés

suite à l'exploration spatiale des années 1970 : fission d'une partie du manteau terrestre, de densité comparable à celle de la Lune ; capture par la Terre d'une Lune formée ailleurs indépendamment de la Terre ; accréation en orbite autour de la Terre. À partir des années 1980, le développement des modèles de simulation numérique a permis de proposer un scénario qui est aujourd'hui largement accepté par la communauté scientifique. On pense aujourd'hui que le système Terre-Lune est né de l'impact latéral entre la jeune Terre (âgée de quelques dizaines de millions d'années) et une planète plus petite, de la taille de Mars. Cette collision a eu pour effet d'entraîner la fusion des deux noyaux riches en éléments lourds et d'éjecter en orbite terrestre une partie des manteaux des deux corps. Les débris orbitaux, plus légers, se sont ensuite assemblés pour former la Lune. Ce scénario a l'avantage d'expliquer la densité actuelle de la Lune mais aussi son orbite initiale, très elliptique et inclinée, que l'on peut déduire de son taux de récession actuel à partir de modèles dynamiques. La distance Terre-Lune augmente actuellement de 4 cm/an à cause de l'effet de marée, également responsable de la rotation synchrone de la Lune. Dans le cas de Mars, le même effet de marée est responsable de l'éloignement progressif de son satellite Deimos, ainsi que du rapprochement de son autre satellite Phobos.

9 La Terre, une planète unique...

Ce petit tour d'horizon de l'histoire de la Terre et de son satellite nous fournit un premier enseignement : notre planète est unique dans le système solaire. Si son évolution a pu déboucher sur ce que nous connaissons, c'est grâce à une combinaison de facteurs multiples, dont certains sont difficilement quantifiables.

Au départ, la Terre se trouve à une distance héliocentrique compatible avec la présence d'eau liquide, dans les conditions du flux solaire actuel. Mais nous avons vu que le rayonnement du Soleil jeune était plus faible : il a donc fallu la présence d'une atmosphère primitive riche en gaz carbonique (et peut-être aussi en méthane) pour assurer un effet de serre suffisant, permettant d'échapper à la glaciation complète. Très tôt dans l'histoire de la planète est intervenue la collision avec une protoplanète de la taille de Mars, qui a eu pour effet de mettre en orbite un gros satellite, capable de stabiliser sur le long terme l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre.

Ensuite la vie est apparue dans les océans, mais nous ne savons toujours pas si elle est venue de l'intérieur, près des sources hydrothermales, ou de l'extérieur, à partir de molécules prébiotiques apportées par les impacts météoritiques et cométaires. La libération de l'oxygène a permis la constitution de la couche d'ozone et a rendu possible le développement de la vie sur les continents. À plusieurs reprises, des périodes de glaciation totale auraient pu « geler » définitivement la planète en une boule de neige définitive ; mais son énergie interne a permis de générer l'activité

volcanique suffisante pour réalimenter l'effet de serre. Il y a 65 millions d'années, une catastrophe écologique a permis, sans doute indirectement, l'émergence et le développement des mammifères puis, après de multiples diversifications, de l'espèce humaine.

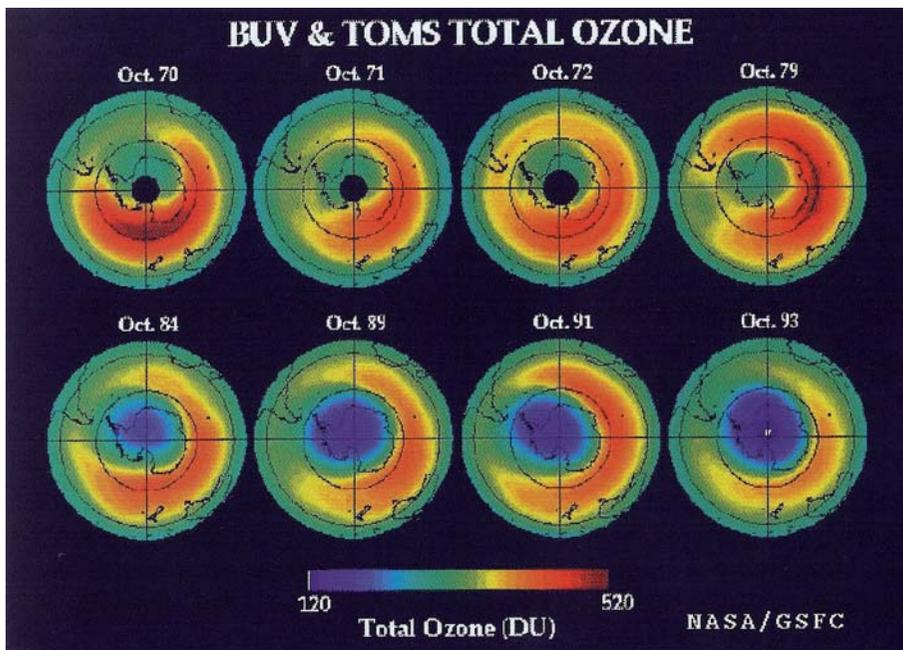


Figure 3.12. L'évolution du trou d'ozone au-dessus du pôle sud entre 1970 et 1993, mesurée à partir d'observations satellitaires. Depuis une dizaine d'années, les mesures prises au niveau mondial pour limiter le taux de CFC ont permis d'enrayer la diminution de l'ozone polaire en hiver (©NASA/GSFC).

Quel est l'avenir de la planète Terre ? Nous nous trouvons actuellement à un tournant de l'histoire du climat terrestre. Depuis un siècle, l'activité humaine a modifié celui-ci de façon sensible. Les activités industrielles sont la cause d'une augmentation du taux de CO_2 atmosphérique et donc de la température. Un autre impact de l'activité industrielle sur le climat a été l'utilisation de fréon, ou chlorofluorocarbures (CFC), qui s'est traduit par le tristement célèbre « trou d'ozone » (Fig. 3.12) : les CFC, émis en grande quantité au début de l'ère industrielle, ont en effet le pouvoir de détruire les molécules d'ozone stratosphérique car ils servent de catalyseurs dans des réactions photochimiques entraînant la destruction de O_3 . Suite à la découverte du « trou d'ozone » au début des années 1980, des mesures ont été prises pour éliminer l'usage des CFC, et on peut espérer aujourd'hui que le phénomène est en voie de régression. Le problème du réchauffement climatique est autrement plus grave, car les constantes de temps sont très longues : même si l'on arrivait aujourd'hui à

stabiliser les émissions de CO₂, les effets ne se feraient pas sentir avant une centaine d'années. . . Des modèles numériques ont été développés pour tenter de prévoir l'élévation de température à attendre dans le siècle à venir. Les incertitudes sont grandes mais, dans tous les cas de figure, les prévisions sont très inquiétantes. La température pourrait s'élever de quelques degrés d'ici 2030, et le niveau des mers pourrait s'élever de quelques dizaines de centimètres, entraînant l'immersion de nombreuses zones côtières. Les conséquences climatiques seraient considérables : pendant le Petit Âge Glaciaire, la température moyenne n'était inférieure que de 1 °C à la température actuelle. . .

Depuis une dizaine d'années, l'humanité a pris conscience à l'échelle planétaire de la gravité et de l'urgence du problème causé par le réchauffement climatique. De nouvelles mesures s'imposent, concernant les économies d'énergie, la recherche de sources d'énergies alternatives, et la sauvegarde de l'environnement.

Vj ku' r ci g' l p v g p v k p c m (' i g h ' d r e p m

4

Les voisines de la Terre

Mercury, Vénus, la Terre et Mars : quatre planètes qui appartiennent à la même catégorie, celle des planètes telluriques (aussi appelées planètes « rocheuses »), mais qui n'en présentent pas moins des différences extrêmes. Quelles sont les similitudes et les différences entre les planètes telluriques, et quelle en est l'origine ? C'est tout l'objet de ce chapitre.

Les caractéristiques communes aux planètes telluriques résultent naturellement de leur mode de formation (voir chapitre 2). Formées relativement près du Soleil à partir de matériau solide réfractaire, les planètes telluriques sont dotées d'une densité élevée, mais sont de petite taille, du fait de l'abondance limitée de ce matériau. Leur champ de gravité n'a pas été suffisant pour capturer le gaz protosolaire environnant comme l'ont fait, à de plus grandes distances du Soleil, les planètes géantes. L'atmosphère qui les entoure ne constitue donc qu'une infime fraction de leur masse. Même dans le cas de Vénus, qui possède l'atmosphère la plus dense, la masse de celle-ci est inférieure au dix-millième de celle de la planète solide. Les planètes telluriques ont acquis leur atmosphère partiellement par dégazage, mais sans doute surtout grâce au bombardement météoritique par les astéroïdes et les comètes. Autre spécificité des planètes telluriques : elles n'ont pas ou peu de satellites ; ceux qui existent – la Lune autour de la Terre, Phobos et Deimos autour de Mars – n'ont pas été formés en même temps que la planète, mais résultent d'une collision ou d'une capture. Mentionnons enfin un autre point commun aux trois planètes dotées d'une atmosphère : leur composition atmosphérique initiale, à base de gaz carbonique, d'eau et d'azote, était sans doute semblable ; la composition actuelle de l'atmosphère terrestre résulte de la présence d'eau liquide et de l'apparition de la vie (voir chapitre 3, paragraphe 7).

Venons-en maintenant aux différences entre les planètes telluriques. Mettons de côté Mercure, trop petite et trop proche du Soleil pour conserver une atmosphère

stable. Les trois autres planètes ont des conditions de surface qui varient à l'extrême entre l'enfer de Vénus, dotée d'une pression de surface de près de 100 bars et d'une température de 457 °C, et les déserts de Mars où la pression au sol est inférieure au centième de bar et où la température de surface peut osciller entre 0 °C à l'équateur et -100 °C aux pôles. Entre ces deux extrêmes, la Terre présente des conditions de température et de pression qui lui permettent de conserver l'eau sous forme liquide, et c'est bien ce qui nous permet aujourd'hui d'en parler. . .

1 Au plus près du Soleil, Mercure

Situé à moins de 0,4 UA du Soleil, Mercure est difficilement observable depuis la Terre, car sa distance angulaire au Soleil est toujours inférieure à 30° ; la planète se présente sous la forme d'un mince croissant, visible à l'aube ou au crépuscule. Une exploration spatiale était donc nécessaire ; la première a eu lieu dans les années 1970 avec la mission américaine *Mariner 10*. Plus récemment, la mission *Messenger*, lancée en août 2004, elle aussi par la NASA, a survolé la planète en janvier 2008 puis en octobre 2008 ; un troisième rendez-vous a eu lieu en septembre 2009. La mission *Bepi Colombo*, en préparation à l'Agence spatiale européenne, devrait être lancée vers 2014 pour une mise en orbite en 2019.

La période de rotation de Mercure (59 jours) est en résonance 2: 3 avec sa période de révolution (88 jours), ce qui veut dire que la planète effectue trois rotations sur elle-même pendant qu'elle effectue deux révolutions autour du Soleil ; ce rapport correspond à une configuration dynamiquement stable du système Mercure-Soleil. Mercure ne présente donc pas le même côté au Soleil en permanence, comme le fait la Lune vis-à-vis de la Terre. Son faible champ de gravité et la température élevée de la surface du côté jour ne permettent pas à Mercure de posséder une atmosphère stable. Sa surface, très cratérisée, ressemble à s'y méprendre à celle de la Lune. Elle témoigne de l'intense bombardement météoritique qui s'est manifesté à la fin du premier milliard d'années après la formation des planètes (voir chapitre 2, paragraphe 3.3). En dehors des impacts, la surface de Mercure n'a pas subi de modification depuis son origine, car l'énergie interne associée à sa masse a été insuffisante pour générer une activité volcanique ou tectonique.

L'absence d'atmosphère se traduit par des températures très élevées du côté jour (près de 700 K, soit plus de 400 °C), mais très basses du côté nuit (90 K, soit environ -180 °C). En particulier, en raison de l'absence d'obliquité, certaines régions polaires peuvent se trouver en permanence dans l'ombre. Leur température serait alors suffisamment basse pour garder sous forme de glace des résidus provenant d'impacts d'origine cométaire, riches en eau. De tels dépôts pourraient avoir été

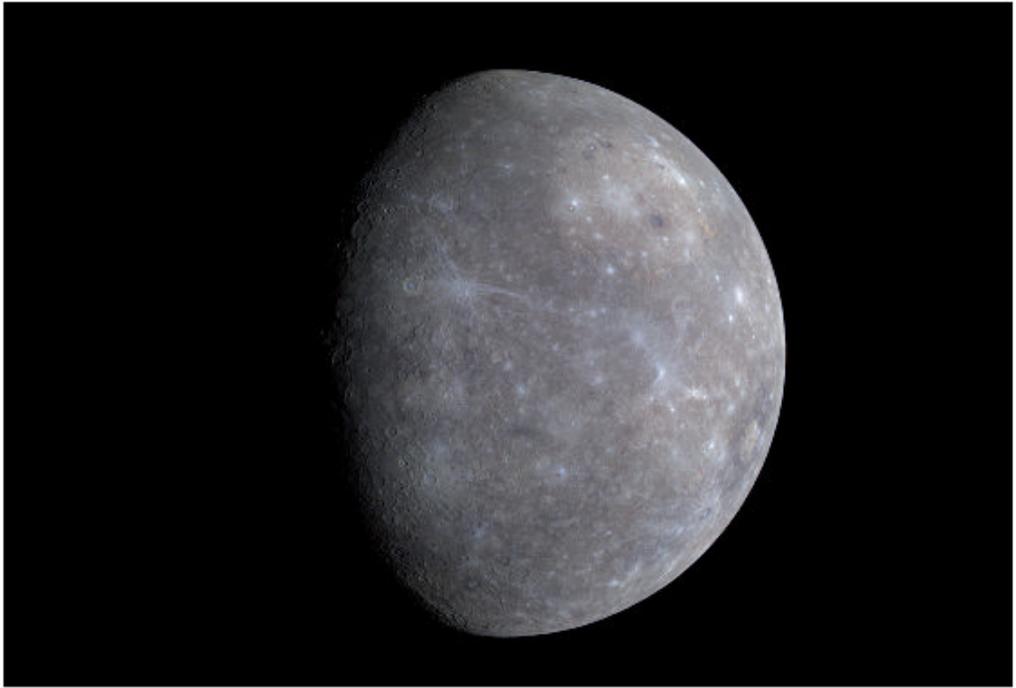


Figure 4.1. La planète Mercure vue par la sonde *Messenger* (©NASA).

détectés par mesure radar ; les données des sondes *Messenger* puis *Bepi Colombo* permettront de confirmer ou d'infirmier ce résultat.

La densité de Mercure est remarquablement élevée. Elle est presque égale à celle de la Terre alors que notre planète subit un facteur de compression dû à sa masse près de vingt fois plus élevée. Ceci implique que la proportion d'éléments lourds sur Mercure est sensiblement plus élevée que dans les autres planètes telluriques. Comment la planète s'est-elle débarrassée des éléments solides plus légers, qui devraient logiquement être présents plus près de la surface ? Peut-être ceux-ci ont-ils été éjectés suite à une collision majeure ; l'immense bassin Caloris, vieux de 3,8 milliards d'années, témoigne de la possibilité d'une telle hypothèse.

Une autre découverte est à mettre à l'actif de la sonde *Mariner 10* : l'existence d'un champ magnétique, détecté par la présence d'une magnétosphère. Le champ magnétique est faible, en comparaison du champ magnétique terrestre mais sa présence sur Mercure est très inattendue. D'après sa densité élevée, Mercure doit posséder un noyau riche en fer mais, compte tenu de la faible masse de la planète, on se serait attendu à un noyau solide ; de plus, la faible rotation de la planète ne plaide pas en faveur d'un champ magnétique intense. Quelle qu'en soit la raison, l'étude



Figure 4.2. La sonde *Mariner 10* (©NASA).

et la compréhension du champ magnétique de Mercure constituent l'un des enjeux majeurs de l'exploration de Mercure.

Lancée en 2007 par la NASA, la mission *Messenger* a effectué trois survols de Mercure entre janvier 2008 et septembre 2009. La sonde se mettra en orbite autour de la planète à partir de mars 2011 pour une exploration en profondeur de Mercure et de son environnement. Les trois survols ont permis de compléter la cartographie en longitude de la surface ; celle-ci couvre maintenant toutes les latitudes à l'exception des pôles. Les images ont mis en évidence, en certaines régions, des signes d'activité tectonique passée (contraction ou extension de la croûte). De manière beaucoup plus surprenante, le comptage des cratères a mis en évidence des régions datées de moins d'un milliard d'années, ce qui pourrait être le signe d'une activité volcanique relativement récente. La morphologie de certains cratères et le niveau très plat de certaines plaines, sans doute remplies de lave, appuient cette hypothèse. Voilà qui relance l'intérêt des planétologues qui voyaient en Mercure une planète depuis longtemps inactive... De nouveaux résultats sont à attendre des observations orbitales de *Messenger* et, plus tard, de la mission européenne *Bepi-Colombo*, actuellement en phase de développement à l'ESA, en partenariat avec l'agence spatiale japonaise JAXA ; le lancement de la mission est prévu pour 2014. Deux orbiteurs exploreront simultanément la planète ; l'orbiteur européen sera dédié à l'étude de sa surface et de son intérieur tandis que l'orbiteur japonais étudiera la magnétosphère de Mercure et l'interaction de la planète avec le vent solaire.

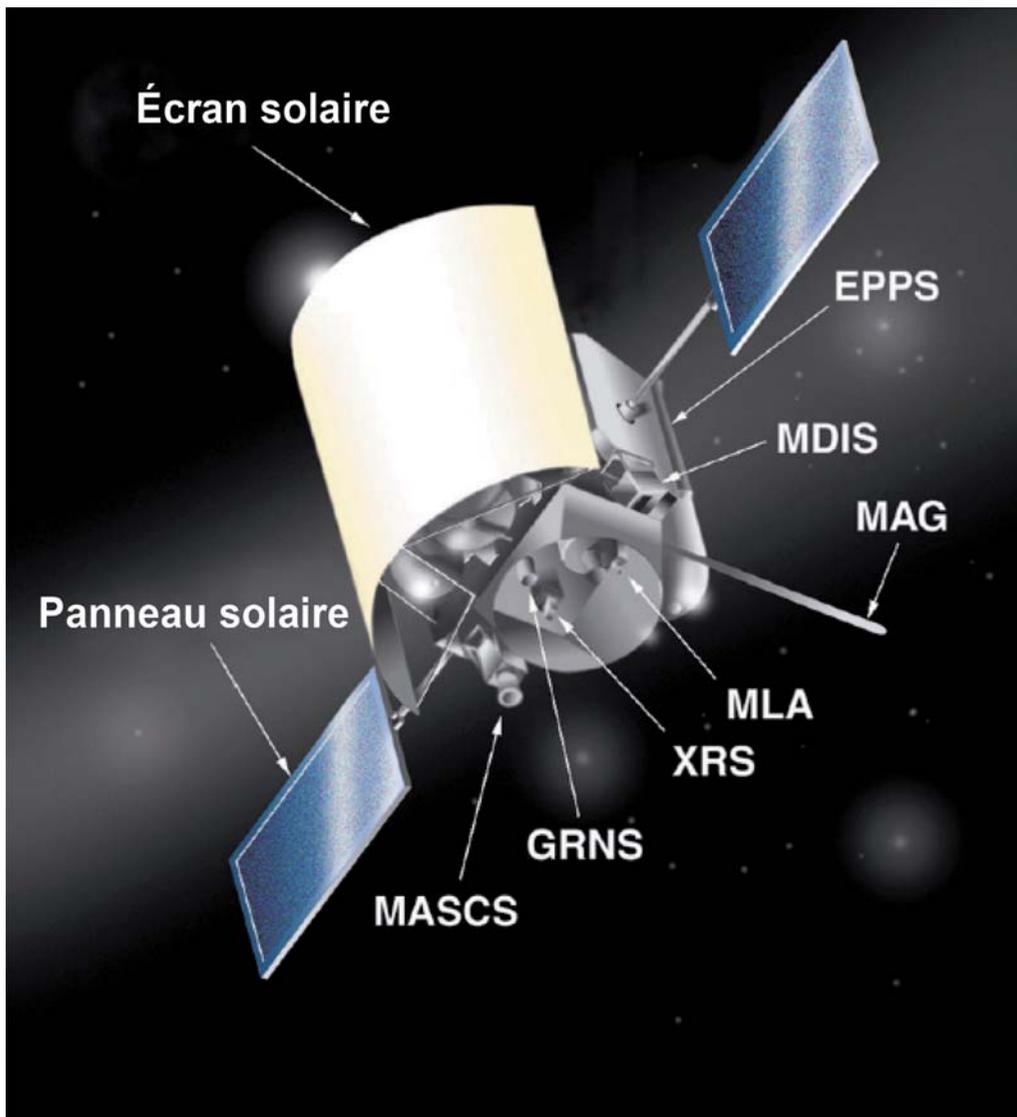


Figure 4.3. La sonde *Messenger* (©NASA).

2 Une Lune qui ressemble à Mercure

Si l'on considère sa distance au Soleil, la Lune ne devrait pas apparaître dans cette section, mais après celle de Vénus. Qui plus est, il ne s'agit pas d'une planète mais

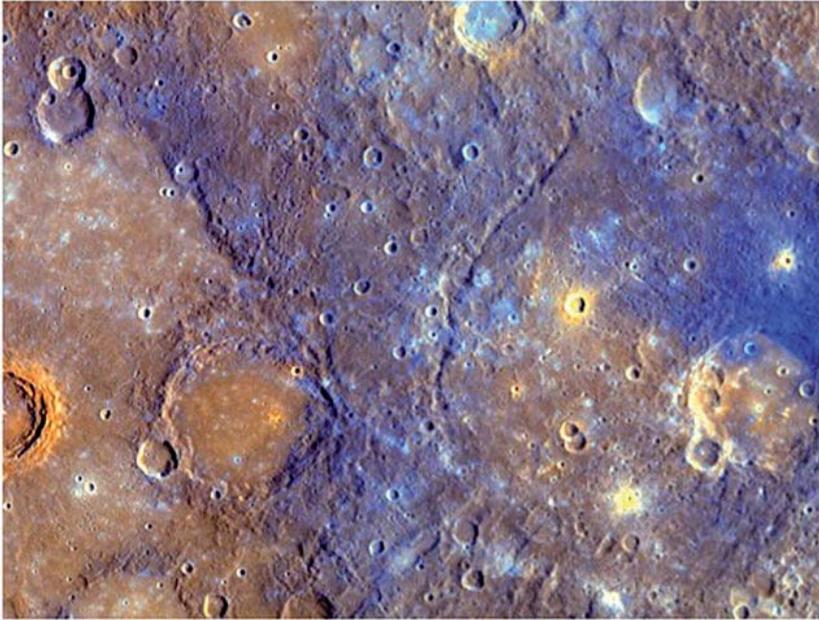


Figure 4.4. La surface de Mercure photographiée par la sonde *Messenger* (©NASA).

d'un satellite. Toutefois, sa nature justifie que l'on range notre satellite dans la classe des planètes telluriques, juste après Mercure.

La Lune est en effet, comme Mercure, un corps rocheux dénué d'atmosphère : sa gravité est insuffisante pour retenir une atmosphère stable. De plus, sa surface, criblée de cratères, ressemble de manière frappante à celle de Mercure. Dans les deux cas, il s'agit de surfaces anciennes qui ont très peu évolué depuis l'époque du bombardement tardif, moins d'un milliard d'années après la formation des planètes. Pourtant, à la différence de Mercure, la Lune ne peut pas être considérée comme un objet tellurique typique, susceptible d'être découvert dans un système planétaire de type solaire, à la même distance de son étoile. Nous l'avons vu (chapitre 3, paragraphe 8), la densité anormalement faible de la Lune est la conséquence de son mode de formation. Suite à la collision de la jeune Terre avec une protoplanète de masse comparable à celle de Mars, elle a accreté en orbite terrestre les éléments plus légers des couches externes des deux corps. On ne s'attendrait donc pas à trouver, à la distance orbitale de la Terre, une planète rocheuse si peu dense.

La Lune nous intéresse aussi pour une autre raison. Quelles qu'en soient les raisons (bien loin d'être dominées par la science), la Lune a fait l'objet, avec les missions américaines Apollo, d'un programme d'exploration spatiale sans précédent. Le résultat scientifique majeur en est la collecte d'échantillons lunaires et la datation

absolue des échantillons lunaires. L'exploration spatiale par les missions Apollo nous a aussi permis de caractériser sa surface. Après plusieurs décennies d'interruption, la Lune a fait l'objet d'attentions nouvelles de la part des agences spatiales : après les missions technologiques Clementine et Smart-1 lancées respectivement par la NASA et par l'ESA en 1994 et 2003, ce sont les agences chinoise, indienne, japonaise et américaine qui ont envoyé des missions robotiques en orbite autour de la Lune.



Figure 4.5. La surface de la Lune photographiée par la sonde japonaise Kaguya le 31 octobre 2007 depuis une altitude de 100 km (©JAXA).

La surface de la Lune se divise en deux grandes catégories : les plateaux, d'albédo élevé, et les plaines, plus sombres. Les plateaux, très cratérisés, sont plus anciens et de densité relativement faible ($2,75 \text{ g/cm}^3$). Les plaines, ou « mers », sont de formation plus récente. Elles résultent de gros impacts et se sont remplies de lave basaltique de couleur grise. La Lune présente par endroits de fortes dénivelées avec, près du pôle Sud, les monts Leibnitz d'une altitude proche de 5 km. On pense que les montagnes lunaires résultent du bombardement météoritique et non, comme sur la Terre, d'une tectonique des plaques.

La géologie lunaire est bien connue depuis les missions Apollo puis Clementine. Les matériaux qui forment sa surface sont essentiellement des silicates, de même composition que sur la Terre. Ces matériaux sont recouverts d'une couche de régolite, débris résultant des impacts météoritiques, dont l'épaisseur peut atteindre quelques mètres. Les laves basaltiques apparaissent plus riches en fer que les plateaux, et sont de faible viscosité, d'où leur grande fluidité.

Depuis quelques années, nous assistons à une renaissance de l'exploration spatiale robotique lunaire. Lancée en octobre 2008 et en opération jusqu'en août 2009, la sonde Chandrayaan 1, lancée par l'agence spatiale indienne ISRO, a créé la surprise en annonçant la détection de volatiles (vapeur d'eau et glace d'eau), à l'état de traces, adsorbés à la surface lunaire. Ces résultats ont été confirmés par d'autres mesures, en particulier celles de la sonde *Cassini*, faites à l'occasion de son survol de la Terre en 1999. Les traces d'hydratation pourraient être le résultat de l'impact de la surface lunaire par le vent solaire, mais le mécanisme d'adsorption n'est pas encore bien compris.

Quel sera l'avenir de l'exploration spatiale lunaire ? Les enjeux sont avant tout politiques mais la science pourrait en tirer parti. La France pourrait participer à une prochaine mission japonaise, *Selene-2*, dont l'objectif est de déposer un rover à la surface lunaire. La France pourrait fournir un sismomètre destiné à étudier la structure interne de la Lune.

3 Vénus, la fournaise

Vénus est la planète la plus brillante du ciel. Visible, comme Mercure, au lever et au coucher du Soleil, l'« étoile du berger » servit de repère céleste depuis l'Antiquité. À environ 0,7 UA du Soleil, Vénus est, de par sa taille et sa densité, très comparable à la Terre. Une différence majeure toutefois : son axe de rotation est très proche de la perpendiculaire à l'écliptique, mais il est orienté vers le sud, à l'encontre de toutes les autres planètes du système solaire. Sa rotation est donc rétrograde, avec une période de rotation très longue, de 243 jours. Quelle est l'origine de cette anomalie ? Collision au début de son histoire ou évolution dynamique chaotique, la question n'est pas encore complètement élucidée.

3.1 Des traces d'un volcanisme passé... et peut-être présent ?

D'emblée, les images de Vénus, en lumière visible, nous indiquent qu'elle est très différente de la Terre. Une couche opaque et uniforme de nuages d'une couleur blanc verdâtre nous masque la surface ; elle est située à des niveaux de pression compris entre 1 et 0,1 bar. Grâce aux mesures réalisées depuis le sol dans le domaine radio, puis, dans les années 1980, grâce aux multiples sondes spatiales (sondes *Venera*, lancées par l'URSS ; *Pioneer Venus* et *Magellan*, lancées par la NASA) qui se sont mises en orbite en essayant parfois de poser un module à sa surface, nous connaissons aujourd'hui les conditions torrides de la basse atmosphère. En 1982, les sondes soviétiques *Venera* nous ont envoyé les premières images du sol de Vénus ; en 1992, le radar de la sonde américaine *Magellan* nous a fourni une reconstruction complète de la surface de Vénus. On sait que Vénus, aujourd'hui, ne présente pas

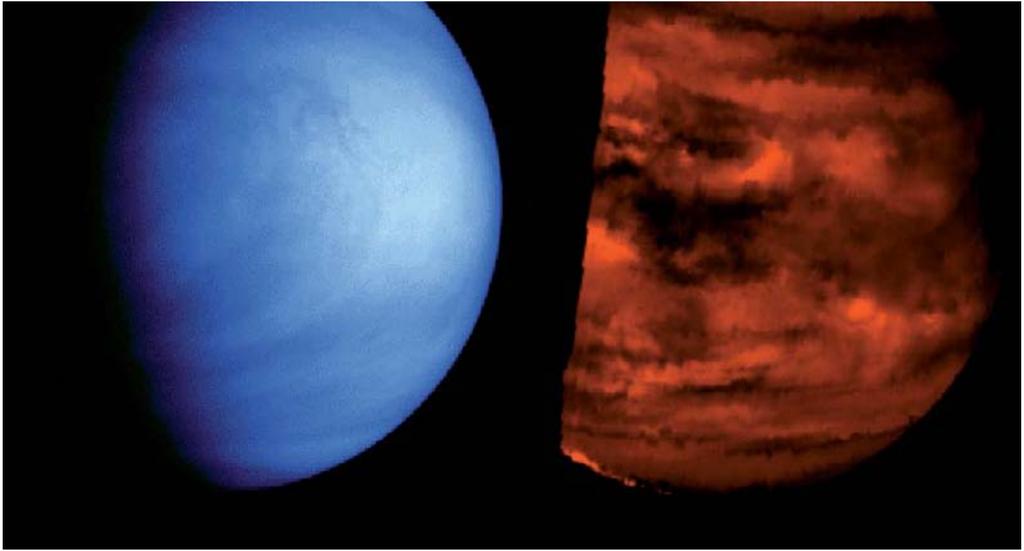


Figure 4.6. La planète Vénus observée en ultraviolet (à gauche) et en infrarouge (à droite) par la sonde *Galileo*, lors de son survol de la planète en décembre 1989 (©NASA).

de tectonique des plaques, ce qui pourrait être dû à l'absence d'eau. La croûte, d'épaisseur sensiblement uniforme, est constituée de basaltes. De plus, la surface de Vénus est jeune (moins d'un milliard d'années), comme en témoigne le petit nombre de cratères d'impact présents à sa surface, ce qui est le signe d'un volcanisme récent. Aucun champ magnétique n'ayant été détecté, nous n'avons pas d'information sur l'intérieur de Vénus. L'absence de champ magnétique pourrait être due au fait que le noyau est solide, ou alors à l'absence de convection au sein d'un noyau partiellement liquide.

L'atmosphère de Vénus est constituée très majoritairement de gaz carbonique (96,5 %), avec une petite contribution d'azote (3,5 %). D'autres constituants mineurs (CO , H_2O , SO_2 , H_2S) sont présents à l'état de traces, avec des abondances qui varient avec l'altitude. Entre 40 et 70 km d'altitude, la planète est couverte de plusieurs couches nuageuses constituées essentiellement d'acide sulfurique H_2SO_4 . Dans le domaine visible, cette couche nuageuse masque complètement la basse atmosphère de Vénus. Heureusement, dans l'infrarouge proche, il existe des fenêtres spectrales partielles, entre les bandes d'absorption du gaz carbonique, où le rayonnement émis vers l'extérieur provient des couches atmosphériques les plus basses, et même, dans certains cas, de la surface elle-même. La spectroscopie dans l'infrarouge proche fournit ainsi un moyen unique de sonder la basse atmosphère de Vénus (Fig. 4.6). Des mesures ont été obtenues au début des années 1990, depuis le sol et avec la

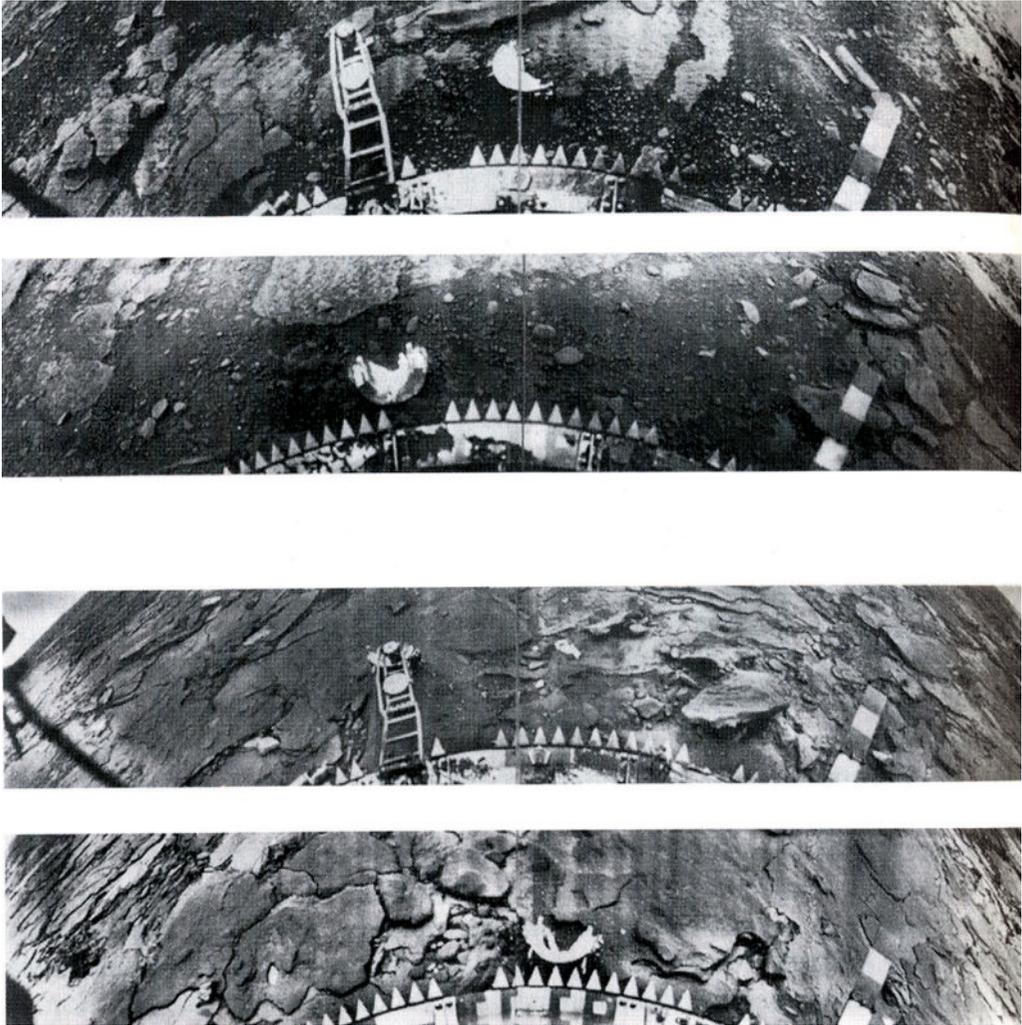


Figure 4.7. La surface de Vénus photographiée par les sondes *Venera 13* (haut) et *Venera 14* (bas) en mars 1982 (© Académie des sciences de l'Union Soviétique).

sonde spatiale *Galileo* qui a survolé la planète avant de repartir vers le système de Jupiter, sa destination finale. Toutes ces mesures ont permis de reconstituer ce qu'est sans doute le cycle du soufre sur Vénus : au niveau des nuages, SO_2 , présent dans la basse atmosphère, est photolysé en SO_3 puis réagit avec H_2O pour former l'acide sulfurique H_2SO_4 qui condense et retombe à la surface où il pourrait former le sulfate de calcium CaSO_4 . La présence permanente de nuages d'acide sulfurique semble indiquer l'existence d'une source de SO_2 , sans doute par volcanisme. Les images de

la surface reconstituées à partir des données radar de *Magellan* ont montré que la planète était recouverte de volcans relativement jeunes, datant du dernier milliard d'années. Cependant, aucune preuve de volcanisme actif n'a été à ce jour détectée à la surface de Vénus.



Figure 4.8. La sonde *Venus Express* (© ESA).

Depuis 2006, la sonde européenne *Venus Express*, en orbite autour de la planète, étudie son atmosphère et son interaction avec le milieu interplanétaire. Vénus présente, comme la Terre, une circulation méridienne atmosphérique en cellules convectives dite « de Hadley » : à l'équateur, les masses gazeuses chauffées par le Soleil s'élèvent et se déplacent vers les hautes latitudes où elles redescendent (Fig. 4.9).

Le système diffère de la circulation terrestre pour deux raisons : la très faible rotation et l'absence d'obliquité. En conséquence, les cellules qui partent de l'équateur montent jusqu'aux hautes latitudes alors que sur Terre elles redescendent au niveau des tropiques pour reformer deux autres systèmes à plus haute latitude. Autre phénomène inattendu : les observations de Vénus ont montré que l'atmosphère est en super-rotation par rapport à sa surface : la période de rotation zonale (c'est-à-dire le long des parallèles) au niveau des nuages supérieurs n'est que de quatre jours, alors que celle-ci est de 245 jours à la surface ! L'origine de ce phénomène pourrait être l'existence d'ondes thermiques générées localement au point subsolaire (c'est-à-dire le point de la surface où le Soleil est vu au zénith).

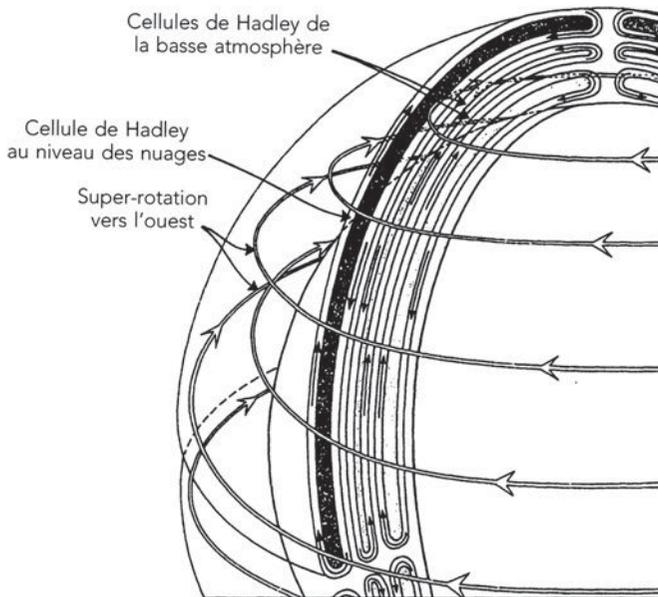


Figure 4.9. La circulation atmosphérique de Vénus. Comme pour la Terre, il s'agit d'une circulation convective dite de Hadley. Du fait de la rotation très lente de la planète, la cellule issue de l'équateur s'étend jusqu'aux hautes latitudes (d'après G. Schubert, dans « Venus », D. M. Hunten *et al.*, University of Arizona Press, 1983).

3.2 L'histoire passée de Vénus révélée par l'eau lourde

Aujourd'hui, l'eau pour Vénus n'est qu'un constituant atmosphérique très minoritaire : moins du dix-millième de la pression totale dans la basse atmosphère, encore bien moins au-dessus des nuages où elle est piégée avec SO_3 sous forme de H_2SO_4 . Pourtant, nous avons la preuve que l'eau a été présente en grandes quantités dans l'atmosphère primitive de Vénus. D'où vient cette certitude ? De la molécule HDO,

aussi appelée eau lourde ; dans cette molécule d'eau, l'un des atomes d'hydrogène est remplacé par son isotope le deutérium, formé d'un proton et d'un neutron, et donc deux fois plus lourd que l'atome d'hydrogène. La molécule HDO présente des signatures spectroscopiques différentes de celles de H_2O , et son abondance dans un astre peut donc être mesurée indépendamment de celle de l'eau. Toutes deux peuvent être mesurées dans le spectre infrarouge thermique provenant de la basse atmosphère de Vénus (Fig. 4.10). Or toutes les mesures, y compris celles réalisées in situ, mettent en évidence un enrichissement considérable du deutérium : le rapport D/H sur Vénus est environ 120 fois plus élevé que sur Terre !

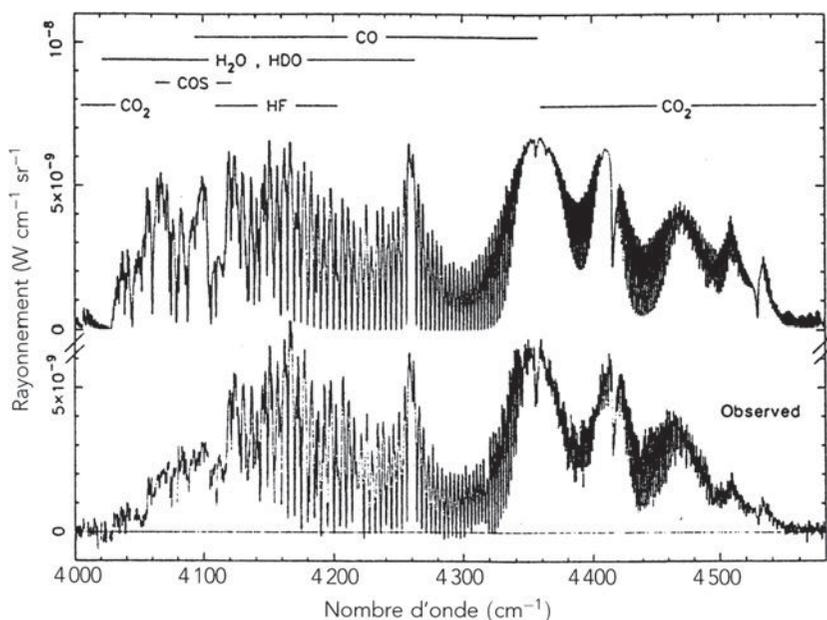


Figure 4.10. Le spectre thermique de Vénus. En haut : spectre synthétique ; en bas : spectre observé. Enregistré du côté nuit de la planète, entre les fortes bandes d'absorption de CO_2 , le spectre thermique de Vénus sonde les couches atmosphériques profondes et permet, en particulier, de mesurer le rapport D/H, à partir de HDO/H_2O (d'après B. Bézard *et al.*, Nature, 1990).

Pour expliquer un tel écart, une explication, aujourd'hui largement acceptée par la communauté scientifique, a été proposée. L'eau a sans doute été très abondante sur Vénus autrefois, peut-être aussi abondante que sur la Terre aujourd'hui. Mais elle s'est peu à peu échappée, sans doute après photodissociation, selon un mécanisme encore mal compris. La molécule H_2O , plus légère que HDO, s'est échappée préférentiellement, entraînant un enrichissement progressif de l'atmosphère résiduelle en HDO.

L'échappement de l'eau a pu être favorisé par l'absence de magnétosphère autour de Vénus. On pense en effet que celle-ci, quand elle existe (c'est le cas de la Terre) joue un rôle de cavité protectrice face au flux de particules du vent solaire (voir chapitre 3, paragraphe 6). Or Vénus, nous l'avons vu, ne présente pas de champ magnétique, ce qui est surprenant compte tenu de ses conditions de masse et de densité, très voisines de celles de la Terre. Même en tenant compte de la faible rotation de la planète, on attendrait un champ supérieur aux limites qui ont été mesurées. Pourquoi la planète n'a-t-elle pas de champ magnétique ? Sans doute parce qu'il n'y a pas de mouvement convectif dans le noyau. La cause pourrait être un taux de refroidissement insuffisant du noyau, lui-même lié à l'absence de tectoniques des plaques. À nouveau, l'absence d'eau a sans doute joué un rôle dans cette situation. Sur Terre, on pense que l'eau favorise la tectonique des plaques par son recyclage dans le manteau. La disparition de l'eau sur Vénus a eu pour effet d'inhiber le processus qui aurait permis l'initiation de ce mécanisme.

Revenons aux débuts de l'histoire de Vénus. Gaz carbonique et vapeur d'eau sont de puissants gaz à effet de serre. À une distance de 0,7 UA du Soleil, l'eau de Vénus s'est trouvée à l'état de vapeur dès que le Soleil a atteint le niveau de rayonnement qu'il a aujourd'hui. Notons que cela n'a pas été le cas au tout début de son histoire : les modèles d'évolution stellaire nous apprennent que le jeune Soleil rayonnait environ 70 % de son énergie actuelle. À cette époque, l'eau de Vénus a très bien pu être sous forme d'un océan. Celui-ci s'est peu à peu évaporé à mesure que le flux solaire augmentait. Toujours est-il qu'une fois l'eau sous forme de vapeur, rien n'est venu freiner l'effet de serre de Vénus ; c'est lui qui est responsable de la fournaise actuelle.

Venus Express poursuit son exploration de l'atmosphère, sa dynamique, son interaction avec la surface et avec l'extérieur. D'autres projets sont à l'étude en Europe, aux États-Unis et en Russie. L'enjeu de ces recherches : déterminer si Vénus possède aujourd'hui un volcanisme actif ; comprendre la raison de l'absence de champ magnétique et de tectonique des plaques. Il sera malheureusement très difficile d'obtenir des informations sur le passé lointain de la planète, puisque le remodelage relativement récent de la surface par le volcanisme ne nous laisse aucun indice antérieur au dernier milliard d'années.

4 Mars, un monde désertique

Avec Mars, la planète rouge, nous passons au-delà de la Terre, dans le clan des planètes extérieures. Par rapport à Vénus et à la Terre, elle est à la fois plus petite et moins dense : sa masse n'est que le dixième de celle de la Terre. Son atmosphère, nous l'avons vu, est extrêmement ténue, ce qui fait que sa surface est directement

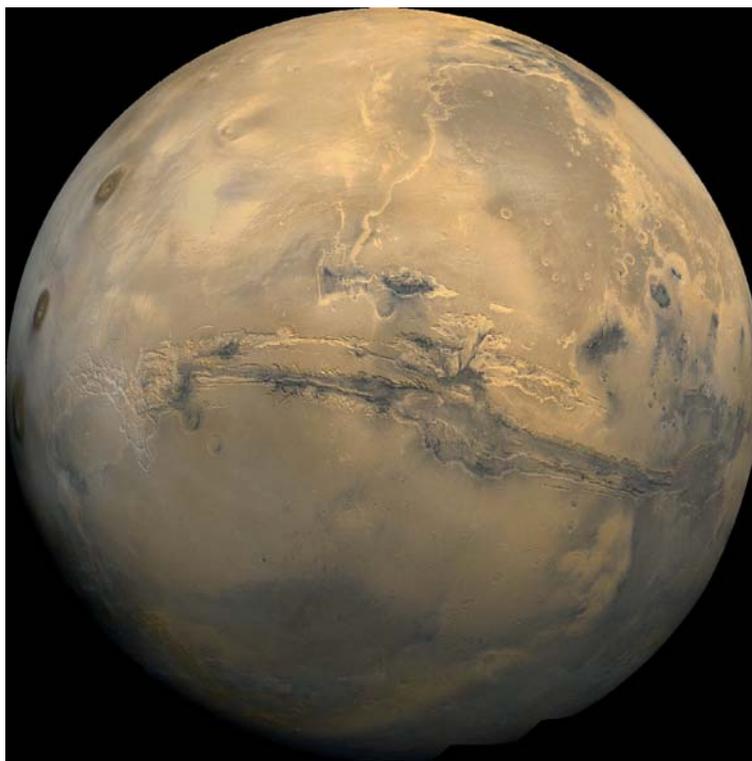


Figure 4.11. La planète Mars photographiée par la sonde *Viking* (©NASA).

observable au moyen d'un télescope terrestre. Alors que Mercure et Vénus sont dénuées de satellites, Mars en possède deux, de très petite taille (inférieure à la trentaine de kilomètres), Phobos et Deimos (voir chapitre 3, paragraphe 8). Il s'agit peut-être d'astéroïdes capturés par la planète, à moins qu'ils ne résultent d'une collision.

Dès le début de l'aventure spatiale, Mars a été une cible privilégiée : les premières tentatives, américaines et soviétiques, datent des années 1960. L'histoire de l'exploration de Mars est une aventure jalonnée d'échecs : le taux de perte des missions a été très élevé au départ, et reste, intégré sur quarante ans, de l'ordre de 50 %. Les premiers succès viennent des missions américaines *Mariner* puis *Viking*. C'est *Mariner 9*, en 1972, qui nous fournit la première cartographie de la surface, dévoilant volcans et canyons. Cette découverte majeure met définitivement fin à la polémique née des observations de Schiaparelli un siècle auparavant, et entretenue pendant des décennies par l'astronome américain Perceval Lowell, concernant l'existence possible de « canaux » (ou « chenaux ») et de traces de vie sur Mars. L'exploration de Mars, pilotée par la NASA, s'est faite à partir d'orbiteurs et de modules de descente,

puis, depuis 1997, à partir d'engins mobiles. Depuis 2003, l'Europe participe à l'aventure avec l'orbiteur *Mars Express*. Le futur de l'exploration spatiale de Mars se fera très vraisemblablement dans le cadre d'une collaboration internationale autour de la NASA et de l'ESA, avec en perspective le retour sur la Terre d'échantillons martiens.

En dépit de sa faible masse, la planète Mars présente avec la Terre deux remarquables analogies : sa période de rotation et son obliquité, toutes deux très proches des valeurs terrestres. Il s'ensuit un cycle saisonnier qui n'est pas sans rappeler le nôtre, avec la présence de calottes polaires à la fois saisonnières et pérennes. Autre analogie frappante, le relief de Mars, caractérisé par des volcans et des canyons beaucoup plus grands que sur Terre, et par des déserts ressemblant à s'y méprendre aux nôtres.

Là s'arrête l'analogie. Il existe une différence majeure dans les cycles saisonniers de Mars et de la Terre, liée à la fois à la composition atmosphérique de Mars, dominée par le gaz carbonique, et à sa basse température. Il s'ensuit une condensation périodique du CO₂ qui se dépose alternativement sur les calottes nord et sud en fonction du cycle saisonnier : un tiers de l'atmosphère est ainsi piégé aux pôles au gré des saisons, ce qui induit des vents très violents et des tempêtes de poussière qui peuvent englober la planète entière. Au cycle du gaz carbonique s'ajoutent ceux de l'eau et de la poussière. Bien que la vapeur d'eau soit un constituant très minoritaire de l'atmosphère martienne avec un rapport en volume inférieur à 1 %, l'eau, comme le CO₂, condense alternativement aux pôles (passant directement de la phase gazeuse à la phase solide) et contribue aux calottes saisonnières.

Revenons à la surface de Mars. Elle porte les plus grands volcans connus dans le système solaire : le plus élevé, Olympus Mons, haut de 25 km, est à la limite de ce que permet l'isostasie (voir chapitre 3, paragraphe 3). Avec le canyon Valles Marineris, long de 4500 km, large de 150 km et profond de 8 km par endroits (l'analogie, en plus grand, du grand rift africain sur la Terre), il montre aussi les marques d'une tectonique très active dans le passé. À la différence de Vénus, Mars a conservé les traces de son passé reculé, jusqu'à environ 3,8 milliards d'années, dans les terrains surélevés de la région sud, très fortement cratérisés (Fig. 4.12). C'est aussi dans l'hémisphère Sud que l'on trouve l'immense bassin d'impact Hellas, dont la profondeur atteint plus de 5 kilomètres en dessous du niveau moyen. Dans la partie nord, les plaines de basse altitude ont été recouvertes de lave.

4.1 Une atmosphère sèche et ténue

La composition atmosphérique de Mars, avec 95 % de CO₂, 3 % de N₂ et 1 % d'Argon, ressemble étonnamment à celle de Vénus. D'autres constituants mineurs ont des rapports de mélange inférieurs au pourcent : O₂ (0,13 %), puis CO et H₂O

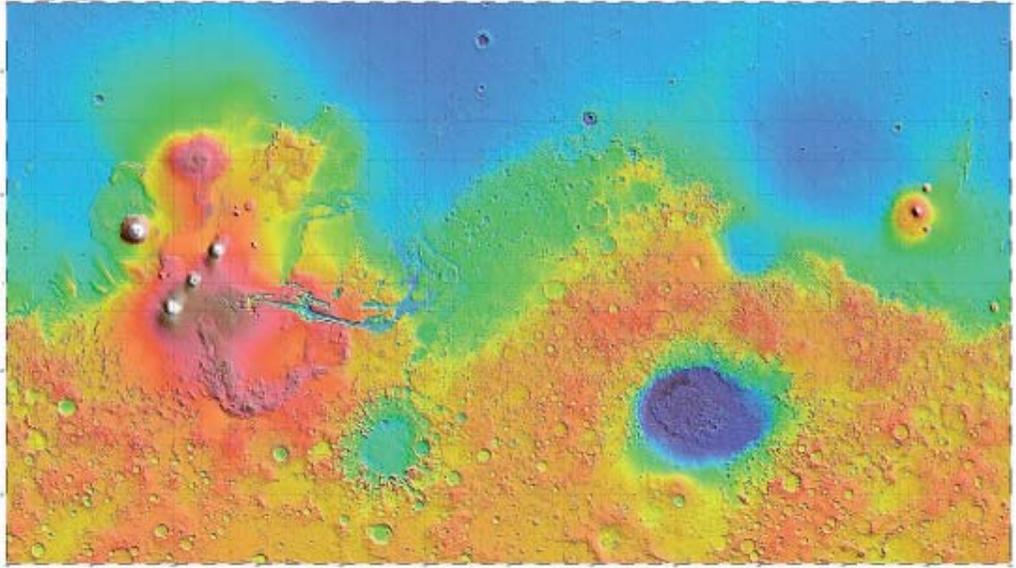


Figure 4.12. L'altimétrie de Mars, déterminée par l'altimètre laser de la sonde *Mars Global Surveyor* (©NASA).

(environ 10^{-4}), puis O_3 , H_2O_2 , $CH_4 \dots$ (environ 10^{-8}). À la différence de Vénus, on n'y trouve pas de produits soufrés.

Avec une pression de surface moyenne de 6 mbar, l'atmosphère martienne est très réactive aux variations du flux solaire, ce qui induit des différences de température très fortes entre l'été à l'équateur (environ $0\text{ }^\circ\text{C}$, voire davantage) et l'hiver aux pôles ($-100\text{ }^\circ\text{C}$). La condensation périodique de CO_2 et H_2O aux pôles de Mars, ajoutée à la faible masse atmosphérique, entraîne une dynamique atmosphérique très complexe, encore accentuée par l'excentricité de l'orbite martienne, plus élevée que celle de la Terre, qui augmente les contrastes saisonniers.

Comme sur la Terre et Vénus, la circulation atmosphérique martienne est de type convectif et se caractérise par des cellules de Hadley. À l'équinoxe, le gaz chauffé à l'équateur s'élève pour redescendre à plus haute altitude ; au solstice, la cellule s'élève à partir du point subsolaire (c'est-à-dire le point où le Soleil est au zénith) pour traverser la planète et redescendre aux latitudes opposées. Le périhélie intervient pendant l'été dans l'hémisphère sud, où la température est maximum, ce qui donne naissance à des tempêtes de poussière particulièrement violentes. Des vents pouvant atteindre 100 km/h au sol et 400 km/h à 50 km , alimentent ces tempêtes qui peuvent recouvrir la planète entière et durer plusieurs mois.

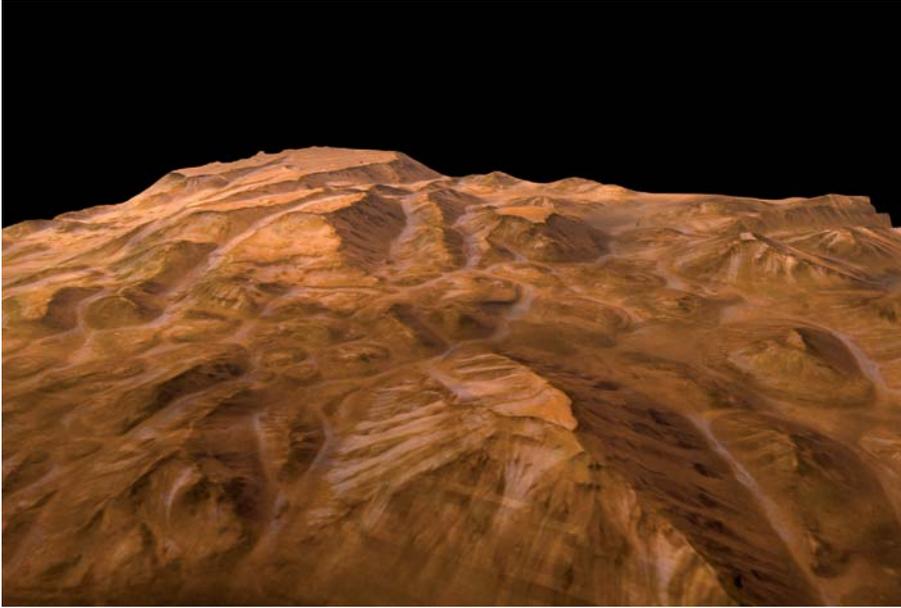


Figure 4.13. Le canyon Valles Marineris observé par la caméra HRSC de la sonde *Mars Express* (©ESA).

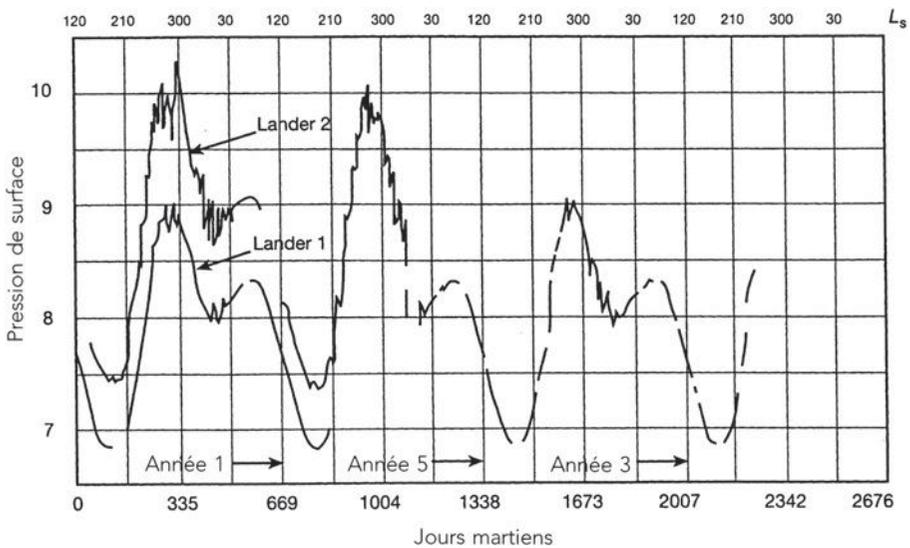


Figure 4.14. Variations de la pression à la surface de Mars en fonction des saisons, mesurées in situ par les modules de descente des missions *Viking* au cours de trois années martiennes, soit six années terrestres. La modulation saisonnière de la pression est le résultat de la condensation du gaz carbonique aux pôles en hiver (©NASA).



Figure 4.15. La surface de Mars, observée par le module de surface de *Viking* (©NASA).

4.2 L'eau sur Mars : passé et présent

Les conditions de pression sont aujourd'hui telles que l'eau ne peut pas être sous forme liquide. Cependant, de nombreux indices semblent suggérer la présence d'eau liquide dans l'histoire passée de Mars. Mais à quel moment l'eau a-t-elle été liquide, et combien de temps a-t-elle séjourné ? C'est tout l'enjeu de l'exploration de Mars dans les décennies à venir.

Avec un rapport de mélange de l'ordre de 10^{-4} , la vapeur d'eau sur Mars est aujourd'hui un composant très minoritaire de l'atmosphère martienne. En quantité intégrée le long de l'atmosphère, son abondance varie de 0 (en hiver au pôle) à

100 microns précipitables (en été au pôle), en fonction de la condensation de H₂O sur les calottes. Il est actuellement difficile d'établir un bilan global de la quantité totale d'eau sur Mars. Il semble établi que la glace d'eau est présente sous les calottes polaires martiennes. Des mesures réalisées par la sonde Mars Odyssey en 2000 ont détecté la présence d'atomes d'hydrogène sous les pôles ; les mesures infrarouges et radar réalisées par Mars Express puis par Mars Reconnaissance Orbiter ont confirmé ce résultat. Cependant, l'abondance de l'eau reste encore à déterminer. L'eau pourrait aussi être piégée sous la surface, en certains endroits, sous forme de pergélisol ; en effet, les cratères à éjecta lobés, présents principalement à haute latitude, semblent être un indice de la présence passée d'eau en subsurface.

Quels sont les indices en faveur de la présence passée d'eau liquide sur Mars ? Les premiers remontent aux découvertes des missions *Mariner 9* et *Viking*, dont les images ont dévoilé de surprenantes structures : d'une part des réseaux de vallées ramifiées, aujourd'hui asséchées, dans des terrains anciens, d'autre part des « vallées de débâcle », correspondant à des effondrements catastrophiques plus récents. Plus récemment, les mesures infrarouges de *Mars Express* et les observations in situ du robot *Opportunity* ont montré la présence de sulfates qui sur Terre ne peuvent se former qu'en présence d'eau liquide (Fig. 4.18). Sur Mars ces sulfates dateraient d'une époque relativement récente (-2 à -3 milliards d'années). L'eau liquide aurait donc séjourné sur Mars, mais pendant une durée limitée : en effet le robot *Spirit* n'a pas trouvé trace des dépôts sédimentaires que l'on aurait attendu si l'eau avait longtemps séjourné en surface. D'autre part, la présence de silicates hydratés (phyllosilicates) dans certains terrains anciens de l'hémisphère sud semble indiquer que l'eau liquide a séjourné à une époque plus ancienne, celle de la formation de ces terrains (plus de 3,5 milliards d'années). On a longtemps recherché des carbonates, qui auraient pu être fixés par le sol martien en présence d'eau liquide (comme cela a été le cas sur la Terre), mais sans succès ; leur formation pourrait avoir été inhibée en présence du dioxyde de soufre émis par les volcans. Mais celui-ci n'a pas non plus été détecté dans l'atmosphère martienne. . .

Notre compréhension de l'histoire de l'eau sur Mars est donc encore très incomplète. On peut tenter de la résumer ainsi : l'eau liquide a coulé au début de l'histoire de la planète (il y a plus de 3,5 milliards d'années), comme en témoignent les vallées ramifiées des terrains anciens et la présence de silicates hydratés dans certains de ces sites. Elle a ensuite disparu pour couler épisodiquement à l'occasion de phénomènes locaux (peut-être associés au volcanisme ou à des mouvements tectoniques) qui ont donné naissance aux vallées de débâche et à la formation des sulfates. Mais tout ceci n'est qu'une hypothèse qui reste à valider. Il y a quelques années, certains chercheurs ont évoqué la possibilité d'un ancien océan qui aurait à l'origine recouvert les plaines du nord ; cependant, l'absence de toute détection de silicates hydratés dans ces régions tend à infirmer cette hypothèse. Le débat reste entier. . .

4.3 Un climat passé chaud et humide ?

Il semble donc acquis que l'eau liquide a coulé dans le passé sur Mars. Les implications sont considérables : pour que l'eau ait pu séjourner à la surface, il fallait que la pression et la température soient sensiblement plus élevées qu'aujourd'hui. Nous disposons de deux indices qui viennent renforcer cette hypothèse.

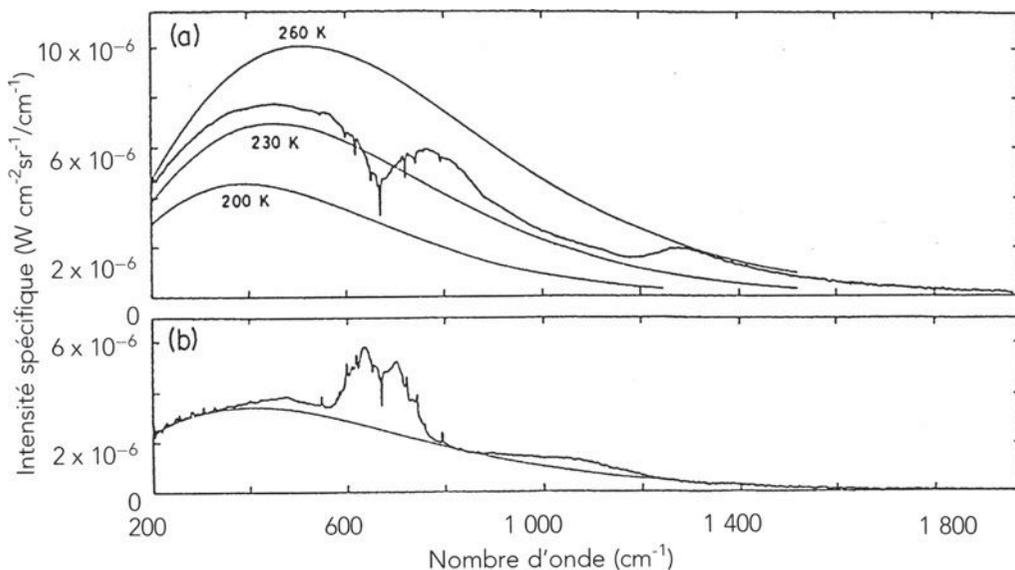


Figure 4.16. Le spectre thermique de Mars enregistré à l'équateur (haut) et au pôle (bas). À l'équateur, la température de surface est supérieure à celle de l'atmosphère et la bande du gaz carbonique, à 15 microns (667 cm^{-1}) apparaît en absorption. Au pôle, la température de surface est inférieure à la température atmosphérique et la bande de CO_2 apparaît en émission (d'après R. Hanel *et al.*, *Infrared Remote Sensing of the Solar System*, CUP, 1990).

Le premier indice nous vient des mesures de rapports isotopiques dans l'atmosphère de Mars. Le premier d'entre eux est le rapport D/H. On se souvient que dans le cas de Vénus, la très forte valeur du rapport HDO/ H_2O (120 fois la valeur terrestre) a été interprétée comme preuve de l'échappement d'une grande quantité de vapeur d'eau au cours de son histoire. Dans le cas de Mars, ce même rapport a été mesuré par des observations infrarouges depuis la Terre. Le rapport D/H, déduit de HDO/ H_2O , est enrichi d'un rapport 5 par rapport à la valeur terrestre. Il traduit que sur Mars aussi, une partie de l'atmosphère s'est échappée. La même conclusion est atteinte avec la mesure du rapport isotopique $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, obtenue avec les sondes *Viking*. L'enrichissement par un facteur 1,6 mesuré par rapport à la valeur terrestre implique lui aussi un échappement significatif de l'atmosphère. D'après



Figure 4.17. Exemple de vallée ramifiée sur Mars (Vedra et Maumee Valles, près de Chryse Planitia ©NASA).

certains modèles théoriques, l'atmosphère primitive de Mars pourrait avoir été dix fois plus dense qu'aujourd'hui.

Comment l'atmosphère a-t-elle pu s'échapper ? C'est ici qu'intervient le second indice. En 1999, la sonde *Mars Global Surveyor* a mis en évidence l'existence d'un champ magnétique fossile, piégé dans les terrains anciens de l'hémisphère Sud. L'aimantation rémanente de ces terrains est interprétée comme l'existence d'une dynamo au moment de leur formation, au cours du premier milliard d'années de l'histoire de la planète. Cette dynamo a dû s'arrêter faute d'une énergie interne suffisante (n'oublions pas que Mars est dix fois moins massive que la Terre). Mais pendant sa phase d'activité interne, Mars a possédé une magnétosphère qui a pu empêcher l'atmosphère de s'échapper. Une fois la dynamo éteinte et la magnétosphère disparue, Mars a pu perdre progressivement son atmosphère ; parallèlement, l'effet de serre initial s'est réduit et la température a diminué, jusqu'à atteindre les valeurs que nous connaissons aujourd'hui. Selon un autre scénario, la planète aurait pu connaître un impact météoritique géant (voire plusieurs) qui aurait entraîné l'échappement brutal et massif de la plus grande partie de son atmosphère. Il ne nous est pas possible de trancher actuellement entre ces deux hypothèses.

Au-delà de ce débat émerge une question qui prend une autre dimension. Nous savons maintenant que l'eau liquide a séjourné sur Mars dans le passé. A-t-elle

séjourné suffisamment longtemps pour que la vie ait pu y apparaître ? Si oui, pouvons-nous espérer découvrir un jour des traces de vie fossile, voire présente ? Cette question est au cœur de l'exploration future de Mars. Une découverte récente est venue alimenter la discussion sous un nouveau jour. La détection du méthane a été annoncée sur Mars, en quantités très faibles (avec un rapport de mélange de l'ordre de 10^{-8}). Il semble que les émissions de méthane, qui restent à confirmer, soient localisées et variables dans le temps ; elles impliquent l'existence de sources et de puits non encore identifiés. Sur la Terre, le méthane est presque entièrement d'origine biogénique, avec une faible source abiotique liée à l'activité géothermique. Sur Mars, une telle source pourrait aussi être envisagée. Elle impliquerait, en sous-sol, des réactions entre des silicates et l'eau liquide qui formeraient de l'hydrogène, celui-ci réagissant ensuite avec le gaz carbonique pour former du méthane. Ce mécanisme nécessiterait donc la présence d'un aquifer (mélange de roches et d'eau liquide à haute pression) sous la surface de Mars. Sa présence a été évoquée sur la base de modèles géophysiques mais n'a pas été mise en évidence. Encore une fois, le problème reste entier. . .

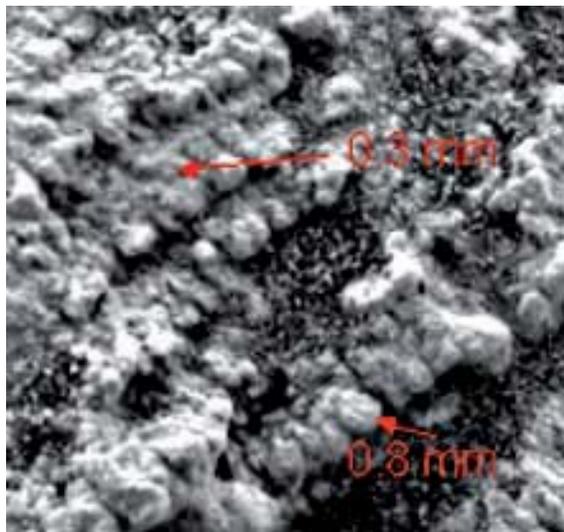


Figure 4.18. Ces grains observés par le rover *Opportunity* sont probablement des sphérules de sulfates. Sur Terre, ces matériaux se forment en présence d'eau liquide salée, ce qui pourrait impliquer sa présence à la surface de Mars dans l'histoire passée de la planète (© NASA/JPL/Cornell).

4.4 Du passé lointain au passé récent. . .

Une curieuse découverte a récemment illustré la puissance des méthodes de simulation numérique permettant de reconstruire les caractéristiques orbitales des planètes,

ainsi que leurs implications possibles sur leurs climats passés. De tels travaux ont mis en évidence l'évolution périodique de l'inclinaison et l'excentricité de Mars au cours des dernières dizaines de millions d'années. En particulier, l'obliquité de la planète qui est aujourd'hui très proche de celle de la Terre (24°) a pu atteindre 40° il y a quelques vingt millions d'années. Les modèles d'évolution climatique montrent que la glace d'eau aujourd'hui piégée aux pôles se trouve alors dans les zones équatoriales sous forme des glaciers, en particulier sur les flancs des reliefs. Les images de la sonde *Mars Express* montrant les résidus morphologiques de ces glaciers, au pied des volcans et sur le flanc du bassin de Hellas, ont apporté une confirmation spectaculaire de cette théorie (Fig. 4.19). Au passage, la découverte de variations climatiques sur le long terme associées à des variations orbitales nous rappelle le rôle qu'a sans doute joué la Lune dans l'évolution du climat terrestre, en stabilisant l'obliquité de la planète.

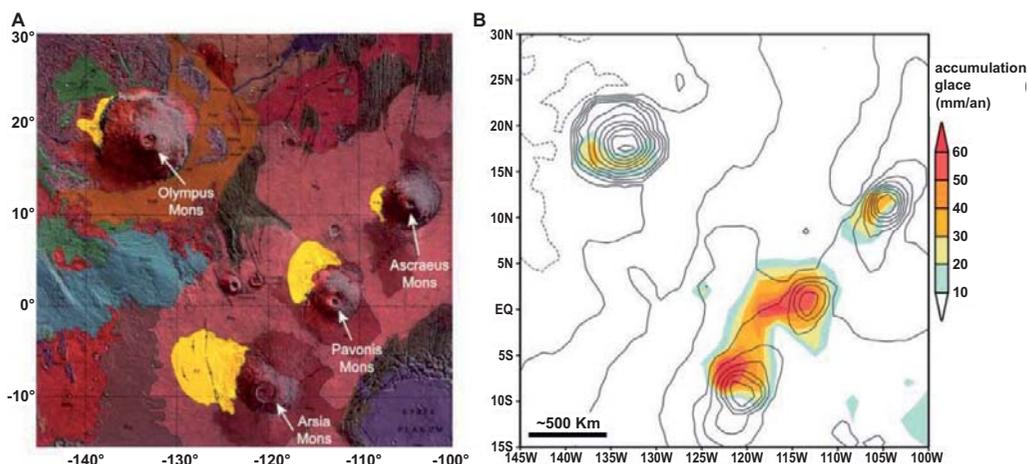


Figure 4.19. Glaciers sur les flancs des volcans martiens : à gauche, observations par la caméra HRMC de la sonde *Mars Express* (© ESA) ; à droite, prédictions à partir des variations d'obliquité et du GCM (d'après F. Forget *et al.*, 2006).

5 Évolution comparative des planètes telluriques : le rôle de l'eau

À la lumière des discussions précédentes, nous pouvons mieux comprendre comment et pourquoi les planètes telluriques, à partir de conditions initiales relativement proches, ont évolué vers leur destin actuel.

Comparons d'abord Vénus et la Terre. De taille et de densité très voisines, elles semblent vraiment jumelles. La principale différence réside dans leur distance héliocentrique : le flux solaire reçu par Vénus est deux fois celui que reçoit la Terre, et la température d'équilibre au niveau de l'orbite de Vénus, à albédo égal, est plus élevée d'environ 10 %. Elle est suffisante pour que l'eau soit, comme le gaz carbonique, sous forme de vapeur. Même si l'eau de Vénus a pu se trouver sous forme liquide au tout début de son histoire lorsque le Soleil était moins lumineux, cette phase n'a pu se maintenir avec l'accroissement du flux solaire. La présence en abondance de deux gaz à effet de serre très efficaces, H₂O et CO₂, a été la cause de l'emballement de l'effet de serre, d'où les températures observées aujourd'hui. L'eau a peu à peu disparu par photodissociation et échappement, et l'atmosphère de Vénus est devenue majoritairement composée de CO₂, avec une composante minoritaire de N₂.

La Terre, en revanche, s'est trouvée à une distance héliocentrique telle que, la température de surface étant comprise entre 0 °C et 100 °C, l'eau a pu se maintenir sous forme liquide. Le gaz carbonique, très abondant dans l'atmosphère primitive, a été piégé au fond des océans par réaction avec les roches pour former des carbonates, principalement le carbonate de calcium CaCO₃. L'azote étant spectroscopiquement inactif et donc sans effet sur l'effet de serre, celui-ci est resté très limité, d'où une température sensiblement constante au cours du temps, à l'exception de certaines phases de glaciation totale, sans doute interrompues par des épisodes volcaniques. L'apparition de la vie, il y a près de quatre milliards d'années, a entraîné la formation de l'oxygène, puis de la couche d'ozone stratosphérique. Celle-ci a rendu possible le développement de la vie sur les continents il y a environ 500 millions d'années.

Quant à la planète Mars, elle se différencie de Vénus et de Mars de deux façons : d'une part elle est environ dix fois moins massive, d'autre part elle est plus loin du Soleil ; l'énergie qu'elle reçoit est environ deux fois moins que celle de la Terre et quatre fois moins que celle de Vénus. La faible masse de Mars a pour effet une énergie interne moindre ; celle-ci provient du rayonnement des éléments radiogéniques à longue période contenus dans le noyau. Si la quantité de ces éléments est faible, le rayonnement s'éteint et la planète devient inactive. L'arrêt de la dynamo de Mars, avant la fin du premier milliard d'années, semble confirmer ce scénario. Autre conséquence de la faible masse de Mars : son champ de gravité est moins apte à capturer une atmosphère massive. Dès l'origine, l'atmosphère martienne, de composition proche de celle de ses voisines, a dû être sensiblement moins dense.

Dans les conditions actuelles, l'eau est majoritairement à l'état gazeux sur Vénus, liquide sur la Terre et solide sur Mars. Mais cela n'a pas toujours été le cas puisque, nous l'avons vu, l'eau liquide a coulé à la surface de Mars dans le passé, et elle a pu être présente aussi au tout début de l'histoire de Vénus. Dans le cas de Mars, c'est sans doute la quantité insuffisante d'énergie interne qui a entraîné l'arrêt de la

dynamo, la disparition du champ magnétique et peut-être aussi l'échappement de l'atmosphère.

Que faut-il retenir de l'évolution comparative des planètes telluriques ? Que même en présence de conditions initiales comparables, les planètes peuvent évoluer de manière radicalement différente ; que l'eau, par ses changements d'état, joue un rôle majeur dans ces évolutions ; que la masse des planètes est un facteur déterminant de leur activité interne ; que la présence d'une magnétosphère peut sans doute freiner voire empêcher l'échappement atmosphérique. La diversité des planètes telluriques nous laisse deviner ce que pourront être les « exoTerres » que les instruments du futur nous feront découvrir autour d'autres étoiles dans les décennies à venir.

5

Un peu plus loin, les planètes géantes

Au-delà de la ligne des glaces, à plus de 5 UA du Soleil, s'étend le royaume des planètes géantes. Nous avons vu (chapitre 2) comment le mode de formation des planètes, à partir de particules solides au sein d'un disque en rotation, avait favorisé l'émergence de deux classes de planètes bien distinctes, les telluriques et les géantes. Les planètes géantes se sont formées en deux temps : d'abord à partir de l'accumulation d'un noyau de glaces, d'environ dix masses terrestres, puis par l'effondrement du gaz environnant (essentiellement constitué d'hydrogène et d'hélium), capturé par le champ de gravité du noyau. Les caractéristiques principales des planètes géantes résultent de ce mode de formation : elles sont très volumineuses (le rayon de Jupiter est onze fois celui de la Terre, celui d'Uranus et de Neptune quatre fois) mais elles sont aussi très peu denses (de 0,7 à 1,6 g/cm³). Autre caractéristique des planètes géantes : elles sont toutes entourées d'un système d'anneaux et d'un cortège de satellites. Nombre d'entre eux sont réguliers, c'est-à-dire qu'ils sont situés, comme les anneaux, dans le plan équatorial de la planète autour de laquelle ils gravitent. Leur présence est la conséquence de l'effondrement du gaz environnant le noyau de glace autour de celui-ci ; on peut ainsi considérer les planètes géantes et leur système comme de petits systèmes solaires en miniature. Il y a tout de même une limite à cette analogie : comparativement aux planètes géantes qu'elles entourent, les satellites extérieurs sont beaucoup plus proches et plus gros que ne le sont les planètes du Soleil (ainsi Io, le satellite galiléen le plus proche de Jupiter, est situé à 6 rayons joviens de la planète, alors que Mercure, la planète la plus proche du Soleil, en est éloignée de plus de 80 rayons solaires). Notons aussi qu'il n'existe pas de système d'anneau à proximité immédiate du Soleil. . .



Figure 5.1. La planète Jupiter, photographiée par la sonde *Cassini* lors de son survol en décembre 2000 (©NASA).

1 Deux classes de planètes géantes

1.1 Géantes gazeuses et géantes glacées

Observons de plus près les quatre planètes géantes. Voici d'abord Jupiter, la plus proche du Soleil et aussi la plus volumineuse et la plus massive : sa masse est égale à 318 masses terrestres. Située à 5,2 UA du Soleil, elle a dû se former à proximité de la ligne des glaces et bénéficier ainsi d'une grande quantité de matériau solide,

rendu disponible par la condensation des glaces. Avec ses couleurs jaune orangé, sa structure en bandes et en zones parallèles et sa Grande Tache Rouge, identifiée par Galilée voilà plus de trois siècles, Jupiter a été, de la part des astronomes, l'objet de toutes les attentions. Environ deux fois plus éloignée, à 9,2 UA du Soleil, nous trouvons Saturne et son impressionnant système d'anneaux, connu depuis plus de trois siècles. C'est *Huygens* qui donna, au XVII^e siècle, l'explication de la nature des anneaux, dont l'aspect change périodiquement selon la position de la Terre par rapport à son plan. Avec ses 90 masses terrestres, Saturne est, comme Jupiter, essentiellement constituée de gaz issu de la nébuleuse protosolaire initiale ; n'oublions pas que la masse du noyau de glace initial est d'une dizaine de masses terrestres. C'est pourquoi Jupiter et Saturne sont appelées « géantes gazeuses ». Située environ deux fois plus loin, à 19 UA du Soleil, nous trouvons Uranus, puis, à environ 30 UA, Neptune. Ces deux planètes, très différentes des deux premières, se ressemblent par leur masse, leur rayon et leur densité. Avec des masses respectives de 14 et 17 masses terrestres, elles sont constituées essentiellement de glace : on les appelle les « géantes glacées ».

Quelle est l'origine de ces deux catégories au sein des planètes géantes ? Une hypothèse semble plausible. Jupiter et Saturne, plus proches du Soleil, ont bénéficié d'une masse plus importante de glaces pour former leur noyau initial ; celui-ci a dû atteindre la masse critique de 10 masses terrestres avant que n'intervienne la phase T-Tauri du jeune Soleil qui a eu pour effet de disperser le gaz environnant, environ dix millions d'années après sa formation. En revanche, Uranus et Neptune, situés plus à l'extérieur du disque protoplanétaire, dans un environnement moins riche en glaces, ont dû mettre plus de temps à construire leur noyau initial. Il est fort possible que la masse critique ait été atteinte après la phase de dissipation du gaz. Les planètes n'auront pu alors accrêter qu'une faible contribution de gaz.

1.2 La composition chimique des planètes géantes, un test de leur formation

Tout notre scénario de formation des planètes géantes est bâti, nous l'avons vu, sur l'hypothèse d'un noyau de glace initial autour duquel s'accrète ensuite le gaz protosolaire environnant. Selon les modèles théoriques et les simulations numériques, l'effondrement du gaz se produit dès que la masse du noyau atteint une dizaine, voire une quinzaine de masses terrestres (voir chapitre 2, paragraphe 5). C'est ce modèle que nous avons adopté ci-dessus pour définir les deux catégories de planètes géantes, les gazeuses et les glacées. mais avons-nous la preuve de l'existence de ces noyaux de glace au sein des planètes géantes ? La réponse est oui, elle nous est fournie par la mesure de l'abondance de leurs éléments. C'est ce que nous allons détailler ci-dessous.

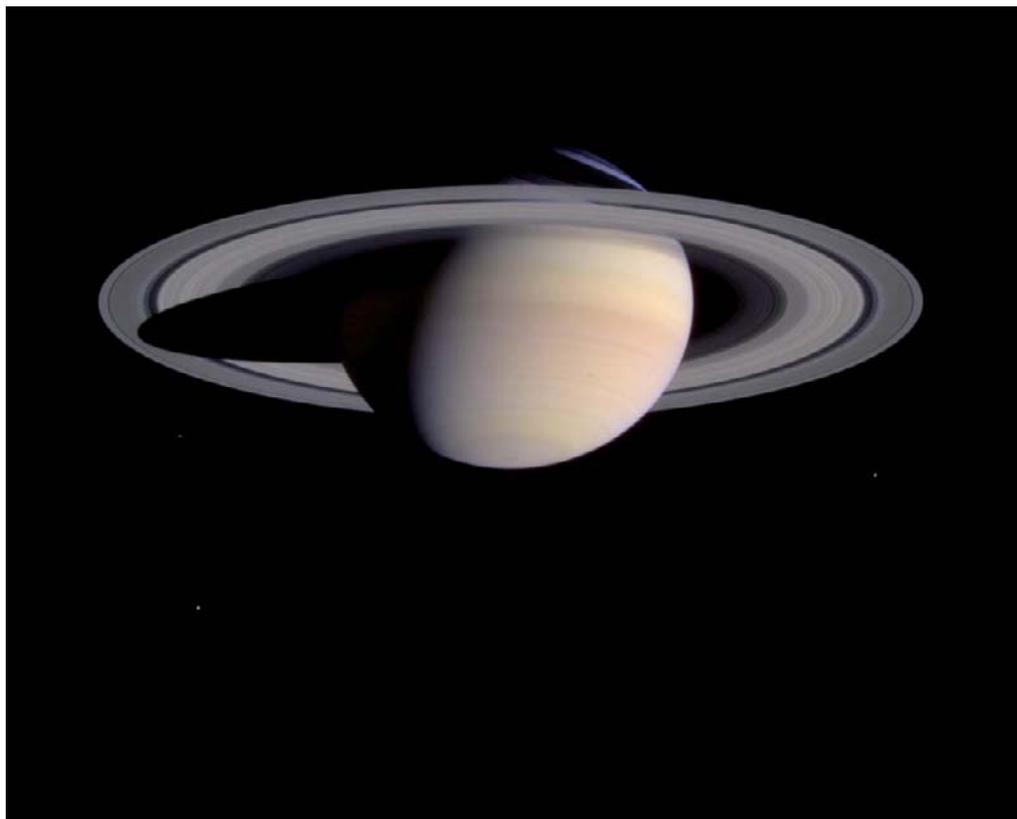


Figure 5.2. La planète Saturne photographiée par la sonde *Cassini* (©NASA).

Au sein de la nébuleuse protosolaire, l'abondance des différents éléments chimiques résulte directement de la manière dont ils ont été formés : par nucléosynthèse primordiale dans le cas des éléments les plus légers (H, He, D...), et par nucléosynthèse stellaire, au sein des étoiles, pour les éléments plus lourds (carbone, azote, oxygène...). L'abondance des éléments du disque protosolaire reflète donc ce que l'on appelle les abondances cosmiques. L'hydrogène, avec 75 % de la masse totale, y est prédominant. Vient ensuite l'hélium avec près de 23 %. Tous les autres éléments « lourds » sont contenus dans moins de 2 % – plus exactement 1,6 %. Que sont ces éléments lourds ? principalement les éléments C, N et O que l'on retrouve à l'état de glaces (H_2O , CH_4 , NH_3 , CO_2 ...) dans le noyau initial des planètes géantes. Évaluons maintenant la quantité d'éléments lourds dans chaque planète géante, en prenant l'hypothèse d'un noyau initial de 12 masses terrestres (c'est la limite au-delà de laquelle le gaz environnant peut être capturé). Nous supposons que ce noyau est constitué entièrement d'éléments lourds, dont la fraction en masse est 1,6 %



Figure 5.3. La planète Uranus observée par la sonde *Voyager 2* en 1986 (©NASA).

du total. Nous ajoutons à cette contribution celle qui provient du gaz protosolaire environnant, doté des abondances cosmiques. Nous supposons alors que, suite à l'effondrement du gaz protosolaire sur le noyau initial et l'élévation de température qui s'ensuit, l'ensemble de la planète est ré-homogénéisé ; ce qui est mesuré dans l'enveloppe extérieure est alors représentatif de l'ensemble de la planète. Un calcul simple montre alors que l'on doit observer un enrichissement en éléments lourds, et que cet enrichissement est d'autant plus important que la fraction en masse du noyau initial est grande par rapport à la masse totale de la planète. On obtient ainsi, par rapport aux valeurs cosmiques, un enrichissement de 4 pour Jupiter, de 9 pour Saturne, et de 30 à 50 pour Uranus et Neptune.



Figure 5.4. La planète Neptune photographiée par la sonde *Voyager 2* en 1989 (©NASA).

Or ces enrichissements ont été effectivement mesurés. Dans le cas de Jupiter, l'abondance de plusieurs éléments a pu être mesurée grâce à la sonde de descente *Galileo* (Fig. 5.6) – nous y reviendrons. Dans le cas des trois autres planètes, nous ne disposons que des mesures du méthane qui nous donne accès au rapport C/H. Dans les trois cas, les mesures sont en très bon accord avec les observations (Fig. 5.7). Une confirmation supplémentaire nous est fournie par le rapport D/H, mesuré à partir du rapport HD/H₂, mais aussi de CH₃D/CH₄. Là aussi, toutes les mesures concordent : le rapport D/H est sensiblement plus élevé sur Uranus et Neptune (5×10^{-5}) ; on sait qu'il se trouve enrichi dans les glaces (ce qui est mesuré au laboratoire comme dans le milieu interstellaire), or celles-ci sont particulièrement abondantes dans Uranus et Neptune puisque leur noyau constitue la majeure fraction de leur masse. En revanche, pour Jupiter et Saturne, le rapport D/H est proche de

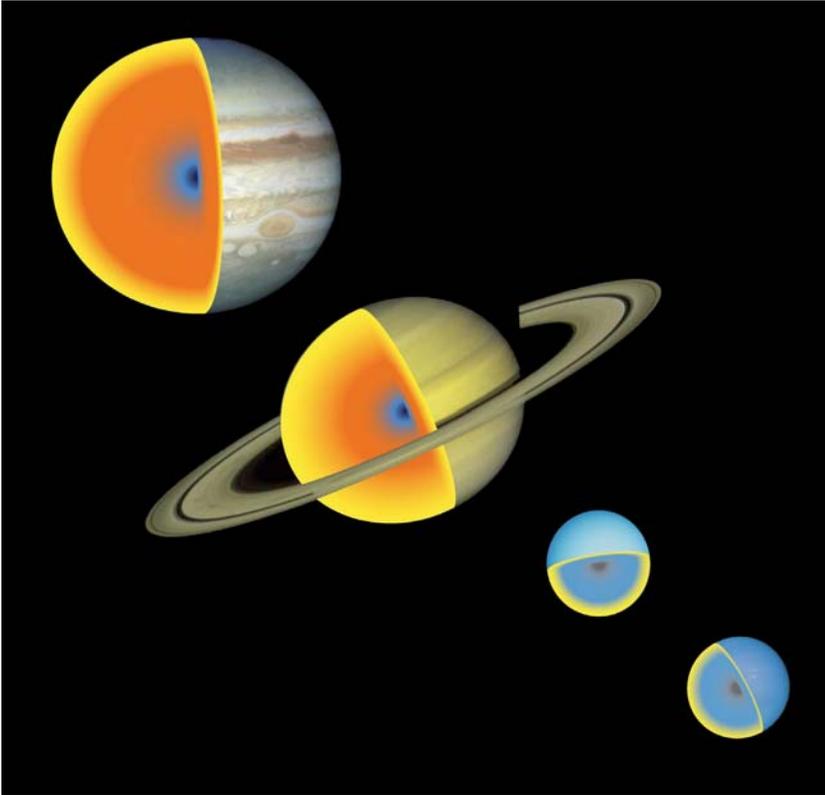


Figure 5.5. Schéma des planètes géantes, illustrant la structure interne des géantes gazeuses (Jupiter et Saturne), riches en gaz, et celle des géantes glacées (Uranus et Neptune) principalement constituées de leur noyau initial de glace (les échelles ne sont pas respectées).

la valeur protosolaire (2×10^{-5}). Voilà donc une démonstration simple à l'appui du modèle de formation nucléaire des planètes géantes.

1.3 À l'origine, une migration modérée

Observons à nouveau Uranus et Neptune : il y a tout de même un fait intrigant. Pourquoi Neptune, située aujourd'hui à environ 30 UA du Soleil, est-elle plus massive qu'Uranus, alors que celle-ci n'est qu'à environ 20 UA ? A priori, on s'attendrait à ce que la densité de matière au sein du disque protosolaire diminue à mesure que la distance héliocentrique. Pourquoi cette inversion ?

Il existe une explication possible à ce paradoxe, mais précisons d'emblée qu'il ne s'agit que d'une hypothèse. Depuis une vingtaine d'années, les travaux de simulation numérique portant sur la dynamique des objets du système solaire, et en particulier

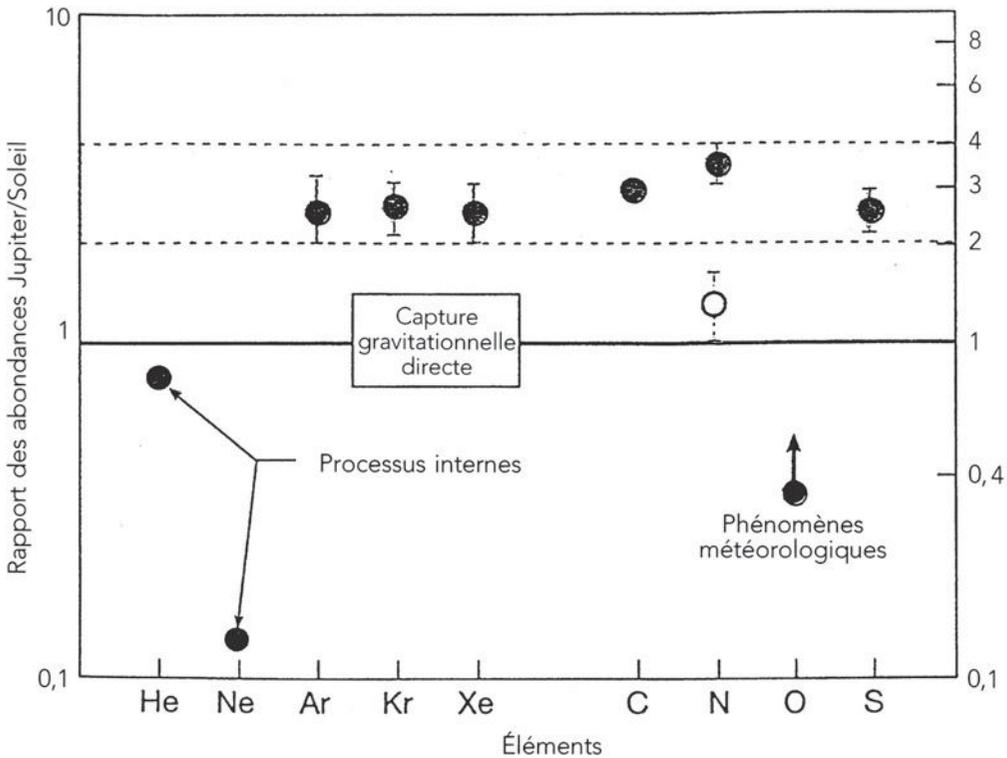


Figure 5.6. Enrichissement de Jupiter en éléments lourds par rapport aux valeurs protosolaires. Les abondances sont comparées à celle de l'hydrogène. On voit que six éléments (C, N, S, Ar, Kr, Xe) présentent un enrichissement compris entre 2 et 4 fois la valeur protosolaire. Trois éléments l'hélium, le néon et l'oxygène, ont des abondances sensiblement réduites. L'hélium et le néon sont vraisemblablement sous forme condensée à l'intérieur de la planète ; quant à l'oxygène, il n'est sans doute par représentatif de la valeur globale sur la planète à cause des effets de convection atmosphérique (la mesure a été effectuée dans une région de courant descendant particulièrement sèche). Suite à une nouvelle détermination des abondances solaires, l'enrichissement moyen par rapport à l'hydrogène, égal à 3 ± 1 sur cette figure, a été réévalué à 4 ± 2 (la figure est tirée de Owen *et al.*, Nature, 1999).

sur leur scénario de formation, se sont multipliés grâce à la mise en service des supercalculateurs. Il est maintenant possible de simuler la formation des planètes telluriques et géantes, ainsi que des astéroïdes, à partir d'un choix de conditions initiales ; il reste ensuite à sélectionner les conditions produisant les résultats les plus proches des conditions actuelles. Dans le cas des planètes géantes, les spécialistes s'accordent à penser que celles-ci ont connu, au cours de leur histoire, une certaine variation de leur distance au Soleil ; c'est ce que l'on appelle la migration. Cette idée est relativement nouvelle : elle s'est développée il y a une quinzaine d'années, suite à la découverte inattendue d'exoplanètes géantes à proximité immédiate de leur étoile.

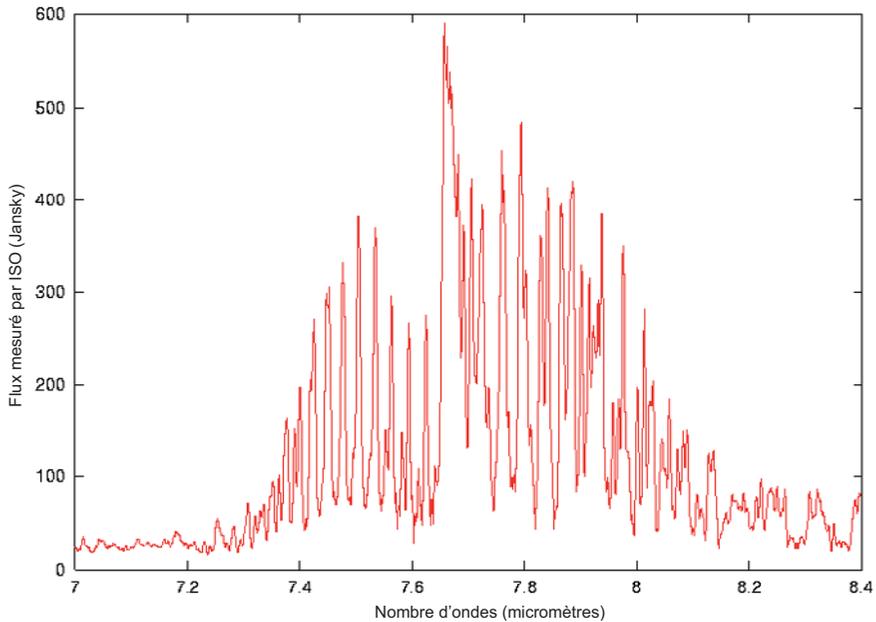


Figure 5.7. Le spectre de Saturne dans la bande d'émission du méthane CH₄ à 7,7 μm. L'analyse de ce spectre a permis de déterminer dans l'atmosphère de Saturne un rapport C/H égal à 9 fois la valeur protosolaire. Le spectre a été enregistré par l'instrument SWS sur le satellite ISO.

Pour expliquer ce phénomène, en totale contradiction avec celui qui rend compte de la formation du système solaire, il a fallu invoquer le phénomène de migration, qui permet de ramener à proximité de l'étoile centrale une planète géante initialement formée loin d'elle. S'il apparaît que ce mécanisme doit être courant dans les systèmes planétaires extérieurs, pourquoi n'aurait-il pas été aussi à l'œuvre au sein du système solaire ? Selon la théorie développée par les dynamiciens de l'Observatoire de Nice – fort judicieusement appelée « the Nice Model » – Jupiter, initialement placée à environ 6 UA du Soleil, se serait déplacée légèrement vers l'intérieur du système solaire pour atteindre sa position actuelle à 5,2 UA, tandis que l'orbite de Saturne, en revanche, serait passée d'environ 8 UA à sa position actuelle de 9,2 UA. Uranus et Neptune, toutes deux placées initialement à environ 15 UA du Soleil, auraient elles aussi connu une forte migration vers l'extérieur et, selon certains modèles, Neptune aurait pu être à l'origine plus proche du Soleil qu'Uranus.

Le scénario de migration des planètes géantes, bien que non démontré, présente plusieurs éléments en sa faveur. Outre les tailles relatives d'Uranus et de Neptune, il apporte une explication plausible au phénomène dit de « bombardement tardif » (en anglais *Late Heavy Bombardment*, ou LHB ; voir chapitre 2, paragraphe 3.3). On sait, par analyse des cratères d'impacts sur les surfaces des objets du système solaire

dénués d'atmosphère, qu'un maximum d'impacts est intervenu environ 800 millions d'années après la formation du Soleil et des planètes. Il est très possible que ce phénomène ait été initié par le passage à la résonance 2: 1 du système Jupiter-Saturne (Jupiter accomplissant 2 révolutions tandis que Saturne en effectuait exactement une). Les simulations numériques montrent en effet que cet état engendre un très grand bouleversement des orbites des petits corps, les inclinaisons et les excentricités prenant des valeurs très élevées, avec pour conséquence une augmentation très forte des taux de collision.

1.4 Une atmosphère riche en hydrogène

Suite à l'effondrement du gaz protoplanétaire autour du noyau de glace initial, on s'attend à ce que l'atmosphère des planètes géantes – celle qui est accessible à l'observation, à des pressions inférieures à la dizaine de bars – soit dominée par l'hydrogène. C'est bien le cas : l'hydrogène moléculaire, détecté par spectroscopie au début des années soixante, constitue l'élément majoritaire (entre 75 et 85 % par volume). Le reste est essentiellement constitué d'hélium, les autres éléments n'intervenant qu'à l'état de traces. Le plus abondant de ces constituants mineurs est le méthane, qui représente moins de 1 % des atmosphères de Jupiter et Saturne, à peine 2 % sur Uranus et Neptune. Le méthane CH_4 est pourtant important à plusieurs titres. Tout d'abord il a un spectre infrarouge très riche (Fig. 5.10) : c'est, avec CO_2 et H_2O , le gaz à effet de serre le plus actif. De plus, il est photodissocié par le rayonnement ultraviolet solaire, ce qui entraîne la production de toute une chaîne d'hydrocarbures (C_2H_2 , C_2H_6 , C_2H_4 , CH_3 , C_6H_6 ...). Ces gaz, à leur tour, absorbent l'énergie solaire, ce qui entraîne le réchauffement de la haute atmosphère et la présence d'une stratosphère. Le phénomène est analogue à la formation, sur la Terre, de la couche d'ozone et de la stratosphère terrestre.

L'atmosphère des planètes géantes est donc réductrice, à la différence de celle des planètes telluriques. Les éléments y sont naturellement associés à l'hydrogène pour former CH_4 , NH_3 , H_2O , H_2S ... Certains condensent, pour donner naissance à des nuages ou à des brumes stratosphériques. Ainsi, sur Jupiter et sans doute aussi Saturne, H_2O et NH_3 se combinent pour former l'hyposulfite d'ammonium NH_4SH qui condense sous forme de nuage ; dans le cas de Jupiter, le nuage apparaît au niveau de 2 bars. À plus basse altitude (donc à plus haute pression), l'eau condense. Pour Jupiter et Saturne, le nuage se présente à une pression de 5 à 10 bars (Fig. 5.9). À plus haute altitude, sur les quatre planètes géantes, des brumes stratosphériques peuvent se former, liées à la condensation des hydrocarbures, en particulier l'éthane C_2H_6 .

La structure thermique est remarquablement similaire pour les quatre planètes géantes, avec une troposphère convective où, comme sur la Terre, le gradient

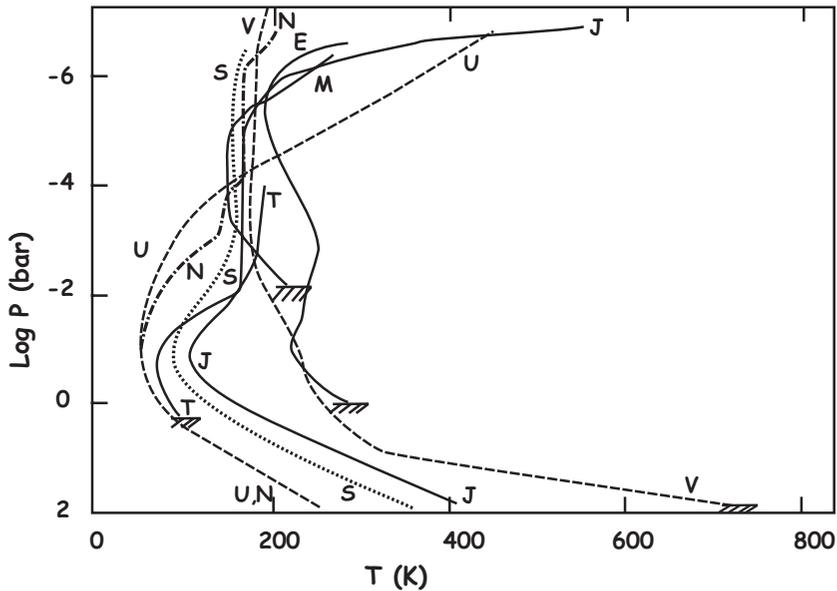


Figure 5.8. Le profil thermique des planètes et de Titan (J : Jupiter ; S : Saturne ; U : Uranus ; N : Neptune ; T : Titan ; V : Vénus ; E : Terre ; M : Mars). On voit que les quatre planètes géantes se caractérisent par une troposphère ayant sensiblement le même gradient, et une tropopause située autour de 0,1 bar. Les stratosphères, en revanche, sont très différentes, ce qui traduit des mécanismes de chauffage différents.

thermique est proche de la valeur adiabatique. Les profils de température, en fonction de l'altitude, sont donc parallèles pour les quatre planètes, avec des valeurs décroissantes à mesure que la distance héliocentrique augmente. Un minimum se produit à la tropopause, à un niveau de pression d'environ 100 millibars. Ensuite les profils thermiques augmentent à nouveau avec l'altitude et cette fois les profils sont très différents d'une planète à l'autre (Fig. 5.8). Dans tous les cas, la présence des hydrocarbures provenant de la photodissociation du méthane entraîne une élévation de température et donc une stratosphère. À plus haute altitude, d'autres facteurs interviennent : ondes de gravité, chauffage par les particules magnétosphériques de haute énergie.

Le spectre des planètes géantes est dominé par les signatures spectrales de l'hydrogène et du méthane. Celui-ci, bien que très minoritaire dans la composition atmosphérique, est omniprésent dans le spectre infrarouge, depuis l'infrarouge proche jusqu'au domaine thermique. L'ammoniac NH_3 est clairement visible dans le spectre de Jupiter ; du fait de sa condensation, il est faiblement détectable sur Saturne et complètement absent des spectres d'Uranus et de Neptune. Sur Saturne, en revanche, la phosphine PH_3 est détectée en abondance... une anomalie qui pourrait être liée à une circulation verticale plus active dans le cas de Saturne. Sur Uranus et Neptune,

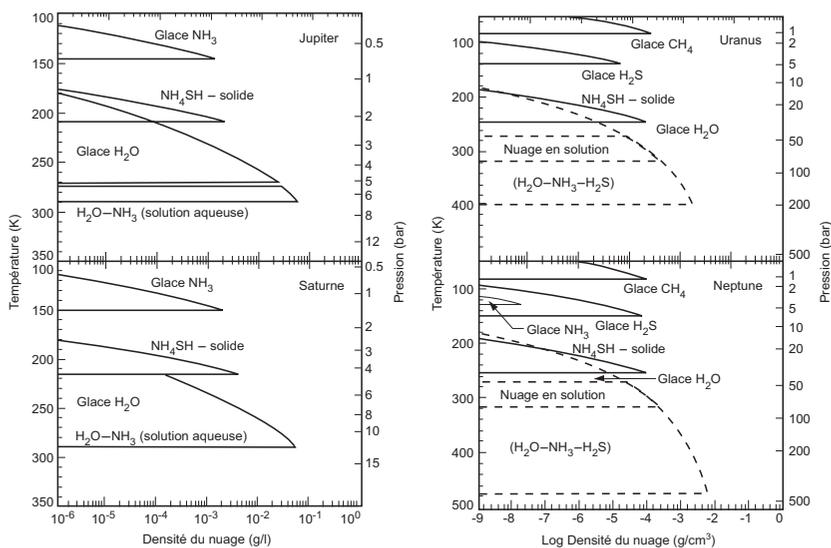


Figure 5.9. Structure nuageuse des planètes géantes. Sur Jupiter et Saturne, on trouve l'ammoniac NH_3 aux environs de 0,5 bars, puis NH_4SH aux environs de 2 bars et H_2O à quelques bars. Sur Uranus et Neptune, plus froides, ces espèces condensent à plus grande profondeur, à des niveaux inaccessibles à l'observation. Le méthane condense aux environs de 1 bar, et (d'après les modèles thermochimiques) H_2S à environ 3 bars ; des hydrocarbures, issus de la photodissociation du méthane, condensent dans la stratosphère, en particulier l'éthane C_2H_6 (d'après S. K. Atreya et P. Romani, *Planetary Meteorology*, G. Hunt, ed. CUP, pour Jupiter et Saturne ; d'après I. de Pater *et al.*, *Icarus* 91,220,1991 pour Uranus et Neptune).

la plupart des constituants mineurs sont sous forme de glace aux niveaux de pression accessibles à l'observation. On s'attendait donc à ce que le spectre de ces deux géantes glacées se limite aux signatures du méthane et des hydrocarbures. En 1992, la détection inattendue de CO et HCN dans la stratosphère de Neptune a créé la surprise. Le rapport de mélange de CO était environ mille fois supérieur à sa valeur théorique, elle même mesurée sur Jupiter et Saturne... En revanche, cet excès de CO et de HCN n'est pas présent sur Uranus. D'où une double question : quelle en est l'origine sur Neptune, et pourquoi Uranus est-il différent ? Ces questions n'ont pas trouvé de réponse définitive à ce jour.

Autre découverte inattendue : les observations menées en 1997 par le satellite européen ISO (*Infrared Space Observatory*) ont montré la présence de constituants oxygénés, l'eau et le gaz carbonique, dans la stratosphère des quatre planètes géantes et de Titan (Fig. 5.12). Quelle pouvait être leur origine ? Au niveau de la tropopause, la température est telle que, sur les quatre planètes géantes, l'eau doit être à l'état de glace. La tropopause constitue donc pour les gaz atmosphériques un piège froid infranchissable. Si l'eau est présente dans la stratosphère des planètes géantes, elle doit

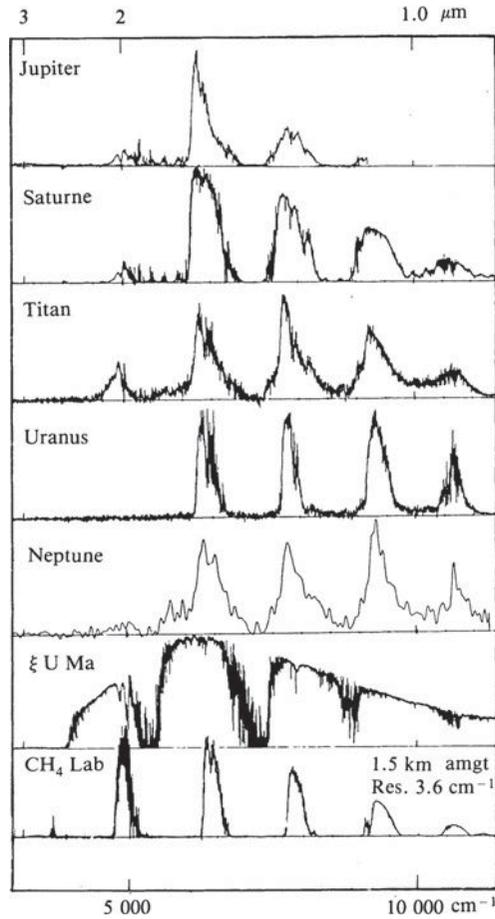


Figure 5.10. Le spectre des planètes géantes dans l'infrarouge proche. On voit que le méthane (dont le spectre en laboratoire est représenté au bas de la figure) domine tout le domaine spectral de 1 à 2,5 μm . Bien qu'il soit un constituant atmosphérique très minoritaire, il domine aussi le spectre des quatre planètes géantes et de Titan (d'après H. P. Larson, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1980).

donc provenir de l'extérieur. Quel est l'origine de ce flux d'oxygène ? Deux sources sont possibles : une source locale, en provenance des anneaux et des satellites de la planète, et une source interplanétaire, sous la forme d'un flux de micrométéorites riches en eau, de type cométaire. Le débat n'est pas tranché, mais il semble aujourd'hui que les deux sources doivent être considérées. En particulier, la collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter, en 1994 (Figs. 5.13 et 5.14), a rappelé que ce type d'événement existe et peut contribuer au phénomène que nous observons. Avec le satellite européen *Herschel*, en orbite depuis mai 2009, il devrait

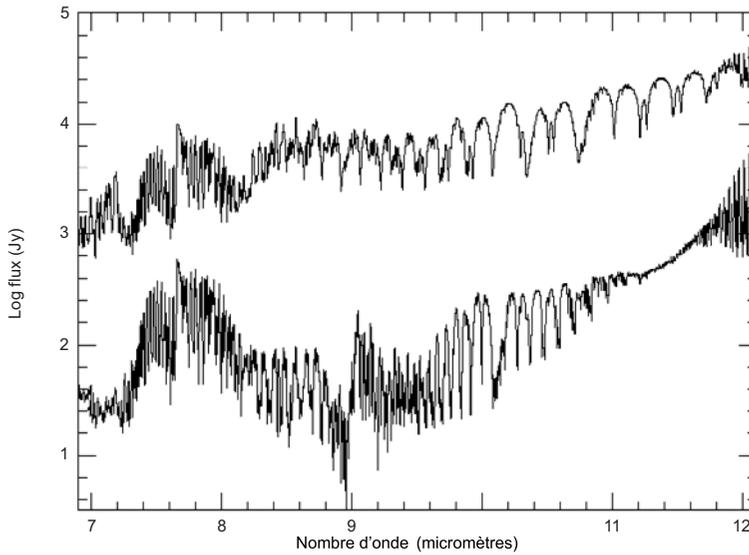


Figure 5.11.

1.5 Une structure interne encore mal connue

À des pressions supérieures à une dizaine de bars, l'intérieur des planètes géantes est inaccessible au sondage à distance. En ce qui concerne les mesures in-situ, seule la sonde *Galileo* a sondé les couches profondes de l'atmosphère jovienne, jusqu'à une pression de 22 bars. Nous ne possédons donc que des mesures indirectes des paramètres physiques : masse, rayon, densité, aplatissement, composantes du champ gravitationnel. À partir de ces données, des modèles théoriques peuvent être construits en prenant en compte les changements d'état de la matière à haute pression ; la détermination des équations d'état à haute température et à haute pression fait d'objet d'expériences de laboratoire très complexes.

Dans le cas de Jupiter et de Saturne, les modèles suggèrent une structure en trois couches : une enveloppe d'hydrogène moléculaire, un océan d'hydrogène métallique

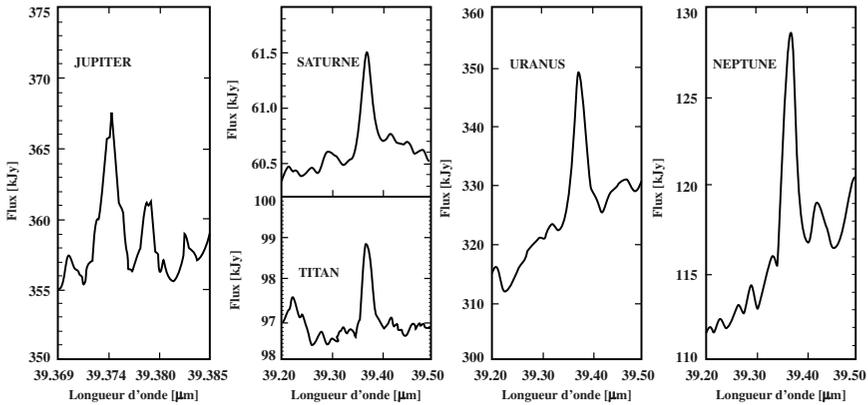


Figure 5.12. Le spectre d'émission de la vapeur d'eau dans les planètes géantes. La présence d'eau dans la stratosphère des planètes géantes et de Titan est le signe de la présence d'un flux de matière oxygénée, d'origine interplanétaire (comètes) ou locale (anneaux et satellites) (d'après Lellouch *et al.*, *Astron. Astrophys.*, 2002).

et un noyau central, très dense mais fluide, d'éléments plus lourds. Au centre de Jupiter et de Saturne, les pressions atteindraient respectivement 40 et 10 millions de bars, et les températures respectives y seraient de 20 000 et 10 000 K. Le champ magnétique des deux planètes pourrait être généré dans le noyau fluide ou dans l'océan d'hydrogène métallique.

Uranus et Neptune présentent un cas un peu différent : d'après les équations d'état de l'hydrogène à haute pression, les conditions de pression à l'intérieur ne seraient pas suffisantes pour que l'hydrogène soit sous forme liquide. Selon un modèle théorique qui reste hypothétique, leur structure interne comprendrait, sous l'enveloppe d'hydrogène moléculaire, un mélange fluide d'hydrogène et de glaces, et enfin un noyau de roches. La pression au centre serait de l'ordre de 8 millions de bars et la température de l'ordre de 8000 K. Le champ magnétique pourrait être généré au sein du mélange d'hydrogène et de glaces ou dans le noyau fluide rocheux.

Mentionnons enfin une particularité de trois des planètes géantes : l'existence d'une source d'énergie interne. Ce sont les sondes *Voyager* qui l'ont mis en évidence, et seule Uranus en est dénuée. Dans le cas des trois autres planètes géantes, l'énergie émise est environ deux fois l'énergie reçue par le Soleil. L'origine la plus plausible est la restitution vers l'extérieur de l'énergie accumulée pendant la phase de formation (pendant laquelle les planètes ont été beaucoup plus volumineuses et plus chaudes qu'aujourd'hui), sous forme d'une lente contraction accompagnée d'un refroidissement. Dans le cas de Jupiter et de Saturne, une autre contribution pourrait venir de la condensation de l'hélium au sein de l'hydrogène métallique : cette condensation s'accompagnerait d'une précipitation de l'hélium vers l'intérieur (et donc d'un

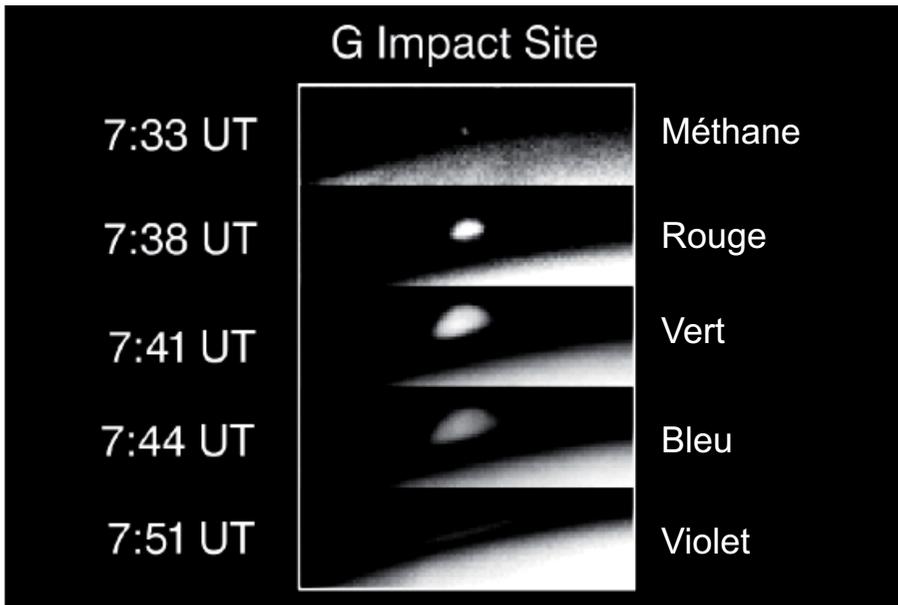


Figure 5.13. Observation de la collision d'un fragment de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter en Juillet 1994. La matière a été soulevée jusqu'à une altitude de 3000 km. L'image a été prise par le télescope Spatial Hubble (©NASA).

appauvrissement relatif des couches supérieures) ainsi qu'un dégagement d'énergie vers l'extérieur.

Il reste alors à expliquer le paradoxe suivant : alors qu'Uranus et Neptune paraissent si semblables (nous avons vu ci-dessus qu'elles se sont peut-être même formées à la même distance du Soleil), pourquoi la planète Uranus ne rayonne-t-elle pas d'énergie interne ? Cette différence rejoint d'autres singularités que nous évoquerons plus loin ; nous n'avons pas aujourd'hui de réponse définitive à cette question.

1.6 Des magnétosphères diversifiées

Nous avons vu (chapitre 3, paragraphe 6) que la Terre était dotée d'un champ magnétique intense, généré par effet dynamo au sein de son noyau liquide. La magnétosphère qui en résulte se présente comme un bouclier qui protège l'atmosphère terrestre du vent solaire, sous la forme d'une cavité hémisphérique du côté du Soleil et d'une queue allongée dans la direction opposée.

Les planètes géantes possèdent elles aussi une magnétosphère dont les grandes structures sont analogues à celle de la Terre. Nous avons vu ci-dessus (chapitre 5, paragraphe 1.5) qu'elles sont dotées d'une partie centrale, fluide et conductrice : dans

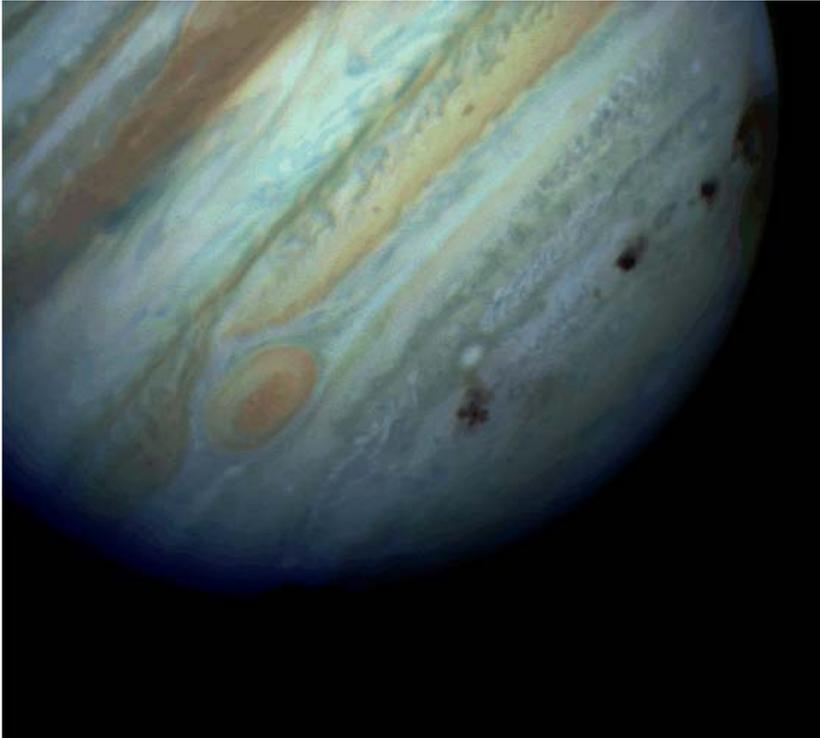


Figure 5.14. Quelques sites d'impact de la collision de la comète Shoemaker-levy 9 avec Jupiter (juillet 1994). À mesure que les vingt fragments cométaires pénétraient dans l'atmosphère, ils ont formé des impacts qui se sont alignés le long d'un parallèle à la latitude 44S. Les impacts sont restés visibles pendant plusieurs mois. L'image a été prise par le télescope spatial Hubble (©NASA).

le cas de Jupiter et de Saturne celle-ci pourrait être constituée d'hydrogène métallique ; pour Uranus et Neptune, dont les pressions internes sont moins élevées, il s'agirait d'un océan d'hydrogène H_2 et d'autres molécules ionisées. Dans le cas des quatre planètes, l'effet dynamo doit être amplifié par leur rotation rapide autour de leur axe (entre 10 et 16 heures).

Parmi les quatre planètes, c'est la magnétosphère de Jupiter qui ressemble le plus à celle de la Terre. Son existence fut découverte dès les années 1950 par la mise en évidence d'un rayonnement radio très intense à 22 MHz, caractéristique du rayonnement synchrotron d'électrons dans le champ magnétique de la planète. Plus tard, les mesures des sondes spatiales Pioneer 10 et 11, *Voyager*, puis *Ulysses*, *Galileo* et enfin *Cassini*, ont permis d'affiner sa structure. Comme dans le cas de la Terre, le champ magnétique de Jupiter est de nature dipolaire, avec un axe faiblement incliné par rapport à l'axe de rotation planétaire. Ce dipôle subit des perturbations

liées à la présence des satellites galiléens les plus proches, à commencer par Io. La magnétosphère de Jupiter présente des ceintures analogues aux ceintures de Van Allen terrestres, qui sont à l'origine du rayonnement synchrotron. Dans les régions polaires, l'interaction des particules énergétiques du vent solaire avec la magnétosphère de Jupiter produit des phénomènes auroraux : les atomes et les ions de l'ionosphère excités par les particules énergétiques du vent solaire émettent, dans le domaine visible, des rayonnements multicolores spectaculaires.

Comme Jupiter, la planète Saturne est dotée d'un champ magnétique dipolaire qui nous a été révélé par les sondes spatiales. L'axe du dipôle est quasiment aligné avec l'axe de rotation planétaire. La magnétosphère de Saturne se différencie de celle de Jupiter par la présence du satellite Titan et son tore d'hydrogène, ainsi que la présence du système d'anneaux qui empêche le piégeage des particules le long des lignes de champ, d'où l'absence de ceintures de Van Allen. Saturne présente des phénomènes auroraux analogues à ceux de Jupiter. Enfin, lors de son survol successif des deux planètes, en 1986 et en 1989, la sonde *Voyager 2* a révélé la nature particulière des magnétosphères d'Uranus et de Neptune. Les dipôles sont en effet très inclinés et excentrés par rapport aux pôles des planètes, ce qui induit une structure plus complexe avec des termes multipolaires. Dans le cas d'Uranus, la situation est encore compliquée par la position exceptionnelle de l'axe de rotation de la planète, pratiquement situé dans le plan de l'écliptique... Chaque magnétosphère est ainsi unique en son genre, et présente un laboratoire de choix à échelle planétaire pour les spécialistes de physique des plasmas.

2 De Jupiter à Neptune : trois décennies d'exploration

L'exploration spatiale des planètes géantes a débuté avec les deux sondes américaines *Pioneer 10* et *11*, lancées dans les années 1970. Dotées d'une instrumentation simple, elles nous ont envoyés les premières images, spectaculaires, de la Grande Tache Rouge de Jupiter et des anneaux de Saturne. C'est la mission *Voyager* qui nous a fournis les bases de notre connaissance actuelle des planètes géantes. Deux sondes identiques *Voyager 1* et *2* ont été lancées en 1977 ; *Voyager 1* a survolé Jupiter et Saturne en 1979 et 1980 tandis que *Voyager 2* a survolé successivement les quatre planètes géantes en 1979, 1981, 1986 et 1989. L'exploration de Jupiter s'est poursuivie avec la mission *Galileo*, lancée en 1989, dotée d'un orbiteur et d'une sonde de descente qui a pénétré dans l'atmosphère de Jupiter en 1995, apportant les premières mesures in situ de la structure thermique et nuageuse de la planète. Le système de Saturne a quant à lui été exploré par la mission *Cassini*, développée conjointement par la NASA et l'ESA, et lancée en 1997. Elle était dotée d'un orbiteur, toujours en opération, et d'une sonde de descente européenne, *Huygens*, qui s'est posée avec

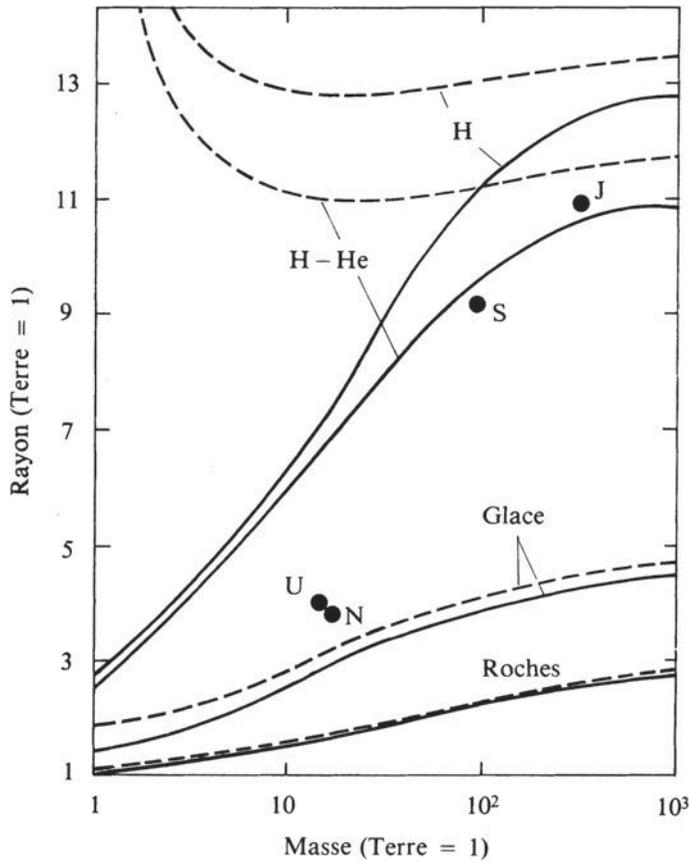


Figure 5.15. La relation masse-rayon pour un objet auto-gravitant, pour différentes compositions. Jupiter et Saturne se situent dans le domaine des géantes gazeuses tandis qu'Uranus et Neptune sont majoritairement composées de glaces (d'après Stevenson, 1982).

succès sur le sol de Titan le 14 janvier 2005. D'autres projets sont en préparation pour la poursuite de l'exploration de Jupiter et de Saturne, mais rien n'est actuellement prévu pour Uranus et Neptune (voir chapitre 1, paragraphe 3.2). Précisons que les observations au sol, particulièrement dans les domaines infrarouge et millimétrique, ont apporté de précieuses informations sur la composition atmosphérique des planètes géantes ; c'est aussi le cas des observations en orbite terrestre, avec les satellites IUE (*International Ultraviolet Explorer*), puis HST (*Hubble Space Telescope*) et ISO (*Infrared Space Observatory*).

2.1 Jupiter, la géante

Jupiter, la plus massive des planètes géantes et aussi la plus proche, a depuis toujours constitué une cible de choix pour l'observation télescopique. *Cassini*, dès la fin du XVII^e siècle, surveillait sa Grande Tache Rouge ainsi que son système de circulation en bandes et en zones, généré par la rotation rapide de la planète. Comme sur les autres planètes, la différence d'insolation entre l'équateur et les pôles génère une circulation de Hadley (voir chapitre 3, paragraphe 4), caractérisée par une structure alternée en bandes et en zones, d'autant plus nombreuses que la rotation de la planète est rapide. La couleur jaune pâle des bandes est sans doute liée à la présence de nuages d'ammoniac. La cause de la couleur rouge de la Grande Tache n'est pas claire ; elle pourrait être due à la présence de constituants phosphorés ou soufrés, ou d'aérosols provenant de la photochimie du méthane. Les archives de l'Observatoire de Paris mentionnent l'observation par *Cassini* d'une série d'impacts provenant très vraisemblablement de la chute d'une comète. Un événement similaire, suivi par l'ensemble de la communauté astronomique, a eu lieu en juillet 1994 : la comète Shoemaker-Levy 9, en orbite autour de la planète, s'est fracturée en une vingtaine de fragments, sous l'effet des forces de marée, lors de son passage antérieur au périastre, deux ans plus tôt. Les vingt fragments ont ensuite voyagé de concert sur des orbites très voisines, pour plonger successivement dans l'atmosphère de Jupiter lors du passage au périastre suivant. Les impacts ont donné lieu à des phénomènes spectaculaires : élévation locale de température au delà de 10 000 degrés, éjection de matière à plus de 3000 km d'altitude, formation de cratères sombres observables pendant plusieurs mois, formation de nouvelles molécules (H₂O, CO, HCN, CS, OCS...) par chimie de choc. La taille du noyau initial a été estimée à 1 km environ. L'observation de ce phénomène exceptionnel a permis aux astronomes d'étudier en vraie grandeur (et sans danger !) les effets d'un impact météoritique majeur sur une atmosphère planétaire.

Nous l'avons mentionné, Jupiter est la seule planète géante à avoir bénéficié d'observations in situ. Des spectromètres de masse et des chromatographes ont permis de mesurer à chaque altitude la température, la pression, la composition chimique, la composition nuageuse et la vitesse des vents à mesure que la sonde descendait dans l'atmosphère. Elle a émis des signaux jusqu'à une profondeur de 22 bars, ce qui a fourni une base de données unique, qui sert de référence encore aujourd'hui, tout en constituant un exploit technologique sans précédent. L'un des résultats les plus importants concerne la mesure de l'abondance des éléments lourds : mesurée par rapport à l'hydrogène, celle-ci est environ quatre fois supérieure à la valeur protosolaire, ce qui valide sans ambiguïté le modèle de formation des planètes géantes à partir d'un noyau de glace (voir Fig. 5.6 et chapitre 5, paragraphe 1.2). Un autre résultat particulièrement remarquable est la mise en évidence d'une structure convective



Figure 5.16. La Grande Tache Rouge de Jupiter, photographiée par la sonde *Voyager 1* en 1979. L'origine de la couleur orange est encore mal comprise. La tache blanche correspond à un nuage d'ammoniac (©NASA).

très complexe. La sonde *Galileo* a en effet pénétré dans une région très atypique de la planète, agitée de mouvements descendants, particulièrement sèche et dénuée de nuages, un peu analogue aux régions tropicales sur Terre. Sur Jupiter, ces régions, également regroupées le long de bandes parallèles du fait de la circulation de Hadley, sont très localisées. Les mécanismes de cette circulation complexe sont encore mal compris.

Bien que ceux-ci soient très ténus, Jupiter, comme les autres planètes géantes, est doté d'un système d'anneaux, situés à moins de deux rayons joviens du centre de la planète. Découvert fortuitement par la sonde *Voyager 1* en 1979, puis réobservé par l'orbiteur de *Galileo*, le système, formé de trois composantes, est constitué de très petites particules, de taille micronique, et est probablement alimenté par les satellites proches de Jupiter.

Dans le prolongement de la mission *Galileo*, la NASA et l'ESA préparent une nouvelle mission plus ambitieuse, EJSM (*Europa and Jupiter System Mission*) qui sera consacrée à l'exploration du système de Jupiter et plus spécifiquement de ses satellites Europe et Ganymède (voir chapitres 5, paragraphe 3.1 et 7, paragraphe 2.3). Cette mission pourrait être lancée à l'horizon 2020.

2.2 Saturne, la plus belle

Saturne, comme Jupiter, est une géante gazeuse : le gaz protosolaire constitue environ 90 % de sa masse totale. Elle présente donc de fortes analogies avec Jupiter en termes de structure thermique et nuageuse, ainsi que de circulation en bandes et en zones. Une différence toutefois : la température plus basse entraîne la condensation de l'ammoniac en de plus grandes quantités que dans le cas de Jupiter, ce qui explique sans doute la couleur jaune pâle plus uniforme de la planète.

C'est bien sûr la présence de son imposant système d'anneaux qui fait de Saturne l'un des plus beaux objets du ciel. Son aspect variable, associé à la position de la Terre par rapport au plan équatorial de la planète, continue de fasciner les astronomes amateurs et professionnels, plusieurs siècles après que Christiaan Huygens en ait compris la raison. Les observations télescopiques se sont faites de plus en plus précises permettant la découverte de nouveaux anneaux et de nouvelles divisions. L'épaisseur des anneaux est très faible : moins d'un kilomètre. C'est la sonde *Voyager 1* qui, en 1980, nous a révélé l'extrême complexité des anneaux de Saturne. Les images nous ont montré la présence de milliers d'anneaux individuels en évolution permanente, avec des excentricités différentes, en interaction les uns avec les autres ; leur évolution est aussi liée à celle des satellites voisins qui jouent un rôle de confinement, d'où leur nom de « satellites gardiens ». Les anneaux, comme les satellites, sont majoritairement constitués de glace d'eau, avec des particules de toutes tailles, allant du micromètre au mètre. La durée de vie des anneaux individuels et des petits satellites gardiens est très courte, et peut ne pas excéder quelque mois ou quelques années ; ce sont les forces de marée qui sont responsables de ces évolutions.

Suite à la mission *Cassini*, un autre projet est à l'étude du côté de la NASA et de l'ESA. Il s'agit de la mission TSSM (*Titan and Saturn System Mission*) qui, outre Saturne, aura pour mission l'exploration de Titan et d'Encelade, deux satellites qui fascinent particulièrement les astronomes (voir ci-dessous, chapitres 5, paragraphe 3.2 et 7, paragraphe 2.5). Cette ambitieuse mission pourrait voir le jour d'ici une à deux décennies.

2.3 Uranus et Neptune, les fausses jumelles

Les deux géantes glacées, Uranus et Neptune, sont voisines par leur taille et leur densité. Leur couleur (bleu profond pour Neptune, bleu-vert pâle pour Uranus) est sans doute liée à la présence de méthane en abondance, mais la cause de la différence de couleur entre les deux planètes n'est pas claire. À première vue Uranus et Neptune sont jumelles ; pourtant, si on les observe de plus près, plusieurs questions se posent. Tout d'abord, leur position orbitale est inattendue. Pourquoi Neptune, plus massive qu'Uranus, est-elle située à plus grande distance du Soleil ? Nous avons vu qu'une



Figure 5.18. Les anneaux d'Uranus (à gauche) et de Neptune (à droite) photographiés par le HST et par la sonde *Voyager 2*, respectivement (© NASA).

Quelles sont les causes possibles des différences entre Uranus et Neptune ? Il a été suggéré que la convection interne d'Uranus pourrait être inhibée, ce qui aurait pour effet d'empêcher l'évacuation de l'énergie interne contenue dans les couches profondes, et de supprimer toute activité dynamique. Ceci expliquerait l'absence d'énergie interne, de turbulence et d'activité météorologique. Il resterait à comprendre la cause de cette inhibition. . .

Les anneaux d'Uranus et Neptune, très ténus, n'ont été découverts que récemment, en 1977 et 1984 respectivement. Dans les deux cas, ils ont été observés depuis la Terre lors d'une expérience d'occultation stellaire, à l'occasion du passage de chaque planète devant une étoile (voir chapitre 1, paragraphe 2.2). Dans le cas d'Uranus, avant et après le transit, la courbe de lumière de l'étoile a montré une série de neuf occultations très brèves, signes de l'existence de neuf anneaux très ténus. Ceux-ci se présentaient alors sous une forme quasi circulaire, car l'axe de rotation de la planète était orienté dans la direction du Soleil et de la Terre. La sonde *Voyager 2*, en 1986, a confirmé la présence de ces anneaux. Dans le cas de Neptune, la courbe de lumière de l'étoile était plus surprenante : elle présentait bien une occultation, mais d'un côté seulement. . . Les astronomes ont alors conclu à la présence d'arcs. En 1989, la sonde *Voyager 2* a montré que les anneaux existaient bien tout au long de l'orbite mais qu'ils présentaient une épaisseur accrue en certains endroits ; ce phénomène résulte de leur interaction avec de petits satellites voisins. Comme ceux de Saturne, les anneaux d'Uranus et de Neptune sont composés de glace d'eau mais ils sont plus sombres. Ils sont sans doute recouverts d'un dépôt de matière organique, résultant de l'irradiation des grains de plusieurs sortes de glaces par des particules énergétiques issus de la magnétosphère.

3 Les satellites extérieurs

À la différence des planètes telluriques, les planètes géantes sont dotées de très nombreux satellites. Ceux-ci se divisent en deux grandes catégories. Les satellites réguliers, très proches du plan équatorial de la planète, ont été formés lors de l'effondrement de la matière protosolaire autour du noyau initial (voir chapitre 2, paragraphe 5) ; les satellites irréguliers, d'excentricité et d'inclinaison aléatoires, ont été capturés par la planète. Du fait de leur fort champ de gravité, ce mécanisme de capture est bien plus efficace que dans le cas des planètes telluriques.

Les satellites extérieurs couvrent toutes les échelles des tailles, depuis quelques kilomètres jusqu'à la taille de Mercure pour les plus gros d'entre eux (Ganymède, Titan et Callisto). Il n'y a pas de frontière nette entre les plus petits satellites intérieurs de Saturne et les plus gros fragments de ses anneaux qui sont en interaction permanente avec ceux-ci (voir chapitre 5, paragraphe 2.2).

Les quatre planètes géantes présentent une grande variété dans la distribution en taille de leur cortège de satellites. Jupiter présente quatre gros satellites – appelés galiléens depuis leur découverte par Galilée en 1610 – situés à des distances allant de 6 à 26 rayons joviens. On retrouve avec Uranus une configuration comparable, avec 5 gros satellites situés entre 5 et 25 rayons uraniens de la planète. Saturne, en revanche, présente un seul gros satellite, Titan, situé à 20 rayons saturniens, ainsi que huit plus petits satellites de rayon compris entre 100 et 800 km. Tous les satellites mentionnés ci-dessus sont réguliers. Neptune présente quant à lui un cas à part. Il possède un gros satellite irrégulier, Triton, situé à 15 rayons neptuniens environ, doté d'une inclinaison très élevée (160°). Il s'agit vraisemblablement d'un objet trans-neptunien dont la capture pourrait avoir eu pour effet d'éjecter le système de satellites réguliers antérieur. Précisons enfin que la liste des satellites extérieurs répertoriés autour de quatre planètes géantes ne cesse de s'allonger, suite aux progrès de l'instrumentation des télescopes au sol et aussi, dans le cas de Saturne, grâce aux observations de l'orbiteur *Cassini*, toujours en opération.

Les satellites extérieurs, de mieux en mieux connus grâce à l'exploration spatiale, présentent une extrême diversité qui résulte de la nature, l'histoire et l'environnement spécifique de chaque corps : masse, densité, distance à la planète, interaction avec les corps voisins... Indépendamment de leur intérêt propre, ils nous intéressent aussi comme exemples possibles de ce que pourraient être des exosatellites, voire des exoplanètes de faible masse éloignées de leur étoile, au sein d'autres systèmes planétaires. Nous allons ci-dessous étudier certains d'entre eux plus en détail.

3.1 Proches de Jupiter, les satellites galiléens

Les quatre satellites galiléens (Io, Europe, Ganymède et Callisto, classés par ordre croissant de leur distance à Jupiter) s'apparentent par leurs dimensions aux planètes

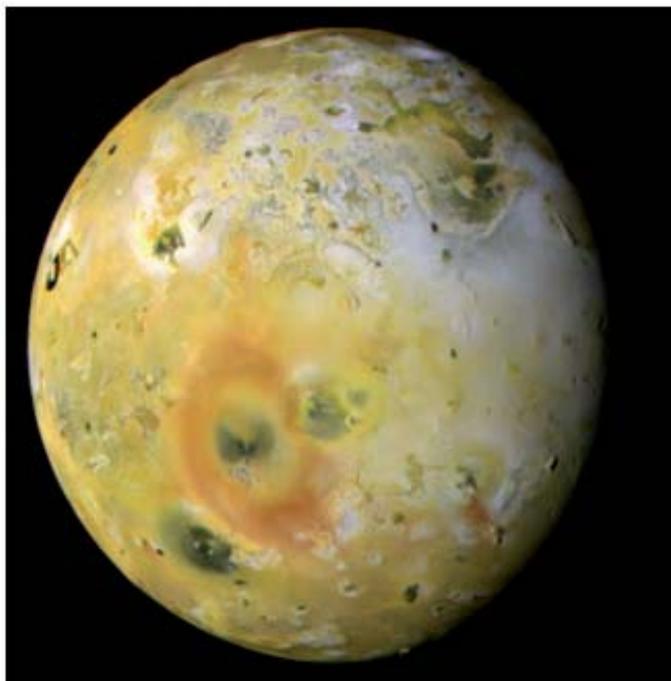


Figure 5.19. Le satellite Io photographié par la sonde *Galileo* en 1995. Prise seize ans après la découverte des volcans par *Voyager 1*, cette image a mis en évidence l'évolution des volcans pendant cette période (©NASA).

telluriques, mais leur densité plus faible (moins de 2 g/cm^3 pour Ganymède et Callisto, environ 3 g/cm^3 pour Europe) témoigne de la présence d'eau en quantité significative, comme on peut s'y attendre pour des objets situés au-delà de la ligne des glaces (voir chapitre 2, paragraphe 5).

Seule exception, Io, situé à 6 rayons joviens, affiche une densité de $3,5 \text{ g/cm}^3$ et des propriétés de surface très différentes des trois autres galiléens. Cette singularité est due aux très forts effets de marée liés au champ de gravité de Jupiter, plus de dix mille fois plus massif. Ces effets de marée, conjugués aux effets gravitationnels des satellites voisins Europe et Ganymède, en résonance avec Io, sont la cause du volcanisme actif mis en évidence en 1979 par la sonde *Voyager 1*. La surface de Io est sans cesse renouvelée, comme le montre l'absence de cratères d'impacts à sa surface. Les images prises ensuite par les missions *Galileo* (Fig. 5.19) et *Cassini*, ainsi que par le HST, ont montré que l'activité des volcans de Io évoluait rapidement, à l'échelle de quelques années. Comme l'atteste sa densité élevée, Io n'est pas constitué majoritairement d'eau, car celle-ci s'est échappée suite à l'élévation de température liée à l'énergie interne provenant des effets de marée. La surface de Io est couverte de

glace de dioxyde de soufre ; l'atmosphère, alimentée par le volcanisme, est elle aussi composée de SO_2 . Bien que très ténue (quelques nanobars en surface), l'atmosphère de Io joue un rôle important dans l'environnement magnétique de Jupiter car elle laisse échapper des atomes ionisés d'hydrogène, de sodium, de soufre, d'oxygène qui alimentent un tore autour de l'orbite de Io.

Europe, le plus petit des galiléens, est, comme Ganymède et Callisto, recouvert de glace d'eau. Cependant lui aussi est, dans une moindre mesure que Io, soumis aux forces de marée de Jupiter. Celles-ci se traduisent par une énergie interne qui a pour effet d'élever la température en quantité suffisante, selon les modèles, pour que l'eau, sous la surface, puisse être à l'état liquide jusqu'au noyau silicaté situé plus en profondeur. Les observations des sondes *Voyager* et *Galileo* ont confirmé cette hypothèse. Elles ont observé à la surface d'Europe des fissures et des plaques dont l'agencement suggère un déplacement au-dessus d'un milieu visqueux ou liquide. De plus, le magnétomètre de l'orbiteur *Galileo* a mis en évidence un champ magnétique induit par celui de Jupiter qui pourrait indiquer la présence d'un milieu conducteur, tel qu'un océan d'eau salée. Voilà donc un objet particulièrement intéressant pour les exobiologistes, en quête de milieux éventuellement favorables à l'émergence de la vie (voir chapitre 7, paragraphe 2.3). Avec le projet EJSM (*Europa and Jupiter System Mission*), actuellement à l'étude à la NASA et à l'ESA, le satellite Europe est devenu une cible privilégiée pour l'exploration spatiale future des planètes géantes. Enfin, Ganymède et Callisto, plus éloignés de Jupiter, et de surface plus cratérisée, ont la densité caractéristique des objets extérieurs riches en eau.

3.2 Titan, un analogue de la Terre primitive ?

Proche des deux galiléens extérieurs par sa taille et sa densité, Titan, le plus gros satellite de Saturne, n'en est pas moins très différent : il est le seul satellite du système solaire doté d'une atmosphère neutre de masse conséquente. La surface de Titan est en permanence cachée par une brume d'aérosols épaisse de couleur jaune-orangé, aujourd'hui attribuée à des condensats d'hydrocarbures et de nitriles. On connaissait très mal l'atmosphère et la surface de Titan avant son exploration par la sonde *Voyager 1* en 1980. Celle-ci a révélé que l'atmosphère est majoritairement constituée d'azote moléculaire, et que sa pression de surface est 1,5 fois la pression atmosphérique terrestre. Voilà deux propriétés suffisantes pour éveiller l'intérêt des exobiologistes qui voient en Titan un laboratoire possible de chimie prébiotique, voire un analogue possible de la Terre primitive (voir chapitre 7.2.5). Il existe toutefois une différence notable, la très basse température qui règne sur Titan (94 K à la surface, 70 K à la tropopause).

Après l'azote, le méthane, avec une pression partielle de 2 %, est le constituant atmosphérique le plus abondant. La présence simultanée de N_2 et de CH_4 donne

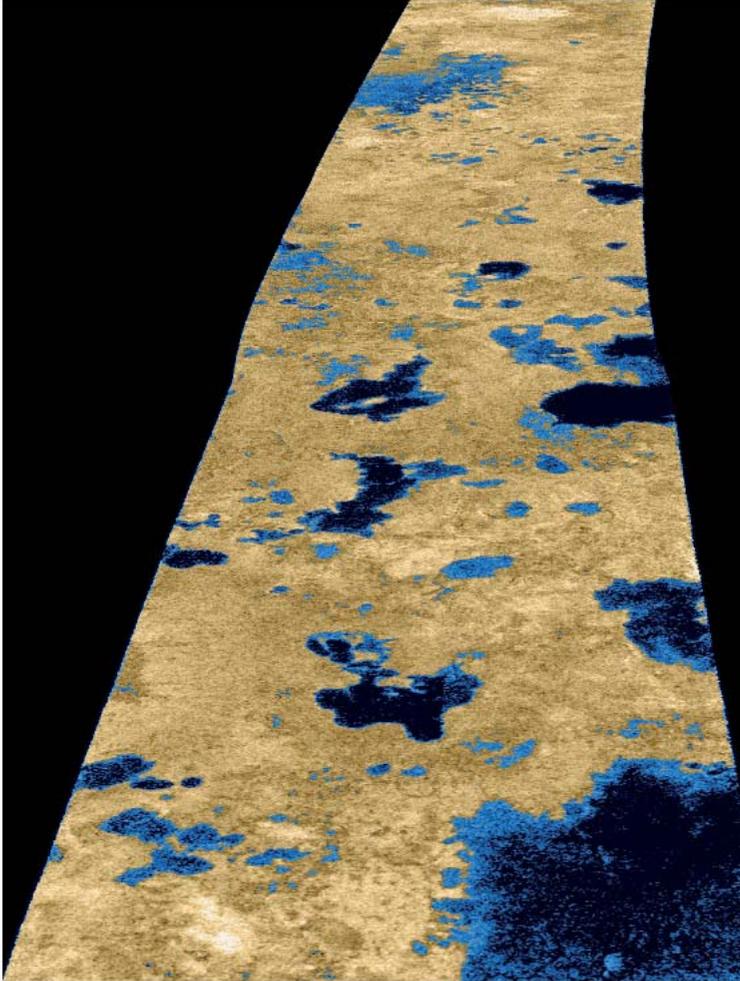


Figure 5.20. Les lacs d'hydrocarbures de Titan mis en évidence par le radar de la sonde *Cassini* (©NASA).

naissance à une chimie complexe, différente de celles des planètes, et unique dans le système solaire. À la photodissociation du méthane qui entraîne, comme sur les planètes géantes, la présence de nombreux hydrocarbures, s'ajoute la dissociation de N_2 par le rayonnement UV solaire et les particules énergétiques de la magnétosphère de Saturne, d'où la formation de nitriles (HCN , C_2N_2 , HC_3N , CH_3CN). Pour compliquer la situation, Titan reçoit, comme les planètes géantes, un flux de particules oxygénées issues des satellites de glace voisins et/ou d'un flux interplanétaire (voir chapitre 5, paragraphe 1.4). Tous les ingrédients sont donc réunis pour créer une chimie complexe...

Près de vingt ans après le succès de *Voyager 1*, l'ESA et la NASA ont conjointement lancé, en 1997, la mission *Cassini-Huygens*, destinée à l'exploration du système de Saturne. En juillet 2004, le vaisseau spatial *Cassini* s'est mis en orbite autour de Saturne pour une exploration approfondie de son système. Le 14 janvier 2005, la sonde européenne *Huygens* a retransmis à la Terre les premières images de Titan : un sol plat, couvert d'un dépôt sombre d'hydrocarbures, jonché de galets fortement érodés, très probablement constitués de glace d'eau. Pas de trace de méthane liquide, contrairement à certaines prédictions. Cependant, les images de *Huygens* ont montré des réseaux ramifiés suggérant la présence de réseaux fluviaux passés. Plus récemment les observations réalisées par le radar de l'orbiteur ont montré la présence de lacs d'hydrocarbures sombres, principalement situés aux hautes latitudes Nord (Fig. 5.20). Il est vraisemblable que ces lacs évoluent au fil des saisons. L'hémisphère nord étant actuellement en hiver, les lacs remplis de méthane liquide y sont plus nombreux, particulièrement à proximité du pôle Nord. Quelle est la source du méthane de Titan ? Comme celui-ci est photodissocié dans l'atmosphère, il doit être en permanence renouvelé ; sans doute est-il injecté dans l'atmosphère depuis la surface par cryo-volcanisme (ce mécanisme traduit l'éjection d'un gaz qui condense immédiatement du fait de la basse température du milieu).

Autre résultat spectaculaire de la mission *Cassini* : la mise en évidence d'une chimie extrêmement complexe dans l'ionosphère de Titan où ont été découverts, par spectrométrie de masse, des dizaines d'ions très complexes, dépassant la centaine d'unités de masse atomique. Cette découverte pose un nouveau défi aux astronomes qui tentent maintenant de reproduire en laboratoire les conditions de formation de ces ions, et aussi de comprendre la nature exacte des condensats qui forment la brume masquant la surface. On le voit, Titan n'a pas fini de nous étonner... d'où les efforts des planétologues qui préparent sans attendre une nouvelle mission d'exploration de Titan qui pourrait voir le jour d'ici une quinzaine d'années (voir chapitre 7, paragraphe 2.5).

De part ses dimensions et sa densité, Titan est très voisin de Ganymède et Callisto. Les trois satellites sont suffisamment éloignés de leur planète pour que l'effet de celle-ci sur leur composition et leur structure interne soit mineur (ce qui n'est pas le cas pour Io et Europa, plus proches de Jupiter). Pourquoi donc Titan est-il doté d'une atmosphère dense alors que les satellites galiléens en sont démunis ? Il faut sans doute rechercher la réponse dans la différence de leur distance au Soleil. Situés juste au-delà de la ligne des glaces, à 5 UA du Soleil, Ganymède et Callisto se sont formés principalement à partir de glace d'eau : rappelons-nous que l'eau est la première molécule qui condense lorsque l'on s'éloigne du Soleil (voir chapitre 2, paragraphe 5). Situé à 10 UA du Soleil, Titan s'est formé à plus basse température et a pu piéger d'autres glaces, à commencer par l'ammoniac NH_3 et le méthane CH_4 . L'ammoniac se transforme rapidement en azote moléculaire N_2 sous l'effet

du rayonnement ultraviolet solaire, tandis que la réaction inverse se produit très difficilement. Il est donc très probable que l'azote de l'atmosphère de Titan provient de la photodissociation de NH_3 . Sa masse moléculaire plus élevée que celle de l'eau aura favorisé le maintien d'une atmosphère stable.

3.3 De Saturne à Uranus

Parmi les cinq plus gros satellites réguliers qui s'échelonnent entre Saturne et Titan (dans l'ordre de distance croissante : Mimas, Encelade, Téthys, Dioné et Rhéa), Encelade mérite une attention particulière. Le magnétomètre de *Cassini* a détecté une atmosphère émergeant du pôle Sud du satellite. La caméra de l'orbiteur *Cassini* a ensuite observé des panaches de vapeur d'eau et de composés organiques éjectés de cet endroit (Fig. 5.21). Des observations infrarouges ont alors montré une élévation locale de température dans cette région qui apparaît aussi striée et plus jeune que le reste du globe. Encelade est donc le siège d'un cryo-volcanisme dont l'origine reste à expliquer (voir chapitre 7, paragraphe 2.4). Des modèles récents suggèrent la présence de poches d'eau liquide proches de la surface. Encore un objet intéressant pour les exobiologistes qui sera étudié de près par la prochaine mission spatiale vers Saturne.

Les cinq gros satellites entourant Uranus (par ordre croissant, Miranda, Ariel, Umbriel, Titania et Obéron) sont eux aussi recouverts de glace d'eau mais de couleur plus sombre que dans le cas des satellites de Saturne, sans doute du fait de la présence d'autres glaces (méthane, hydrocarbures...). Lors du passage de *Voyager 2* en 1986, les images de Miranda ont créé la surprise : ce petit satellite présente une surface fortement accidentée avec falaises, failles, vallées qui témoignent d'une intense activité tectonique passée (Fig. 5.22). Quelle peut avoir été la source de l'énergie interne sur un objet si petit et si froid ? Selon une hypothèse évoquée par certains, le satellite pourrait avoir été détruit suite à une collision, puis s'être reconstitué ensuite à partir de fragments en orbite autour d'Uranus ; mais il ne s'agit que d'une hypothèse...

3.4 Triton, un autre Pluton ?

Enfin, dernier échantillon de notre panorama, Triton, le plus gros satellite de Neptune, mérite une mention spéciale. Tout d'abord, à la différence de tous les objets précédemment cités, il est irrégulier, comme en témoigne son orbite rétrograde et très inclinée. Cette géométrie particulière entraîne les effets saisonniers les plus forts existant dans le système solaire : depuis la surface, le Soleil est au zénith à des latitudes atteignant 52° au nord et au sud ! Comme dans les cas précédents, l'orbite de Triton est synchrone : elle présente toujours la même face à Neptune. La nature de Triton nous a été révélée lors de son survol par *Voyager 2*

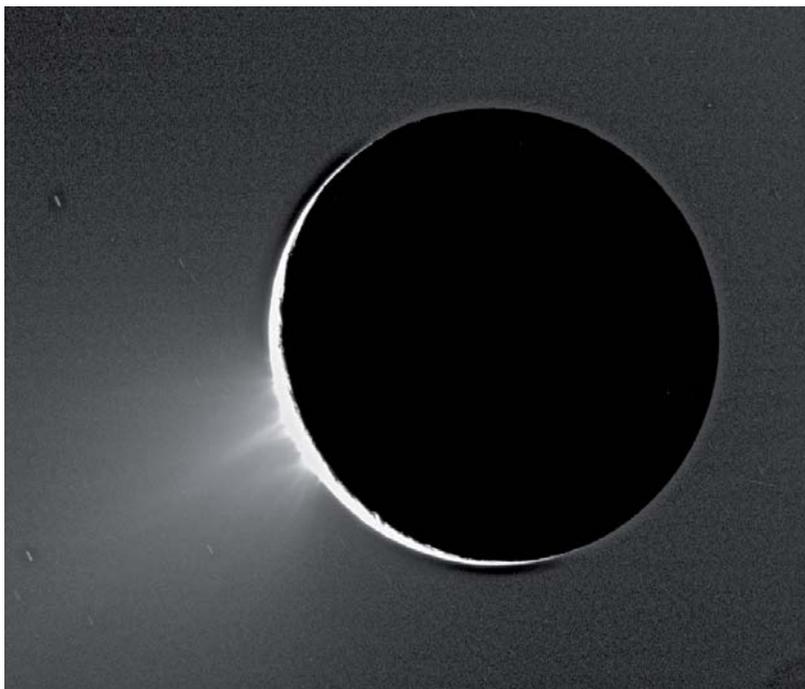


Figure 5.21. Le satellite Encelade photographié par la caméra de l'orbiteur de la mission *Cassini*. On voit l'émission d'une plume, contenant de la vapeur d'eau, éjectée de la surface par cryovolcanisme (©NASA).

en 1989. L'atmosphère est comme celle de Titan composée d'azote avec une faible composante de méthane ; cependant, la pression de surface n'est que de quelques microbars. Avec une température de 38 K, la surface de Triton est la plus froide et aussi la plus brillante mesurée dans le système solaire. La surface de Triton est jeune et montre les signes d'un cryo-volcanisme peut-être encore actif aujourd'hui. Des mesures de spectroscopie infrarouge réalisées depuis la Terre ont révélé la présence de glaces de N_2 , CH_4 , CO , CO_2 et plus marginalement H_2O .

Nous avons vu que Triton est très vraisemblablement un objet trans-neptunien égaré, capturé par Neptune. Les conditions de cette capture ne sont d'ailleurs pas complètement claires pour les dynamiciens, mais l'intérêt que revêt Triton à nos yeux n'en est pas moindre pour autant : Triton a pu être observé de près par la sonde *Voyager 2*, alors que la sonde *New Horizons*, lancée en 2006 par la NASA, n'atteindra Pluton qu'en 2015...

Les observations de Pluton et de son satellite Charon, réalisées depuis le sol depuis les années 1980, n'ont fait que confirmer la remarquable similitude entre Triton et Pluton. Plusieurs techniques ont été utilisées avec succès : les observations mutuelles de Pluton et de Charon, les occultations stellaires (voir chapitre 1.2.2),

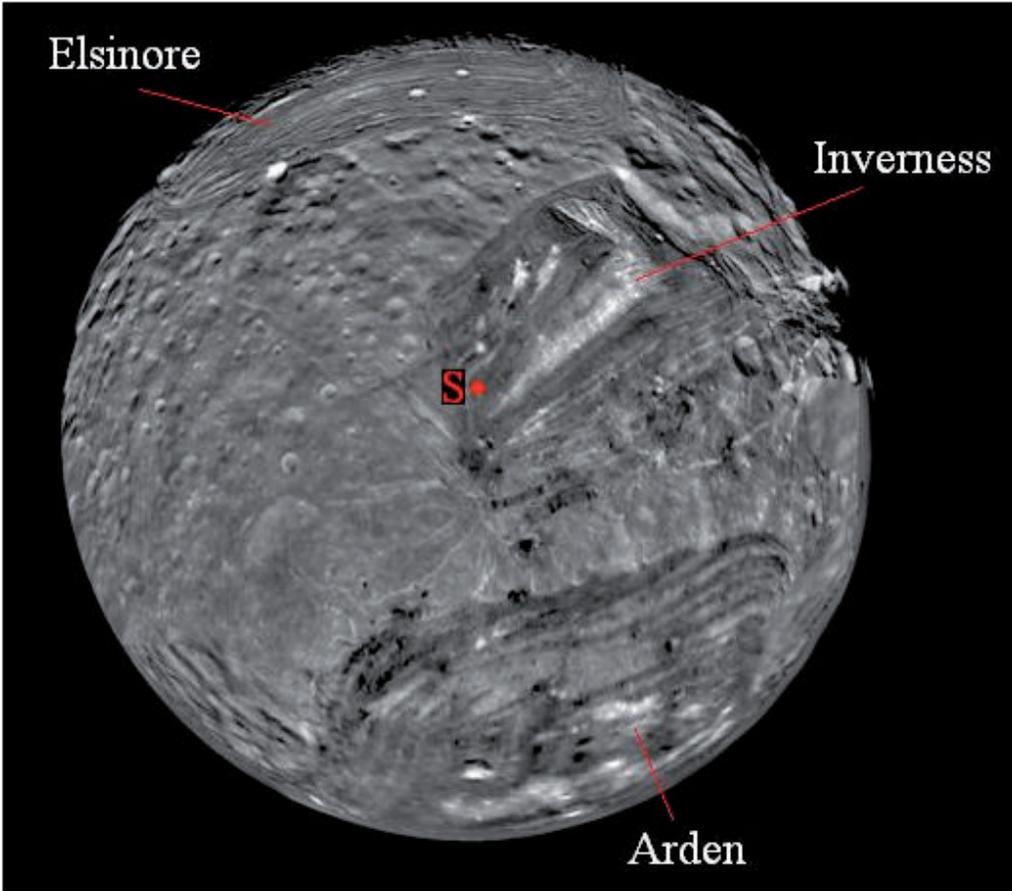


Figure 5.22. Le satellite Miranda photographié par la sonde *Voyager 2* en 1986 (©NASA).

la spectroscopie infrarouge, les mesures millimétriques, et les observations en orbite terrestre, avec le HST et ISO. Entre 1979 et 1998, Pluton, dont l'orbite est sensiblement plus excentrée que celle des planètes géantes, était plus proche du Soleil que Neptune et Triton. L'élévation (très relative) de la température a entraîné la sublimation des glaces, en particulier l'azote et le méthane. On a alors détecté sur Pluton une atmosphère très comparable à celle de Triton, constituée elle aussi de N_2 et d'une petite contribution de CH_4 , avec une pression de surface de quelques microbars. À la surface de Pluton, la composition des glaces est elle aussi très similaire à celle de Triton. Voilà qui conforte pleinement l'hypothèse selon laquelle Triton est lui aussi un objet trans-neptunien. Il reste à comprendre comment Triton s'est retrouvé piégé dans l'orbite de Neptune : un problème toujours ouvert pour les dynamiciens. . .

6

Exoplanètes, les nouveaux mondes

Sommes-nous seuls dans l'Univers ? Cette question s'est posée aux hommes dès l'aube des civilisations. Elle a divisé les Grecs, entre partisans, comme Épicure, d'une infinité de mondes habités, et les tenants de l'unicité de la Terre, centre de l'Univers, telle que la concevait Aristote. Le débat était alors purement philosophique mais agitait déjà les esprits.

Avec l'avènement du système copernicien, au XVI^e siècle, la question se trouve reposée dans un contexte plus scientifique. L'observation des astres a montré que la Terre et les planètes tournent autour du Soleil, qui n'est lui-même qu'une étoile semblable à des milliards d'autres. Dès lors, comment ne pas imaginer que certaines de ces étoiles pourraient elles aussi être entourées d'un cortège planétaire ? En 1600, cette hypothèse trop hardie pour l'époque a coûté la vie à Giordano Bruno, victime du dogmatisme religieux dominant. Mais l'idée continuera de faire son chemin. En 1686, le philosophe Fontenelle, dans ses *Entretiens sur la Pluralité des Mondes*, se fait l'ardent défenseur d'un nombre infini de planètes dans l'Univers, mais aussi de l'habitabilité de certaines d'entre elles, y compris dans notre système solaire. Toujours au XVII^e siècle, l'astronome Christiaan Huygens, dans son ouvrage *Cosmotheoros*, plaide aussi pour l'existence de planètes extraterrestres. Un siècle plus tard, le philosophe Immanuel Kant et le physicien Pierre-Simon de Laplace jettent les bases de ce qui deviendra le « modèle de la nébuleuse primitive », selon lequel le Soleil et les planètes du système solaire se sont formées au sein d'un disque résultant de l'effondrement d'un nuage de gaz interstellaire en rotation (voir chapitre 2). Si ce scénario est valide pour le système solaire, pourquoi ne le serait-il pas pour d'autres étoiles ? Nous retrouvons cette hypothèse au XIX^e siècle dans *Astronomie populaire* de l'astronome Camille Flammarion, véritable ouvrage de référence de l'époque.

1 Une longue quête semée d'échecs

Si des planètes existent autour d'étoiles voisines, comment les mettre en évidence ? Très tôt, les astronomes ont pris conscience de l'extrême difficulté de la tâche. Prenons le cas de la planète Jupiter et voyons si nous pourrions l'observer si nous étions placés à la distance de l'étoile voisine la plus proche. Il s'agit de Proxima du Centaure, située à 1,3 parsec¹, c'est-à-dire à environ 4 années-lumière : la lumière met donc 4 années à nous parvenir de cette étoile... La séparation angulaire entre le Soleil et Jupiter, vue de cette distance, est de 4 secondes d'arc, ce qui serait aisément mesurable ; mais ce qui est quasiment impossible, c'est de séparer la lumière de la planète, noyée dans celle du Soleil : dans le domaine visible, celui-ci est un milliard de fois plus brillant que Jupiter ! Comme la température de la planète (130 K dans le cas de Jupiter) est bien inférieure à celle du Soleil (5600 K), le flux de Jupiter augmente dans l'infrarouge et le contraste entre les flux solaire et planétaire devient moins défavorable. Or même à une longueur d'onde de 10 microns, le Soleil est encore un million de fois plus brillant de la planète. Aujourd'hui, des techniques ont été développées pour tenter d'extraire des signaux très faibles à proximité de sources brillantes ; nous y reviendrons (voir chapitre 6, paragraphe 5.1). Mais au XIX^e et au XX^e siècles, de telles observations étaient impossibles. Les astronomes de l'époque se sont donc tournés vers des méthodes de détection indirecte.

1.1 Les premières recherches par astrométrie

Si une étoile est entourée d'une planète suffisamment massive, son mouvement en est affecté : le système étoile-planète tourne autour de son centre de gravité avec une période qui est celle de la révolution de la planète autour de l'étoile. Plus la planète est massive, plus le mouvement de l'étoile est affecté ; plus la planète est proche, plus la période de révolution est courte. La méthode demande une excellente précision de mesure et une grande patience : elle consiste à repérer très précisément la position de l'étoile susceptible d'avoir une planète par rapport à d'autres étoiles du champ supposées fixes. La présence de la planète se traduit alors par un petit mouvement elliptique de l'étoile sur la sphère céleste ; le temps mis par l'étoile pour décrire l'ellipse est la période de révolution de la planète autour de son étoile.

Cette méthode, dite d'astrométrie, avait déjà permis à l'astronome Friedrich Bessel, au XIX^e siècle, de détecter la présence d'un compagnon stellaire de faible masse autour de l'étoile Sirius. Forts de ce premier succès, certains astronomes décidèrent d'appliquer la même technique à la recherche d'exoplanètes. Le plus connu fut Piet Van de Kamp qui annonça en 1944 la découverte de la première exoplanète,

¹ Le parsec est la distance à laquelle une unité astronomique est vue sous un angle de 1 seconde d'arc. Il est donc égal à environ 200 000 UA.

située autour de l'étoile de Barnard. Il s'avéra par la suite que l'exoplanète n'existait pas : les mouvements de l'étoile, interprétés à tort par la présence d'une planète, étaient dus à un problème instrumental lié au télescope utilisé pour les mesures. En 1974, P. Van de Kamp annonça une nouvelle détection, cette fois autour de l'étoile Epsilon Eridani, mais là encore cette détection ne fut pas confirmée. Avec le recul, il apparaît que les moyens instrumentaux de l'époque ne fournissaient pas la précision astrométrique suffisante compte tenu de la difficulté de l'enjeu.

1.2 Autour des pulsars, des planètes singulières

Nous sommes au début des années 1990. Si les astronomes ont pour la plupart renoncé à rechercher les exoplanètes par astrométrie, la question reste d'une brûlante actualité. Une autre méthode, complètement différente, va voir le jour : il s'agit de l'étude des perturbations autour du signal radio périodique émis par les pulsars. De quoi s'agit-il ? Les pulsars (*pulsating stars*) sont des étoiles à neutrons, très petites et extrêmement denses ; résidus de l'explosion d'une supernova, elles sont parvenues au dernier stade de leur existence. Dotées d'un champ magnétique très intense, elles ont été détectées en 1967 grâce au signal radio, d'une périodicité extrêmement stable qu'elles émettent.

Dès les années 1970, les radioastronomes se sont intéressés aux éventuelles perturbations de ce signal périodique, possibles signatures de la présence d'un compagnon. Plusieurs détections tentatives furent annoncées sans qu'aucune ne puisse être confirmée. Enfin, en 1992, l'astronome Alexander Wolszczan annonça la découverte de deux planètes autour du pulsar PSR 1257+12, dont la période de rotation est très courte (1,3 millisecondes). Une troisième planète fut détectée ultérieurement. Deux des planètes, sur des orbites proches de celle de Mercure, ont des masses voisines de celle de la Terre tandis que la troisième, plus proche, est cent fois moins massive (Fig. 6.1).

1992 est donc l'année de la découverte du premier système planétaire : la découverte fait grand bruit. Les questions se multiplient : quel est cet étrange objet doté d'un cortège planétaire ? Il ne ressemble en rien au Soleil. Les pulsars dits « milliseconde » sont des astres très âgés, à la différence des premiers pulsars découverts, de période voisine de la seconde, qui sont beaucoup plus jeunes. Les pulsars « milliseconde » pourraient constituer le dernier stade de l'évolution d'un système formé d'une étoile normale et d'une étoile à neutrons. L'étoile, se dilatant en vieillissant, transmettrait peu à peu sa matière à l'étoile à neutrons dont la vitesse de rotation s'accélérerait. L'accrétion de matière pourrait se faire par l'effondrement d'un disque au sein duquel se formeraient les planètes. À quoi peuvent ressembler de tels objets ? Il est bien difficile de les décrire, tout au plus pouvons nous avancer qu'elles ne

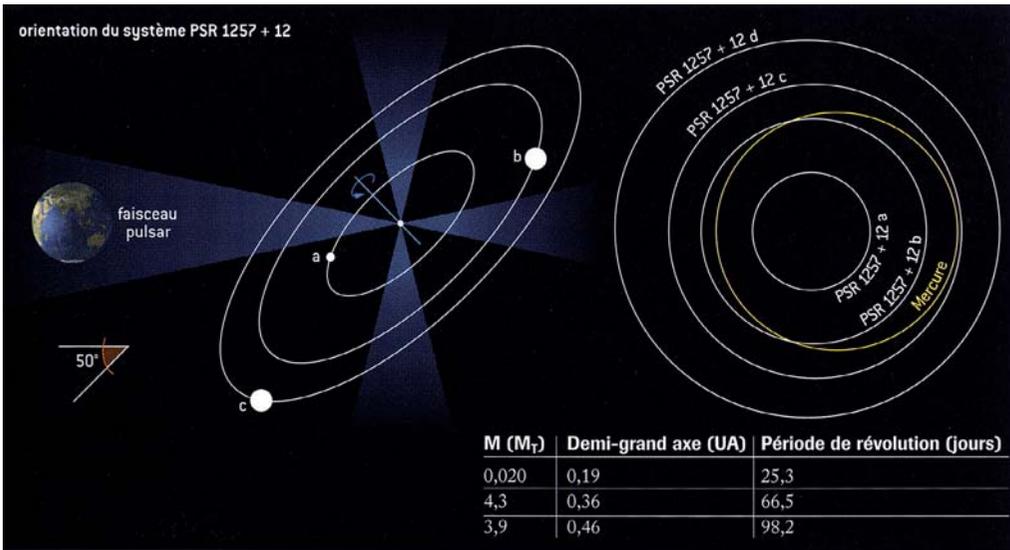


Figure 6.1. Le système planétaire entourant le pulsar PSR 1257 +12 (©F. Casoli et T. Encrenaz, Planètes extrasolaires, Belin, 2005).

ressemblent en rien aux planètes du système solaire, et qu'en termes d'habitabilité, ce ne sont pas les candidats que nous recherchons...

1.3 L'avènement de la vélocimétrie : premières découvertes et premières surprises

En dépit de ce premier succès, les astronomes restent sur leur faim. Trouverons-nous un jour des exoplanètes susceptibles de ressembler aux planètes que nous connaissons ? Pour cela il faut d'abord faire porter la recherche sur les étoiles de type solaire. Il faut aussi développer une nouvelle technique, plus sensible que l'astrométrie. Celle-ci va s'avérer mûre au début des années 1990 : c'est la vélocimétrie.

Comme l'astrométrie, la vélocimétrie a pour objet la détection du mouvement de l'étoile centrale par rapport au centre de gravité du système étoile-planète. Mais au lieu de mesurer ce mouvement sur la sphère céleste, les astronomes déterminent la vitesse de l'étoile par rapport à ce centre de gravité. Pour cela ils utilisent l'effet Doppler, dont le principe est le suivant : si un astre se rapproche de l'observateur, la fréquence du rayonnement qu'il émet est décalé vers les courtes longueurs d'onde, c'est-à-dire les hautes fréquences ; s'il s'éloigne, le rayonnement est décalé vers les grandes longueurs d'onde ou les basses fréquences : c'est le fameux décalage vers le rouge observé sur les galaxies lointaines qui démontre l'expansion de l'Univers (Fig. 6.2). Appliquée à notre système étoile-planète, la méthode consiste à mesurer dans le visible, avec une très haute résolution spectrale, l'effet Doppler d'un certain

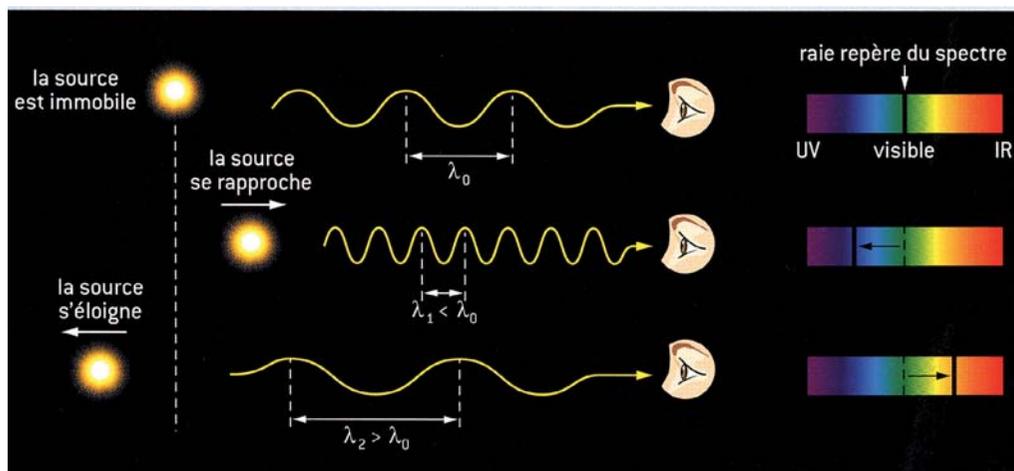


Figure 6.2. Le principe de l'effet Doppler (©F. Casoli et T. Encrenaz, Planètes extrasolaires, Belin, 2005).

nombre de signatures spectrales de l'étoile (on utilise des raies bien identifiées de son spectre, dont on mesure très précisément la position). L'observation est répétée en fonction du temps dans l'espoir de voir apparaître une courbe périodique (Fig. 6.3).

Remarquons que l'astrométrie et la vélocimétrie sont des méthodes complémentaires pour mesurer le mouvement de l'étoile par rapport à son centre de gravité. L'astrométrie mesure les mouvements sur la sphère céleste, tandis que la vélocimétrie mesure les mouvements dans la direction perpendiculaire, selon la ligne de visée de l'observateur. Si un système planétaire a son axe de révolution aligné avec l'axe de visée, la vélocimétrie ne détecte pas de mouvement, en revanche l'astrométrie voit un déplacement maximum. Si l'axe de révolution est situé sur la sphère céleste, perpendiculairement à l'axe de visée, la vélocimétrie enregistre un écart maximum des vitesses, tandis que l'astrométrie ne mesure qu'un petit mouvement de l'étoile le long d'un segment, et non une ellipse. Notons au passage une limitation de la méthode de vélocimétrie : comme on ne mesure que la composante de la vitesse alignée selon l'axe de visée, on ne connaît pas l'inclinaison sous laquelle le système planétaire est vu par l'observateur. La méthode ne permet donc pas de déterminer exactement la masse de l'exoplanète, mais seulement une limite inférieure de celle-ci.

Comme dans le cas de l'astrométrie, le programme de vélocimétrie nécessite de la patience, puisque les observations doivent couvrir la totalité d'une période de révolution de la planète recherchée, ou tout au moins une fraction significative de celle-ci. Rechercher l'équivalent d'un Jupiter n'est donc pas une tâche facile : rappelons que sa période de révolution autour du Soleil est de près de 12 ans ! Rechercher l'équivalent d'une Terre ne demanderait qu'une année d'observation,

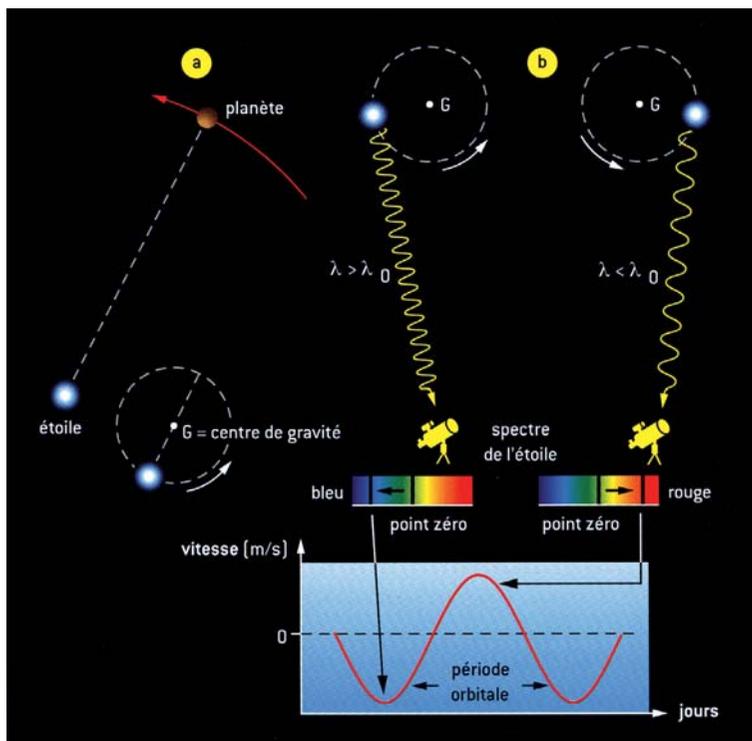


Figure 6.3. Le principe de la vélocimétrie (©F. Casoli et T. Encrenaz, Planètes extrasolaires, Belin, 2005).

mais en revanche la modulation de vitesse attendue est bien plus faible, puisque la planète est moins massive. À titre d'exemple, la présence de Jupiter induit sur le Soleil une modulation de vitesse de 12,5 m/s, tandis que celle induite par la présence de la Terre est d'à peine 10 cm/s. . .

Au début des années 1990, les spectrographies à haute résolution, associées aux télescopes de diamètre supérieur au mètre, permettent de mesurer, sur des étoiles proches du Soleil, des vitesses de l'ordre de quelques m/s. La détection d'un « exo-Jupiter », s'il existe, est donc en principe faisable. Mais faudra-t-il attendre dix ans que la planète ait fait le tour de son étoile ?

La réponse est non, fort heureusement. Ici intervient un événement inattendu : il existe de nombreuses exoplanètes géantes situées à proximité immédiate de leur étoile : leur période de révolution n'est que de quelques jours ! De tels objets sont bien plus faciles à détecter que les « exo-Jupiter » puisque leur détection peut être suspectée en l'espace de quelques semaines, et confirmée en quelques mois. C'est ainsi qu'en 1995 tombe la nouvelle de la première découverte d'une exoplanète autour d'une étoile de type solaire (Fig. 6.4). Le programme d'observation a été réalisé à

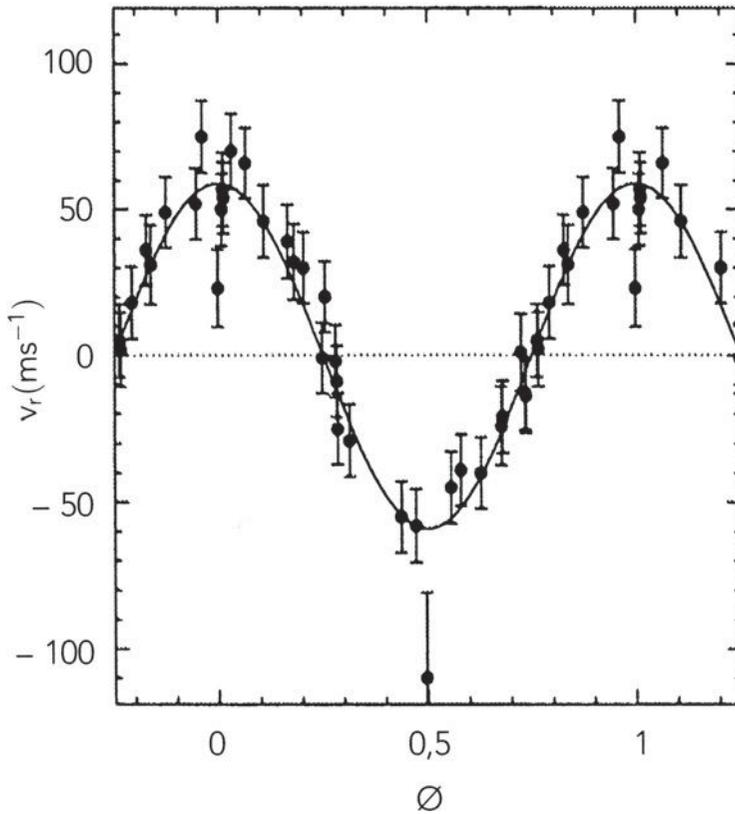


Figure 6.4. La courbe de vélocimétrie de 51 Peg (d'après M. Mayor et D. Queloz, Nature, 1995).

l'Observatoire de Haute Provence par deux astronomes de l'Observatoire de Genève, Michel Mayor et Didier Quéloz. L'objet découvert autour de l'étoile 51 Pegase (appelé selon l'usage 51 Peg b) a une masse égale à au moins la moitié de celle de Jupiter et tourne autour de son étoile en 4 jours : sa distance à l'étoile est donc de 0,05 UA ! La découverte a un retentissement considérable dans la communauté astronomique et au-delà. Dans les semaines qui suivent, deux autres exoplanètes sont découvertes par l'équipe de Geoffrey Marcy aux États-Unis : situées autour des étoiles 47 Uma et 70 Vir, elles ont des masses au moins égales à 2,6 et 7 fois celle de Jupiter, avec des distances moyennes à leur étoile de 0,5 et 2 UA respectivement. Dans les mois qui viennent, les découvertes vont se multiplier : dans la plupart des cas, il s'agit d'exoplanètes géantes situées à proximité immédiate de leur étoile.

L'extrême intérêt soulevé par ces découvertes s'explique par deux raisons. La première déborde largement le cadre de l'astronomie : c'est la réponse enfin apportée à la question que se pose l'humanité depuis des siècles : il existe bien des

planètes autour d'étoiles de type solaire ; les implications potentielles concernant la recherche d'une vie extraterrestre sont immenses. Mais au-delà de cette découverte se pose immédiatement la question de la nature de ces exoplanètes. On attendait, comme dans le cas du système solaire, des planètes géantes à grande distance de leur étoile, formées à des températures suffisamment basses pour permettre la constitution d'un noyau de glace. Or les exoplanètes géantes sont très proches de leur étoile. Imaginerait-on Jupiter tournant en quatre jours autour du Soleil ? Sa distance au Soleil serait de 10 rayons solaires, et sa distance angulaire maximum serait de 5 degrés ; son diamètre angulaire serait de plus de 3 minutes d'arc, dix fois moins que celui du Soleil.

Dès les premières découvertes, une évidence s'impose donc : les nouveaux systèmes planétaires n'ont rien à voir avec le nôtre. Il reste à comprendre pourquoi, et à mieux caractériser ces objets exotiques ; c'est tout le défi de la recherche en cours et à venir.



Figure 6.5. L'observatoire de La Silla au Chili. C'est sur le télescope de 3,60 m qu'est installé le spectromètre HARPS, l'instrument de vélocimétrie le plus précis à ce jour (©ESO).

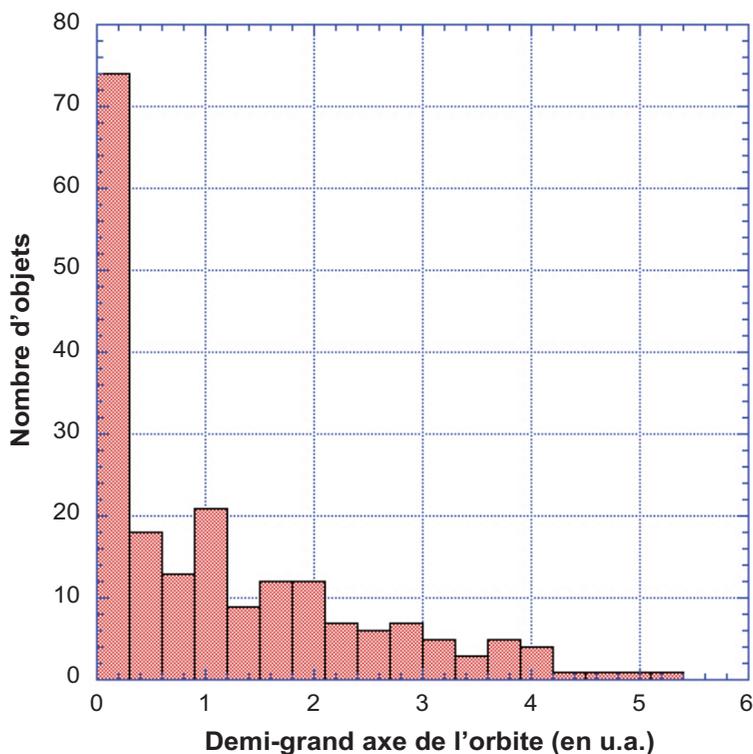


Figure 6.6.

1.4 Une nouvelle avancée, les transits planétaires

Pendant les quelques années qui suivent la détection de 51 Peg b, la vélocimétrie est la seule méthode permettant la détection des exoplanètes. Une autre technique, indirecte elle aussi, va s'imposer à partir de 1999 : il s'agit de l'observation d'une exoplanète lorsque celle-ci passe devant son étoile ; c'est ce que l'on appelle un transit. Elle nécessite une configuration géométrique particulière : il faut que la Terre soit située dans le plan de l'orbite planétaire que l'on observe alors par la tranche. Bien sûr, la planète est trop petite pour être elle-même détectée ; mais sa présence devant le disque stellaire se traduit par une très légère baisse du flux de celui-ci (Fig. 6.7). Ainsi, observé depuis l'extérieur du système solaire, le passage de Jupiter devant le Soleil introduit une baisse de luminosité de 1 %, puisque le diamètre de Jupiter est environ le dixième de celui du Soleil. Dans le cas de la Terre, encore dix fois plus petite, la baisse de luminosité n'est que de 0,01 %.

Encore faut-il que la planète passe devant son étoile... Quelle est la probabilité d'un tel événement ? Elle augmente avec la dimension angulaire de l'étoile, et est

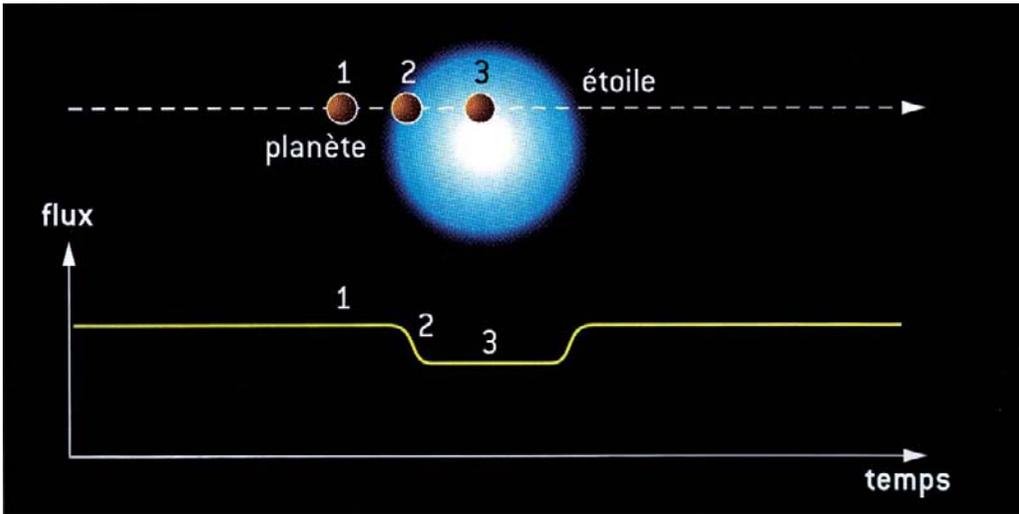


Figure 6.7. Schéma d'un transit planétaire (©F. Casoli et T. Encrenaz, *ibid*).

donc d'autant plus élevée que l'étoile a un gros diamètre ou qu'elle est proche du Soleil. Le transit est aussi d'autant plus fréquent que la planète est proche de son étoile, ce qui est justement le cas d'un grand nombre d'exoplanètes récemment découvertes. Ainsi la probabilité d'observer une exoplanète de type 51 Peg b (on les appelle les « Pégasides ») est de l'ordre de 10 % ; en revanche, celle d'observer une planète analogue à la Terre serait seulement de 0,5 %. Quant à la durée du transit, elle est de l'ordre de la quinzaine d'heures pour une exoplanète située à 1 UA de son étoile, et environ deux fois plus si celle-ci est située à 5 UA.

La méthode des transits consiste à mesurer de manière continue, avec une grande stabilité, le rayonnement des étoiles d'un champ stellaire donné, pendant une longue durée, de quelques semaines au moins. En principe, la détection des exoplanètes géantes par transit est possible depuis la Terre, car la stabilité des mesures permet de détecter une baisse de signal du pourcent. En revanche, la détection des exoterres n'est pas possible depuis le sol, et nécessite des observations dans l'espace ; nous y reviendrons. Dans le cas des exoplanètes géantes, les mesures depuis la Terre souffrent tout de même de la difficulté d'observer en continu un champ stellaire donné, à moins de viser dans la direction de l'un des pôles depuis les hautes latitudes.

En complément à la technique de vélocimétrie, la mesure des transits apporte un avantage certain : elle permet la mesure du diamètre de l'exoplanète. En utilisant la mesure des vitesses radiales, on accède alors à la masse de l'exoplanète (et non une limite inférieure de celle-ci) et donc sa densité. On peut ainsi déterminer si l'objet est une exoplanète gazeuse, glacée ou rocheuse.

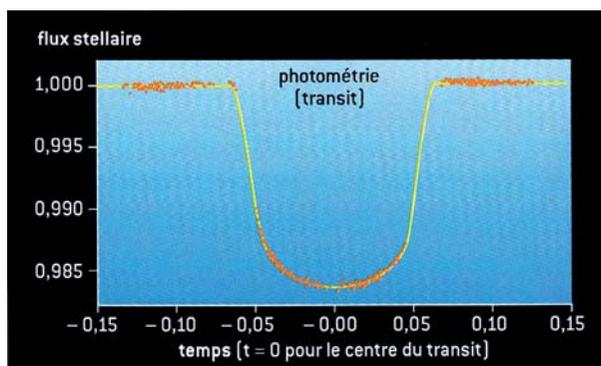


Figure 6.8. Courbe de lumière d'Osiris (HD209458b), observée avec le HST (d'après Brown *et al.*, 2001).

En 1999, l'équipe de David Charbonneau annonce la détection de la première exoplanète par transit ; l'observation est ensuite confirmée par des observations faites par le télescope spatial Hubble. L'exoplanète porte le nom peu poétique de HD209458b mais sera plus tard rebaptisée Osiris. Il s'agit d'une Pégaside, dont la masse équivaut aux deux tiers de celle de Jupiter, et de très faible densité ($0,3 \text{ g/cm}^3$). Suite à ce succès, de nombreuses campagnes d'observation depuis le sol se sont mises en place. Elles ont conduit à la détection de plus d'une soixantaine d'exoplanètes par transit.

Comment rechercher les exoterras ? Nous avons vu que la précision photométrique requise est au-delà des possibilités des observations depuis le sol. C'est pourquoi plusieurs projets de missions spatiales ont vu le jour. Le premier, initié par la France, est la mission *CoRoT*, lancée en décembre 2006 et en orbite terrestre pour une durée de six ans. Des caméras CCD enregistrent des champs stellaires, sans interruption et avec une très grande stabilité, pendant une durée allant de quelques semaines à quelques mois. Près d'une dizaine d'exoplanètes ont été ainsi détectées, et des dizaines de candidats potentiels restent à confirmer par vélocimétrie. Un satellite américain doté d'une plus grande sensibilité, *Kepler*, a été lancé en 2009 avec lui aussi pour objectif la détection des transits planétaires. Compte tenu de ses performances, on peut espérer la détection par *Kepler* d'une centaine de « super-Terras » (de masse supérieure à dix masses terrestres), et peut-être une dizaine d'exo-Terras. La mission *Plato*, actuellement à l'étude à l'ESA, pourrait constituer l'étape suivante, en utilisant un champ de vue sensiblement plus grand que celui de *Kepler*.



Figure 6.9. La mission *CoRoT* (© CNES).

1.5 D'autres techniques de détection

En parallèle à la vélocimétrie et à l'observation des transits, une autre méthode originale a également conduit à la détection de plusieurs exoplanètes. Elle est basée sur un effet de la relativité générale, dit de « lentille gravitationnelle » : quand une étoile passe devant un astre lointain, les rayons lumineux en provenance de celui-ci sont incurvés par la masse de l'étoile et convergent vers l'observateur pour produire un effet de lentille. Cet effet, mis en évidence observationnellement depuis près d'un siècle, a été en particulier utilisé pour tenter de détecter la « matière noire » manquante de notre Galaxie par la recherche de naines brunes. La recherche ne s'est pas avérée fructueuse ; en revanche, le même effet, rebaptisé « microlentille gravitationnelle » peut être utilisé pour rechercher la présence d'une exoplanète autour de l'étoile servant de lentille devant un objet lointain. Dans ce cas, la courbe d'amplification du flux de l'objet lointain présente sur son flanc un pic caractéristique correspondant au passage de l'exoplanète devant cet objet (Fig. 6.11). Plusieurs

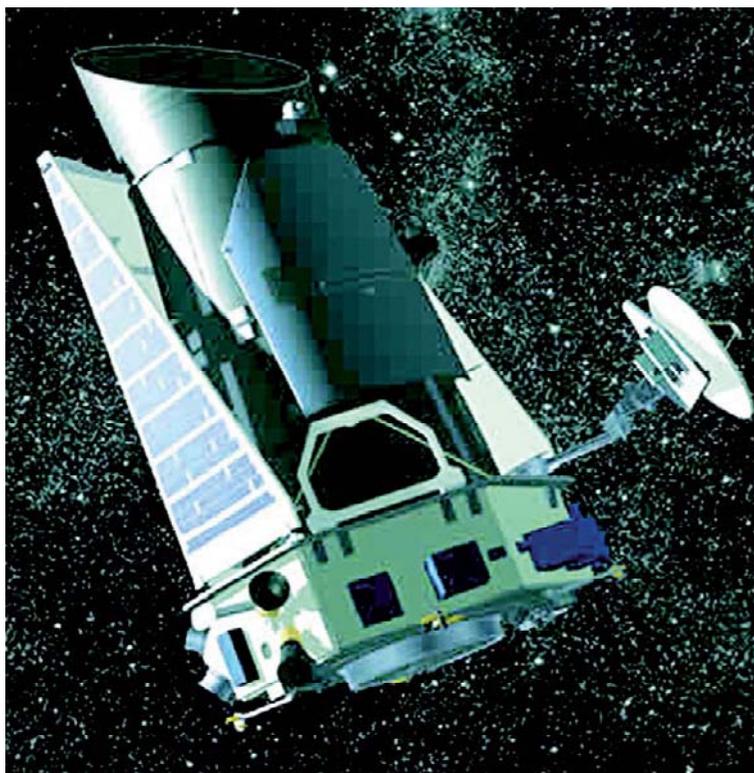


Figure 6.10. La mission *Kepler* (©NASA).

campagnes internationales se sont mobilisées autour de la détection de microlentilles et une dizaine d'exoplanètes ont ainsi été détectées. L'avantage de cette méthode est sa très grande sensibilité : on peut ainsi identifier des exoplanètes de quelques masses terrestres seulement.

Pour résumer ce tour d'horizon des méthodes indirectes de détection des exoplanètes, essayons de dégager leurs mérites respectifs :

- L'astrométrie est particulièrement adaptée à la détection d'objets massifs éloignés de leur étoile ; de grands progrès dans ce domaine sont attendus avec la mission spatiale astrométrique *Gaia* qui sera lancée à l'horizon 2013 par l'Agence spatiale européenne.
- La vélocimétrie est l'outil privilégié de détection des objets massifs proches de leur étoile, comme l'illustrent les résultats spectaculaires obtenus au cours des quinze dernières années. L'amélioration apportée aux spectrographes à haute résolution a permis de descendre la limite de détectabilité en masse des

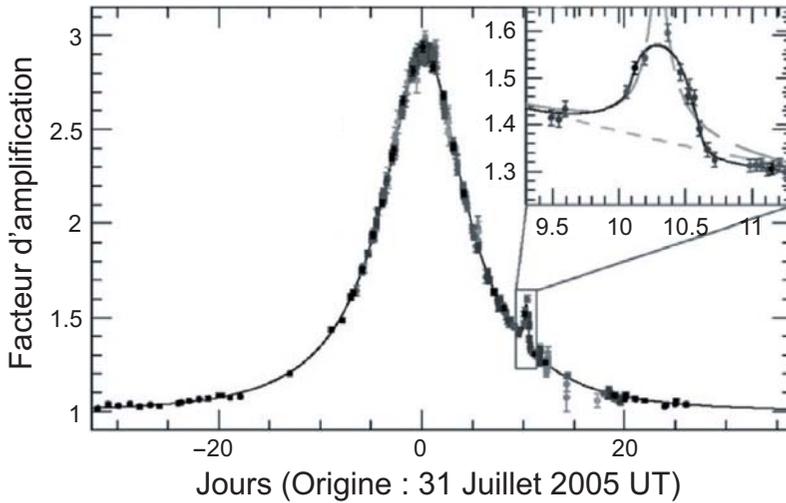


Figure 6.11. Courbe de lumière d'une étoile dont l'exoplanète est détectée par microlentille.

exoplanètes à quelques masses terrestres seulement, et les performances ne cessent de s'améliorer.

- Le chronométrage des pulsars présente une très grande sensibilité quant à la masse des exoplanètes détectées. La méthode reste cependant limitée à une classe très particulière (les pulsars dotés de planètes) dont les objets, au vu des résultats obtenus, semblent peu nombreux ; en 2009, le nombre total de planètes détectées autour de pulsars est inférieur à la dizaine.
- L'observation des transits planétaires présente une sensibilité accrue pour les objets volumineux proches de leur étoile ; elle est limitée à une configuration géométrique particulière. Combinée à la vélocimétrie, elle permet la détermination des paramètres physiques de l'exoplanète (masse, rayon, densité).
- Enfin la technique de microlentille gravitationnelle, très sensible en ce qui concerne la masse des objets détectés, est particulièrement adaptée aux objets peu volumineux éloignés de plus d'une UA de leur étoile. Elle permet la détection d'exoplanètes autour d'étoiles éloignées, situées dans le halo de notre Galaxie. Les paramètres physiques de l'exoplanète sont déterminés à partir de l'ajustement de modèles. L'inconvénient est que l'événement n'est pas répétitif ni prédictible, puisqu'il dépend du passage fortuit de l'étoile devant un astre lointain.

D'autres méthodes sont actuellement à l'étude pour détecter directement les exoplanètes : il s'agit de l'imagerie directe, la coronographie, l'interférométrie, et la

recherche du signal radio des exoplanètes. Elles sont présentées plus en détail ci-dessous (voir chapitre 6, paragraphe 5).

2 Quinze ans plus tard, état des lieux

Nous voici plus de quinze ans après la découverte des toutes premières exoplanètes. Aujourd'hui (début 2010), nous connaissons près de 450 exoplanètes, dont la très grande majorité ont été découvertes par vélocimétrie. Parallèlement, les détections de super-Terres ne cessent d'augmenter ; on en compte actuellement plus d'une soixantaine. Il est maintenant possible de déduire des propriétés statistiques pour ces objets (leur masse, leur distance à l'étoile, leur densité dans le cas des exoplanètes à transit), ainsi que pour leurs étoiles hôtes et pour les systèmes planétaires eux-mêmes. Quelle est la proportion d'étoiles dotées de planètes ? Cette proportion dépend-elle de leur type spectral, de leur masse, de leur teneur en éléments lourds ? Quelle est la probabilité pour une étoile d'avoir un système planétaire multiple ? Ce sont ces questions que nous allons aborder ci-dessous, en gardant en mémoire les biais observationnels liés à cette recherche : la vélocimétrie privilégie la découverte des exoplanètes massives et proches de leur étoile.

2.1 Des exoplanètes géantes proches de leur étoile !

Les premières découvertes l'ont déjà montré : la proportion d'exoplanètes géantes détectées à proximité de leur étoile est étonnamment élevée. Près de la moitié de toutes les exoplanètes détectées sont situées à moins de 0,4 UA de leur étoile et parmi celles-ci, environ le tiers gravitent à 0,05 UA, ce qui correspond à une période de révolution de 4 jours ; c'est en particulier le cas des Pégasides, aussi appelés « Jupiter chauds ». Nous reviendrons plus loin sur les importantes implications qu'a l'existence de cette nouvelle classe d'objets, inconnus dans le système solaire, sur les modèles de formation stellaire et planétaire (voir chapitre 6, paragraphe 3.3). La proximité des Pégasides à leur étoile, qui implique une rotation synchrone avec celle-ci (lui présentant toujours le même côté) est aussi lourde de conséquences pour la planète elle-même, car elle implique de forts contrastes entre les côtés jour et nuit.

2.2 Une majorité d'exoJupiters ?

La méthode de vélocimétrie permet la détection des exoplanètes mais aussi, plus généralement, de l'ensemble des compagnons de faible masse orbitant autour de leur étoile. Nous avons déjà mentionné (voir Introduction) que ceux-ci peuvent être classés en fonction de leur masse. Si celle-ci est inférieure à 0,01 masses solaires (ou à 13 masses de Jupiter) il s'agit de planètes ; leur énergie interne est insuffisante pour

généraliser le premier cycle des réactions thermonucléaires conduisant à la nucléosynthèse stellaire. Si la masse de l'objet est comprise entre 0,01 et 0,08 masse solaire (soit entre 13 et 80 masses de Jupiter) on parle de « naines brunes » : la température centrale est suffisante pour initier le premier cycle de destruction du deutérium, mais pas le suivant qui transformerait l'hydrogène en hélium. Au delà de 0,08 masse solaire, les objets sont bien des étoiles, dont le cycle complet peut se mettre en place (d'autant plus rapidement que l'énergie initiale est importante). Les étoiles se classifient en divers types (O, B, A, F, G, K, M) en fonction décroissante de leur masse et de leur température ; leur durée de vie est d'autant plus courte que leur température est élevée. Notre Soleil, de type G, est au beau milieu de la gamme ; sa durée de vie est d'environ dix milliards d'années.

Si l'on trace la distribution en masse des compagnons stellaires détectés par vélocimétrie (voir Fig. 6.12), on voit immédiatement apparaître une distribution bimodale, avec un premier pic de masse compris entre 0,001 et 0,01 masse solaire (il s'agit bien des exoplanètes) et l'autre au-delà de 0,1 masse solaire (ce sont les étoiles classiques). L'absence d'objets entre les deux pics, interprétée comme le « désert des naines brunes », met en évidence le très faible nombre d'objets appartenant à cette catégorie.

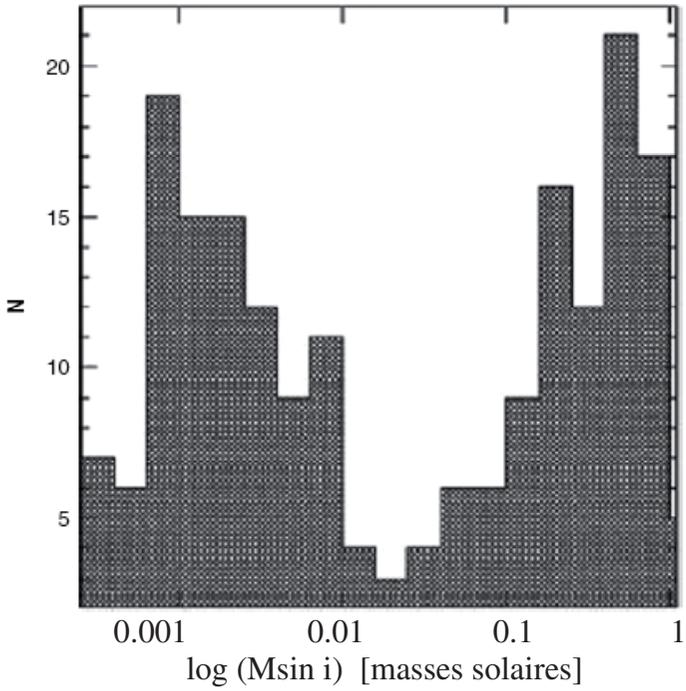
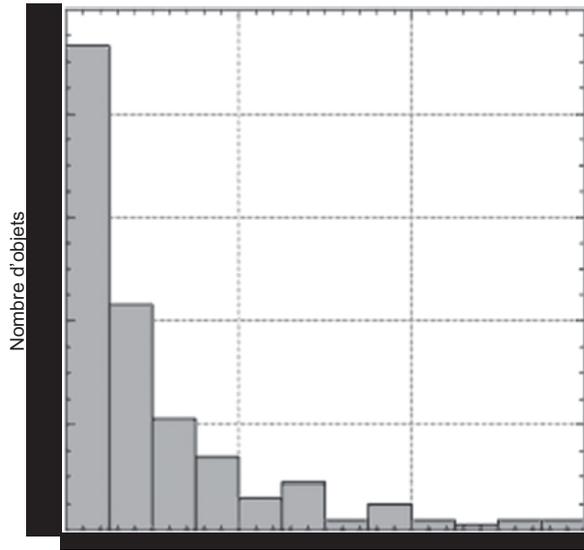
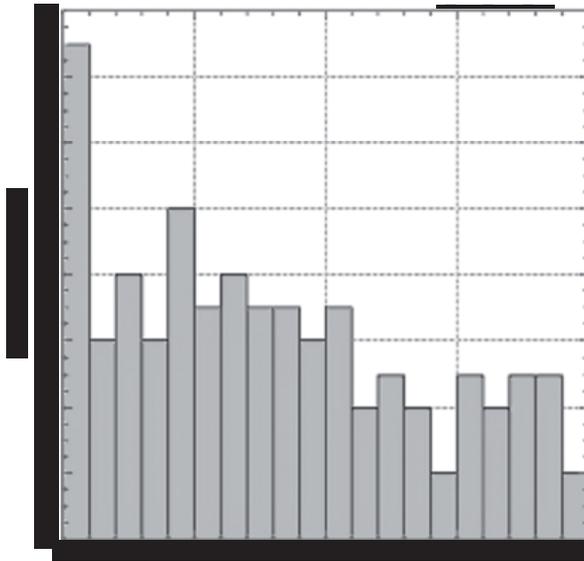


Figure 6.12. Distribution en masse des compagnons stellaires et sub-stellaires (d'après Santos *et al.*, 2002).



(a)



(b)

Figure 6.13. Distribution des exoplanètes en fonction de leur masse : (a) $M < 15 M_J$; (b) ($M < 2 M_J$) (d'après M. Ollivier *et al.*, Planetary Systems, Springer, 2009).

Revenons sur l'histogramme en masse des exoplanètes (Fig. 6.13). Alors que la vélocimétrie favorise à priori la détection des objets les plus massifs, on observe que les plus nombreux sont de la masse de Jupiter : il existe très peu d'objets ayant plus

de deux fois la masse de Jupiter. Notons que pour arriver à cette conclusion, nous devons faire une hypothèse sur l'inclinaison moyenne des systèmes que nous observons ; l'hypothèse est que cette inclinaison prend toutes les valeurs possibles sans qu'aucun angle ne soit privilégié. Entre 0,1 et 2 masses de Jupiter, la distribution est uniformément répartie. Quant au nombre d'objets de masse inférieure au dixième de la masse de Jupiter, leur nombre est de plusieurs dizaines et augmente rapidement, avec les progrès des techniques de vélocimétrie : il s'agit des « exoNeptune », dont la proportion relative par rapport aux exoJupiter pourrait augmenter encore dans le futur.

Comment la masse des exoplanètes se distribue-t-elle en fonction de la distance à leur étoile ? Deux conclusions apparaissent : tout d'abord, il y a peu d'objets supermassifs à proximité immédiate de leur étoile (en d'autres termes, les « Jupiter chauds » ne sont pas des « super-Jupiter » ; en second lieu, il y a un grand nombre d'exoplanètes de masse comparable à celle de Jupiter entre 0,5 et 5 UA. Tous ces faits observationnels devront être pris en compte dans la construction de scénarios de formation des systèmes planétaires.

2.3 Des exoplanètes très excentriques

Notre système solaire nous a habitués à des orbites planétaires quasi-circulaires ; ce n'est plus du tout le cas au royaume des exoplanètes (Fig. 6.14), à l'exception des objets très proches de leur étoile, les « Jupiter chauds », dont la période est inférieure à 6 jours. L'orbite circulaire de ceux-ci peut être le résultat des effets de marée très forts dûs au champ de gravité de leur étoile. Une autre conséquence est très probablement la rotation synchrone de ces objets que nous avons déjà évoquée ci-dessus.

Pour les objets de période supérieure à quelques jours, aucune corrélation n'apparaît entre l'excentricité et la distance à l'étoile. Certaines excentricités ont des valeurs très élevées, pouvant dépasser 0,90. Une explication possible est à chercher dans les interactions entre l'exoplanète et le disque protoplanétaire qui deviennent prédominantes par rapports aux effets de marée ; nous y reviendrons (voir chapitre 6, paragraphe 3.3). Enfin, notons que l'on ne voit pas apparaître de corrélation entre l'excentricité des exoplanètes et leur masse, ce qui constitue également une contrainte pour les modèles de formation.

2.4 De nombreux système multiples

Plus d'une vingtaine de systèmes planétaires ont été détectés, avec un nombre de composantes pouvant aller jusqu'à 4 voire 5. Actuellement, environ 12 % des systèmes planétaires observés ont au moins deux planètes. Compte tenu de la difficulté

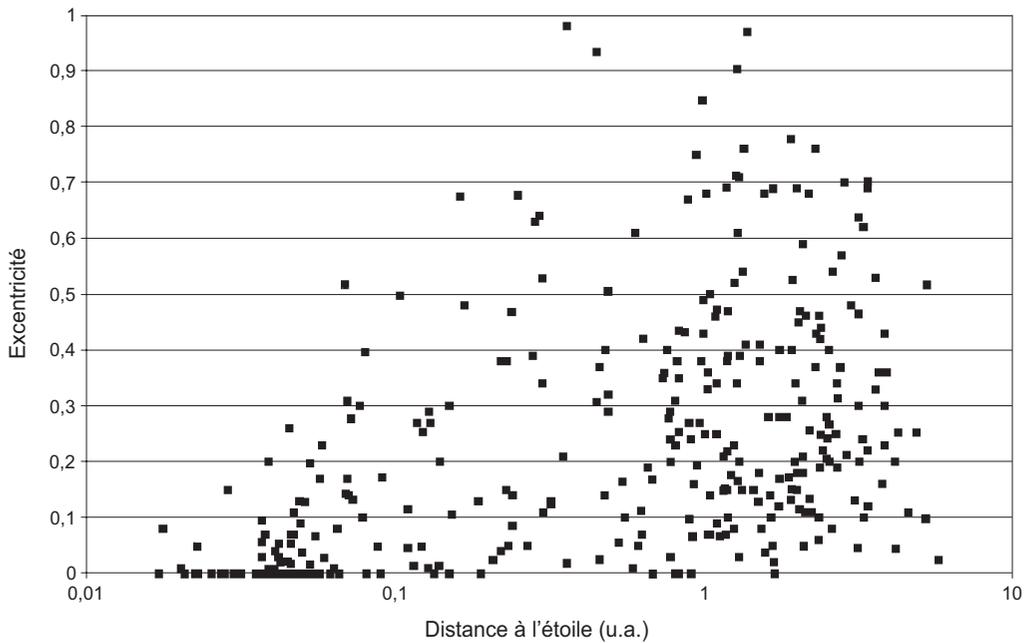


Figure 6.14. Distribution de l'excentricité des exoplanètes en fonction de leur distance à l'étoile (©M. Ollivier).

observationnelle à mettre en évidence de tels systèmes, il est possible que les systèmes planétaires multiples soient au moins aussi courants que les systèmes simples, voire plus. Le système solaire, à cet égard, n'est donc pas une exception.

Les caractéristiques orbitales des composantes des systèmes multiples peuvent, comme les autres exoplanètes, avoir de fortes excentricités. Plusieurs systèmes présentent des résonances : les périodes de révolution des planètes du système sont dans un rapport de nombres entiers. Cette configuration stable pourrait être le résultat d'une migration : nous avons vu comment, au début de l'histoire du système solaire, une migration modérée des planètes géantes avait amené le système Jupiter-Saturne dans une résonance 2 : 1, ce qui avait eu d'importantes implications pour la dynamique de l'ensemble des petits corps du système solaire (voir chapitre 5, paragraphe 1.3).

Dans les systèmes multiples, les résonances peuvent entraîner des effets dynamiques très importants. Deux planètes placées sur des orbites résonantes voient leur interactions gravitationnelles s'amplifier, ce qui peut se traduire à terme par l'éjection de l'un des deux objets. Les systèmes multiples à résonance présentent un intérêt particulier pour les spécialistes de dynamique gravitationnelle, qui peuvent ainsi étudier leur évolution orbitale.

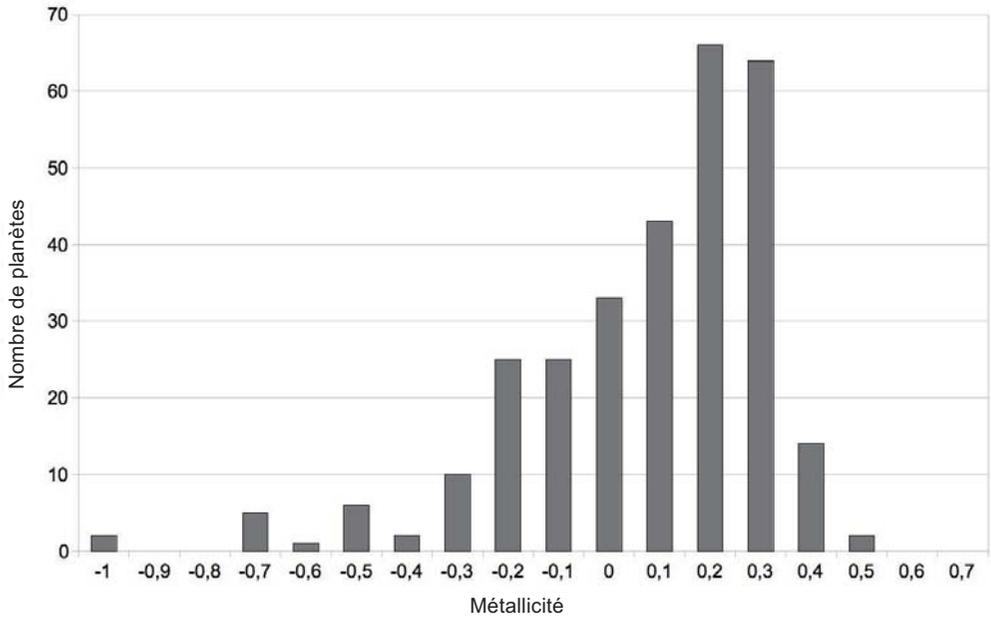
2.5 Le rôle des éléments lourds

Si la recherche des exoplanètes s'est d'abord concentrée sur les étoiles de type solaire, elle s'est rapidement étendue à une grande variété de types spectraux. Nous connaissons aujourd'hui des systèmes planétaires autour d'étoiles de types F, G, K et M, mais aussi autour d'objets jeunes, d'étoiles multiples, sans oublier les pulsars. On voit déjà que la capacité pour une étoile de se former en compagnie d'un système planétaire n'est pas une spécificité des étoiles de type solaire.

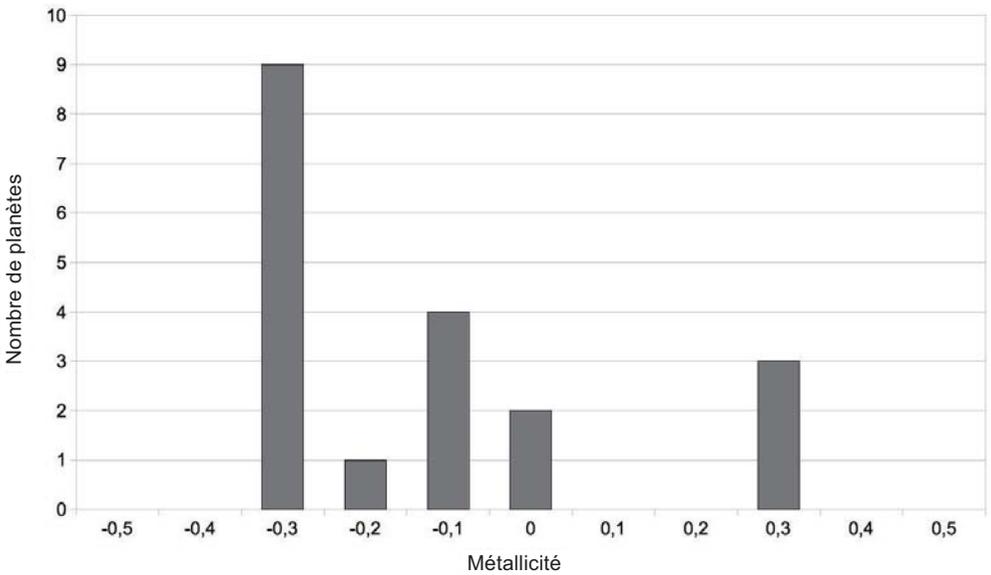
Il est possible d'étudier la probabilité pour une étoile d'avoir une exoplanète en fonction de sa fraction relative d'éléments lourds, ce que l'on quantifie par un paramètre appelé la métallicité. De quoi s'agit-il ? On sait que selon les abondances cosmiques, l'hydrogène est l'élément le plus abondant en masse ; sa fraction de masse appelée X est environ 0,75. Vient ensuite l'hélium avec une fraction de masse Y d'environ 0,23. Tous les autres éléments, appelés « éléments lourds » constituent les 2 % restant : c'est ce que l'on appelle le taux de métallicité Z . Nous avons vu que les éléments lourds sont produits dans les étoiles puis réinjectés dans le milieu interstellaire à la fin de leur vie, suite à l'explosion des novae ou des supernovae ; les éléments les plus lourds sont synthétisés lors des explosions de supernovae. La métallicité varie donc d'une étoile à l'autre. Les abondances cosmiques sont définies à partir des abondances solaires, les seules que l'on puisse mesurer avec précision. Pour les autres étoiles, on mesure leur métallicité à partir des signatures des atomes métalliques (le fer par exemple) présentes dans leur spectre visible ou ultraviolet.

Que nous apprend l'étude du nombre d'exoplanètes entourant les étoiles de différents taux de métallicité ? que la probabilité pour celles-ci d'avoir une exoplanète géante est d'autant plus élevée qu'elles sont riches en métaux (Fig. 6.15.a). Cette conclusion, a priori, n'est pas très surprenante : nous savons que dans le système solaire, les planètes se sont formées par accumulation autour de noyaux solides. Plus les éléments lourds sont abondants, plus il y a de masse solide disponible pour constituer de gros noyaux, lesquels pourront à leur tour capturer le gaz environnant. Cependant, la corrélation entre la métallicité de l'étoile et le nombre de planètes n'apparaît pas clairement dans le cas des super-Terres (Fig. 6.15.b) ; elle nécessitera un échantillonnage plus important pour pouvoir être précisée.

Un autre résultat plus inattendu est que la métallicité du Soleil, relativement faible, est a priori peu favorable pour la constitution d'un système planétaire. Peut-être pouvons-nous expliquer ce paradoxe en prenant en compte le fait que les exoplanètes massives sont plus aisément détectables. La corrélation que nous observons concernerait donc plutôt les exoplanètes géantes, qui se formeraient plus facilement autour de gros noyaux dans le cas d'une étoile à forte métallicité. Nous savons encore très peu de choses des exoplanètes de type terrestre. . .



(a)



(b)

Figure 6.15. Distribution des exoplanètes en fonction de leur métallicité : (a) planètes de masse supérieure à 10 masses terrestres ; (b) planètes de masse inférieure à 10 masses terrestres (©M. Ollivier).

2.6 Combien d'étoiles dotées de planètes ?

À la lumière de toute l'information collectée depuis quinze ans, pouvons-nous aujourd'hui apporter une réponse à cette question simple : quelle est la probabilité pour une étoile d'avoir une planète ? C'est en effet une question qui intéresse au plus haut point toute l'humanité, puisque de sa réponse dépend la probabilité de l'existence d'une vie extraterrestre.

Voici les résultats que nous pouvons présenter aujourd'hui, sur la base des observations actuelles, de leur interprétation et de leur extrapolation. Sur la totalité des étoiles de type F, G et K observées, 7 % sont dotées d'au moins une exoplanète géante. Environ 30 % de toutes les étoiles possèdent une exo-Terre ou une exoplanète plus massive. Si l'on considère maintenant les étoiles dont la métallicité est deux fois celle du Soleil, la probabilité de détecter une exoplanète est de 25 %.

Bien entendu, ces résultats sont très préliminaires. Il faut prendre en compte le biais observationnel en faveur des étoiles massives de courte période, ainsi que la spécificité des divers échantillons sélectionnés. Il faut maintenant affiner les études, accéder aux masses plus faibles grâce aux développements technologiques autour de la vélocimétrie, élargir l'étude aux étoiles présentant d'autres types spectraux et définir d'autres critères spécifiques d'échantillonnage. Nous ne sommes encore qu'au début d'une recherche passionnante qui s'orientera tout particulièrement vers les exoplanètes de faible masse – les fameuses « super-Terres ». Plus d'une soixantaine d'entre elles ont été détectées à ce jour.

2.7 À la recherche des super-Terres

Au début de l'exploration des exoplanètes par vélocimétrie, les performances des spectromètres à haute résolution semblaient limiter cette technique à la recherche des exoplanètes géantes. Depuis quelques années, il est apparu que les progrès réalisés dans la sensibilité de ces instruments permettaient maintenant la détection d'objets de masse inférieure à la dizaine de masses terrestres. C'est un nouveau champ de recherche qui s'offre à l'astronomie depuis le sol, et qui a déjà commencé à porter ses fruits.

Alors que la limite de détectabilité en vitesse radiale était de l'ordre de la dizaine de m/s à l'époque de la détection de 51 Peg b, on peut maintenant espérer atteindre une précision de 20 cm/s, ce qui ouvre la possibilité de détection d'objets dont la masse est de quelques masses terrestres seulement. Il faut pour cela choisir des étoiles particulièrement stables, dénuées de fluctuations intrinsèques, car celles-ci apportent une perturbation qui limite la détectabilité des objets compagnons. Ainsi, au cours des trois dernières années, l'équipe de Michel Mayor, avec le spectromètre HARPS installé au télescope de 3,60 m de l'ESO au Chili, a détecté des exoplanètes

de très faibles masse (moins d'une masse de 5 masses terrestres en 2007, moins de 4 masses terrestres en 2008, moins de 2 masses terrestres en 2009). Les exoterres sont à notre portée !

Les progrès de la vélocimétrie sont d'autant plus précieux qu'ils permettent le suivi des exoplanètes de faible masse détectées par transit avec le satellite *CoRoT*. Nous avons vu que la combinaison des méthodes permet la caractérisation complète des objets : masse, diamètre, densité, distance à l'étoile. Ce couplage va porter tous ses fruits dans les années à venir avec la poursuite du programme d'observation de *CoRoT* et l'exploitation des données de la mission *Kepler*. Bientôt viendront également les nouvelles techniques d'imagerie directe, actuellement en développement, qui seront elles aussi opérationnelles dans les années à venir.

2.8 Petit échantillon d'objets exotiques

Parmi les quelques 450 exoplanètes connues aujourd'hui, les astronomes ont recherché avec un soin particulier celles qui présentaient des ressemblances avec les nôtres. Jusqu'à présent, ils ne les ont pas vraiment trouvées. Ceci peut s'expliquer, nous l'avons vu, par le biais observationnel qui privilégie les objets massifs proches de leur étoile. Mais chemin faisant, ils ont découvert certains objets vraiment étranges... En voici quelques exemples.

2.8.1 Osiris

Voici d'abord Osiris, que nous avons déjà mentionnée : la première exoplanète détectée par transit, de son vrai nom HD 209458 b, est le parfait exemple du « Jupiter chaud ». Dotée d'une masse égale à 0,7 fois celle de Jupiter, elle a un rayon égal à 1,3 fois le rayon jovien, ce qui lui confère une densité de $0,4 \text{ g/cm}^3$. À titre d'exemple, même Saturne, la planète la moins dense du système solaire, a une densité qui fait près de 2 fois cette valeur... Mais son originalité tient surtout dans sa courte période de révolution (3,5 jours), ce qui la place à 0,045 UA de son étoile. Si proche de son étoile, Osiris est très vraisemblablement en rotation synchrone, et présente donc toujours le même côté à l'étoile. La différence de température entre les côtés jour et nuit pourrait atteindre près de 1000 K, et engendrer des vents de plusieurs milliers de km/h... Soumise à un rayonnement stellaire si intense, l'atmosphère d'un tel objet peut-elle être stable ? Rien n'est moins sûr. Les modèles théoriques prédisent une évaporation continue du gaz qui pourrait former une queue allongée dans la direction opposée à l'étoile, comme dans le cas d'une comète... Si c'est bien le cas, la totalité du gaz pourrait disparaître en quelques milliards d'années, ce qui pourrait être aussi le sort d'un bon nombre de Pégasides.

Pour tenter d'analyser la composition atmosphérique de l'objet, des mesures spectroscopiques de l'étoile ont été réalisées pendant le transit et en dehors. À partir de l'observation de transits primaires (la planète passant devant l'étoile), l'hydrogène a été détecté (ce qui n'est pas une surprise compte tenu de la faible densité) mais aussi l'oxygène et le carbone, ainsi que le sodium, qui pourrait signaler la présence de nuages de sodium à plus grande profondeur. À partir de 2005, les transits secondaires (c'est-à-dire derrière l'étoile) d'Osiris ont pu être observés. Le satellite *Spitzer* a mesuré la température de l'exoplanète du côté jour (de l'ordre de 1000 K) et y a détecté la vapeur d'eau, tandis que le HST a mesuré son spectre dans l'infrarouge proche et y a identifié le méthane. Du point de vue de sa composition chimique comme de sa dynamique atmosphérique, Osiris constitue une perle rare pour les observateurs comme pour les théoriciens.

2.8.2 Corot-7 b

Restons à proximité de l'étoile : voici maintenant l'un des objets les plus petits détectés à ce jour. Avec un rayon de 1,7 fois celui de la Terre et une masse de 4,8 masses terrestres, la septième exoplanète détectée par le satellite *CoRoT* a une densité de $4,7 \text{ g/cm}^3$, pas très éloignée de celle de la Terre. Mais là s'arrête la ressemblance : Corot-7 b présente la particularité d'être extrêmement proche de son étoile, à 0,017 UA ; sa période de révolution est inférieure à la journée... Comme Osiris, Corot-7 b présente toujours la même face au Soleil, et doit présenter des contrastes jour/nuit extrêmes. Avec une température supérieure à 1000 K, le côté jour pourrait être constitué d'un magma de roches, tandis que le côté nuit, à une température de l'ordre de 200 K voire moins, serait constitué de roches et peut-être de glace. Notons que les mesures vélocimétriques ont permis la détection d'une seconde super-Terre autour de l'étoile CoRoT-7 : située à 0,046 UA de l'étoile, CoRoT-7c a une masse de 8,4 masse terrestre. Quant à CoRoT-7b, l'exoplanète des extrêmes, elle compte parmi les objets les plus extraordinaires découverts à ce jour.

2.8.3 OGLE-05-390L : le succès de la microlentille

Restons dans le domaine des petites exoplanètes. Voici maintenant l'un des premiers objets détectés par microlentille. Il possède une masse de 5,5 masses terrestres et est situé à 2,6 UA de son étoile. Observé en 2006, il a tenu plus de deux ans le record de la plus petite masse (si l'on exclut les planètes entourant les pulsars). C'est à partir de la modélisation de la courbe de lumière de l'objet lointain que l'on détermine les paramètres physiques et orbitaux de l'exoplanète (voir chapitre 6, paragraphe 1.4). Il sera malheureusement difficile d'en dire plus, car le phénomène de microlentille ne peut être répété sur le même objet.

2.8.4 Le système HD 69830 : les trois Neptunes

Nous passons maintenant aux systèmes multiples. Celui-ci, détecté par Lovis en 2006, présente l'originalité d'héberger trois planètes dont la masse varie entre 5 et 20 masses terrestres. Les orbites sont situées à 0,08, 0,2 et 0,6 UA. De plus, un disque de poussières, situé à moins d'1 UA, doit être présent, comme le montre l'excès de flux infrarouge mesuré dans le spectre de l'étoile. Les modèles dynamiques montrent qu'un tel système peut être stable sur une durée d'un milliard d'années. Quelle peut-être la nature des trois planètes ? La plus intérieure pourrait être rocheuse, tandis que la plus extérieure pourrait avoir une enveloppe gazeuse entourant un noyau de glace et de roche. Compte tenu de la distance à son étoile, il n'est pas exclu que l'eau existe sous forme liquide à la surface d'un tel objet. Voilà un système qui fera l'objet de toutes les attentions. . .

2.8.5 2MASS 1207 : le premier succès de l'imagerie directe

Pour terminer ce tour d'horizon, voici 2MASS 1207 b, dont la détection illustre les techniques de détection directe qui vont fleurir dans la décennie à venir. L'objet, détecté par l'équipe de G. Chauvin à l'Observatoire de Grenoble, a été observé en 2005 par imagerie directe au VLT à l'ESO, avec le système d'optique adaptative NAOS-CONICA doté d'un système coronographique (voir Fig. 6.16 et chapitre 6, paragraphe 5.1). L'objet, dont la masse est 5 fois celle de Jupiter, est situé à 55 UA de son étoile. Il s'agit d'un objet jeune, de quelques millions d'années, et donc encore chaud. L'étoile est une naine brune, de masse égale à 0,025 masse solaire. Elle est donc relativement froide, ce qui explique que la détection ait été possible : le contraste entre les flux stellaire et planétaire est particulièrement favorable, et la distance éloignée de l'exoplanète assure une distance angulaire de 778 millisecondes d'arc, mesurable par les techniques actuelles. Il s'agit sans doute de la première exoplanète détectée par imagerie directe

3 La formation des systèmes planétaires

À la lumière des observations accumulées depuis quinze ans, et face à la diversité des objets découverts, sommes-nous en mesure de définir un scénario cohérent de la formation des systèmes planétaires ? Si de nombreuses questions restent sans réponse, il est toutefois possible de définir les grandes lignes de la formation des étoiles et des systèmes planétaires. Les deux vont de pair car les exoplanètes prennent naissance au sein d'un disque protoplanétaire dont la formation accompagne celle de l'étoile elle-même ; ce scénario est analogue à celui du système solaire.

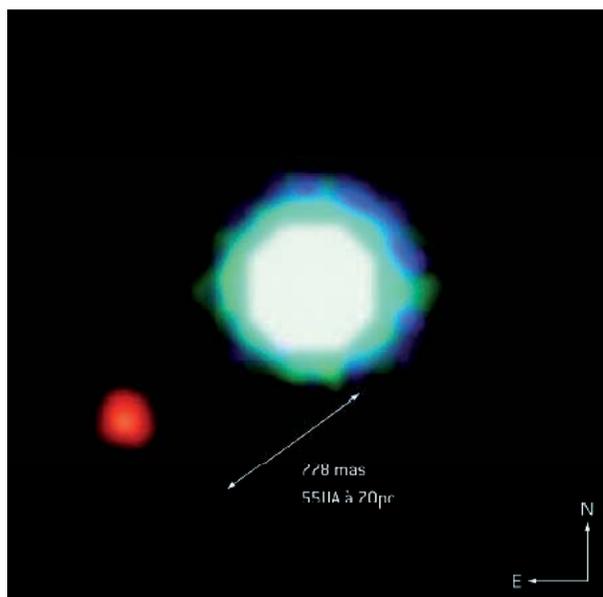


Figure 6.16. Première détection d'une exoplanète par imagerie directe. Il s'agit d'un compagnon de 5 masses de jupiter situé à 55 UA de l'étoile naine 2M1207, dont la masse est égale à 0,025 masse solaire. Le contraste entre le flux de la planète et celui de l'étoile est donc particulièrement favorable. L'observation a été faite avec l'instrument NACO du VLT (G. Chauvin *et al.*, 2005) (© ESO).

3.1 Le scénario de formation stellaire

Les étoiles naissent en permanence, au sein de notre Galaxie comme dans les autres. À l'origine, un fragment de nuage interstellaire plus dense que son environnement peut, suite à une instabilité (par exemple l'explosion d'une étoile voisine), se contracter sous l'effet de sa propre masse. Ce fragment, dont la température ne dépasse pas quelques dizaines de Kelvin, est constitué de gaz et de poussières, les éléments chimiques y étant présents, en première approximation, selon leurs abondances cosmiques : l'hydrogène y est prépondérant, puis l'hélium, puis des molécules telles que H_2O , CH_4 , NH_3 , CO , HCN , H_2CO ... que l'on observe dans le milieu interstellaire. La phase solide comporte des silicates et des agrégats carbonés, éventuellement recouverts de glaces.

À mesure que le fragment de nuage se contracte, sa température et sa densité augmentent, ainsi que sa vitesse de rotation sur lui-même. Si la masse du nuage est suffisante, la contraction du nuage entraîne son effondrement en un disque perpendiculaire à l'axe de rotation du nuage. Au centre du disque va se former la protoétoile ; c'est aussi le scénario que nous avons décrit pour le système solaire (voir chapitre 2).

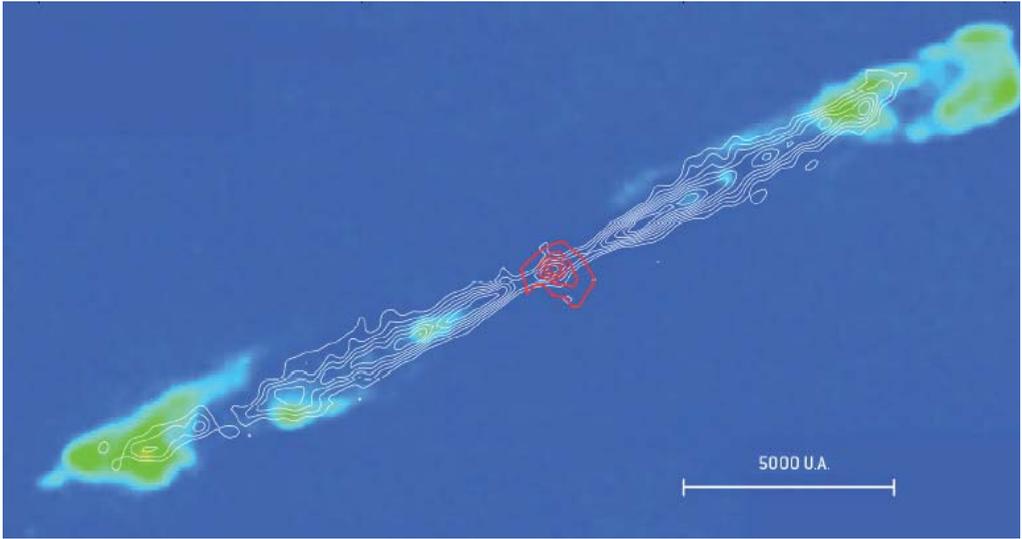


Figure 6.17. Disque protoplanétaire et jets bipolaires observés par cartographie de la molécule CO par interférométrie millimétrique ; ici l'objet HH 211 observé avec l'interféromètre du Plateau de Bure à l'IRAM (©IRAM).

Notre connaissance des premières étapes de la formation stellaire se base d'une part sur l'observation des étoiles jeunes, d'autre part sur celle des disques protoplanétaires associés. Ceux-ci sont souvent détectés par leur rayonnement infrarouge et observés dans le domaine millimétrique, la molécule CO étant utilisée comme traceur des abondances moléculaires (Fig. 6.17). Les mesures millimétriques, réalisées à très haute résolution spectrale, permettent une mesure très précise des vitesses. Elles ont mis en évidence l'existence de jets bipolaires très violents émis selon l'axe de rotation des disques. En parallèle, l'observation en UV, visible et infrarouge des objets très jeunes de type T-Tauri (selon le nom de l'étoile dans laquelle ce comportement a été tout d'abord observé) montre l'existence d'éjection de matière avec des taux de perte de masse considérable chez des objets âgés de moins d'une dizaine de millions d'années. Les mécanismes responsables de cette perte de masse peuvent être les vents stellaires, les champs magnétiques ou la viscosité turbulente au sein du disque. L'observation directe de tels objets est difficile car ils sont souvent cachés dans un cocon de gaz et de poussières ; plusieurs d'entre eux ont été observés par le télescope spatial Hubble.

3.2 Les disques protoplanétaires

L'observation des jeunes étoiles qui nous entourent semble montrer que la formation de disques protoplanétaires autour d'étoiles en formation est un scénario courant dans l'Univers, non limité à notre propre système solaire. Autre résultat remarquable : ces disques ont une durée de vie limitée, de l'ordre de la dizaine de millions d'années. Il semble que l'intense activité des jeunes étoiles lors de leur phase T-Tauri ait pour effet d'éjecter vers l'extérieur la quasi-totalité de la matière. Ceci pose une forte contrainte sur le modèle de formation des planètes au sein du disque, puisque celles-ci doivent avoir achevé leur croissance avant la disparition du gaz environnant.

Comment une planète peut-elle se former au sein du disque protoplanétaire ? Le scénario proposé reprend les grandes lignes de celui de la formation du système solaire (voir chapitre 2). Au départ, suite à l'effondrement du nuage, les poussières tendent à migrer vers le plan du disque protoplanétaire, où leur densité augmente fortement. Les collisions y sont fréquentes, mais peuvent être non destructives, car les vitesses relatives entre particules sont faibles : toutes les particules tournent ensemble dans le plan autour de la protoétoile. Les particules peuvent ainsi s'agglutiner par interaction électrostatique. Sans doute la croissance se fait-elle de manière fractale, telle qu'on l'observe sur les poussières interplanétaires collectées dans la stratosphère ou par les sondes spatiales. Selon les simulations numériques, il est possible de générer des grains de quelques centimètres en quelques milliers d'années.

Par quel processus ces grains vont-ils ensuite croître pour atteindre la taille kilométrique ? Ce problème reste mal compris à l'heure actuelle. Certains modèles font intervenir une instabilité gravitationnelle au sein du disque, d'autres favorisent la poursuite du mécanisme de coagulation ; la turbulence du gaz peut également jouer un rôle. Toujours est-il que, d'une manière ou d'une autre, le disque a généré une multitude de « planétésimaux » de taille kilométrique. À ce stade, les interactions gravitationnelles entre en jeu : les plus gros de ces fragments peuvent attirer par gravité les grains environnants, « aspirant » ainsi la matière présente autour de leur orbite. Les modèles montrent que ce mode de formation accélérée favorise la formation d'un petit nombre de gros objets, sur des orbites quasi-circulaires, en quelques dizaines de milliers d'années. Les collisions entre ces objets vont encore en diminuer le nombre, au bénéfice des plus gros d'entre eux.

Comment les exoplanètes géantes se forment-elles au sein du disque ? La question divise encore la communauté. Le scénario le plus couramment adopté est, comme pour les planètes géantes du système solaire, celui de l'accrétion autour d'un noyau solide dont la taille est suffisante pour capturer le gaz environnant. Pour que le noyau soit suffisamment gros (au minimum une dizaine de masses terrestres), il faut que les glaces y soient incluses, donc que la température soit inférieure à environ 200 K, donc que l'accrétion ait lieu à une distance suffisamment éloignée de

l'étoile (typiquement 5 UA dans le cas d'une étoile de type solaire). C'est là que nous retrouvons le paradoxe mentionné ci-dessus : comment expliquer la présence d'exoplanètes géantes près de leur étoile ?

3.3 Au sein d'un disque, la migration

La clé de l'énigme se trouve sans doute dans le phénomène de migration. Celui-ci permet à une planète géante de se déplacer, soit vers l'intérieur, soit vers l'extérieur, par l'effet d'interactions avec le disque de gaz, ou le disque de poussières, ou d'autres planètes. L'effet est connu dans le système solaire, où il a été invoqué pour expliquer l'existence de satellites extérieurs en résonance, ou celle des objets trans-neptuniens (les Plutinos) en résonance avec Neptune. Nous avons vu que, dans le cas du système solaire, la migration des planètes géantes est restée limitée. Mais rien n'empêche a priori une exoplanète géante, par ce mécanisme, de partir du système extérieur, au-delà de la ligne des glaces où elle se sera formée par nucléation, et de se rapprocher très près de son étoile.

Les modèles couramment cités prennent en compte l'interaction entre la planète et le disque de gaz. L'interaction crée un couple entre le disque et la planète, ce qui permet un transfert d'énergie résultant, dans certains cas, dans une diminution du demi-grand axe de la planète qui se rapproche alors de son étoile. Pour une planète dont la masse est faible devant celle du disque, le temps de chute est estimé à environ 100 000 ans. Dans le cas d'une planète plus massive, un sillon se crée au sein du disque de gaz autour de l'orbite de la planète, le temps de chute est encore plus court : quelques milliers d'années ! En théorie, le mécanisme de migration est donc parfaitement capable de rapprocher l'exoplanète géante de son étoile. Mais une question s'impose alors : comment s'arrête la migration ? Si les temps de migration sont si courts face à la durée de vie du disque protoplanétaire, toutes les exoplanètes devraient être englouties par leur étoile et nous ne devrions pas en observer tant... Autre fait troublant : un grand nombre de Pégasides sont situées à 0,05 UA de leur étoile. Y aurait-il un mécanisme susceptible de stopper la migration à ce stade ? Certains modèles dynamiques prédisent qu'après une phase de grande excentricité, la planète se stabilise à une distance d'équilibre égale à deux fois la limite de Roche (celle-ci étant de 2,5 fois le rayon de l'étoile) en une orbite semi-circulaire. D'autres processus peuvent entrer en jeu : dans le champ gravitationnel intense de l'étoile voisine, la planète peut perdre sa masse (comme cela a été suggéré dans le cas de l'exoplanète Osiris) ou être déformée par les effets de marée. Pour mieux comprendre l'histoire de la migration des exoplanètes et son stade final, nous en sommes pour l'instant réduits aux hypothèses.

4 Comment classer les exoplanètes ?

Que savons-nous des exoplanètes que nous avons découvertes ? Nous connaissons leur distance à leur étoile et leur période de révolution, et nous avons une limite inférieure de leur masse. Pour les objets observés par transit nous connaissons aussi le rayon et la densité. Mais nous ignorons tout de leur nature physique. Quelques rares observations spectroscopiques nous ont permis, dans certains cas, de détecter certains éléments ou certaines molécules : hydrogène, méthane, eau. Mais l'information est encore parcellaire. . .

Dans le cas du système solaire, les modèles d'équilibre thermochimique nous renseignent sur la nature des molécules que l'on peut s'attendre à trouver dans certaines conditions de température et de pression. Ainsi le carbone et l'azote se trouvent préférentiellement sous forme de CO et de N₂ à haute température et à basse pression, et sous forme de CH₄ et de NH₃ dans les conditions opposées. Ceci est cohérent avec le fait que l'atmosphère des planètes telluriques est majoritairement constituée de CO₂ et de N₂ (l'hydrogène étant trop léger pour être capturé) tandis que CH₄ et NH₃ sont présents dans l'atmosphère des planètes géantes. Extrapolons ces modèles aux exoplanètes géantes : CH₄ et NH₃ devraient y être prédominants à une distance de quelques UA ; CO devrait devenir dominant devant CH₄ en deçà de 0,1 UA, et N₂ serait plus abondant que NH₃ en deçà de 0,05 UA. L'eau H₂O devrait être présente aussi, sous forme de gaz ou de glace, voire de liquide, qui sait, si la température du milieu est dans la gamme 0 °C-100 °C. À plus grande profondeur, d'autres éléments pourraient être présents dans l'atmosphère sous forme solide (nuages, aérosols) : silicates, oxyde de titane, métaux. . . Tous ces modèles supposent que les éléments sont présents selon leurs abondances cosmiques.

À partir de notre connaissance des planètes et des satellites du système solaire, essayons de définir quelques grandes classes d'objets que nous pourrions utiliser pour tenter de définir une classification des exoplanètes. Bien entendu, il ne s'agit que d'une extrapolation, et nous devons attendre que des mesures viennent confirmer ou infirmer ces hypothèses.

Bien que les objets du système solaire soient d'une extrême diversité, il est toutefois possible de définir quelques grandes classes. Deux paramètres sont essentiels : la masse de l'objet et sa température (directement liée à sa distance héliocentrique). En ce qui concerne la masse, nous considérons deux types d'objets : ceux de masse inférieure à 10 masses terrestres et ceux qui sont plus massifs (ces derniers sont donc capables de capturer le gaz environnant).

Dans la catégorie des petits objets, nous avons les « planètes rocheuses » et les « planètes glacées » (ce sont les satellites extérieurs). Dans les deux catégories, les objets peuvent être ou non entourés d'une atmosphère ; celle-ci peut être dense (c'est le cas de Vénus ou de Titan) ou ténue (c'est le cas de Mars ou de Triton). Quelle est

la nature de l'atmosphère, quand elle existe ? Dans le cas des objets rocheux, elle est dominée par CO_2 et N_2 (nous laissons de côté le cas de la Terre qui a accumulé l'oxygène suite à l'apparition de la vie). Dans le cas des objets glacés, elle est dominée par N_2 et CH_4 (c'est ce que nous observons sur Titan, Triton et Pluton). Pourquoi l'azote est-il préférentiellement sous forme de N_2 ? Sans doute parce que l'ammoniac NH_3 est facilement transformé en N_2 par photodissociation tandis que la réaction inverse est très difficile. Notons que, dans le cas des planètes glacées, l'atmosphère présente une stratosphère, suite à la dissociation de ces molécules qui forme des hydrocarbures et des nitriles. Ce n'est pas le cas des planètes rocheuses à l'exception de la Terre dont la stratosphère est créée par la présence de l'ozone, produit de photodissociation de l'oxygène.

Passons maintenant à la catégorie des planètes massives. On peut distinguer les géantes gazeuses ou les géantes glacées, selon la proportion relative de gaz et de glace qu'elles contiennent. Leur atmosphère, dans tous les cas, est dominée par l'hydrogène et le méthane et elles possèdent une stratosphère riche en hydrocarbures, produits de la photodissociation du méthane.

Essayons maintenant de projeter cette classification simple au royaume des exoplanètes (Fig. 6.18). Nous supposons au départ un disque protoplanétaire de masse comparable à celui du disque protosolaire, c'est-à-dire de faible masse (environ le centième de la masse de l'étoile). Prenons pour commencer une étoile de type solaire. Nous supposons que les exoplanètes sont dotées d'un albédo moyen de 0,3, une valeur typique rencontrée dans le système solaire. Dans la catégorie des petites planètes, nous avons trois cas possibles : en deçà de 0,4 UA, une planète rocheuse sans atmosphère (à moins d'être très massive) ; de 0,5 à 3 UA, une planète rocheuse avec atmosphère dominée par CO_2 et N_2 (c'est dans cette catégorie que nous rechercherons les planètes habitables) ; au-delà de 4 UA, une planète glacée avec ou sans atmosphère (si celle-ci existe, on s'attend à une composition dominée par N_2 et CH_4). Dans la catégorie des planètes géantes, nous avons, en-deçà de 0,05 UA, une composition dominée par H_2 , CO , N_2 , éventuellement H_2O ; entre 0,05 et 0,1 UA, une atmosphère de H_2 , CO , NH_3 , H_2O ; au-delà de 0,1 UA, une atmosphère de H_2 , CH_4 , NH_3 , H_2O (Fig. 6.19).

Que se passe-t-il si l'étoile n'est pas de type solaire ? La relation entre la distance à l'étoile et la température n'est plus la même que pour le Soleil. Ainsi pour une étoile de type A, d'une température de 10 000 K, la zone des planètes rocheuses avec atmosphère s'étend de 1 à 10 UA environ ; dans le cas d'une naine de type M, de température 3200 K, cette région se situe entre 0,05 et 0,5 UA environ. Il faut garder en mémoire que les paramètres les plus importants pour définir la nature d'une exoplanète sont sa masse et sa température. L'albédo est important puisqu'il définit la quantité de flux stellaire absorbé et donc la température de l'objet en fonction de sa distance à l'étoile. D'autres facteurs interviennent aussi, à un degré moindre : sa

QUELLE ATMOSPHÈRE POUR LES EXOPLANÈTES?

<u>Te (K)</u>	1200	850	460	220	120	50
<u>Distance à l'étoile (AU)</u>	0.05	0.1	0.3	1.5	5.0	20.0
(Étoile de type solaire)						
Petite Exoplanète	< PLAN. ROCHEUSES >			< PLAN. GLACÉES >		
	(CHAUDES)			(FROIDES)		
(0.01 - 10 M _T)	Pas d'atmosphère	Atmosphère		Atmosphère		
	(Mercure)	N ₂ , CO ₂ , CO, H ₂		N ₂ , CH ₄ (+CO)		
		(Mars-Vénus)		(Titan)		
		si O ₂ -> O ₃ (Terre)		STRATOSPHERE		
		STRATOSPHERE		STRATOSPHERE		
Exoplanète géante	<PÉGASIDES>< GEANT. GAZEUSES >			<GEANT.GLACÉES>		
	(TRES CHAUDES) (CHAUDES)			(FROIDES)		
(10 - 1000 M _T)	Atmosphère	Atmosphère		Atmosphère		
	H ₂ , CO, N ₂ , H ₂ O	H ₂ , CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O		H ₂ , CH ₄		
		hydrocarbures		hydrocarbures		
		(Jupiter)		(Neptune)		
		STRATOSPHERE		STRATOSPHERE		

Figure 6.18. Les différents types d'atmosphères attendues pour les exoplanètes. À partir de quelques paramètres simples (masse de la planète, densité, distance à l'étoile), type spectral de l'étoile, il est possible, par comparaison avec les planètes du système solaire, de faire une hypothèse sur la nature de leur atmosphère.

vitesse de rotation sur elle-même, l'existence ou non d'un champ magnétique... Enfin, rappelons que nous avons supposé un disque protoplanétaire de faible masse. Que se passerait-il dans le cas d'un disque dont la masse serait le dixième de celle de l'étoile? D'autres modes de formation pourraient éventuellement intervenir, comme la contraction gravitationnelle directe à partir d'une instabilité. Peut-être pourrait-on aussi imaginer des planètes rocheuses proches de l'étoile suffisamment massives pour accréter le gaz environnant, qui sait? Reste à savoir alors si dans ce dernier cas, le jeu des collisions autoriserait la formation de ces très grosses planètes rocheuses ou s'il serait destructif, entraînant la formation de multiples planètes rocheuses de plus petite taille...

On le voit, la classification qui précède ne constitue qu'une grille de lecture très simple, certainement trop simple. Il est fort probable que les premières observations de la composition atmosphérique des exoplanètes viendront démentir ces prédictions et nous faire découvrir de nouveaux objets exotiques... !

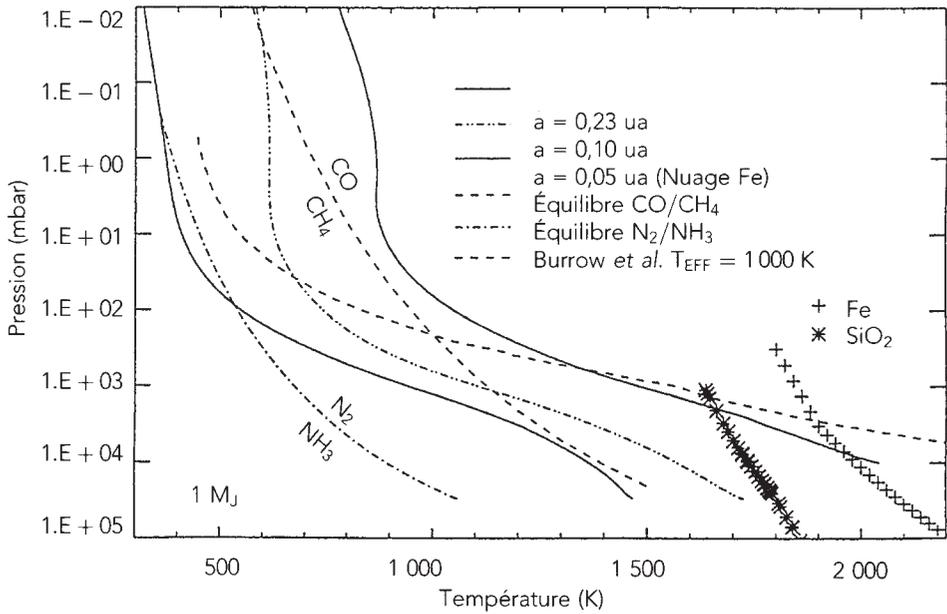


Figure 6.19. Structure thermique d'une exoplanète géante située à proximité de son étoile, pour trois distances astrocentriques (0,23 UA, 0,10 UA et 0,05 UA). Les courbes en trait plein correspondent à l'équilibre thermochimique CO/CH₄ et N₂/NH₃, et les croix indiquent les courbes de saturation du fer et des silicates (d'après C. Goukenleuque *et al.*, in « From Cool Stars to Giant Planets », C. Griffin et M. Marley eds., ASP Conferences series, 1999).

5 De la détection à la caractérisation

La quasi-totalité des exoplanètes découvertes à ce jour l'ont été par des méthodes indirectes. La question se pose maintenant de déterminer la nature physique de ces objets, et donc de caractériser leur atmosphère. Pour cela, une détection directe, avec analyse spectroscopique du spectre, sera nécessaire.

5.1 Comment détecter directement les exoplanètes ?

La première méthode à explorer est celle de l'imagerie directe. Elle a déjà porté ses fruits, nous l'avons vu, pour la découverte d'une exoplanète supergéante orbitant autour d'une naine brune (2MASS 1207, voir chapitre 6, paragraphe 2.8). L'objectif est maintenant d'obtenir directement l'image d'exoplanètes moins massives plus proches de leur étoile. Nous sommes de retour à la question de départ : comment s'affranchir du flux stellaire ? Une première voie : dans la poursuite des observations précédentes, utiliser l'optique adaptative et le traitement d'image, toujours plus

sophistiqué, associés à la coronographie. Cette technique, dont l'astronome Bernard Lyot est le père fondateur, consiste à occulter le flux de l'objet central par un masque pour faire ressortir les structures de faible intensité situées à la périphérie. C'est en particulier par coronographie que la couronne solaire a pu être analysée. Cette technique a permis, en 1983, la première détection d'un disque de poussières autour de l'étoile β Pic. En 2008, la coronographie a permis la détection d'une exoplanète autour de l'étoile Fomalhaut. En 2009, nous comptons une dizaine d'exoplanètes détectées par imagerie directe. Plusieurs projets spatiaux (*SEE-COAST*, *TPF-C*, *New World Observer*) sont à l'étude, utilisant le principe de la coronographie dans le domaine du visible et de l'infrarouge proche.

Une méthode alternative est l'interférométrie annulante. Le principe en est le suivant : le flux de l'étoile est enregistré par un interféromètre réglé de telle sorte que, au niveau de la frange centrale, le flux s'annule le long de l'axe de visée, ce qui permet d'éteindre le flux de l'étoile centrale. Si une exoplanète est présente en dehors de l'axe de visée mais à proximité de celui-ci, elle peut être détectée de cette manière. L'interférométrie annulante est développée dans le domaine de l'infrarouge thermique, autour de 10 microns. Le projet spatial utilisant ce principe est *Darwin/TPF-I*, en phase de pré-étude à l'ESA comme à la NASA. La mission consiste à envoyer dans l'espace un ensemble de plusieurs télescopes qui travailleront en mode interférométrique. Ils devront être situés à une distance d'au moins 5 UA du Soleil, pour s'affranchir de la lumière exozodiacale du système solaire. La mission, très ambitieuse sur le plan technologique, ne pourra voir le jour avant l'horizon 2025, voire au-delà.

Une troisième méthode de détection directe consiste à rechercher le rayonnement radio des exoplanètes géantes, supposées dotées d'un champ magnétique comme les planètes géantes du système solaire. Une émission non thermique est détectable dans le domaine des ondes décamétriques ; l'avantage de la méthode est que, si l'on se réfère à Jupiter et au Soleil, le flux non-thermique de l'exoplanète géante doit être comparable à celui de l'étoile qu'elle accompagne. Le rayonnement radio peut être mesuré depuis le sol, par de grandes antennes ou au moyen du réseau décimétrique LOFAR actuellement en développement.

5.2 Comment mesurer le spectre des exoplanètes ?

L'observation directe des exoplanètes et leur suivi tout au long de leur orbite pourra déjà fournir une information précieuse sur leur variation temporelle saisonnière. Si les mesures sont assez précises, il sera en principe possible de déterminer leur période de rotation à partir de leur courbe de lumière. Mais pour déterminer leur composition atmosphérique, la spectroscopie, de l'ultraviolet à l'infrarouge, constitue un outil incontournable. Comment réaliser cette mesure ? La technique la plus

prometteuse semble aujourd'hui être celle de l'observation du transit. Nous avons vu que la mesure du transit (dit aussi transit primaire), qui correspond au passage de l'exoplanète devant son étoile, permet la détection de l'objet ainsi que la mesure de son rayon. À cette occasion, si l'objet est entouré d'une enveloppe de gaz volumineuse, il est possible d'en détecter certains éléments par spectroscopie d'absorption devant le flux stellaire. C'est ainsi que l'échappement de l'hydrogène moléculaire, ainsi que la présence d'atomes de sodium, ont été détectés sur la planète Osiris. Une autre opportunité d'observation est fournie par le transit secondaire, c'est-à-dire le passage de l'exoplanète derrière son étoile. En observant le flux de l'étoile avant, pendant et après le transit secondaire, il est possible, par soustraction, d'extraire le spectre de l'exoplanète côté jour. Nous avons vu que des spectres de Pégasides ont été obtenus, par le HST dans le visible et l'infrarouge proche, et par *Spitzer* dans l'infrarouge moyen et lointain (voir chapitre 6, paragraphe 2.8).

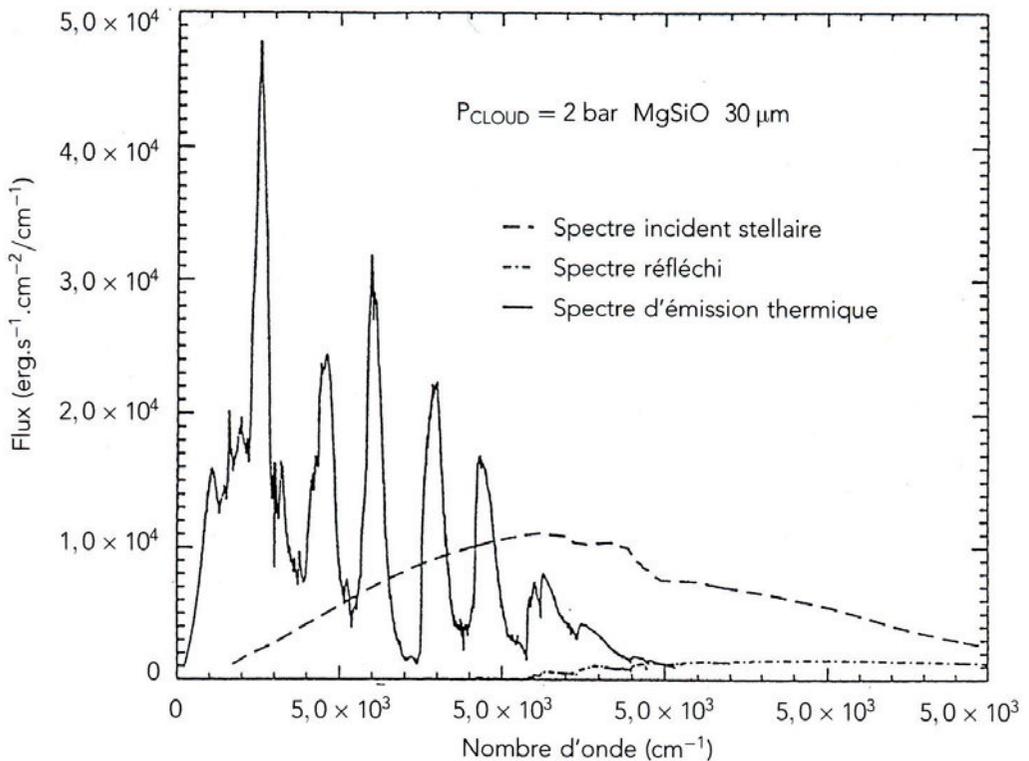


Figure 6.20. Le spectre synthétique d'une exoplanète géante de type 51 Peg b. Le spectre thermique est indiqué en trait plein, le spectre stellaire réfléchi en traits-points, et le spectre stellaire incident en tirets (d'après C. Goukenleuque *et al.*, *Icarus*, 2000).

Quel est le domaine spectral le plus adapté pour l'étude spectroscopique des exoplanètes ? Nous avons vu que l'infrarouge thermique est le plus favorable en ce qui concerne le contraste du flux planétaire au flux stellaire. Dans le cas des Gégasides, dont la température est de l'ordre de 1200 K, le flux thermique s'étend à plus courtes longueurs d'onde, vers l'infrarouge proche. Les signatures spectrales apparaissent en émission ou en absorption, selon le profil thermique de l'exoplanète et la région de formation des raies (stratosphère ou troposphère). L'infrarouge, entre 1 et 30 microns, est le domaine privilégié d'observation des molécules neutres qui présentent dans ce domaine des bandes de rotation ou de vibration-rotation aisément identifiables. Il y a toutefois des exceptions : ainsi l'azote moléculaire n'a pas de signature infrarouge, mais présente de fortes bandes d'émission dans l'ultraviolet. C'est aussi le cas de l'hydrogène moléculaire, dénué comme N_2 de moment dipolaire, dont les signatures infrarouges sont faibles. L'hydrogène atomique présente de fortes signatures dans l'UV (la plus intense étant la raie Lyman alpha) et dans le visible (avec notamment la raie H alpha). Le spectre infrarouge des molécules dépend de leur structure. Les molécules dotées d'un moment dipolaire présentent des raies de rotation intenses jusqu'à l'infrarouge lointain et le millimétrique : c'est en particulier le cas de H_2O , NH_3 , HCN et CO . Celles qui en sont démunies (comme CO_2 , CH_4 et la plupart des hydrocarbures) présentent des signatures de vibration-rotation qui ne vont guère au-delà de 15 microns.

Reprenons maintenant notre classification simpliste des exoplanètes et essayons d'imaginer ce que pourra être leur spectre. Dans le cas des petites planètes rocheuses, on pourra rechercher N_2 dans l'UV, CO et CO_2 entre 2 et 15 microns, H_2O dans tout le domaine spectral infrarouge au-delà de 2 microns. Avec l'espoir de détecter une planète où la vie est apparue, on recherchera aussi la signature de l'ozone à 9 microns ; nous y reviendrons (chapitre 7). Dans le cas des petites planètes glacées, on recherchera à nouveau N_2 dans l'UV, ainsi que le méthane, les hydrocarbures et les nitriles entre 1 et 15 microns. Dans le cas des planètes géantes, on recherchera H_2 et H dans l'UV, ainsi que CH_4 et les hydrocarbures dans l'infrarouge moyen. Si la température le permet, on recherchera aussi les molécules associées à l'hydrogène telles que NH_3 , PH_3 ou H_2S entre 2 et 11 microns, et H_2O dans tout le spectre infrarouge ; dans les géantes les plus froides, ces molécules seront sans doute piégées dans des nuages trop profonds pour être observables, comme c'est le cas pour Uranus et Neptune.

Le plus difficile reste à faire : mesurer le spectre des exoplanètes ! Jusqu'à présent, les mesures encore très parcellaires, réalisées en particulier avec le satellite *Spitzer*, ont un faible pouvoir de résolution spectral, ce qui rend l'identification très difficile. Encore une fois, les hypothèses présentées ci-dessus quant à la nature des spectres d'exoplanètes ne sont qu'une extrapolation de ce que nous a appris le système solaire, et, sans nul doute, les surprises seront nombreuses.

7

À la recherche de mondes habitables

La vie existe-t-elle ailleurs que sur Terre ? Si la question n'a cessé de se poser à l'humanité depuis l'origine des civilisations, elle a pris une actualité nouvelle avec la découverte des exoplanètes. Aujourd'hui nous sommes en mesure de les détecter, demain nous saurons les caractériser, étudier leur atmosphère, leur surface, déterminer celles qui pourraient être habitables et peut-être enfin y rechercher d'éventuels signes de vie. Un nouveau champ de recherche s'offre aux scientifiques qui mettent en place les outils et les instruments nécessaires à cette étude.

1 Une nouvelle discipline, l'exobiologie

La recherche de la vie dans l'Univers, que ce soit dans le système solaire ou sur les exoplanètes, ne concerne pas seulement les astronomes, même si ceux-ci sont concernés en premier lieu. La question de l'émergence de la vie et celle des conditions favorables pour qu'elle puisse se produire concernent les chimistes et les biologistes ; le problème de l'apparition de la vie sur la Terre et des facteurs qui l'ont rendue possible est aussi l'affaire des spécialistes des sciences de la Terre. Enfin la dimension sociétale du phénomène relève des sciences humaines et sociales. On le voit, c'est la totalité de la communauté qui est concernée par la quête de la vie extraterrestre. Elle se retrouve dans une discipline nouvelle, l'exobiologie (aussi appelée astrobiologie), dont l'objet est la recherche et l'étude de la vie sous toutes ses formes et de ses conditions d'émergence. Pluridisciplinaire par essence, elle regroupe astronomes, physiciens, chimistes, biologistes et chercheurs en sciences humaines et sociales.

La première question qui se pose à la communauté des exobiologistes est : qu'est-ce que la vie ? Les biologistes s'accordent sur la définition suivante. La matière vivante doit répondre à trois critères : capacité d'auto-reproduction (c'est-à-dire reproduction à l'identique), capacité d'évolution par mutation (correspondant à une exception dans la reproduction), et auto-régulation face au milieu ambiant (ce qui permet sa croissance et sa conservation). Le second critère permet l'adaptation à des conditions environnementales en évolution (par exemple un changement de température). Les espèces résultant de la sélection naturelle sont celles qui se seront trouvées les mieux adaptées aux nouvelles conditions.

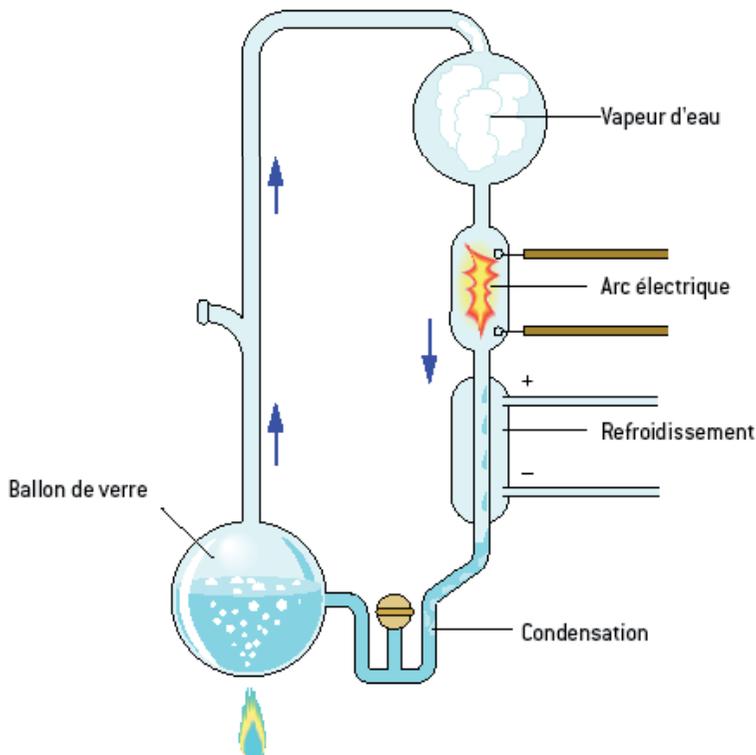


Figure 7.1. Schéma de l'expérience de Miller et Urey (d'après Ph. De la Cotardière, L'Astronomie, 1999).

Partons de ce que nous connaissons : la vie sur Terre. C'est la cellule qui est la base structurelle des systèmes vivants. Tous les organismes vivants utilisent les mêmes types de molécules, essentiellement les acides nucléiques et les protéines. Le principal acide nucléique est l'acide désoxyribonucléique, plus connu sous le nom d'ADN, la « double hélice » qui, tout en transportant l'information génétique, est en charge de la multiplication et du fonctionnement cellulaire. Les protéines

sont constituées d'une vingtaine d'acides aminés, dites « molécules prébiotiques » car elles sont à l'origine de la vie sans être elles-mêmes de la matière vivante. Fait remarquable, toutes ces molécules ont été détectées dans certaines météorites, ce qui prouve qu'elles existent ailleurs que sur la Terre. L'existence d'une chimie prébiotique interstellaire a aussi été illustrée par une expérience célèbre, celle de Stanley Miller et Harold Urey en 1953 (Fig. 7.1) : elle a montré qu'il était possible de synthétiser des acides aminés au laboratoire, en présence d'eau liquide, à partir d'un mélange de gaz réducteurs (H₂, CH₄, NH₃...) soumis à des décharges électriques.

Composés hydrogénés						
H ₂	H ₃ ⁺					
Chaînes et cycles carbonés						
CH	CH ⁺	C ₂	CH ₂	CCH	C ₃	
CH ₃	C ₂ H ₂	<i>l</i> -C ₃ H	<i>c</i> -C ₃ H	CH ₄	C ₄ ?	
<i>c</i> -C ₃ H ₂	<i>l</i> -C ₃ H ₂	C ₃ H	C ₅	C ₂ H ₄	C ₅ H	
<i>l</i> -H ₂ C ₄	HC ₃ H	CH ₃ CCH	C ₇ H	C ₆ H ₂	HC ₆ H	
C ₇ H	CH ₃ C ₄ H	C ₈ H	C ₆ H ₆			
Composés contenant de l'hydrogène, de l'oxygène et du carbone						
OH	CO	CO ⁺	H ₂ O	HCO		
HCO ⁺	HOC ⁺	C ₂ O	CO ₂	H ₃ O ⁺		
HOCO ⁺	H ₂ CO	C ₃ O	HCOOH	CH ₂ CO		
H ₂ COH ⁺	CH ₂ OH	CH ₂ CHO	HC ₂ CHO	C ₂ O		
CH ₃ CHOH ₂	<i>c</i> -C ₂ H ₄ O	CH ₃ OCHO	CH ₂ OHCHO	CH ₃ COOH		
CH ₂ CHOH	(CH ₃) ₂ O	CH ₂ CHCHO	CH ₃ CH ₂ CHO	CH ₃ CH ₂ OH		
(CH ₃) ₂ CO	HOCH ₂ CH ₂ OH	C ₂ H ₅ OCH ₃				
Composés contenant de l'hydrogène, de l'azote et du carbone						
NH	CN	NH ₂	HCN	HNC	N ₂ H ⁺	
NH ₃	HCNH ⁺	H ₂ CN	HCCN	C ₃ N	CH ₂ CN	
CH ₂ NH	HC ₃ N	HC ₂ NC	NH ₂ CN	C ₃ NH	CH ₃ CN	
CH ₃ NC	HC ₂ NH ⁺	C ₅ N	CH ₃ NH ₂	C ₂ H ₃ CN	HC ₃ N	
CH ₃ C ₂ N	C ₂ H ₅ CN	HC ₃ N	CH ₃ C ₃ N?	HC ₅ N	HC ₁₁ N	
Composés contenant de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote et du carbone						
NO	HNO	N ₂ O	HNCO	NH ₂ CHO	NH ₂ CH ₂ COOH?	
Composés soufrés, silicés et autres espèces						
SH	CS	SO	SO ⁺	NS	SiH	SiC
SiN	SiO	SiS	HCl	NaCl	AlCl	KCl
HF	AlF	CP	PN	H ₂ S	C ₂ S	SO ₂
OCS	HCS ⁺	<i>c</i> -SiC ₂	SiCN	NaCN	MgCN	MgNC
H ₂ CS	HNCS	C ₂ S	<i>c</i> -SiC ₃	SiH ₄	SiC ₄	CH ₃ SH
C ₃ S	FeO	AiNC				
Espèces deutérées						
HD	H ₂ D ⁺	D ₂ H ⁺	HDO	CCD	DCN	DNC
DCO ⁺	N ₂ D ⁺	HDS	D ₂ S	NH ₂ D	ND ₂ H	ND ₃
HDCO	D ₂ CO	HDCS	CH ₂ DOH	CD ₂ HOH	CD ₃ OH	CH ₃ OD
DC ₃ N	DC ₂ N	C ₄ D	CH ₂ DCCH	CH ₂ DCN	<i>c</i> -C ₃ HD	

Figure 7.2. Tableau des molécules interstellaires.

Comment la vie est-elle apparue sur la Terre ? Nous n'avons pas encore la réponse à cette question. Nous savons qu'elle est d'abord apparue dans les océans, il y a plus de 3,5 milliards d'années. Mais comment ? Deux hypothèses sont en présence : les

sources hydrothermales des océans profonds, apparemment propices à la synthèse des molécules complexes, et les impacts météoritiques et micrométéoritiques, qui pourraient avoir enrichi l'atmosphère terrestre en acides aminés. Quoi qu'il en soit, trois facteurs semblent avoir été très importants pour le développement de la vie : la présence d'eau liquide, celle du carbone, et une source d'énergie.

Pourrions-nous imaginer ailleurs dans l'Univers une forme de vie qui n'utiliserait pas ces ingrédients de base ? On ne peut l'exclure, mais cela paraît peu probable. Le carbone, avec ses quatre valences, est l'élément le plus apte à créer des liens avec lui-même avec d'autres atomes. Dans le milieu interstellaire, on a découvert plus d'une centaines de molécules dont la plupart contiennent du carbone, la plus complexe étant HC_{11}N . Comme le montre la table périodique des éléments de Mendeleev, l'élément suivant doté de 4 valences est le silicium, mais il est dix fois moins abondant que le carbone dans l'Univers, et on ne connaît pas dans le milieu interstellaire de molécule contenant plus d'un atome de silicium. Le carbone semble donc, et de loin, l'élément le plus capable de générer une chimie complexe.

Quant à l'eau liquide, il apparaît également difficile de lui trouver un substitut. En effet l'eau est une molécule dotée d'un moment dipolaire ; en phase liquide, elle est capable de dissoudre les molécules organiques polaires (dites hydrophiles) tandis que les molécules non-polaires (dites hydrophobes) ne réagissent pas avec l'eau. Les propriétés hydrophiles et hydrophobes des différentes molécules sont utilisées par les organismes vivants pour diverses fonctions spécifiques, comme de produire une membrane par exemple. Existe-t-il d'autres molécules susceptibles de jouer le rôle de l'eau à l'état liquide ? On pourrait penser à l'ammoniac NH_3 , mais la phase liquide intervient à plus basse température, ce qui aurait pour effet de ralentir les réactions chimiques. De plus l'eau possède d'autres avantages : comme nous l'avons vu, c'est une molécule très abondante dans l'Univers, qui condense à des températures particulièrement élevées ; c'est ce qui lui a fait jouer un rôle important dans la formation des planètes. Elle est sous forme liquide sur une plage de températures particulièrement élevée. Enfin, elle présente une autre propriété remarquable : la glace a une densité inférieure à celle du liquide. Cette particularité pourrait s'être avérée décisive pour l'histoire de la vie sur la Terre : dans les périodes de refroidissement, les océans se sont couverts d'une couche de glace, préservant à l'intérieur les espèces vivantes. Si les océans avaient commencé à geler par le fond, ce qui est le cas pour nombre d'autres molécules, les formes de vie présentes dans le liquide auraient été détruites. On le voit, l'eau liquide présente bien des avantages. . . et à défaut d'avoir de meilleurs candidats, nous utiliserons l'eau liquide comme traceur possible d'une vie extraterrestre.

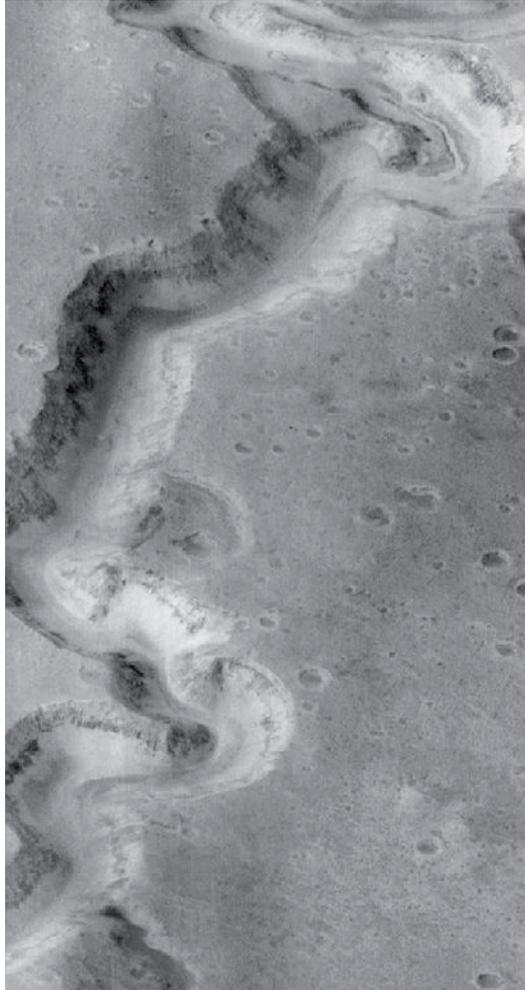


Figure 7.3. La région de Nani Valles photographiée sur Mars par la sonde *Mars Global Surveyor*. Elle montre un bel exemple de l'hydrologie martienne, parfois très semblable à celle de la Terre (©NASA).

2 La vie ailleurs dans le système solaire ?

Avant d'envisager la vie extraterrestre autour d'autres étoiles, les philosophes et les scientifiques du siècle des Lumières l'ont imaginée au sein du système solaire, sur Vénus ou Mars ou même la Lune. C'est en particulier le discours de Fontenelle dans « La pluralité des mondes habités ». Il ne s'agit alors que de pures spéculations. À la fin du XIX^e siècle, l'affaire rebondit sur une base scientifique cette fois. L'astronome italien Schiaparelli, en 1877, a annoncé la découverte sur la planète Mars

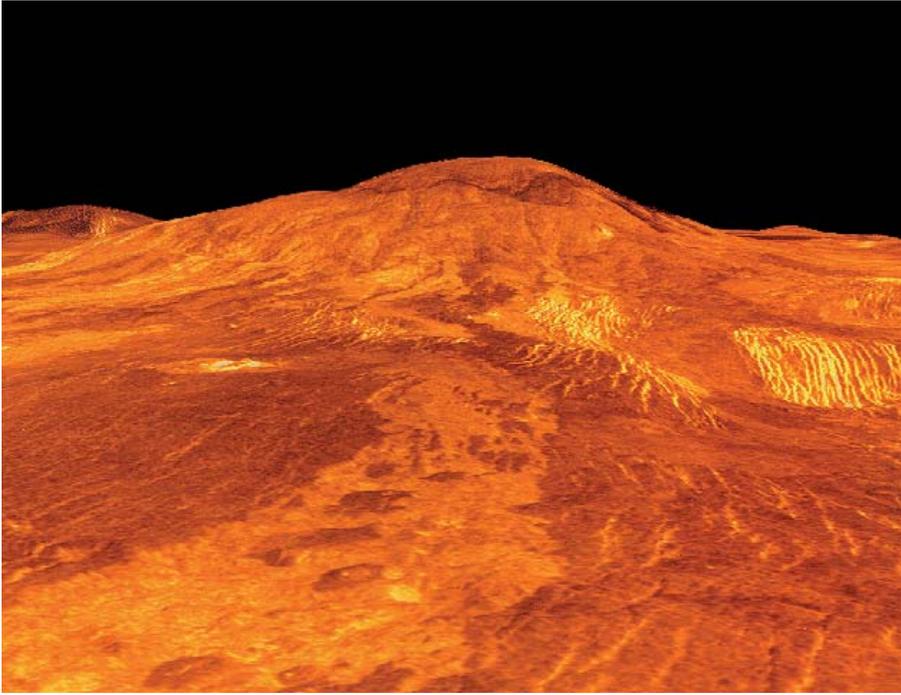


Figure 7.4. Image de la surface de Vénus, synthétisée à partir du radar de la mission *Magellan* (©NASA).

de structures linéaires qu'il appelle « canaux ». Lui-même est prudent quant à l'interprétation de ce résultat mais d'autres le sont moins. En particulier l'astronome américain Perceval Lowell n'hésite pas à voir dans ces structures la preuve d'une vie intelligente : ces canaux seraient construits par les Martiens pour échapper à la sécheresse. . .

D'autres astronomes sont plus sceptiques : c'est le cas d'Eugène Antoniadi qui, accumulant les observations de son côté, montre dans les années 1920 que les canaux ne sont que le résultat d'une illusion d'optique liée à la qualité instrumentale insuffisante des observations antérieures. Il en faut plus pour tuer le mythe d'une vie intelligente sur Mars ; celui-ci va perdurer jusqu'à l'arrivée des premières sondes spatiales dans les années 1960. Mais le débat n'est pas clos pour autant. Les exobiologistes sont toujours à la recherche de traces de vie, passée ou présentes, sur la planète rouge.



Figure 7.5. La surface d'Europe photographée par la caméra de la sonde *Galileo* (©NASA).

2.1 La vie sur Mars ?

Pourquoi Mars ? Parce que c'est la planète qui ressemble le plus à la Terre, avec ses déserts de sable, ses calottes polaires et ses cycles saisonniers. Certes, son atmosphère de gaz carbonique est très ténue et l'eau liquide ne peut séjourner à sa surface dans les conditions de pression et de température actuelles. Mais cela n'a pas été le cas dans le passé (voir chapitres 4, paragraphe 4.2 et 4, paragraphe 4.3) : nous avons tout un faisceau d'indices qui suggèrent que l'eau a coulé sur Mars dans un passé lointain, et que son atmosphère a été plus dense et plus humide qu'aujourd'hui. C'est pourquoi, dès le début de l'ère spatiale, les astronomes se sont mis en quête de traces de vie sur Mars. La première mission consacrée à cet objectif a été la mission *Viking*, en opération dans les années 1970, constituée de deux orbiteurs identiques et de deux modules de descente, également identiques. L'ensemble de la mission a parfaitement fonctionné, et est restée dans les annales de l'exploration spatiale comme un exploit technologique ; les données accumulées sur plusieurs années par l'ensemble des instruments a constitué une base de référence encore utilisée par les planétologues aujourd'hui. Seule ombre au tableau : les instruments des modules de descente n'ont détecté aucune trace de vie. Plusieurs expériences spécifiques étaient conçues pour observer et analyser le dégazage du sol en présence d'un milieu nutritif, et pour rechercher une possible activité de photosynthèse d'éventuels constituants

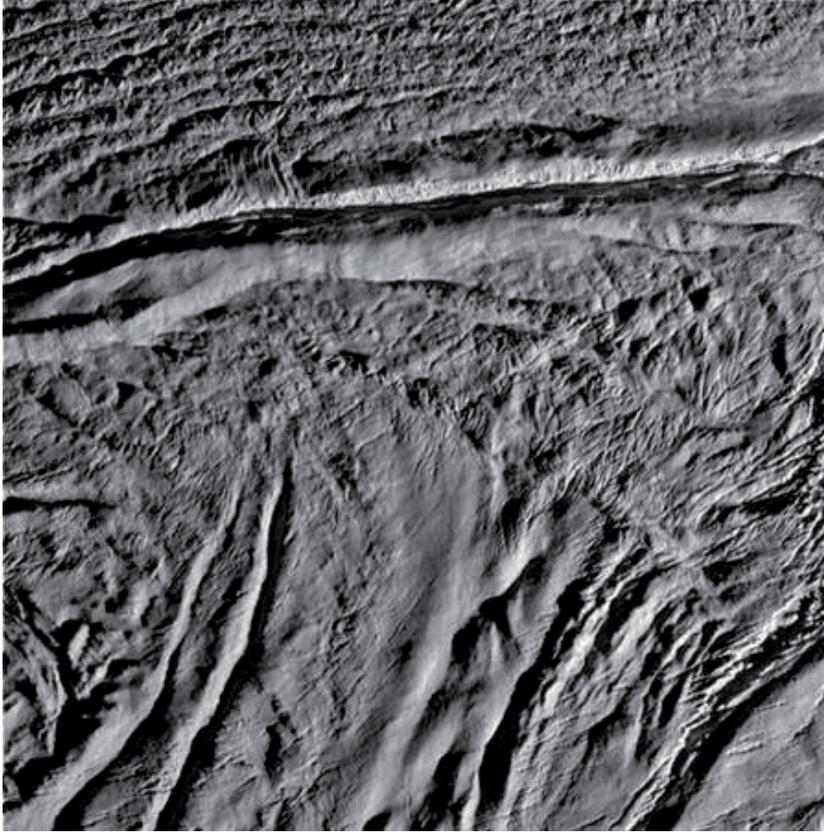


Figure 7.6. Cette région proche du pôle sud d'Encelade, prise par la sonde *Cassini* le 11 août 2008, montre des failles et des craquelures qui témoignent d'une activité tectonique récente (©NASA).

carbonés. En fait ils ont mis en évidence l'absence totale de molécules organiques à la surface de Mars. L'explication la plus plausible est que le rayonnement ultraviolet solaire qui arrive jusqu'au sol détruirait très rapidement toute molécule organique. Il ne faut donc pas chercher des traces de vie sur Mars dans des régions exposées au Soleil ; c'est la leçon de *Viking* qui a été prise en compte dans les missions ultérieures.

Après une décennie marquée par plusieurs échecs, l'exploration spatiale de Mars a repris à la fin des années 1990, alternant l'envoi d'orbiteurs, de modules de descente et de véhicules robotisés. De multiples observations ont confirmé ce que les premières images de la surface envoyées par *Mariner 9* puis par *Viking* suggéraient déjà : l'eau a coulé dans le passé de la planète (voir chapitre 4, paragraphe 4.2). En particulier la sonde *Mars Odyssey*, en 2002, a détecté la présence de glace d'eau sous les calottes polaires pérennes de Mars ; la sonde *Mars Express* ainsi que le robot

Masse de l'étoile (exprimée en masses solaires)

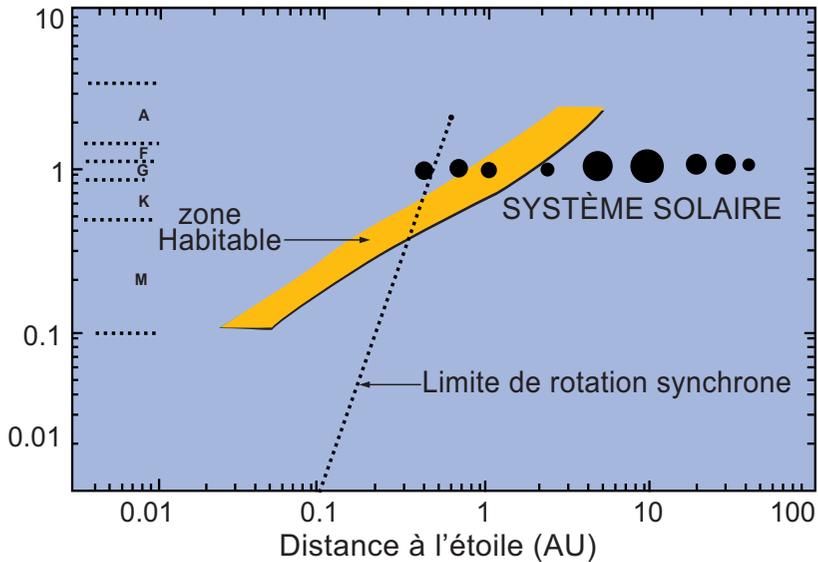


Figure 7.7. La zone d'habitabilité d'une étoile en fonction de son type spectral.

Opportunity ont mis en évidence la présence de sulfates, sans doute formés en présence d'eau liquide ; des silicates hydratés ont été trouvés dans les terrains les plus anciens. L'eau a donc coulé sur Mars mais à quel moment et pendant combien de temps ? Ce temps a-t-il pu être suffisant pour permettre à la vie d'apparaître ? C'est la question qui reste ouverte. Les missions spatiales futures auront pour objectif la recherche de sites où l'eau a pu être liquide, dans l'espoir d'y rechercher des traces de vie fossile.

2.2 Un océan passé sur Vénus ?

A priori, Vénus n'est pas un bon candidat pour l'exobiologie. Avec son atmosphère dense de gaz carbonique, sa température infernale et ses pluies d'acide sulfurique, elle constitue l'un des milieux les plus inhospitaliers que l'on puisse imaginer. . . Pourtant, la planète au début de son histoire a pu être très différente de ce que nous connaissons. Rappelons-nous en effet qu'au début de son histoire, le rayonnement du jeune Soleil était plus faible qu'aujourd'hui ; les modèles d'évolution stellaire nous indiquent qu'il était environ 70 % de sa valeur actuelle. Située à 0,7 UA du Soleil, la température d'équilibre de Vénus (en supposant pour sa surface un albédo de 0,3) a dû être d'environ 300 K, ce qui permettait à l'eau (dont nous savons qu'elle

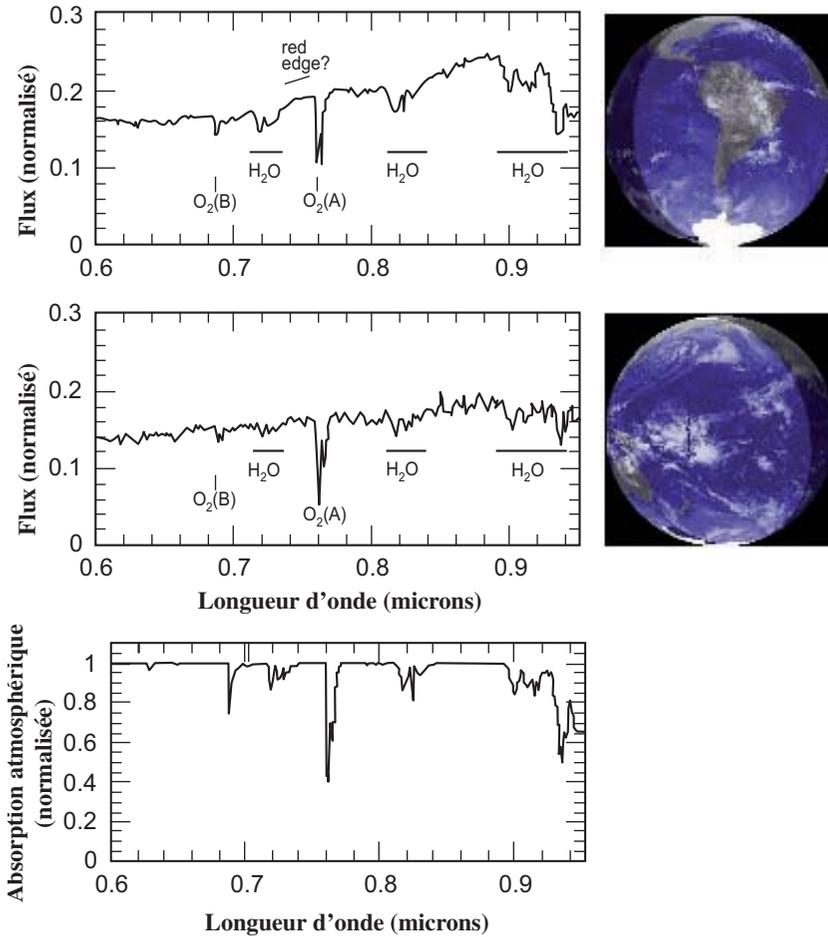


Figure 7.8. La signature spectrale due à la présence de chlorophylle, à 0,7 microns, a été recherchée dans la lumière cendrée de la Lune, c'est-à-dire le rayonnement du côté jour de la Terre réfléchi par la face sombre de la Lune. Une légère différence entre les spectres en présence de continent (en haut) et côté océan (en bas) est peut-être due à la présence de végétation (d'après Seager *et al.*, 2005).

était présente en abondance, voir 3, paragraphe 2.2) d'être sous forme liquide. Mais l'augmentation inexorable du flux solaire aura peu à peu entraîné la vaporisation des océans puis leur échappement par photodissociation de l'eau.

À la différence de la Terre, Vénus n'a conservé aucun vestige de son passé lointain, car le volcanisme a effacé de sa surface toute trace antérieure au dernier milliard d'années. Nous ne saurons donc sans doute jamais si Vénus a pu héberger la vie. . .

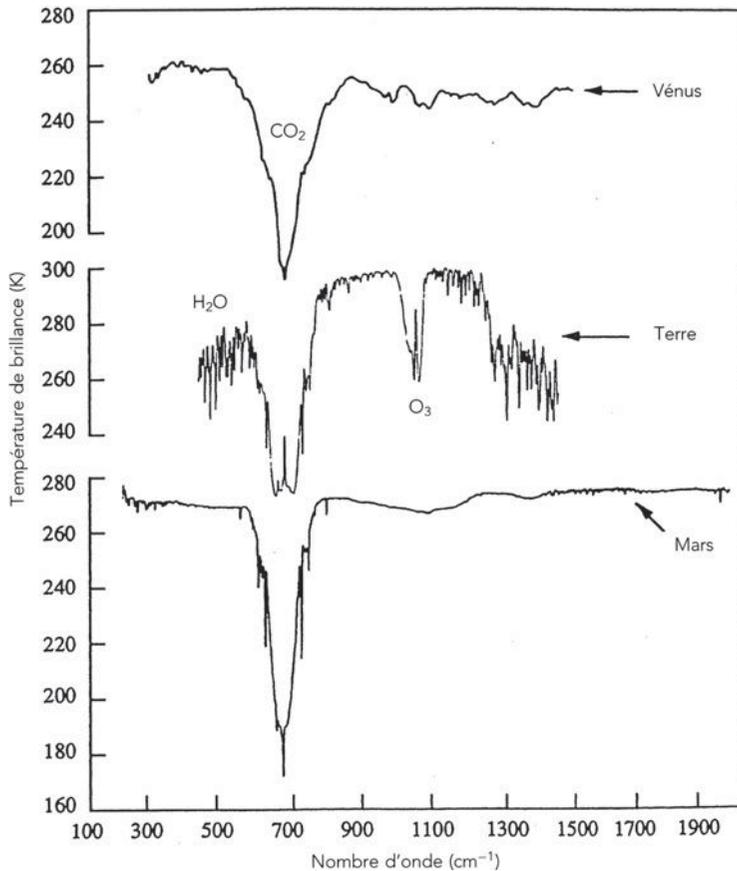


Figure 7.9. Le spectre thermique des planètes telluriques. La signature de l’ozone est présente à 1040 cm^{-1} , c’est-à-dire à une longueur d’onde de 9,5 microns (d’après R. Hanel *et al.*, 1992).

2.3 Un océan sous la surface d’Europe ?

Les atmosphères et les surfaces des planètes telluriques ne sont pas le seul milieu où l’on puisse rechercher l’eau liquide. Il existe une autre région, mise en évidence par le diagramme de phase de l’eau : la phase liquide existe aussi à haute pression et à haute température (jusqu’à quelques centaines de bars et quelques centaines de Kelvin). On rencontre ces conditions dans l’intérieur des satellites du système solaire extérieur, dont nous avons vu qu’ils étaient riches en eau.

Le premier cas intéressant pour les exobiologistes est celui d’Europe, deuxième satellite galiléen. Nous l’avons vu (chapitre 5, paragraphe 3.1), les sondes spatiales *Voyager* et *Galileo* ont fourni plusieurs indices de la présence d’un océan liquide d’eau salée sous sa surface de glace. Comment expliquer sa présence ? Les effets de marée

liés à la présence de Jupiter, et à sa résonance avec Io et Ganymède, fournissent assez d'énergie, selon les modèles de structure interne, pour maintenir une température interne suffisante pour que l'eau soit liquide. Dans le cas de Io, l'énergie reçue est encore plus forte, mais elle a eu pour effet de générer un volcanisme actif qui a eu pour effet la disparition de l'eau. Dans le cas de Ganymède et Callisto, les modèles de structure interne n'excluent pas la possibilité d'une couche d'océan liquide dans leur intérieur, mais celle-ci, si elle existe, est vraisemblablement piégée entre deux couches de glace. L'intérêt d'Europe, pour les exobiologistes, est que l'océan d'eau liquide, toujours selon les modèles, pourrait être suffisamment profond pour être en contact direct avec le noyau silicaté du satellite. Les implications pourraient être importantes pour le développement d'une chimie complexe.

Comment vérifier l'existence de l'océan interne d'Europe et l'explorer ? Tout le problème réside dans l'épaisseur de la couche de glace qui le recouvre, que nous ignorons aujourd'hui. Selon les modèles, elle serait au moins de plusieurs kilomètres et pourrait même atteindre plusieurs dizaines de kilomètres... Le forage de cette couche de glace n'est donc pas pour demain. En premier lieu, des expériences de gravimétrie et de sondage radar tenteront de confirmer l'existence de l'océan et de mesurer l'épaisseur de la couche de glace. C'est l'un des objectifs de la mission EJSM (*Europa and Jupiter System Mission*) actuellement à l'étude à l'ESA et à la NASA. D'autres étapes plus ambitieuses pourront être envisagées pour les décennies à venir.

2.4 Les satellites glacés de Saturne

D'autres satellites extérieurs pourraient eux aussi posséder un océan d'eau dans leur intérieur, si les forces de marée causées par leur proximité à leur planète leur fournissent l'énergie suffisante. Encelade, satellite de Saturne situé à proximité de l'anneau E, semble bien être dans ce cas (voir Chapitre 5, paragraphe 3.3). Les images prises par la sonde *Cassini* et les mesures infrarouges de la température de surface ont montré que le pôle sud était le siège d'une activité cryovolcanique se traduisant par l'éjection de plumes. L'analyse spectroscopique de ces plumes a mis en évidence une grande quantité de vapeur d'eau. Situé à quatre rayons saturniens de la planète, Encelade est en résonance 2: 1 avec le satellite Dioné ; cependant le calcul des effets de marée conduit à une énergie dissipée nettement insuffisante, compte tenu de la petite taille de l'objet. Le cryovolcanisme actif d'Encelade, qui est sans doute la source de matière qui alimente l'anneau E, est donc encore mal compris.

2.5 Une chimie prébiotique sur Titan ?

Titan, nous l'avons vu, est un satellite extérieur exceptionnel, avec son atmosphère dense dominée par l'azote et une pression de surface comparable à celle de la Terre

(voir chapitre 5, paragraphe 3.2). Si Titan intéresse tant les astronomes, c'est parce que ceux-ci ont découvert en 1981, grâce à la mission *Voyager*, la présence d'un grand nombre d'hydrocarbures et de nitriles. D'autres observations ont ensuite complété la liste avec en particulier HC_3N et CH_3CN , deux molécules dont la présence est prédite par les expériences de laboratoire dans la synthèse de molécules plus complexes à partir de molécules simples, en présence d'une source d'énergie. Titan est donc apparu aux exobiologistes comme un laboratoire potentiel de chimie prébiotique, peut-être comparable à ce qu'a pu être la Terre primitive. Il y cependant deux différences importantes à prendre en compte. La première est la très basse température qui règne sur Titan (93 K en surface, 70 K à la tropopause), ce qui a pour effet de ralentir considérablement toutes les réactions chimiques. La seconde est la composition atmosphérique de la Terre primitive, qui nous est mal connue, mais qui était sans doute à base de gaz carbonique, bien loin de l'atmosphère réductrice utilisée dans les expériences de synthèse des acides aminés. Il n'empêche : l'intérêt suscité par ce satellite hors du commun a été le moteur de l'ambitieuse mission *Cassini-Huygens* d'exploration du système de Saturne (voir chapitre 5, paragraphe 3.2). On s'attendait à découvrir un grand nombre de nouvelles molécules complexes. Il n'en a rien été mais la surprise est venue de l'ionosphère de Titan : le spectromètre de masse de la sonde *Huygens* a détecté un très grand nombre d'ions complexes d'hydrocarbures et de nitriles, avec des masses atomiques allant jusqu'à plusieurs centaines. Ce n'est donc pas dans l'atmosphère neutre que se produit la chimie complexe la plus active, mais à très haute altitude. Il est vraisemblable que ces ions complexes forment des condensats alimentant les fameux aérosols, de couleur jaune-orangé, qui masquent la surface de Titan. Il reste à en analyser la composition plus en détail. L'exploration du système de Saturne continue avec les observations de l'orbiteur de *Cassini* et celles-ci nous réserveront sans doute encore bien des surprises. À plus long terme, les astronomes travaillent à la préparation d'une mission encore plus ambitieuse d'exploration du système de Saturne, TSSM (*Titan and Saturn System Mission*), qui prévoit l'envoi d'un ballon dans l'atmosphère de Titan et une exploration rapprochée d'Encelade.

3 La vie dans les exoplanètes ?

Quittons maintenant le système solaire : plus question d'exploration in situ. Nous devons étudier les exoplanètes par sondage à distance. Il nous reste à définir les méthodes les plus propices à identifier les exoplanètes les plus aptes à abriter la vie, et à trouver des diagnostics susceptibles d'y mettre en évidence la présence de vie.

3.1 La zone d'habitabilité

Revenons au critère principal dont nous disposons, celui de la présence d'eau liquide. Celle-ci dépend de la température du milieu, et donc de plusieurs paramètres que nous avons défini ci-dessus (chapitre 6, paragraphe 4) : la distance à l'étoile, le type spectral de l'étoile et l'albédo de la planète. En utilisant une valeur moyenne de l'albédo (par exemple 0,3, valeur typique dans le système solaire), on définit ainsi pour chaque étoile, une « zone habitable » (Fig. 7.7) : il s'agit d'un anneau entourant l'étoile dans lequel la température est telle que l'eau peut s'y trouver à l'état liquide. Pour une étoile de type solaire, la région s'étend de 0,9 à 1,3 AU. Elle s'approche jusqu'à 0,1 UA dans le cas des étoiles naines et s'éloigne jusqu'à 10 UA dans le cas des étoiles les plus massives.

Il faut mentionner tout de suite les limites de la notion de « zone habitable ». Prenons le cas de Vénus par exemple : à cause de l'effet de serre galopant dont elle a été l'objet, la planète a une température de surface bien supérieure à la température d'équilibre correspondant à sa distance au Soleil. Nous avons mentionné que l'eau liquide avait coulé sur Mars dans le passé, et que Vénus pouvait aussi avoir abrité un océan au début de son histoire ; or les deux planètes sont hors de la zone habitable définie actuellement. Autre entorse à la règle : nous avons mentionné les « niches écologiques » que pourraient constituer les océans internes de certains satellites extérieurs : or ceux-ci se trouvent bien loin de la zone d'habitabilité du système solaire. La notion de zone habitable n'est donc rien d'autre qu'un premier indice, certainement trop simple, pour nous guider dans une recherche où, justement, nous en sommes singulièrement dépourvus. . .

3.2 La recherche des biomarqueurs

Supposons que nous ayons identifié une exoplanète située dans la zone habitable de son étoile. Comment aller plus loin ? C'est l'étude de la composition chimique de son atmosphère qui peut nous renseigner sur de possibles signes de vie. Pour ce faire, les exobiologistes ont défini ce que l'on appelle des « biomarqueurs » : ce sont des molécules simples dont la présence pourrait être associée à la présence de vie. Ils sont arrivés à la conclusion que la détection simultanée de CO_2 , H_2O et O_3 serait un indice très fort de l'existence d'une activité biologique. Pourquoi O_3 ? parce que l'ozone provient de la photodissociation de O_2 et que l'oxygène lui-même n'est pas facilement détectable spectroscopiquement. L'ozone présente en revanche une signature caractéristique à 9,5 microns, aisément identifiable dans le spectre de la Terre (Fig. 7.9) ; quant à CO_2 et CH_4 , ils sont spectroscopiquement très actifs et dominent les spectres planétaires (voir chapitre 6, paragraphe 5).

Franchissons encore un pas : pour rechercher la vie sur une exoplanète, le moyen le plus sûr n'est-il pas d'étudier directement sa surface ? Là aussi, la spectroscopie peut nous aider. Le spectre de la végétation terrestre dans l'infrarouge proche, aux environs de 0,7 microns, une signature caractéristique qui se traduit par une rupture de pente dans le continu du spectre (Fig. 7.8). Pourrait-on observer une telle signature sur une exoplanète ? La tâche n'est pas simple, en particulier à cause de la présence vraisemblable d'un système nuageux de vapeur d'eau qui risquerait de masquer partiellement la surface. À titre exploratoire, des astronomes ont tenté de mesurer la lumière cendrée de la Lune (c'est-à-dire la lumière émise par la Terre réfléchiée par le côté sombre de la Lune, observée au moment de la nouvelle lune), mais les essais montrent la difficulté de la mesure. La détection de végétation à la surface d'une exoplanète nécessite, outre la spectroscopie, l'imagerie du disque, et non plus seulement sa mesure en flux intégré. Des simulations numériques ont synthétisé l'image de la Terre à une distance de 10 parsecs, avec différents pouvoirs de résolution spatiale. En utilisant une surface collectrice de 80 000 m² (soit l'équivalent d'une centaine de télescopes de 30 m), une ligne de base de plusieurs milliers de kilomètres, et en observant la lumière visible de l'exoplanète pendant environ une demi-heure, il serait théoriquement possible de mettre en évidence des continents et les grandes structures nuageuses depuis une distance de 10 parsecs. Il faudrait ensuite obtenir le spectre visible de chaque pixel pour y rechercher la fameuse signature de la végétation. Nous sommes dans le futur lointain, mais pas complètement dans la science fiction. Les projets d'interférométrie sont dans les cartons, et les astronomes espèrent qu'ils pourront voir le jour dans les décennies à venir.

4 À la recherche de mondes habités

La recherche d'éventuelles civilisations extraterrestres n'a pas attendu la découverte des exoplanètes. Dès les années 1970, les astronomes Frank Drake et Carl Sagan ont tenté de définir par une équation la probabilité d'existence de planètes dotées de civilisations technologiquement avancées au sein de notre Galaxie. N étant le nombre de ces planètes, l'équation s'écrit comme suit :

$$N = N^* \cdot F_{pl} \cdot F_{habit} \cdot F_{life} \cdot F_{civil} \cdot \langle T_{civil} \rangle / T^*$$

Dans cette équation, appelée Équation de Drake, N^* est le nombre d'étoiles peuplant notre galaxie ; F_{pl} est la fraction d'entre elles possédant une planète ; F_{habit} est la fraction d'entre elles où la vie est apparue ; F_{civil} est la fraction d'entre elles ayant atteint un niveau de civilisation capable de communiquer ; $\langle T_{civil} \rangle$ est la durée de vie moyenne d'une civilisation technologiquement avancée, et T^* est la durée de vie des étoiles.

Nous connaissons N^* (environ 10^9) et T^* (environ 10 milliards d'années pour une étoile de types solaire). Depuis 1995, nous avons une estimation de F_{pl} (entre 0,1 et 0,2). En revanche nous ignorons tout des autres facteurs !

Observées depuis l'extérieur, les émissions radio émises par la Terre manifestent la présence d'une civilisation technologiquement avancée. Depuis plusieurs décennies, les radioastronomes ont étudié la possibilité de communiquer avec d'éventuelles civilisations extraterrestres au moyen de signaux radio. Pour porter leurs messages, ils ont sélectionné la transition de l'hydrogène atomique à la longueur d'onde de 21 cm, observable à travers l'atmosphère terrestre, et ont entrepris de surveiller en permanence le ciel à cette longueur d'onde au moyen des radiotélescopes les plus puissants. Le projet SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*) est né aux États-Unis en 1984 sur la base de ce concept. Initialement financé par la NASA, il fonctionne aujourd'hui sur fonds privés dans le cadre d'une vaste collaboration internationale. Un autre projet de recherche appelé CETI (*Communication with Extraterrestrial Intelligence*) a pour objectif, non pas de recevoir des messages venant de l'extérieur, mais d'émettre des signaux à l'intention des civilisations extérieures. Ainsi Frank Drake, au moyen du radiotélescope d'Arecibo, a envoyé en 1974 un message codé en direction de l'amas globulaire M13.

Toutes ces recherches ont été jusqu'à présent infructueuses, mais elles témoignent de l'intérêt collectif pour la recherche d'une vie extraterrestre, intérêt qui va bien au-delà de la communauté scientifique. Un autre exemple en est donné par les messages emportés par les sondes *Voyager* qui, maintenant situées à plus de 100 UA du Soleil, continuent de s'éloigner vers l'extérieur du système solaire. . .

Annexe

Tab. A.1. Caractéristiques orbitales des planètes du système solaire.

Nom	Demi-grand axe (UA)	Excentricité	Inclinaison sur l'écliptique (°)	Période de révolution sidérale (année)
Mercure	0,387	0,206	7,00	0,241
Vénus	0,723	0,007	3,39	0,615
Terre	1,000	0,017	0,00	1,000
Mars	1,524	0,093	1,85	1,881
Jupiter	5,203	0,048	1,30	11,856
Saturne	9,537	0,054	2,48	29,424
Uranus	19,191	0,047	0,77	83,747
Neptune	30,069	0,008	1,77	163,723

Tab. A.2. Les principaux satellites du système solaire.

Planète	Satellite	Année de découverte	Distance à la planète (R _p)	Rayon (km)	Inclinaison (°)	Densité (g/cm ³)
Terre	Lune	–	60,27	1737	5,2	3,34
Mars	Phobos	1877	2,76	11	1,1	1,87
	Deimos	1877	6,91	6	1,8	2,25
Jupiter	Amalthée	1892	2,52	83	0,39	3,1
	Io	1610	5,78	1822	0,04	3,53
	Europe	1610	9,40	1560	0,47	3,01
	Ganymède	1610	15,0	2631	0,17	1,94
	Callisto	1610	26,3	2410	0,19	1,83
Saturne	Janus	1980	2,51	88	0,16	0,66
	Mimas	1789	3,07	198	1,57	1,14
	Encelade	1789	3,95	250	0,01	1,00
	Tethys	1684	4,88	530	0,17	1,00
	Dioné	1684	6,27	559	0,00	1,50
	Rhéa	1672	8,74	764	0,33	1,24
	Titan	1655	20,25	2575	1,63	1,88
	Hypérion	1848	24,55	133	0,57	1,1
	Japet	1671	59	718	7,57	1,02
	Phoebé	1898	216	110	174,7	2,3
Uranus	Miranda	1948	5,12	236	4,34	1,20
	Ariel	1851	7,55	579	0,04	1,66
	Umbriel	1851	10,5	585	0,13	1,40
	Titania	1787	17,3	789	0,08	1,71
	Obéron	1787	23,1	761	0,07	1,63
Neptune	Triton	1846	14,6	1353	156,8	2,06
	Néréide	1949	229	170	7,23	1,5

Tab. A.3. Caractéristiques physiques des planètes du système solaire.

Nom	Masse (M_T)	Rayon équatorial (R_T)	Densité (g/cm^3)	Période de rotation	Obliquité ($^\circ$)	T_s (K)	P_s (atm)	Composition atmosphérique
Mercure	0,055	0,382	5,43	58,65 j	0	100/700	–	–
Vénus	0,815	0,949	5,20	243,0 j	177,33	730	94	96 % CO_2 , 3 % N_2 + CO, SO_2 , Ar, H_2O ...
Terre	1,000	1,000	5,52	23,93 h	23,45	288	1	78 % N_2 , 21 % O_2 + Ar, CO_2 , H_2O ...
Mars	0,107	0,532	3,93	24,62 h	25,19	150/300	0,006	95 % CO_2 , 3 % N_2 + Ar, O_2 , CO, H_2O ...
Jupiter	317,9	11,21	1,33	9,92 h	3,08	110 à 0,1 bar		86 % H_2 , 13 % He + CH_4 , ...
Saturne	95,16	9,45	0,69	10,65 h	26,73	90 à 0,1 bar		88 % H_2 , 11 % He + CH_4 , ...
Uranus	14,53	4,00	1,32	17,24 h	97,92	55 à 0,1 bar		84 % H_2 , 15 % He + CH_4 , ...
Neptune	17,14	3,88	1,64	16,11 h	28,80	55 à 0,1 bar		81 % H_2 18 % He + CH_4 , ...