

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 k' r ci g' k p v g p v k q p c m { ' i g h v ' d r e p m

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 ku' r 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