

PLANÉTOLOGIE

Géologie des planètes et des satellites

Christophe Sotin

Professeur au Laboratoire de Planétologie
et Géodynamique de l'université de Nantes (LPGN)

Olivier Grasset

Professeur au Laboratoire de Planétologie
et Géodynamique de l'université de Nantes (LPGN)

Gabriel Tobie

Chargé de recherches CNRS au Laboratoire de Planétologie
et Géodynamique de l'université de Nantes (LPGN)

Préface de **Pierre Encrenaz**
Membre de l'Académie des Sciences

DUNOD

Illustration de couverture : Figures d'érosion dans *Ius Chasma*, un des nombreux canyons de *Valles Marineris*, sur la planète Mars. Les structures linéaires orientées vers le Nord sont espacées de quelques dizaines de mètres. La distance horizontale de l'image est d'environ 500 mètres. Source NASA, mission *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO).

© Dunod, Paris, 2009, 2020 pour la nouvelle présentation 11
rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-082059-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	ix
AVANT-PROPOS	xi
CHAPITRE 1 • LE SYSTÈME SOLAIRE	1
1 Le Soleil	1
2 Les objets du Système solaire	4
3 Les petits corps du Système solaire	8
Exercices	10
CHAPITRE 2 • L'EAU DANS LE SYSTÈME SOLAIRE	11
1 Le constituant H ₂ O	11
2 Où est l'eau ?	20
CHAPITRE 3 • LES MISSIONS SPATIALES	29
1 Histoire de l'exploration du Système solaire	29
2 Les enjeux du XXI ^e siècle	35
CHAPITRE 4 • L'INSTRUMENTATION GÉOLOGIQUE	39
1 L'observation de la surface	39
2 Les techniques d'étude de la structure interne	49
Exercices	53

PREMIÈRE PARTIE

LES PROCESSUS D'ÉVOLUTION DES PLANÈTES

CHAPITRE 5 • FORMATION DES PLANÈTES ET DE LEURS SATELLITES : ACC RÉTION ET DIFFÉRENTIATION	57
1 Formation du Système solaire	57
2 De la condensation à l'accrétion	64

Table des matières

3	Assemblage, fusion et différenciation	68
4	Les météorites : un témoignage précieux	71
5	Vers notre système actuel... ..	74
	Exercices	81
CHAPITRE 6 • LA STRUCTURE INTERNE DES PLANÈTES		83
1	Composition des couches planétaires	83
2	Les modèles de structure interne	89
	Exercices	98
CHAPITRE 7 • CONTRAINTES ET DÉFORMATIONS DES MATÉRIAUX PLANÉTAIRES		101
1	Notion de contrainte et de déformation	101
2	Lois rhéologiques	104
3	Mécanisme microscopique responsable du fluage	112
4	Propriétés mécaniques des silicates	115
5	Propriétés mécaniques des glaces	119
6	Profil rhéologique et transition ductile-fragile dans un contexte planétaire	123
	Exercices	126
CHAPITRE 8 • TRANSFERTS THERMIQUES ET MAGMATISME		127
1	Introduction	127
2	La conduction thermique appliquée aux lithosphères	129
3	La convection dans les manteaux des planètes	138
	Exercices	151
CHAPITRE 9 • CHAMP MAGNÉTIQUE DES PLANÈTES		155
1	Introduction	155
2	Le champ magnétique de la Terre	156
3	Le champ magnétique rémanent	162
	Exercices	164

CHAPITRE 10 • CHAMP DE GRAVITÉ ET FORMES DES PLANÈTES ET DE LEURS SATELLITES NATURELS	165
1 Notions de base	165
2 Figure théorique d'équilibre hydrostatique	175
3 Topographie et géoïde	182
Exercices	192
CHAPITRE 11 • PROCESSUS DE SURFACE : CRATÉRISATION, VOLCANISME, ALTÉRATION ...	193
1 Cratères d'impact	193
2 Le volcanisme	198
3 Altération et érosion des surfaces	201
Exercices	210

SECONDE PARTIE

HISTOIRE GÉOLOGIQUE DES PLANÈTES ET DES SATELLITES D'APRÈS LES DONNÉES DES MISSIONS SPATIALES

CHAPITRE 12 • LA PLANÈTE TERRE	213
1 Les enveloppes de la Terre	213
2 Les processus d'échanges entre les enveloppes	223
Exercices	229
CHAPITRE 13 • VÉNUS	233
1 Caractéristiques générales	233
2 Le rôle de l'eau dans l'évolution de Vénus	239
3 Pourquoi Vénus n'a-t-elle pas de champ magnétique ?	241
4 Mécanisme de renouvellement de la surface de Vénus	242
Exercices	244
CHAPITRE 14 • MARS	247
1 Introduction	247
2 L'atmosphère	251
3 La géologie de surface	254

Table des matières

4	Structure et dynamique interne	262
5	Évolution géologique de Mars	267
	Exercices	270
CHAPITRE 15 • MERCURE ET LA LUNE		273
1	Les structures observées en surface	273
2	Datation des surfaces	276
3	Composition minéralogique des roches	277
4	Structures internes	279
	Exercices	280
CHAPITRE 16 • LES SATELLITES GALILÉENS DE JUPITER		283
1	Caractéristiques générales	283
2	Io : une lune très active	288
3	Europe : un océan sous sa surface glacée ?	291
4	Le champ magnétique de Ganymède	298
	Exercices	299
CHAPITRE 17 • LES SATELLITES DE SATURNE		301
1	Titan : une autre Terre ?	301
2	Encelade : une petite lune très active	307
3	Les lunes intermédiaires de Saturne	311
	Exercices	315
CHAPITRE 18 • LES PLANÈTES NAINES		319
1	Les gros corps de la ceinture d'astéroïdes : Cérès, Vesta et Pallas	319
2	Pluton, Charon et les gros objets de la ceinture de Kuiper	321
	Exercices	325
SOLUTION DES EXERCICES		327
OUVRAGES DE RÉFÉRENCE		343
INDEX		345

PRÉFACE

Ce livre remarquable arrive à un moment critique où une certaine désaffection pour la recherche fondamentale est évidente parmi les jeunes étudiant(e)s de nos sociétés occidentales. Il montre comment une approche pluridisciplinaire (géophysique, biologie, chimie) permet d'expliquer les observations fascinantes des composantes du système solaire, et de le comparer aux autres systèmes planétaires extrasolaires découverts récemment. La révolution amenée par les techniques novatrices de l'optique adaptative, des sondes spatiales, du traitement des images nous fait découvrir une réalité qui dépasse l'imagination.

Qui mieux que Christophe Sotin, Olivier Grasset et Gabriel Tobie, acteurs majeurs de cette planétologie comparée, pouvaient décrire de façon compréhensible l'ensemble des phénomènes physiques, géologiques, astronomiques et biologiques mis en évidence par ces observations. Qu'ils soient remerciés d'avoir écrit un ouvrage aussi passionnant dont les illustrations montrent la beauté et la poésie de la Planétologie, et nous interpellent sur l'unicité ou non de planètes habitables.

Pierre Encrenaz
Professeur de Physique
Membre de l'Académie des Sciences

AVANT-PROPOS

En 50 ans, la connaissance des planètes a considérablement évolué avec les progrès des télescopes et surtout les observations des sondes spatiales. Leur étude associe astronomes et géologues pour une meilleure compréhension de la composition et de la dynamique des différentes enveloppes qui constituent une planète. Les modèles terrestres ont été appliqués pour expliquer les observations des planètes telluriques (Mars, Vénus, Mercure) et des satellites des planètes géantes. En effet, les découvertes comme le volcanisme de Io, le champ magnétique de Ganymède, le panache d'Encelade, l'atmosphère de Titan, l'océan d'Europe nous démontrent que ces satellites ont de nombreuses similarités avec les planètes telluriques. Tous ces corps du système solaire nécessitent donc des connaissances en géologie.

En 2008, la communauté européenne peut travailler avec les données des missions *Mars-Express*, *Venus-Express* et *Cassini-Huygens*. C'est la première fois que les scientifiques ont tant de données à leur disposition. Avec *Mars-Express*, l'agence spatiale européenne (ESA, *European Space Agency*) mettait pour la première fois un satellite artificiel en orbite autour d'une autre planète que la Terre (en décembre 2003). Avec *Huygens*, l'ESA réussissait à faire atterrir une sonde à la surface d'un objet du système solaire (en janvier 2005). Dans le chapitre sur les missions, nous montrerons que dans l'avenir se présentent de grands projets tels que l'exploration de la surface de Mars, l'étude de l'océan d'Europe et le retour sur Titan.

La découverte de planètes extrasolaires ouvre une nouvelle ère en Planétologie. Il va devenir possible non seulement de comparer la Terre avec les planètes et grands satellites des planètes géantes mais aussi de comparer le système solaire avec les systèmes extrasolaires. L'acquisition des futures données sur la composition et la morphologie des surfaces planétaires et sur leur structure interne devrait permettre de mieux comprendre l'unicité de la Terre et pourquoi la vie a pu s'y développer. Le but de cet ouvrage est donc de décrire quelques processus géologiques puis de les appliquer aux planètes après une introduction sur les objets du système solaire et les moyens à notre disposition pour les étudier.

Le Système solaire est constitué de son étoile (le Soleil), de planètes, de satellites, d'astéroïdes et de comètes, et de poussières. Avant de décrire les planètes, nous allons donner quelques généralités sur le Soleil qui influence non seulement la dynamique des planètes mais aussi les techniques utilisées pour l'étude des atmosphères et surfaces planétaires. L'objet de ce chapitre est de fournir les données générales tant physiques que chimiques.

1 LE SOLEIL

À lui seul le Soleil contient 99,86 % de la masse du Système solaire et est composé principalement d'hydrogène et d'hélium. C'est aussi le corps le plus grand du Système solaire ($R_S = 700\,000\text{ km}$; un million de fois plus volumineux que la Terre !). Au centre du Soleil, la température est suffisante pour permettre des réactions de fusion thermonucléaire. L'énergie ainsi produite est transférée vers la surface où elle est évacuée par radiation. La lumière ainsi émise fournit une puissance de $3,83\,10^{26}\text{ W}$, aussi appelée luminosité L , sous forme d'un flux de photons. Chaque photon contient une énergie $h\nu$ où h est la constante de Planck ($6,626\,10^{-34}\text{ J.s}$) et ν est la fréquence du photon ($\nu = c/\lambda$ avec c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde). Sur l'ensemble du spectre électromagnétique (depuis les rayons X jusqu'au domaine radio), les étoiles ne rayonnent efficacement que depuis les ultraviolets jusqu'à l'infrarouge et présentent un maximum d'émission dans le domaine visible (figure 1.1). Le spectre solaire a été mesuré par quelques sondes spatiales et par les spectromètres à la surface de la Terre. Les molécules atmosphériques et les minéraux des surfaces planétaires vont absorber sélectivement certains photons, ce qui permet de caractériser la composition atmosphérique ainsi que la composition de la surface (figure 1.1).

Le spectre solaire est assez proche d'un spectre de corps noir, c'est-à-dire que sa luminance (en $\text{W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$) peut être calculée pour chaque longueur d'onde λ à partir de la loi de Planck :

$$B(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{(e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (1.1)$$

avec $k = 1,38\,10^{-23}\text{ J}$ et K la constante de Planck. Dans la figure 1.1, cette courbe théorique est représentée pour $T = 5\,900\text{ K}$ et reproduit fidèlement le spectre solaire, abstraction faite des bandes d'absorption liées aux compositions de l'atmosphère. C'est donc une mesure indirecte de la température de surface du Soleil (voir exercice 1.2.a). Le flux solaire (ou éclat) correspond à l'intégrale de l'équation (1.1) sur l'ensemble du spectre électromagnétique. En intégrant cet éclat sur l'ensemble de

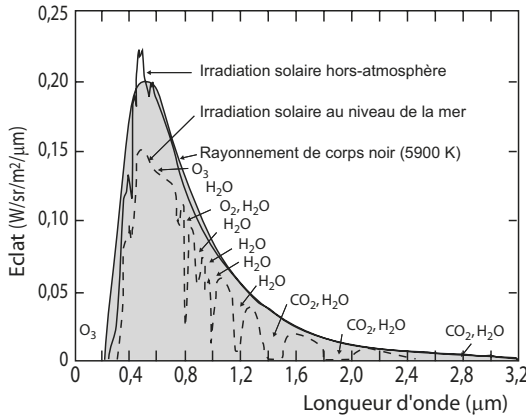


Figure 1.1
Spectre solaire comparé à la courbe du corps noir à 5 900 K et au spectre observé à la surface de la Terre.

la surface solaire, on retrouve la luminosité L . Dans l'hypothèse d'un corps noir, la relation entre l'éclat E et la température de surface T est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$E = \sigma T^4 \quad (1.2)$$

avec $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$.

Les photons solaires absorbés par la surface des planètes sont une composante importante du contrôle de la température de surface des planètes. À une distance d du Soleil, la lumière fournit un flux total :

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (1.3)$$

la puissance totale interceptée et absorbée par une planète de rayon R_p et d'albédo de surface A est donc :

$$P = (1 - A) \frac{L}{4\pi d^2} 2\pi R_p^2 = (1 - A) \frac{L}{2} \left(\frac{R_p}{d} \right)^2 \quad (1.4)$$

En supposant qu'une planète rayonne tout comme le Soleil de façon similaire à un corps noir, alors il est possible d'appliquer à sa surface la loi de Stefan-Boltzmann soit :

$$P = 4\pi R_p^2 \sigma T^4 \quad (1.5)$$

Ainsi, en égalisant les équations (1.4) et (1.5), la température de surface est indépendante du rayon de la planète et décroît en raison inverse du carré de la distance au Soleil. Notons que si la planète tourne lentement sur elle-même, alors l'énergie solaire captée par la moitié de la planète n'est émise que sur cette moitié. C'est le cas de Mercure et Vénus. Mars et la Terre ayant des vitesses de rotation rapides, présentent au contraire une distribution homogène de la température en surface.

1. Le Soleil

Un autre aspect du Soleil qui intéresse les géologues est sa composition par rapport à celle de la Terre. La composition solaire est déterminée à partir de l'observation de sa photosphère (tableau 1.1). Les éléments les plus abondants sont les plus légers et forment principalement des molécules gazeuses (H_2 , H_2O , CH_4 , CO , CO_2 , N_2) où sont des gaz rares (He, Ne, Ar...). Les éléments qui vont former les minéraux et donc les planètes solides vont être Si, Mg, Fe, Ca, Ni, Al, S et l'oxygène. Les quatre éléments Si, Mg, Fe et O expliquent à eux seuls 95 % de la masse de la Terre (Tableau 1.2). En ajoutant les 4 éléments Ca, Ni, Al et S, c'est plus de 99 % de la masse d'une planète tellurique qui est ainsi expliquée. Pour les satellites des

Tableau 1.1 Abondance des principaux éléments de la photosphère solaire et des chondrites CI.

Élément	Symbole	Solaire	Chondrite CI
Hydrogène	H	12	8,28
Hélium	He	10,899	1,32
Carbone	C	8,39	7,43
Azote	N	7,83	6,28
Oxygène	O	8,69	8,42
Sodium	Na	6,30	6,30
Magnésium	Mg	7,55	7,56
Aluminium	Al	6,46	6,46
Silicium	Si	7,54	7,54
Soufre	S	7,19	7,19
Potassium	K	5,11	5,09
Calcium	Ca	6,34	6,32
Fer	Fe	7,47	7,48
Nickel	Ni	6,22	6,22

(D'après Lodders K, *Astrophysical journal*, 2003). Pour permettre la comparaison, les teneurs en silicium sont supposées identiques dans la photosphère solaire et dans les chondrites CI.

Tableau 1.2 Comparaison des compositions des chondrites à enstatite, de la Terre et du Soleil.

La première colonne est calculée avec 4 éléments (O, Mg, Fe, Si) et la seconde avec 8 éléments. Les rapports sont calculés en pourcentage élémentaire et non en pourcentage massique.

	Soleil		Chondrite		Terre	
Fe/Si	0,977	0,986	0,878	0,909	0,877	0,944
Mg/Si	1,072	1,131	0,734	0,803	1,012	0,691
Fe/(Fe + Mg)	0,477	0,466	0,544	0,531	0,464	0,577

planètes géantes qui se forment au-delà de la limite de stabilité de la glace d'eau, il faut rajouter la molécule H_2O qui peut représenter plus 50 % de la masse des satellites de glace. Dans le tableau 1.1, les abondances des éléments majeurs présents dans le Soleil et les météorites sont indiquées en échelle logarithmique relativement à l'hydrogène fixé à 10^{12} atomes. Il apparaît très clairement que, les planètes étant issues des petits corps du Système solaire, leur composition doit être très proche de la composition solaire, éléments légers mis à part. En fait, seul le lithium est nettement moins abondant dans le Soleil, ce qui s'explique par le fait qu'il est détruit par les réactions nucléaires à la base de la zone convective solaire.

2 LES OBJETS DU SYSTÈME SOLAIRE

Conformément à la résolution de l'Assemblée générale de 2006 de l'Union Astronomique Internationale, les planètes et autres corps du Système solaire, sauf les satellites, font partie d'une des trois catégories suivantes :

1. Les planètes. Une planète est un corps céleste qui :

- est en orbite autour du Soleil ;
- possède une masse suffisante pour que sa propre gravité supplante les contraintes tectoniques et de marée de manière à lui donner une forme d'équilibre hydrostatique (quasi sphérique) ;
- a dégagé le voisinage autour de son orbite.

2. Planètes naines. C'est un corps céleste qui :

- est en orbite autour du Soleil ;
- possède une masse suffisante pour que sa propre gravité supplante les contraintes tectoniques et de marée de manière à lui donner une forme d'équilibre hydrostatique (quasi sphérique) ;
- n'a pas complètement dégagé le voisinage autour de son orbite ;
- n'est pas un satellite.

3. Les petits corps. Les petits objets du Système solaire incluent tous les corps qui ne sont ni des planètes, ni des planètes naines, ni des satellites.

À ces trois classes, il convient donc d'ajouter l'ensemble des satellites des planètes dont le nombre est détaillé dans le tableau 1.3.

2.1 Les planètes

Huit « planètes » Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune orbitent autour du Soleil (**planche 1**). Ces planètes sont séparées en planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) et planètes telluriques (Mercure, Vénus, la Terre et Mars). Jupiter, la plus grosse des planètes géantes, est 318 fois plus massive que la Terre, 1 000 fois plus volumineuse mais ne représente pourtant que 0,1 % de la masse du Soleil.

2. Les objets du Système solaire

Tableau 1.3 Principales caractéristiques des gros objets du Système solaire

Une unité astronomique (UA) est la distance Terre-Soleil soit 149 597 870 kilomètres.
(*) La masse de la Terre est $5,974 \cdot 10^{24}$ kg. (**) La température de surface indiquée correspond à la valeur moyenne et ne précise donc pas les variations nuit/jour ainsi que les variations latitudinales.

Objet	définition (source IAU)	Diamètre (km)	Masse (/Terre*)	a (ua)	Albédo de surface	T _{surf} (K)**	Nb de satellites connus
Mercure	Planète	4 879	0,055	0,39	0,06	452	-
Vénus	Planète	12 104	0,815	0,72	0,76	735	-
Terre	Planète	12 746	1	1	0,37	288	1
Mars	Planète	6 780	0,107	1,5	0,16	210	2
Cérès	Planète naine	952	$1,6 \cdot 10^{-4}$	2,7	0,09	230	-
Jupiter	Planète	138 346	318	5,2	0,52	152	> 63
Saturne	Planète	114 632	95	9,5	0,47	143	> 52
Uranus	Planète	50 532	14	19,2	0,51	68	> 27
Neptune	Planète	49 105	17	30,1	0,41	53	> 13
Pluton	Planète naine	$2\,306 \pm 20$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	39,5	0,6	44	1
Éris	Planète naine	$2\,400 \pm 100$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	67,7	$0,6 \pm 0,1$	~ 30	-

Les planètes tournent autour du Soleil suivant des lois établies par Kepler et qui résultent de l'équation de Binet. Ces trois lois de Kepler suffisent à décrire les propriétés des orbites planétaires :

- Les planètes décrivent des orbites elliptiques autour du Soleil qui occupe l'un des foyers de l'ellipse.
- Le vecteur Soleil-Planète balaie une aire constante par unité de temps.
- Le carré de la période de rotation (T) est proportionnel au cube du demi-grand axe de l'ellipse (a) :

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3 \quad (1.6)$$

où G est la constante de gravitation universelle. Le produit GM a pu être connu très tôt grâce aux observations de l'année de chaque planète et de sa distance au Soleil (exercice 1.1).

Des calculs plus précis de la trajectoire de chaque planète tiennent compte des perturbations des autres planètes et en particulier de Jupiter.

Alors que le système interne est constitué de planètes riches en silicates, le système externe est caractérisé par la présence de planètes géantes gazeuses. Elles possèdent une atmosphère de gaz riche en hydrogène et hélium comme notre Soleil. En dessous de cette enveloppe fluide qui évolue depuis un gaz extrêmement diffus en surface jusqu'au domaine métallique de façon continue, il doit exister un noyau de silicates, de fer, et d'eau. Mais les pressions exercées sur les matériaux sont telles que

les structures de ces phases restent mal connues. Jupiter et Saturne sont majoritairement constituées d'hydrogène et d'hélium, tandis qu'Uranus et Neptune possèdent une enveloppe fluide et un noyau solide en proportion non négligeable (> 50 % en poids). Bien que ces planètes soient d'un grand intérêt pour la planétologie comparée, en particulier pour ce qui concerne les origines du Système solaire et l'étude des magnétosphères et ionosphères planétaires, elles ne seront pas abordées en détail dans cet ouvrage. Celui-ci s'intéresse plus particulièrement aux planètes et satellites qui possèdent une surface solide. Cette propriété très particulière n'est pas vérifiée dans le cas des planètes géantes.

Les planètes telluriques sont composées d'une croûte, d'un manteau et d'un noyau. Ces trois enveloppes résultent de processus de différenciation qui seront décrits dans le chapitre 5. L'enveloppe la plus abondante est le manteau. Comme les 4 éléments les plus abondants sont l'oxygène, le fer, le magnésium et le silicium, il n'est pas étonnant que les minéraux les plus courants soient l'olivine $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ et les pyroxènes dont l'enstatite $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$. Notons que pour les planètes les plus grosses (Terre et Vénus), l'olivine se transforme en pérovskite $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ et magnésowüstite $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ à une pression de 23 GPa, ce qui correspond à une profondeur de 670 km sur Terre. À composition égale, plus une planète est grosse, plus sa densité est grande. Cela est lié à l'augmentation de la densité avec la pression. C'est ainsi que la Terre, Mars et Vénus ont des compositions très similaires bien que la densité de Mars soit beaucoup plus faible que celle de la Terre ou de Vénus. Par contre, Mercure doit être enrichie en fer pour expliquer sa masse anormalement élevée pour un corps de cette taille. Les structures internes des planètes sont présentées en détail dans le chapitre 6.

Les planètes Mars, la Terre et Vénus ont chacune une atmosphère mais avec des différences notables. Mars et Vénus ont une atmosphère composée principalement de CO_2 et de N_2 mais la pression à la surface de Vénus est de 90 bar alors que celle à la surface de Mars n'est que de 6 ou 7 mbar. Quand à l'atmosphère de la Terre, elle est constituée de N_2 et de O_2 car le CO_2 a été assimilé et transformé par les organismes vivants.

2.2 Les planètes naines

Une nouvelle classe distincte d'objets appelés « planètes naines » a été créée depuis 2006. Les premiers membres de la catégorie des « planètes naines » sont Cérès, Pluton et Éris). De nombreux autres objets du Système solaire devraient rejoindre la catégorie des « planètes naines » dans les années à venir. Actuellement une douzaine de candidates figurent sur la liste d'attente des « planètes naines » de l'IAU (tableau 1.4), laquelle continue de changer au fur et à mesure que de nouveaux objets sont trouvés et que la physique des candidates existantes devient mieux connue.

2. Les objets du Système solaire

Tableau 1.4 Liste des gros objets du Système solaire candidats à l'appellation de planète naine.

Objet	Diamètre estimé ^(*)	a (UA)	Familles d'astéroïdes ^(**)
Haumea	2 000×1 000×1 200 km	43,3	Ceinture de Kuiper
Makemake	1 500 ± 300 km	45,9	Ceinture de Kuiper
(90377) Sedna	1 200-1 800 km	489	Objet épars
(90482) Orcus	1 000 ± 200 km	39,3	Plutino
(50000) Quaoar	~1 000 km	39,6	Ceinture de Kuiper
(20000) Varuna	600 ± 150 km	45,3	Ceinture de Kuiper
(55636) 2002 TX300	< 700 km	43,0	Ceinture de Kuiper
(28978) Ixion	500 ± 100 km	43,4	Plutino
(55565) 2002 AW197	700 ± 100 km	47,3	Ceinture de Kuiper
(4) Vesta	578×560×458 km	2,3	Ceinture Principale
(2) Pallas	570×525×500 km	2,7	Ceinture Principale
(10) Hygiea	500×400×350 km	3,1	Ceinture Principale

(*) Source : IAU ; (**) Les familles sont indiquées dans la section 1.3.

On connaît peu de chose sur les planètes naines. Deux missions spatiales sont parties pour les étudier : *New Horizons* qui étudiera Pluton, et *Dawn* qui étudiera Vesta et Cérès. New Horizons ne fera qu'un survol de Pluton alors que Dawn se mettra en orbite autour de Vesta puis autour de Cérès.

2.3 La Lune et les satellites des planètes géantes

Parmi les planètes telluriques, seules la Terre et Mars ont des satellites naturels. Les satellites de Mars (Phobos et Déimos) sont des petits objets. Par contre la Lune est suffisamment large pour que les processus internes y soient similaires à ceux qui opèrent à l'intérieur des planètes (chapitre 15). Il est actuellement admis que la formation de la Lune résulte de la collision d'un objet de la taille de Mars avec la proto-Terre. La Lune s'est donc formée à partir d'un matériel qui avait déjà subi des processus de différenciation. L'étude des échantillons lunaires rapportés par les astronautes au cours du programme Apollo a donné de nombreuses indications sur la formation du système Terre-Lune.

Alors qu'avant la période d'exploration spatiale on pensait que les satellites des planètes géantes étaient dénués de toute activité, la mission Voyager a révélé des mondes très actifs. En passant dans l'environnement de Jupiter, Voyager 1 et 2 ont pu photographier l'activité volcanique intense de Io, la surface jeune d'Europe, et les deux types de surface jeunes et anciennes de Ganymède. Près de 20 ans plus tard, la mission NASA *Galileo* a découvert que Ganymède avait un champ magnétique propre, preuve de l'existence d'un noyau de fer liquide en son intérieur. Cette mission montrait également le haut degré de différenciation d'Europe et de Ganymède. En

passant près de Saturne, la mission *Voyager 2* ne pouvait percer l'atmosphère de Titan mais prenait des images de la surface jeune de Encelade et découvrait les montagnes de Japet. Vingt-cinq ans plus tard, la mission *Cassini* dévoile la surface de Titan avec ses dunes, lacs, rivières, volcans de glaces et montagnes. On découvre également le panache d'Encelade qui démontre l'activité interne et le rôle des forces de marée comme source de chaleur. Ces découvertes montrent que les satellites des planètes géantes sont soumis à des processus physico-chimiques similaires à ceux qui opèrent sur Terre. Compte tenu des évolutions majeures de notre connaissance des lunes sur ces dix dernières années, deux chapitres de cet ouvrage sont consacrés aux lunes des planètes géantes (chapitres 16 et 17).

3 LES PETITS CORPS DU SYSTÈME SOLAIRE

L'ensemble de la matière du Système solaire qui n'est pas incluse dans le Soleil, les planètes et leurs satellites, ou les planètes naines, se trouve dans les petits corps. Cette famille d'objets est donc très vaste. Elle couvre à la fois les astéroïdes, les comètes, les anneaux des planètes géantes, et les poussières interplanétaires. Ces objets sont d'un très grand intérêt en planétologie, parce qu'ils sont constitués de la matière primitive du Système solaire. Les planètes et leurs satellites ont subi des différenciations importantes qui font que les compositions de leurs couches périphériques ne sont pas révélatrices de la composition primordiale de la matière qui les a constitués. À l'opposé, les petits corps sont restés inchangés depuis leur formation il y a 4,55 Ga (voir chapitre 5). C'est ce qui explique par exemple que la composition des chondrites est si proche de la composition de l'atmosphère solaire (tableau 1.1).

Mis à part les poussières qui sont disséminées partout dans le Système solaire, et les grains qui sont concentrés dans les anneaux des planètes géantes, les autres petits corps (astéroïdes et comètes) sont localisés dans des zones précises. Il existe en fait quatre réservoirs principaux :

- **La ceinture de Kuiper** : C'est une région située dans le plan de l'écliptique au-delà de l'orbite de Neptune (depuis 35 ua environ jusqu'à plusieurs centaines d'ua). Cette zone contient sans doute plus de deux cents millions de petits corps constitués de silicates et de glaces soit plusieurs masses terrestres sous forme d'astéroïdes et de noyaux cométaires. C'est dans ce réservoir que sont générées les comètes à courte période (< 200 ans) lorsque les perturbations gravitationnelles engendrées par les planètes géantes modifient leur orbite. Leurs trajectoires sont dans le plan de l'écliptique. Parmi les plus célèbres comètes issues de ce réservoir, on retiendra bien sûr la comète de *Halley*, mais aussi *Tempel 1* qui fût la cible de la mission *Deep Impact*.
- **Le nuage d'Oort** : Cet immense réservoir s'étend sur plusieurs milliers d'ua, bien au-delà des orbites planétaires (entre 30 000 et 100 000 ua environ). Il pourrait contenir jusqu'à 200 milliards de comètes. À ces distances, les orbites des noyaux cométaires sont parfois perturbées par l'influence gravitationnelle des étoiles proches. Les comètes à longue période (> 200 ans) sont issues de ce réservoir.