

ASTROPHYSIQUE

Thérèse ENCRENAZ, Jean-Pierre BIBRING  
Michel BLANC, Maria-Antonietta BARUCCI  
Françoise ROQUES, Philippe ZARKA

# • Le système solaire •

*Nouvelle édition*



SAVOIRS ACTUELS

 CNRS EDITIONS

Extrait de la publication

  
EDP  
SCIENCES



# Le système solaire

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

Thérèse Encrenaz, Jean-Pierre Bibring,  
Michel Blanc, Maria-Antonietta Barucci,  
Françoise Roques et Philippe Zarka

# Le système solaire

*Nouvelle édition*

S A V O I R S   A C T U E L S

---

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

*Illustration de couverture :*

Le système d'Uranus photographié en infrarouge (bande K,  $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$ ) avec l'instrument ISAAC du VLT à l'ESO, le 19 novembre 2002. Du fait du mouvement de la planète autour du Soleil, le système des anneaux d'Uranus présente maintenant, pour l'observateur terrestre, une configuration géométrique comparable à celle des anneaux de Saturne. Sur cette photo, le contraste des anneaux par rapport à la planète est considérablement renforcé, car, à  $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$ , le flux solaire réfléchi par la planète elle-même est presque entièrement absorbé par le méthane de son atmosphère. Le Nord est en bas à droite et l'Est est en haut à droite. On reconnaît les cinq plus gros satellites d'Uranus : de gauche à droite Titania, Umbriel, Miranda, Ariel et Obéron.

(E. Lellouch, T. Encrenaz, J.-G. Cuby, A. Jaunsen, © ESO)

© 2003, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

et

CNRS ÉDITIONS, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

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 et 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 2-86883-643-7

ISBN CNRS ÉDITIONS 2-271-05845-7

# Table des matières

Avant-propos	xv
Liste des auteurs	xvii
<b>1 Présentation générale du système solaire</b>	<b>1</b>
1.1 Mécanique et dynamique du système solaire . . . . .	7
1.1.1 La loi universelle de la gravitation de Newton . . . . .	7
1.1.2 Les lois de Kepler . . . . .	8
1.1.3 La loi de Titius-Bode . . . . .	11
1.1.4 Les résonances . . . . .	11
1.1.5 La gravité dans un corps solide : forme et effet de marée . .	12
1.1.6 La limite de Roche . . . . .	16
1.1.7 Les collisions . . . . .	18
1.1.8 Le problème des N corps . . . . .	19
1.1.9 Évolution à long terme du système solaire . . . . .	19
1.1.10 Configurations particulières du système Soleil-Terre-Lune : les éclipses . . . . .	21
1.2 Physique du système solaire . . . . .	23
1.2.1 Rayonnement thermique et rayonnement solaire réfléchi . .	24
1.2.2 Les planètes . . . . .	27
Planètes intérieures et planètes géantes . . . . .	27
Atmosphères primitives et atmosphères secondaires . . . .	28
Structure thermique d'une atmosphère planétaire . . . . .	30
Magnétosphères planétaires . . . . .	31
1.2.3 Les satellites . . . . .	31
1.2.4 Les anneaux . . . . .	32
1.2.5 Les astéroïdes . . . . .	33
1.2.6 Les comètes . . . . .	35
1.2.7 Les objets transneptuniens . . . . .	36
1.2.8 Le milieu interplanétaire . . . . .	37

	Les poussières interplanétaires . . . . .	37
	Le vent solaire . . . . .	39
	L'interaction des planètes avec le vent solaire . . . . .	41
	Précipitation de particules et courants dans l'atmosphère . . . . .	43
<b>2</b>	<b>Le système solaire dans l'Univers</b>	<b>45</b>
2.1	Les échelles de distance . . . . .	45
2.2	Le modèle du « big bang » et la nucléosynthèse primordiale . . . . .	50
2.3	Vie et mort des étoiles . . . . .	51
2.4	La nucléosynthèse stellaire . . . . .	52
2.5	Les premiers stades de formation stellaire . . . . .	54
2.6	La matière interstellaire . . . . .	56
	La phase gazeuse . . . . .	56
	La poussière interstellaire . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Les méthodes d'étude du système solaire</b>	<b>61</b>
3.1	Détermination des paramètres géométriques et physiques . . . . .	62
3.1.1	Détermination des distances . . . . .	62
3.1.2	Détermination des diamètres . . . . .	62
3.1.3	Détermination des masses . . . . .	64
3.1.4	Détermination des périodes de rotation . . . . .	64
3.2	Analyse physico-chimique des gaz et des grains . . . . .	64
3.2.1	Analyse du rayonnement par spectroscopie à distance . . . . .	64
	Transfert radiatif dans les atmosphères planétaires . . . . .	65
	Transfert de rayonnement dans une atmosphère planétaire . . . . .	65
	La composante solaire réfléchie . . . . .	66
	La composante thermique . . . . .	67
	Émission par fluorescence dans les atmosphères et les ionosphères . . . . .	68
	Physico-chimie des surfaces et des poussières . . . . .	70
3.2.2	Analyse du rayonnement en fonction de l'angle de phase . . . . .	70
3.2.3	Analyse de la structure thermique d'une atmosphère par la méthode d'occultation stellaire . . . . .	71
3.2.4	Analyse <i>in situ</i> . . . . .	71
	L'atmosphère des planètes telluriques . . . . .	72
	Méthodes physiques d'analyse des surfaces planétaires par des sondes spatiales . . . . .	72
	L'analyse par spectroscopie X . . . . .	72
	L'analyse par spectroscopie $\gamma$ . . . . .	73
	L'analyse par spectrométrie infrarouge . . . . .	74

	Matière extraterrestre . . . . .	74
3.3	Analyse des plasmas et des champs magnétiques . . . . .	75
3.3.1	Observations au sol . . . . .	75
3.3.2	Observations spatiales . . . . .	76
<b>4</b>	<b>La formation du système solaire</b>	<b>81</b>
4.1	L'histoire des modèles de formation du système solaire . . . . .	82
4.1.1	Le modèle copernicien . . . . .	82
4.1.2	Les différentes classes de modèles du xv <sup>e</sup> au xx <sup>e</sup> siècle . . . . .	82
	Les modèles de turbulence . . . . .	83
	Les théories de marée . . . . .	83
	Les théories d'accrétion . . . . .	83
	La théorie de la nébuleuse . . . . .	84
4.2	Les observations . . . . .	85
4.3	L'émergence d'un « modèle standard » . . . . .	90
4.3.1	Le modèle de protoplanètes gazeuses (disque massif) . . . . .	90
4.3.2	Le « modèle standard » . . . . .	91
4.3.3	La chronologie des événements . . . . .	92
	La nébuleuse . . . . .	92
	La formation des planétésimaux par la séquence de condensation . . . . .	94
	Emballement de la croissance . . . . .	99
	Formation de Jupiter . . . . .	100
	Disparition du gaz . . . . .	100
	Formation des planètes terrestres . . . . .	101
	Formation des planètes géantes . . . . .	102
	Les collisions catastrophiques . . . . .	103
	Anneaux et satellites . . . . .	104
	Les petits corps . . . . .	104
4.4	Confrontation aux autres systèmes . . . . .	105
4.4.1	Les environnements d'étoiles . . . . .	105
4.4.2	Les planètes extrasolaires . . . . .	106
<b>5</b>	<b>L'interaction des corps du système solaire avec le milieu interplanétaire</b>	<b>107</b>
5.1	Le plasma interplanétaire : vent solaire et expansion coronale . . . . .	108
5.1.1	L'expansion coronale . . . . .	108
5.1.2	La structure à grande échelle de l'héliosphère dans le plan de l'écliptique . . . . .	112
5.1.3	La structure tridimensionnelle de l'héliosphère . . . . .	115
5.1.4	Les structures transitoires du vent solaire . . . . .	117
5.1.5	L'interaction de l'héliosphère avec le milieu interstellaire . . . . .	119

5.2	Les enveloppes gazeuses externes des planètes : thermosphères et ionosphères . . . . .	123
5.2.1	La structure de la haute atmosphère neutre . . . . . Structure verticale de l'atmosphère neutre . . . . . Structure verticale de l'hétérosphère/thermosphère . . . . . L'exosphère . . . . .	124 124 127 130
5.2.2	La structure et la dynamique des couches ionosphériques . . . . . L'équation de continuité : naissance et mort du plasma ionosphérique . . . . . Le terme de production . . . . . Le terme de perte . . . . . Mobilités et conductivités du plasma ionosphérique . . . . . Diffusion du plasma dans le gaz neutre : la structure verticale ionosphérique . . . . . Le conducteur ionosphérique . . . . .	132  133 134 136 137  141 143
5.3	L'interaction du vent solaire avec les objets du système solaire . . . . .	145
5.3.1	Les différents types d'interaction . . . . .	145
5.3.2	L'interaction du vent solaire avec les enveloppes gazeuses non magnétisées (cas de figure b) . . . . . Les comètes . . . . . Vénus . . . . .	148 148 151
5.3.3	L'interaction du vent solaire avec les planètes magnétisées . . . . . La magnétosphère fermée . . . . . Le modèle de Chapman-Ferraro . . . . . Les modèles hydrodynamiques tridimensionnels . . . . . La magnétosphère ouverte . . . . . La circulation du plasma à l'intérieur des magnétosphères . . . . .	155 155 158 160 163 165
5.3.4	Les émissions radio « aurorales » des magnétosphères planétaires . . . . . Observations . . . . . Théorie . . . . . Accélération des électrons énergétiques . . . . .	173 173 181 186
6	Les planètes telluriques et leurs satellites . . . . .	189
6.1	Mercure . . . . .	190
6.1.1	Paramètres orbitaux et caractéristiques macroscopiques . . . . .	191
6.1.2	L'exosphère de Mercure et les résidus polaires . . . . .	192
6.1.3	L'intérieur de Mercure et son champ magnétique . . . . .	192
6.1.4	La surface de Mercure . . . . .	193
6.1.5	La magnétosphère de Mercure . . . . .	196
6.2	Vénus . . . . .	197
6.2.1	Observation de Vénus . . . . .	198

6.2.2	Paramètres orbitaux et propriétés globales . . . . .	199
6.2.3	La surface et l'intérieur de Vénus . . . . .	201
	Topographie . . . . .	201
	Composition du sol . . . . .	203
	L'intérieur de Vénus . . . . .	205
6.2.4	L'atmosphère de Vénus . . . . .	206
	Structure thermique . . . . .	206
	Composition atmosphérique . . . . .	207
	Structure nuageuse . . . . .	208
	La circulation atmosphérique . . . . .	211
	L'effet de serre et l'évolution de l'atmosphère de Vénus . . . . .	211
6.3	La Terre . . . . .	213
6.3.1	Caractéristiques orbitales . . . . .	214
6.3.2	Structure interne . . . . .	215
6.3.3	La tectonique des plaques . . . . .	218
6.3.4	Le champ magnétique terrestre . . . . .	225
6.3.5	L'atmosphère actuelle . . . . .	227
	Composition atmosphérique . . . . .	227
	Structure thermique . . . . .	228
6.3.6	Le climat terrestre et la circulation atmosphérique . . . . .	231
	L'évolution climatique . . . . .	232
	L'ionosphère terrestre et l'interaction avec la magnétosphère . . . . .	232
6.4	La Lune . . . . .	233
6.4.1	L'observation télescopique de la Lune . . . . .	235
6.4.2	Les observations spatiales . . . . .	236
6.4.3	Les analyses d'échantillons en laboratoire . . . . .	240
6.4.4	L'origine de la Lune . . . . .	243
6.4.5	Le système Terre-Lune . . . . .	244
6.5	Mars . . . . .	245
6.5.1	L'observation de Mars . . . . .	247
6.5.2	Paramètres orbitaux, propriétés physiques macroscopiques et structure interne . . . . .	248
6.5.3	Formations géologiques . . . . .	249
6.5.4	La composition du sol de Mars . . . . .	253
6.5.5	L'atmosphère de Mars . . . . .	257
	Structure thermique . . . . .	257
	Composition atmosphérique . . . . .	260
	Circulation générale . . . . .	261
	L'eau sur Mars : un indice de son histoire passée . . . . .	263
6.5.6	Étude comparative de l'atmosphère des planètes telluriques Évolution comparative des atmosphères planétaires . . . . .	264

	Abondances des gaz rares dans les planètes telluriques . . .	266
	6.5.7 La recherche d'une vie fossile sur Mars . . . . .	268
6.6	Phobos et Deimos . . . . .	269
<b>7</b>	<b>Les astéroïdes</b>	<b>273</b>
7.1	Caractéristiques orbitales . . . . .	274
7.2	La nature physique des astéroïdes . . . . .	278
7.3	Composition chimico-minéralogique des astéroïdes . . . . .	281
7.4	Résultats récents d'observations spatiales . . . . .	286
7.5	Origine et évolution des astéroïdes . . . . .	289
7.6	L'interaction astéroïde-vent solaire . . . . .	291
<b>8</b>	<b>Les planètes géantes</b>	<b>293</b>
8.1	Introduction . . . . .	293
8.2	L'atmosphère neutre des planètes géantes . . . . .	295
8.2.1	Les structures thermiques . . . . .	297
	Transfert radiatif et transfert convectif . . . . .	297
	Les modèles de transfert radiatif . . . . .	298
	Inversion de l'intégrale de brillance . . . . .	299
	Détermination de T(z) par la méthode d'occultation stellaire	299
	La mesure directe du profil thermique de Jupiter . . . . .	300
	Résultats . . . . .	300
8.2.2	Les structures nuageuses . . . . .	301
	Les modèles d'équilibre thermochimique . . . . .	302
	Mise en évidence observationnelle	
	à partir de la spectroscopie . . . . .	302
	Jupiter : l'apport de la mission <i>Galileo</i> . . . . .	303
	Morphologie à grande échelle : zones et bandes . . . . .	303
	Morphologie à petite échelle : ovales blancs et taches chaudes	307
8.2.3	Abondances moléculaires . . . . .	310
8.2.4	Les rapports d'abondances élémentaires	
	et isotopiques . . . . .	312
	Mesure de l'abondance d'hélium dans les planètes géantes .	313
	Mesure du rapport D/H dans les planètes géantes . . . . .	315
	Le rapport C/H . . . . .	317
	Les rapports N/H, P/H, O/H et Ge/H . . . . .	319
	L'apport de la sonde <i>Galileo</i> : la mesure de l'abondance	
	des gaz rares sur Jupiter . . . . .	320
	Les rapports $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ et $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ et leurs implications	
	astrophysiques . . . . .	322
8.2.5	La haute atmosphère des planètes géantes . . . . .	323

	Détermination des profils de température et de densité . . .	323
	Le coefficient de diffusion turbulente . . . . .	323
	Photochimie des planètes géantes : dissociation et ionisation	325
	CO et HCN dans la stratosphère de Neptune . . . . .	326
	La source externe d'oxygène . . . . .	329
	Les aurores . . . . .	329
	La collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter . .	329
8.3	La structure interne des planètes géantes . . . . .	330
8.3.1	Les données expérimentales . . . . .	331
	Masse, rayon et champ de gravitation . . . . .	331
	L'énergie interne des planètes géantes . . . . .	331
	Structure thermique et composition chimique des atmosphères . . . . .	332
8.3.2	Construction de modèles d'énergie interne . . . . .	332
	Les modèles statiques . . . . .	333
	Les modèles évolutifs . . . . .	334
	Les résultats . . . . .	335
8.4	Champ magnétique et magnétosphère des planètes géantes . . . . .	337
8.4.1	Le champ magnétique de Jupiter . . . . .	338
8.4.2	Structure de la magnétosphère jovienne . . . . .	342
8.4.3	Dynamique de la magnétosphère jovienne . . . . .	345
	Sources de plasma . . . . .	346
	Transport : convection et corotation . . . . .	346
	Transport radial et écarts à la corotation . . . . .	348
	Plasma énergétique et processus d'accélération . . . . .	349
	Interaction Io-Jupiter . . . . .	350
	Émissions électromagnétiques aurorales . . . . .	352
	Ceintures de radiations et puits de plasma . . . . .	354
8.4.4	Le champ magnétique et la magnétosphère de Saturne . . .	356
8.4.5	Les champs magnétiques d'Uranus et de Neptune . . . . .	360
9	Titan . . . . .	363
9.1	L'atmosphère neutre de Titan . . . . .	364
9.1.1	Composition chimique de l'atmosphère . . . . .	364
9.1.2	Le rapport D/H dans l'atmosphère de Titan . . . . .	367
9.1.3	Structure thermique de l'atmosphère . . . . .	367
9.1.4	Aérosols et nuages . . . . .	369
9.2	La haute atmosphère de Titan . . . . .	369
9.2.1	Composition et structure de la haute atmosphère . . . . .	369
9.2.2	L'interaction magnétosphérique . . . . .	370

9.2.3	L'aéronomie de Titan et la formation de molécules complexes	370
9.3	La surface et l'intérieur de Titan . . . . .	372
9.3.1	La surface de Titan . . . . .	372
9.3.2	L'intérieur de Titan . . . . .	373
9.4	L'interaction de Titan avec la magnétosphère de Saturne . . . . .	375
<b>10</b>	<b>Les corps dénués d'atmosphère dans le système solaire extérieur</b>	<b>379</b>
10.1	Les satellites des planètes géantes . . . . .	380
10.1.1	Les satellites de Jupiter . . . . .	380
	Les petits satellites . . . . .	380
	Les satellites galiléens . . . . .	381
10.1.2	Les satellites de Saturne . . . . .	393
	Les gros satellites de glace . . . . .	393
	Les petits satellites de Saturne . . . . .	396
10.1.3	Les satellites d'Uranus . . . . .	397
10.1.4	Les satellites de Neptune . . . . .	399
	Triton . . . . .	399
10.2	Pluton et Charon . . . . .	402
10.2.1	Historique . . . . .	402
10.2.2	L'exploration du système Pluton-Charon . . . . .	403
10.2.3	Pluton : atmosphère et surface . . . . .	403
10.2.4	Charon . . . . .	406
10.2.5	L'origine du couple Pluton-Charon . . . . .	406
10.3	Les anneaux des planètes géantes . . . . .	407
10.3.1	La formation des anneaux planétaires . . . . .	407
10.3.2	Les anneaux de Jupiter . . . . .	409
10.3.3	Les anneaux de Saturne . . . . .	411
10.3.4	Les anneaux d'Uranus . . . . .	414
10.3.5	Les anneaux de Neptune . . . . .	415
<b>11</b>	<b>Les comètes</b>	<b>419</b>
11.1	Nomenclature des comètes . . . . .	420
11.2	Les orbites des comètes et le problème de leur origine . . . . .	422
	La collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter . . . . .	423
11.3	Mesure de la brillance des comètes . . . . .	427
11.4	La physique des comètes . . . . .	428
11.4.1	Le noyau . . . . .	431
	Dimensions, rotation et masse . . . . .	431
	La structure du noyau cométaire . . . . .	433
11.4.2	La coma . . . . .	435

La sublimation du noyau . . . . .	435
L'expansion de gaz dans la coma . . . . .	436
Les molécules mères . . . . .	437
Photodissociation et photo-ionisation des molécules mères . . . . .	441
Molécules filles, radicaux et ions . . . . .	441
Rapports isotopiques dans les comètes . . . . .	443
11.4.3 La poussière cométaire . . . . .	444
Cinématique des queues de poussière . . . . .	444
Composition des grains . . . . .	446
Dimension des grains . . . . .	447
Taux d'éjection de la poussière . . . . .	447
11.4.4 Matière cométaire et matière interstellaire . . . . .	448
11.5 L'interaction des comètes avec le vent solaire . . . . .	448
<b>12 Les nouvelles frontières</b>	<b>453</b>
12.1 Introduction . . . . .	453
12.2 Découverte des objets lointains . . . . .	453
12.3 Caractéristiques orbitales des transneptuniens . . . . .	455
12.4 Les Centaures . . . . .	457
12.5 Propriétés physiques et composition . . . . .	457
<b>13 Grains interplanétaires, micrométéorites et météorites</b>	<b>463</b>
13.1 Introduction . . . . .	463
13.2 Distribution en masse . . . . .	464
13.3 Distribution spatiale de la matière interplanétaire . . . . .	466
13.4 Les météorites . . . . .	469
13.4.1 Classification . . . . .	470
13.4.2 Origine des météorites . . . . .	472
13.4.3 Les météorites martiennes . . . . .	474
13.4.4 Composition chimique des météorites . . . . .	474
13.4.5 Composition isotopique des météorites . . . . .	475
Le fractionnement en masse . . . . .	475
La production radiogénique . . . . .	476
La datation par désintégrations radioactives . . . . .	477
13.4.6 Anomalies isotopiques et origine du système solaire . . . . .	479
13.5 Collectes de matière cométaire . . . . .	483
<b>14 Les nouveaux systèmes planétaires</b>	<b>485</b>
14.1 Introduction . . . . .	485
14.2 Les limites du domaine planétaire . . . . .	485

14.3	Les disques circumstellaires . . . . .	487
14.3.1	Bêta-Pictoris . . . . .	487
14.3.2	Les autres disques circumstellaires . . . . .	487
14.4	Les planètes extrasolaires . . . . .	488
14.4.1	Deux étapes : 1992 et 1995 . . . . .	488
14.4.2	Les méthodes de recherche . . . . .	488
14.4.3	Diversité des planètes extrasolaires . . . . .	494
14.5	Connaissances acquises et questions . . . . .	498
14.5.1	Bilan des observations . . . . .	498
14.5.2	Les questions théoriques posées par les premières découvertes . . . . .	500
14.5.3	Quelques projets observationnels . . . . .	505
14.6	Conclusions . . . . .	507
<b>15</b>	<b>La recherche de la vie dans l'Univers</b>	<b>509</b>
15.1	Qu'est-ce que la vie ? . . . . .	510
15.2	Les expériences de laboratoire . . . . .	511
15.3	La recherche de la vie dans le système solaire . . . . .	512
15.3.1	Analyse des échantillons lunaires . . . . .	512
15.3.2	Les météorites, les micro-météorites et les comètes . . . . .	512
15.3.3	Mars . . . . .	513
15.3.4	Les planètes géantes . . . . .	513
15.3.5	Europe . . . . .	514
15.3.6	Titan . . . . .	515
15.4	Les possibilités de vie dans l'Univers . . . . .	516
15.4.1	Quelle est la probabilité de la vie dans l'Univers ? . . . . .	516
15.4.2	À la recherche d'une vie extraterrestre . . . . .	517
<b>16</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>519</b>
<b>17</b>	<b>Index</b>	<b>525</b>

# Avant-propos

LA PREMIÈRE version de cet ouvrage (*Le Système Solaire*, par Thérèse Encrenaz, Jean-Pierre Bibring et Michel Blanc) est parue en 1987, en co-édition InterÉditions/Éditions du CNRS. Cette version a été traduite et publiée par Springer-Verlag en 1990, puis remise à jour en 1995. Comme l'indiquaient les préfaces des différentes éditions, ce livre était dédié à l'analyse du système solaire dans son ensemble, notamment par l'étude des processus physico-chimiques responsables de la formation et de l'évolution de ses objets.

Depuis la première parution de l'ouvrage, la planétologie a connu, dans tous ses aspects, un développement considérable, qui a fait apparaître encore davantage l'extrême diversité des objets explorés. De nouvelles missions spatiales planétaires sont venues enrichir nos bases de données : citons en particulier *Magellan* sur Vénus, *Galileo* sur Jupiter, *Ulysse* sur l'héliosphère, *Mars Global Surveyor* sur Mars, *Soho* et *Cluster* sur les relations Soleil-Terre. Les observatoires spatiaux *HST* et *ISO* ainsi que les grands télescopes au sol ont fourni des observations à très haute résolution spatiale ou spectrale et ont permis la photométrie d'objets de plus en plus faibles ; c'est ainsi qu'ont pu être détectés les premiers objets transneptuniens qui peuplent la ceinture de Kuiper. Parallèlement, le développement d'outils de calcul numérique de plus en plus puissants ont permis des avancées spectaculaires dans la modélisation de l'évolution dynamique du système solaire. La collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter en 1994, et les apparitions des comètes Hyakutake et Hale-Bopp en 1996 et 1997, ont permis de nouveaux développements dans le domaine de la physique cométaire et de la physique des impacts. Enfin, la détection, en nombre rapidement croissant, de planètes extrasolaires aux propriétés très différentes des nôtres, ouvre de nouvelles interrogations sur les scénarios de formation des systèmes planétaires et du système solaire lui-même.

La planétologie d'aujourd'hui peut se définir autour de deux grands axes : d'une part, l'étude de l'origine et de l'évolution du système solaire (notamment à partir de l'étude du système solaire extérieur et de la matière extraterrestre) et, d'autre part, l'étude comparative des objets du système solaire (qu'il s'agisse de leur intérieur, de leur surface, de leur atmosphère ou de leur magnétosphère). Ces deux aspects vont largement bénéficier des missions spatiales à venir, avec en particulier *Cassini* et *Rosetta* vers le système solaire extérieur, *Mars Sample Return* et *Bepi-Colombo* pour la planétologie comparée, sans oublier les futurs observatoires spatiaux, *NGST* et *Herschel*. On voit que, par ses deux axes, la planétologie entretient des liens de plus en plus étroits avec les disciplines connexes : l'astronomie, pour ce qui concerne l'étude de la physique solaire, de la formation stellaire, du milieu interstellaire et des exoplanètes ; les sciences de la terre, les sciences de l'environnement et les sciences de la vie pour la planétologie comparative et l'exobiologie. Plus que jamais, la planétologie est une science pluridisciplinaire.

Comme lors de sa première parution, ce livre est dédié à l'analyse de la planétologie sous tous ses aspects, y compris pluridisciplinaires, avec pour objectif la compréhension des mécanismes physico-chimiques rencontrés. Le plan de l'ouvrage reprend celui de la première édition, avec une première partie consacrée aux notions générales concernant le système solaire et une deuxième partie consacrée à une étude classe par classe des objets. De nouveaux chapitres ont été introduits sur la place du système solaire dans l'Univers, la ceinture de Kuiper et les exoplanètes. D'autres, concernant la formation du système solaire et les astéroïdes, ont été profondément remaniés. Enfin, l'analyse des magnétosphères planétaires a été plus largement développée. Nous espérons que cette nouvelle édition, ainsi remaniée, pourra servir d'ouvrage de référence pour les étudiants comme pour les chercheurs désireux d'approfondir leurs connaissances.

# Liste des auteurs

Thérèse Encrenaz  
Directeur de recherche CNRS  
LESIA, Observatoire de Paris, Meudon

Jean-Pierre Bibring  
Professeur à l'Université Paris XI  
Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay

Michel Blanc  
Astronome  
Observatoire astronomique de Marseille-Provence

Maria-Antonietta Barucci  
Astronome  
LESIA, Observatoire de Paris, Meudon

Françoise Roques  
Astronome-adjoint  
LESIA, Observatoire de Paris, Meudon

Philippe Zarka  
Chargé de recherche CNRS  
LESIA, Observatoire de Paris, Meudon

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

## Chapitre 15

# La recherche de la vie dans l'Univers

LA DÉCOUVERTE récente de planètes autour d'étoiles voisines a redonné une actualité nouvelle à une question que l'humanité se pose depuis ses origines. Sommes-nous seuls dans l'Univers ? On retrouve dans les textes anciens des discussions, notamment chez les philosophes grecs Démocrite et Épicure, puis le poète romain Lucrèce, autour de la multiplicité des mondes habités. L'idée d'une vie extraterrestre fut reprise par Giordano Bruno au XVI<sup>e</sup> siècle ; victime de l'Inquisition, il la paya de sa vie. Galilée puis de nombreux astronomes et philosophes (Kepler, Kant, Huygens, Fontenelle...) reprirent à leur compte cette doctrine tenue pour hérétique par l'Église catholique.

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, le débat sur la vie extraterrestre fut dominé par la controverse concernant les canaux martiens, dont la mise en évidence, selon leurs auteurs – Schiaparelli et Percival Lowell –, traduisait la présence d'une vie intelligente sur Mars. Il fallut les premières missions spatiales *Mariner*, dans les années 1960, pour mettre un terme définitif à cette polémique. Cependant, la découverte de nombreuses molécules complexes dans le milieu interstellaire, à la fin des années 1960, reposa la question de l'existence d'une chimie interstellaire complexe.

Les premiers concepts d'une évolution chimique vers le vivant datent des années 1920, lorsque Oparine fit le premier l'hypothèse que des micro-organismes pourraient apparaître au terme d'une longue série de transformations faisant intervenir des molécules organiques complexes, le tout dans un milieu réducteur. Les premières expériences de laboratoire ont été réalisées en 1953 par Miller et Urey qui ont réussi la synthèse d'acides aminés à partir d'un mélange réducteur de gaz ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ) soumis à des décharges électriques (voir fig. 15-1). Cette expérience ouvrit la voie à d'importantes et fructueuses recherches en laboratoire, qui toutes conclurent à la possibilité de synthétiser des molécules organiques complexes à partir de mélanges gazeux simples, grâce à l'apport énergétique de rayonnement ultraviolet ou de décharges électriques. Au début des années 1970, la découverte, par la radioastronomie et par l'exploration spatiale des planètes, d'un très grand nombre de molécules complexes dans des sites astrophysiques de

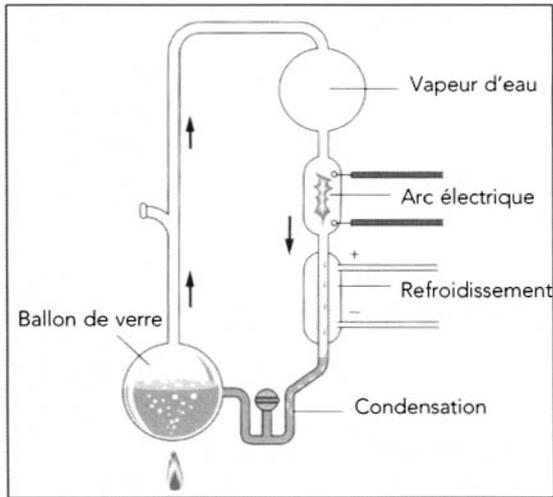


FIG. 15-1 – Schéma de l'expérience de Stanley Miller destinée à simuler l'évolution chimique prébiotique. Cette expérience, réalisée en 1953, a montré qu'il était possible de synthétiser des molécules prébiotiques à partir d'un mélange de  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$  et  $H_2O$ , en présence de décharges électriques. (D'après Ph. De la Cotardière, *Dictionnaire de l'Astronomie*, 1999.)

conditions de température et de pression très différentes (milieu interstellaire, enveloppes circumstellaires, surfaces et atmosphères planétaires) confirma l'idée que la synthèse de molécules complexes n'était pas un phénomène exceptionnel dans l'Univers ; une des dernières découvertes, en 1981, fut celle d'une demi-douzaine de molécules complexes, dites « prébiotiques », sur Titan (chapitre 9). Toutefois, le passage de cette chimie organique au vivant, ne serait-ce que sous une forme fossile, n'a été détecté nulle part ailleurs que sur Terre. Le problème des conditions permettant l'apparition de la vie reste entier.

## 15.1 Qu'est-ce que la vie ?

Avant d'entreprendre une discussion sur la vie extraterrestre, il convient de s'accorder sur la définition de ce qu'on appelle « le vivant ». Nous ne connaissons qu'un exemple de vivant, celui de la vie terrestre, à partir duquel il nous faut définir des critères représentatifs de la matière vivante. Les spécialistes s'accordent à sélectionner les critères suivants : 1) auto-reproduction ; 2) évolution et mutation ; 3) autorégulation face au milieu ambiant.

L'analyse de la matière vivante terrestre montre que tous les systèmes vivants utilisent les mêmes types de molécules, à commencer par les acides nucléiques et les protéines. La multiplication cellulaire s'effectue par les chromosomes, constitués d'acides nucléiques ; ces macromolécules contiennent, *via* l'acide désoxyri-