

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
1 Présentation générale du système solaire	1
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
2	Le système solaire dans l'Univers	45
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
3	Les méthodes d'étude du système solaire	61
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 γ	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
4	La formation du système solaire	81
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 ^e au xx ^e 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
5	L'interaction des corps du système solaire avec le milieu interplanétaire	107
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	124
	Structure verticale de l'atmosphère neutre	124
	Structure verticale de l'hétérosphère/thermosphère	127
	L'exosphère	130
5.2.2	La structure et la dynamique des couches ionosphériques	132
	L'équation de continuité : naissance et mort du plasma ionosphérique	133
	Le terme de production	134
	Le terme de perte	136
	Mobilités et conductivités du plasma ionosphérique	137
	Diffusion du plasma dans le gaz neutre : la structure verticale ionosphérique	141
	Le conducteur ionosphérique	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)	148
	Les comètes	148
	Vénus	151
5.3.3	L'interaction du vent solaire avec les planètes magnétisées	155
	La magnétosphère fermée	155
	Le modèle de Chapman-Ferraro	158
	Les modèles hydrodynamiques tridimensionnels	160
	La magnétosphère ouverte	163
	La circulation du plasma à l'intérieur des magnétosphères	165
5.3.4	Les émissions radio « aurorales » des magnétosphères planétaires	173
	Observations	173
	Théorie	181
	Accélération des électrons énergétiques	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
7	Les astéroïdes	273
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
8	Les planètes géantes	293
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
10	Les corps dénués d'atmosphère dans le système solaire extérieur	379
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
11	Les comètes	419
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
12 Les nouvelles frontières	453
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
13 Grains interplanétaires, micrométéorites et météorites	463
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
14 Les nouveaux systèmes planétaires	485
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
15	La recherche de la vie dans l'Univers	509
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
16	Bibliographie	519
17	Index	525

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^e 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^e 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

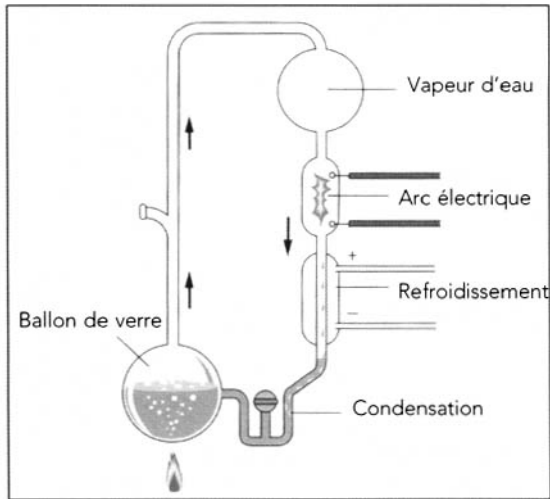


FIG. 15-1 – Schéma de l'expérience de Stanley Miller destinée à simuler l'évolution chimique prébiotique. Cette expérience, réalisée en 1953, a montré qu'il était possible de synthétiser des molécules prébiotiques à partir d'un mélange de H_2 , CH_4 , NH_3 et H_2O , en présence de décharges électriques. (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-