

# INTRO UNE INTRODUCTION À TION DUC

## LES PLANÈTES ET LA VIE

Thérèse Encrenaz,  
James Lequeux  
et Fabienne Casoli

## LES PLANÈTES ET LA VIE

Comprendre l'évolution climatique de la Terre et des autres planètes est un enjeu majeur. La Terre est la seule planète du Système solaire dont les conditions tempérées autorisent aujourd'hui la présence d'eau liquide à sa surface, eau qui paraît nécessaire à une vie évoluée. Ses sœurs Vénus et Mars sont extrêmement différentes. Pourquoi ces trois planètes, nées dans des conditions assez comparables, ont-elles évolué vers les conditions que nous observons aujourd'hui ? Mettre en évidence les facteurs, physiques ou chimiques qui sont à l'origine de ces évolutions si divergentes est une première étape à franchir pour mieux comprendre comment la vie a pu apparaître sur la Terre et s'y développer.

Cette interrogation prend une nouvelle dimension avec la découverte de milliers de planètes extrasolaires, les exoplanètes, dont certaines pourraient ressembler à la Terre. Peuvent-elles abriter la vie ? Avec leur découverte, la question « Sommes-nous seuls dans l'Univers ? », vieille comme l'humanité, ne se cantonne plus à notre Système solaire, mais voit le champ des possibilités s'ouvrir à l'infini. Nous avons aujourd'hui les moyens d'aborder le problème sous un angle scientifique et pas seulement philosophique, comme c'était le cas dans le passé. Dans cette perspective, il est plus que jamais nécessaire de comprendre l'évolution des planètes et de mieux cerner les facteurs qui permettent l'émergence et le développement de la vie : c'est un des buts de ce livre.

L'engouement du public pour le sujet se traduit parfois par des annonces sensationnelles et prématurées. Le livre rappelle qu'il reste un long chemin à parcourir avant que l'on parvienne à détecter la vie sur une exoplanète ; en conclusion, il trace aussi les pistes d'une future exploration des exoplanètes habitables.

*Thérèse Encrenaz est spécialiste de l'étude des atmosphères planétaires. Elle a dirigé le département de Recherche Spatiale de l'Observatoire de Paris, puis a été vice-présidente du Conseil Scientifique de l'Observatoire. Elle est l'auteur de nombreux livres de vulgarisation.*

*James Lequeux a dirigé la Station de radioastronomie de Nançay et l'Observatoire de Marseille, et a été pendant quinze ans rédacteur en chef de la revue européenne Astronomy & Astrophysics. Il a écrit de nombreux ouvrages d'histoire des sciences et de vulgarisation.*

*Fabienne Casoli est astronome à l'Observatoire de Paris. Elle a été directrice adjointe de l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS, directrice de l'Institut d'Astrophysique Spatiale à Orsay, et directrice-adjointe du Centre National d'Études Spatiales (CNES). Elle s'intéresse maintenant à la radioastronomie aux très grandes fréquences et aux projets NenuFAR et SKA (Square Kilometer Array).*

Isbn : 978-2-7598-2354-3



9 782759 823543

Création graphique : Béatrice Couëdel

**edp sciences**  
www.edpsciences.org

La collection « **UNE INTRODUCTION À...** » se propose de faire connaître à un large public les avancées les plus récentes de la science. Les ouvrages sont rédigés sous une forme simple et pédagogique par les meilleurs experts français.

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

# **Les planètes et la vie**

**Thérèse Encrenaz, James Lequeux  
et Fabienne Casoli**



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

## Dans la même collection

*Le climat : la Terre et les hommes*

Jean Poitou, Pascale Braconnot et Valérie Masson-Delmotte,  
préface de J. Jouzel

*Aux origines de la masse : particules élémentaires et symétrie fondamentales*

Jean Iliopoulos, préface de F. Englert

*Les relativités : espace, temps, gravitation*

Michel Le Bellac, préface de T. Damour

*Le temps : mesurable, réversible, insaisissable ?*

Mathias Fink, Michel Le Bellac et Michèle Leduc

*La révolution des exoplanètes*

James Lequeux, Thérèse Encrenaz et Fabienne Casoli

*À l'orée du cosmos*

Alain Omont

*Vertigineuses symétries*

Antony Zee, traduit par Michel Le Bellac

*Le temps des neurones – Les horloges du cerveau*

Dean Buonomano, traduit par Michel Le Bellac

*Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps*

Stéphane Collion

Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur <http://laboutique.edpsciences.fr>

Imprimé en France

**ISBN (papier) : 978-2-7598-2354-3 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2398-7**

© 2019, 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.

# Avant-propos

Avec une pression de surface de 1 bar et une température moyenne de 15 °C, la Terre est la seule planète du Système solaire où les conditions tempérées autorisent aujourd'hui la présence d'eau liquide à sa surface. En revanche, les conditions de surface des planètes Vénus et Mars présentent une extrême diversité, avec une pression proche de cent fois la valeur terrestre sur Vénus et de moins du centième de bar sur Mars, et une température allant de plus de 460 °C sur Vénus à environ -50 °C sur Mars. Comment ces trois planètes, parties de conditions initiales relativement comparables, ont-elles pu évoluer vers les conditions extrêmes que nous observons aujourd'hui ? La compréhension de l'évolution de l'atmosphère des trois planètes terrestres qui en sont dotées – Vénus, la Terre et Mars – constitue un défi majeur pour la planétologie. Mettre en évidence les facteurs physiques ou chimiques qui sont à l'origine de cette évolution apparaît en effet comme une première étape à franchir pour mieux comprendre le contexte dans lequel la vie a pu apparaître sur la Terre et s'y développer.

Cette question prend aujourd'hui une nouvelle dimension avec la découverte, depuis une vingtaine d'années, de milliers de planètes extrasolaires parmi lesquelles de nombreuses exoplanètes dites « rocheuses », c'est-à-dire dotées d'une surface tout comme les planètes terrestres du Système solaire. On les appelle, selon leur masse, « exo-Terres » ou « super-Terres ». Une question s'impose à l'évidence : certaines de ces exoplanètes pourraient-elles abriter la vie ? Avec leur découverte, la question « Sommes-nous seuls dans l'Univers ? », vieille comme l'humanité, ne se cantonne plus à notre Système solaire, mais voit le champ des possibilités s'ouvrir à l'infini. Dans ce nouveau contexte, il est plus que jamais nécessaire de comprendre l'évolution des planètes rocheuses et de mieux cerner les facteurs qui déterminent leur habitabilité, c'est-à-dire leur capacité à permettre l'émergence et le développement de la vie. Ces facteurs peuvent être multiples. Certains sont de nature physico-chimique (pression et température du milieu, composition atmosphérique), d'autres relèvent de l'environnement de la planète (nature de l'étoile, présence d'une magnétosphère) ou de

ses paramètres orbitaux (ellipticité de l'orbite, obliquité de la planète, vitesse de rotation).

Pendant plus de deux millénaires, la quête d'une vie extraterrestre, présente dès les premiers âges de l'humanité, a porté sur des considérations philosophiques. Ce n'est que depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle que les astronomes ont pu commencer à aborder la question de manière scientifique, d'abord avec l'observation des planètes qui nous entourent, puis, un demi-siècle plus tard, avec la recherche d'exoplanètes autour d'autres étoiles. La fin du XX<sup>e</sup> siècle a été le témoin d'une avalanche de découvertes qui s'est poursuivie et amplifiée au cours des deux premières décennies du XXI<sup>e</sup> siècle. Des missions spatiales planétaires de plus en plus complexes continuent d'explorer le sol et le sous-sol de la planète Mars dans le but d'y rechercher d'éventuelles traces de vie fossile ; d'autres, dans les décennies à venir, iront explorer les satellites des planètes géantes du Système solaire extérieur, dont certains pourraient abriter, sous leur surface glacée, un océan d'eau liquide. En parallèle, dans le domaine des exoplanètes, nous disposons aujourd'hui de moyens nous permettant de déterminer leur nature et, dans certains cas, leur composition atmosphérique. Parmi les exoplanètes rocheuses connues aujourd'hui, plusieurs dizaines d'entre elles pourraient être dotées d'une température compatible avec la présence d'eau liquide. D'ici une ou deux décennies, ces recherches vont s'affiner pour permettre, peut-être, de mettre en évidence sur l'une ou plusieurs d'entre elles l'oxygène ou son dérivé l'ozone, signature possible de la présence de vie. . .

Dans ce contexte de recherche foisonnante, en évolution permanente, il nous a paru utile de tenter de mieux comprendre les critères définissant l'habitabilité des exoplanètes rocheuses, celles qui pourraient être à même d'abriter la vie. Ce livre s'inscrit dans la suite de l'ouvrage « À la recherche des exoplanètes », par J. Lequeux, T. Encrenaz et F. Casoli, publié dans la même collection en 2017. Comme le précédent, il s'adresse à tous les publics intéressés par l'astronomie, la planétologie et la recherche d'une vie extraterrestre. Ici, nous nous proposons de partir des planètes que nous connaissons bien, les planètes terrestres du Système solaire dotées d'une atmosphère, pour analyser les divers mécanismes physico-chimiques qui ont pu être responsables de leur évolution divergente. Puis nous tenterons d'extrapoler ces résultats à l'exploration des planètes extrasolaires, afin de mieux comprendre les mécanismes possibles d'évolution des exoplanètes rocheuses et de mieux appréhender ce que pourraient être leurs conditions d'habitabilité. Enfin nous concluons cet ouvrage par une analyse des moyens qui nous pourraient nous permettre de mettre en évidence d'éventuelles traces de vie, voire même de communiquer avec des civilisations lointaines.

Nous tenons à remercier Michèle Leduc et Michel Le Bellac pour leur relecture attentive de cet ouvrage, et Sophie Hosotte pour le soin apporté à sa réalisation.

# Table des matières

Avant-propos	iii
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 La formation des planètes</b>	<b>11</b>
2.1 Depuis l'Antiquité, le mythe de la pluralité des mondes	11
2.2 Le modèle de la nébuleuse primitive	13
2.3 Idées actuelles sur la formation des étoiles et de leur cortège planétaire	16
2.4 Planètes terrestres et planètes géantes	19
2.5 La migration des planètes	24
2.6 Le grand bombardement tardif et ses conséquences	27
2.7 La formation des planètes dans les systèmes exoplanétaires	28
2.8 Les atmosphères primitives des planètes terrestres	29
2.9 Quelle atmosphère pour les exoplanètes rocheuses ?	30
<b>3 L'exploration des planètes terrestres</b>	<b>33</b>
3.1 Premières observations astronomiques	33
3.2 Le mythe des canaux martiens	35
3.3 La nature physique des planètes	36
3.4 Les débuts de l'ère spatiale	37
3.5 La mission Viking : espoirs et désillusions	39
3.6 De Mars à Vénus	40
3.7 Le renouveau de l'exploration martienne	42
3.8 Le retour vers Vénus	47
3.9 Les planètes Mars et Vénus aujourd'hui	50
3.10 Entre Vénus et Mars, la Terre	52
3.11 Vers une étude comparative des planètes terrestres	56
<b>4 Vénus, la Terre et Mars : une évolution divergente</b>	<b>57</b>
4.1 L'étonnante variété des planètes terrestres	58

4.2	Et pourtant. . . des caractéristiques communes . . . . .	64
4.3	Les planètes terrestres juste après leur formation . . . . .	69
4.4	Histoire des planètes terrestres : une évolution divergente . . . . .	74
<b>5</b>	<b>L'apparition de la vie</b>	<b>79</b>
5.1	Qu'est-ce que la vie ? . . . . .	79
5.2	De la génération spontanée à la soupe primitive . . . . .	80
5.3	Premières expériences de chimie prébiotique . . . . .	83
5.4	Les briques de base du vivant terrestre . . . . .	85
5.5	Origine des molécules prébiotiques . . . . .	89
5.6	Croissance de la complexité à partir des molécules prébiotiques . . . . .	92
5.7	La formation des cellules . . . . .	93
5.8	Le métabolisme et la question de l'énergie . . . . .	94
5.9	Le code génétique . . . . .	96
5.10	L'ancêtre de tous les êtres vivants ? . . . . .	97
5.11	La vie sur Terre comme modèle du vivant sur d'autres planètes ? . . . . .	99
5.12	Les débuts de la vie sur Terre . . . . .	100
5.13	La vie sur les exoplanètes . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Le développement de la vie sur Terre</b>	<b>103</b>
6.1	Le paradoxe du « Soleil jeune » . . . . .	104
6.2	Les grandes étapes de l'évolution du climat terrestre . . . . .	105
6.3	Quel devenir pour l'atmosphère terrestre ? . . . . .	113
6.4	Quelles leçons retenir pour l'exobiologie ? . . . . .	115
<b>7</b>	<b>La vie dans le Système solaire ?</b>	<b>119</b>
7.1	La zone d'habitabilité dans le Système solaire . . . . .	119
7.2	Un océan passé sur Vénus ? . . . . .	122
7.3	À la recherche de traces de vie sur Mars . . . . .	125
7.4	Les autres niches du Système solaire . . . . .	128
<b>8</b>	<b>Les exoplanètes rocheuses : comment y rechercher la vie ?</b>	<b>135</b>
8.1	La découverte des exoplanètes : où en sommes-nous ? . . . . .	136
8.2	Le concept d'exoplanète : une idée ancienne . . . . .	139
8.3	Les premières découvertes . . . . .	142
8.4	Les succès de la vélocimétrie . . . . .	142
8.5	Une nouvelle étape : la méthode des transits . . . . .	144
8.6	Comment rechercher la vie sur une exoplanète ? . . . . .	148

8.7	Des satellites autour des exoplanètes géantes?.....	152
8.8	Comment déterminer la composition atmosphérique d'une exoplanète?.....	153
8.9	Comment rechercher la vie à partir de l'étude du spectre d'une exoplanète?.....	155
<b>9</b>	<b>Conclusions : quelques pistes futures de l'exobiologie</b>	<b>161</b>
9.1	L'avenir de l'exploration de Mars.....	162
9.2	Comment détecter des traces de vie <i>in situ</i> ?.....	166
9.3	Vers une exploration habitée de Mars?.....	167
9.4	Vers les satellites extérieurs, autres niches possibles pour la vie.....	169
9.5	L'exploration des exoplanètes : les perspectives.....	170
9.6	Et si nous n'étions pas seuls?.....	175
	<b>Glossaire</b>	<b>179</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>187</b>
	<b>Index</b>	<b>189</b>



# 1

## Introduction

Au sein du cortège des planètes du Système solaire, nos plus proches voisines, Vénus et Mars, sont sans doute celles qui nous étonnent le plus. Alors qu'elles appartiennent, comme la Terre, à la famille des planètes rocheuses, ou « terrestres », et qu'elles sont comme la Terre dotées d'une atmosphère, elles présentent des conditions de surface radicalement différentes : sur Vénus, la pression avoisine cent fois la pression atmosphérique terrestre et la température atteint  $460\text{ }^{\circ}\text{C}$ , alors que sur Mars, la pression de surface est inférieure au centième de bar, et la température moyenne est de l'ordre de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ! Entre ces deux extrêmes, la Terre occupe une position intermédiaire, avec une pression de surface de l'ordre du bar et une température de surface moyenne de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Fig. 1.1). Comment ces trois planètes rocheuses, toutes formées dans le Système solaire interne il y a 4,5 milliards d'années à partir de conditions initiales relativement similaires, ont-elles pu évoluer vers des destins si radicalement divergents ? C'est cette question, l'une des plus fondamentales de la planétologie d'aujourd'hui, que nous allons aborder dans ce livre.

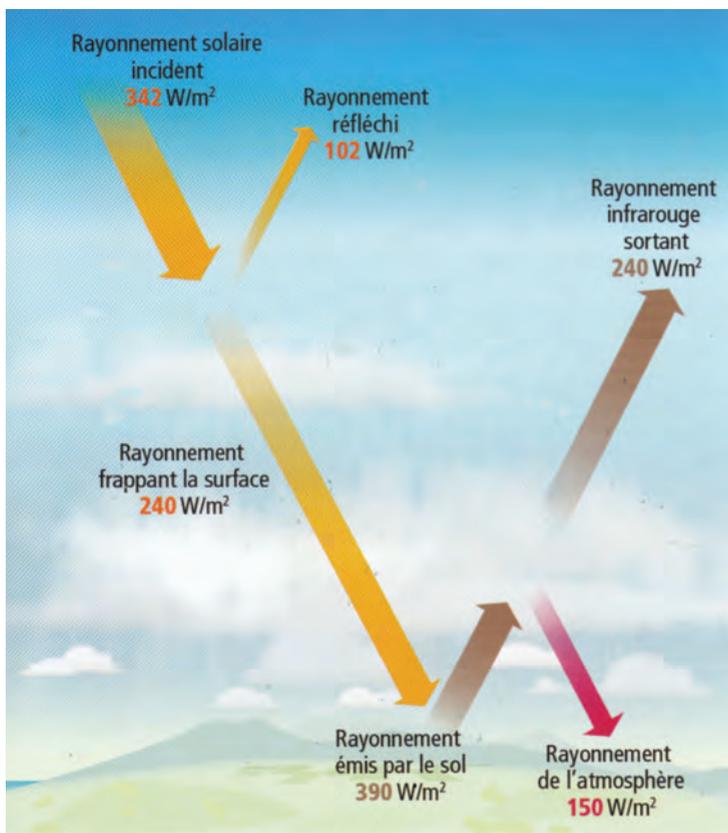
Comprendre l'évolution des planètes terrestres du Système solaire n'est pas seulement important pour déchiffrer l'origine et l'évolution de notre propre environnement. Avec la découverte, depuis deux décennies, de milliers de planètes extrasolaires en orbite autour d'étoiles voisines, parmi lesquelles un nombre croissant d'exoplanètes rocheuses, le débat prend une nouvelle dimension. En effet, la question majeure qui se pose au sujet des exoplanètes rocheuses est celle de leur habitabilité potentielle : s'il existe une forme de vie extraterrestre, cette nouvelle classe d'objets n'est-elle pas l'endroit le plus favorable pour la chercher ? Or la première étape de cette recherche consiste à déterminer la température et la pression de leur atmosphère. Un astronome observant les planètes du



**FIGURE 1.1.** Vénus, la Terre et Mars : des conditions initiales relativement similaires mais des destins divergents. Les dimensions relatives des trois planètes sont respectées. © NASA.

Système solaire interne depuis l'étoile la plus proche, Proxima du Centaure, serait bien en peine d'imaginer la diversité extrême des conditions qui règnent à la surface des planètes terrestres. C'est dire que les propriétés physiques des exoplanètes rocheuses nous réservent sans doute bien des surprises... et à défaut de pouvoir aujourd'hui les étudier en détail, il nous faut comprendre les mécanismes qui sont responsables, dans le Système solaire, de l'évolution divergente des planètes terrestres.

Pourquoi la planète Vénus a-t-elle aujourd'hui une température si élevée ? Nous connaissons le responsable, dont on parle beaucoup actuellement au sujet du réchauffement climatique de notre propre planète : c'est l'effet de serre (Fig. 1.2). De quoi s'agit-il ? L'effet de serre se produit lorsqu'une atmosphère est transparente au rayonnement visible, mais opaque au rayonnement infrarouge. C'est ce qui caractérise les parois d'une serre qui laissent passer le rayonnement solaire visible, provoquant l'échauffement de l'intérieur de la serre ; comme les parois de la serre absorbent le rayonnement infrarouge émis par l'intérieur, la température s'y élève et l'effet s'amplifie. Dans le cas d'une atmosphère planétaire, l'effet de serre intervient si les gaz atmosphériques absorbent le rayonnement infrarouge ; c'est le cas du dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  (aussi appelé gaz carbonique) et aussi de la vapeur d'eau  $\text{H}_2\text{O}$ . Dans le cas de la Terre, les principaux constituants, l'azote  $\text{N}_2$  et l'oxygène  $\text{O}_2$  n'absorbent pas l'infrarouge et ne contribuent donc pas à l'effet de serre ; ce sont les émissions croissantes de  $\text{CO}_2$  qui sont la première cause du réchauffement climatique. D'autres gaz, comme l'eau  $\text{H}_2\text{O}$ , le méthane  $\text{CH}_4$  et l'ozone  $\text{O}_3$  contribuent également à l'effet de serre, de manière minoritaire. Dans le cas de Vénus, la situation est différente. Comme pour Mars, le gaz dominant est le dioxyde de carbone, avec une faible proportion (quelques pourcents) d'azote. Comme, de plus, la pression de surface de



**FIGURE 1.2.** L'effet de serre. L'atmosphère est transparente dans le domaine visible et le rayonnement solaire atteint la surface. Celle-ci, chauffée, émet un rayonnement infrarouge qui est absorbé partiellement par l'atmosphère si celle-ci contient certains gaz absorbant l'infrarouge, tels que le gaz carbonique CO<sub>2</sub>, le méthane CH<sub>4</sub> ou la vapeur d'eau H<sub>2</sub>O. Dans le cas de Vénus, ce sont CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O (dans le passé de la planète) qui ont été responsables de l'emballement de l'effet de serre au cours de son histoire.

Vénus est très grande, c'est l'effet de serre dû au CO<sub>2</sub> qui est responsable de la température de surface très élevée.

Pourquoi la composition atmosphérique de la Terre (environ quatre cinquièmes d'azote moléculaire et un cinquième d'oxygène) est-elle si différente de celle de Vénus et de Mars ? C'est ici qu'intervient une autre molécule clé : l'eau. Il est aujourd'hui établi (nous verrons plus loin comment) que les atmosphères primitives des trois planètes, Vénus, la Terre et Mars, étaient globalement similaires, avec de grandes quantités de gaz carbonique et d'eau et une faible proportion d'azote moléculaire. Dans le cas de Vénus, plus proche du Soleil que la Terre, l'eau s'est trouvée à un certain moment de son histoire sous forme de vapeur, contribuant ainsi à l'effet de serre galopant de la planète.

En revanche, la distance de la Terre au Soleil est telle que l'eau terrestre s'est trouvée principalement sous forme liquide dans les océans ; le gaz carbonique, lui aussi très abondant, a été piégé au fond des océans sous forme de calcaire ; ainsi ont presque disparu de l'atmosphère terrestre les deux principaux gaz à effet de serre, permettant à la Terre de conserver des conditions tempérées tout au long de son histoire.

Comment expliquer l'évolution de Mars ? La planète présente deux différences notoires vis-à-vis de Vénus et de la Terre : étant plus éloignée du Soleil, elle est plus froide que ses voisines (l'eau ne peut pas aujourd'hui y séjourner en surface sous forme liquide) mais elle est aussi plus petite puisque sa masse n'est que le dixième de celle de la Terre. Dotée d'un champ de gravité bien inférieur à celui de Vénus et de Mars, elle n'a pas pu capturer, comme ses voisines, une atmosphère épaisse ; on pense que son atmosphère primitive, aujourd'hui largement disparue par échappement, n'a pas pu dépasser le bar. Du fait de son plus petit volume, son énergie interne, principalement due à la désintégration des éléments radioactifs que contient la planète, était aussi bien moindre que celle de ses voisines, d'où une activité volcanique et tectonique réduite qui a fini par s'éteindre au fil de l'histoire.

Si les grandes lignes de l'évolution des planètes terrestres nous semblent bien définies, de multiples questions restent ouvertes, à commencer par celle de leur habitabilité. Mars et Vénus ont-elles pu un jour abriter une forme de vie ? Nous sommes aujourd'hui bien incapables de répondre à cette question. La question se complique encore si l'on prend en compte ce qu'était le rayonnement solaire au début de l'histoire des planètes : c'est le paradoxe du « Soleil jeune ». Les modèles d'évolution stellaire nous apprennent en effet qu'il y a environ quatre milliards d'années, le rayonnement du Soleil en lumière visible (qui correspond au maximum de son énergie) n'était que de 70 % de sa valeur actuelle. Les températures d'équilibre des surfaces de nos trois planètes terrestres étaient donc inférieures à ce qu'elles sont aujourd'hui. D'où une conséquence capitale pour Vénus : la température a pu être compatible avec celle de l'eau liquide, et la Vénus primitive a pu être couverte d'océans, et peut-être même, qui sait, abriter la vie ! Malheureusement, si ces conditions ont existé, elles n'ont pas duré : à mesure que le rayonnement solaire augmentait, l'eau s'est vaporisée (contribuant un temps à l'effet de serre), puis a été dissociée par le rayonnement ultraviolet solaire en atomes d'hydrogène et d'oxygène qui se sont échappés. Si un océan (et *a fortiori* la vie) a jamais existé au début de l'histoire de Vénus, nous n'en saurons sans doute jamais rien car les traces en ont irrémédiablement disparu : la surface de Vénus est en effet couverte de volcans relativement récents, d'un âge inférieur au milliard d'années.

Ce paradoxe du « Soleil jeune » soulève aussi des questions encore mal résolues dans le cas des autres planètes terrestres. Comment expliquer que la Terre, au début de son histoire, ait échappé à un épisode de « boule de neige globale », sa température d'équilibre étant alors trop basse pour être compatible avec la présence d'eau liquide ? Une hypothèse possible est celle d'éruptions volcaniques relâchant dans l'atmosphère suffisamment de gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$  et aussi  $\text{CH}_4$ ). La même question se pose avec encore plus d'acuité dans le cas de la planète Mars. Nous verrons plus loin que de nombreux indices témoignent de la présence d'eau liquide en surface dans le passé lointain de cette planète. Comment l'eau liquide a-t-elle pu séjourner sur Mars alors que sa température d'équilibre était incompatible (de plusieurs dizaines de degrés !) avec la présence d'eau liquide ? La question n'est toujours pas tranchée.

Avec la Terre et Mars, nous disposons heureusement d'une piste de recherche : à la différence de Vénus, ces deux planètes conservent à leur surface des archives nous permettant de retracer leur histoire jusqu'à près de quatre milliards d'années. C'est pourquoi la planète Mars fait toujours l'objet d'une exploration spatiale soutenue, avec l'objectif de rechercher d'éventuelles traces d'une vie passée – voire présente. À défaut, les recherches portent sur la caractérisation de sites « habitables », c'est-à-dire réunissant les critères physico-chimiques compatibles avec l'émergence de la vie (Fig. 1.3). Ces critères portent en particulier sur l'acidité du sol (de préférence neutre), sa salinité (modérée), sa composition chimique (incluant les éléments essentiels pour la vie que sont C, H, N, O, P, S). Pourrons-nous aller plus loin ? L'exploration spatiale de Mars continue et l'avenir nous le dira...

Des planètes terrestres aux exoplanètes rocheuses, il n'y a qu'un pas. Cela fait plus de vingt ans que des planètes, dites « extrasolaires » ou « exoplanètes », ont été découvertes autour d'étoiles proches du Soleil. À la surprise générale, les premiers objets découverts (les plus faciles à mettre en évidence sur le plan observationnel), ont été des exoplanètes géantes très proches de leur étoile ! Cette découverte a créé une véritable révolution conceptuelle, remettant en cause notre propre compréhension du Système solaire. En effet, selon le modèle de formation du Système solaire qui est largement accepté aujourd'hui par la communauté scientifique, les planètes géantes se forment loin du Soleil, par accumulation de gaz autour d'un noyau de glace, alors que les planètes terrestres se forment à partir d'un noyau rocheux plus petit et plus dense. Les premières découvertes d'exoplanètes ont donc montré que le modèle du Système solaire n'était pas universel. L'explication de ce paradoxe trouve son origine dans le déplacement des planètes au sein du disque protoplanétaire : on parle de « migration », un processus jusqu'alors peu pris en compte par les planétologues. Très

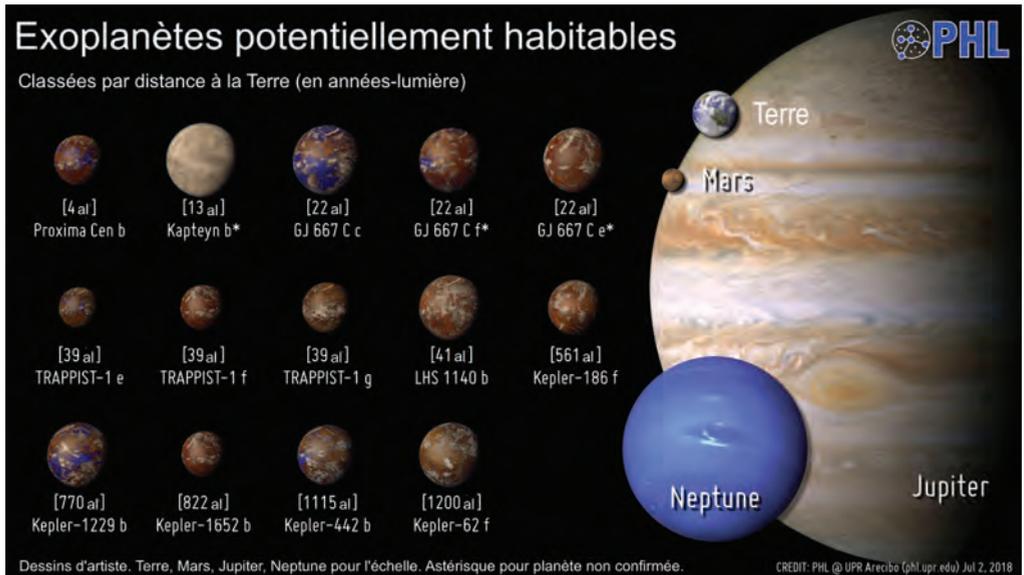


**FIGURE 1.3.** La mission spatiale Mars Science Laboratory (MSL), avec son rover « Curiosity », lancée par la NASA en novembre 2011 et en opération à la surface de Mars depuis août 2012, a pour objectif principal de déterminer si des conditions propices à la vie ont pu exister sur Mars, notamment par la recherche de molécules organiques. Le rover a effectivement identifié, à proximité du Mont Sharp, le vestige d'un lac ancien qui aurait pu constituer un environnement habitable. © NASA.

efficace au sein des systèmes exoplanétaires, il s'est avéré également important pour comprendre l'histoire dynamique de notre propre Système solaire.

Alors que les premières exoplanètes détectées étaient surtout des planètes géantes, identifiées depuis la Terre à partir des oscillations de leur étoile-hôte liées au mouvement de la planète, une nouvelle révolution est intervenue, avec le lancement des missions spatiales *CoRoT* et surtout *Kepler*, dédiées à la détection des exoplanètes lors de leur passage (on parle de transit) devant leur étoile-hôte. *Kepler* a ainsi détecté des milliers de nouvelles exoplanètes, parmi lesquelles des objets de toutes tailles, y compris de nouvelles familles de planètes : « mini-Neptunes », « super-Terres », voire « exo-Terres »... Bien que la nature physique de ces planètes ne soit pas encore connue, il est très probable

que de nombreuses exoplanètes rocheuses figurent au nombre des nouvelles découvertes. Les premières mesures de caractérisation des atmosphères des exoplanètes nous montrent que la vapeur d'eau y est souvent présente. Parmi les exoplanètes rocheuses, certaines, situées à la bonne distance de leur étoile-hôte – dans ce que l'on appelle la « zone d'habitabilité » – pourraient abriter l'eau sous forme liquide, et dès lors, peut-être, constituer des niches potentielles pour l'émergence et le développement de la vie (Fig. 1.4). L'exploration des exoplanètes ouvre ainsi des perspectives immenses en termes d'exobiologie.



**FIGURE 1.4.** Parmi les exoplanètes rocheuses détectées, certaines pourraient connaître un environnement tempéré, compte tenu de la quantité de lumière qu'elle reçoit de leur étoile-hôte : elle se trouve dans la « zone habitable » de leur étoile, celle dont la température est compatible avec la présence d'eau liquide à leur surface. Cependant, il reste à identifier la composition de leur atmosphère pour savoir si l'eau est présente, a fortiori sous forme liquide. Cette figure représente un échantillon sélectionné par les chercheurs du radiotélescope d'Arecibo en 2014 ; l'aspect de la surface des exoplanètes est imaginaire.

Une première question s'impose : si jamais la vie existait à la surface d'une exoplanète, comment pourrions-nous la mettre en évidence ? Encore faut-il d'abord définir la vie : nous reviendrons sur cette notion dans le courant de ce livre. Disons simplement que, selon les biologistes, on peut caractériser la matière vivante par la capacité de reproduction, l'aptitude à utiliser l'énergie du milieu, la séparation d'avec le milieu ambiant, la création d'une organisation, et enfin la capacité d'évolution par mutation. Bien entendu, les formes que peut prendre la vie peuvent être infiniment diverses, comme le montre le seul

exemple que nous connaissons, celui de la Terre. Nous ne savons toujours pas comment la vie est apparue sur la Terre. Cependant, comme nous le verrons plus loin, les chimistes et les biologistes, toujours sur la base de notre expérience terrestre, s'accordent pour définir quelques conditions essentielles : la présence de carbone, d'eau liquide, d'une source d'énergie, et beaucoup de temps. Ce sont ces critères qui seront retenus dans la quête d'une vie extraterrestre, que ce soit au sein du Système solaire ou au-delà.

Comment mettre en évidence la présence de vie en observant l'atmosphère d'une exoplanète ? Compte tenu des distances immenses qui rendent illusoire la perspective d'une mission spatiale, même robotique, qui serait destinée à s'approcher de l'objet en question, nous sommes limités aux méthodes de sondage à distance, dont la plus prometteuse est la caractérisation spectroscopique. Il nous faudra déterminer quels constituants, dans l'atmosphère ou à la surface de l'objet, pourraient trahir la présence de vie. Quelques pistes s'ouvrent d'ores et déjà : dans l'atmosphère, la présence d'oxygène moléculaire  $O_2$ , en quantité substantielle, ainsi que son dérivé photochimique, l'ozone  $O_3$ , semblent un indice assez probant, mais nous verrons que la réalité est plus complexe et que la présence simultanée d'autres constituants –  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $N_2O$ ... – est sans doute également nécessaire à la caractérisation de la vie. À la surface, la présence de chlorophylle serait un diagnostic déterminant mais nous verrons que sa détection spectroscopique n'est pas simple. Et n'oublions pas que la vie sur une autre planète a pu prendre des formes bien différentes de la photosynthèse que nous connaissons sur Terre.

Le but principal de cet ouvrage est d'explorer les conditions d'habitabilité des exoplanètes rocheuses, en partant de ce que nous connaissons : les planètes terrestres du Système solaire dotées d'une atmosphère. En observant leur évolution divergente, en étudiant – dans la mesure du possible – leur conditions d'habitabilité passées ou présentes, nous tenterons d'extrapoler ces notions aux exoplanètes rocheuses dont nous savons pour l'instant bien peu de choses. Parmi les exoplanètes actuellement connues, nous tenterons d'identifier les candidates les plus favorables, celles qui semblent le mieux placées par rapport à la zone d'habitabilité de leur étoile. Enfin, nous nous efforcerons de définir les observations qui nous permettraient de conclure à la présence possible ou probable de vie. Notre premier objectif est la recherche de formes de vie à la surface d'une exoplanète susceptible de présenter des similarités avec le développement de la vie sur Terre au cours des 600 derniers millions d'années. Il existe d'autres niches potentiellement favorables à la vie : ce sont les océans d'eau liquide qu'abritent sous leur surface les satellites extérieurs du Système solaire ; c'est le cas, en particulier, d'Europe, satellite de Jupiter, et d'Encelade, satellite de Saturne. De tels environnements pourraient exister autour d'éventuels satellites en orbite autour

d'exoplanètes géantes ; bien que, à quelques exceptions près, ceux-ci restent à découvrir, leur existence est très plausible si l'on en croit les modèles de formation planétaire. Cependant, la détection de formes de vie au sein de ces milieux aqueux semble *a priori* bien plus difficile que celle qui se serait développée à la surface d'une exoplanète...

Dans la première partie de cet ouvrage, nous décrivons l'histoire passée des planètes terrestres, à partir du modèle de formation du Système solaire qui nous fera découvrir l'émergence de deux classes de planètes, les planètes terrestres proches du Soleil et les planètes géantes plus lointaines. Ce modèle nous permettra de comprendre la nature des gaz qui étaient présents à l'origine dans les atmosphères de ces planètes. Nous verrons aussi comment la migration des planètes géantes au cours de leur histoire a influencé l'histoire dynamique de l'ensemble du Système solaire. Dans une seconde partie, nous décrirons les trois planètes terrestres dotées d'atmosphères, l'histoire de leur exploration, l'état de nos connaissances à leur sujet et enfin leurs différents scénarios d'évolution. Enfin, dans la troisième partie, nous extrapolerons ces connaissances à ce que nous savons des exoplanètes rocheuses (ou susceptibles de l'être). Nous rechercherons les cibles potentiellement favorables à la recherche de la vie et nous imaginerons les observations qui pourraient nous permettre, d'ici une ou plusieurs décennies, de découvrir enfin, qui sait, les signes d'une vie extraterrestre. Pour conclure, nous présenterons quelques pistes de réflexion pour tenter de définir les étapes futures de l'exobiologie, et nous aborderons la question d'une éventuelle communication avec des civilisations extraterrestres, si nous arrivons à découvrir leur existence.



## S

Safronov, Viktor (1917-1999) 20, 183

### Satellites artificiels

**ARIEL** 174

**CHEOPS** 172

**CoRoT** 6, 146, 147, 171

**Gaia** 148, 171, 172

**HabEx** 174

**Herschel** 17, 23, 133

**HST** 145, 152, 153, 155, 156, 162,  
174, 175

**IRAS** 142

**JWST** 155, 156, 174, 175

**Kepler** 6, 147, 148, 150, 171

**LUVOIR** 158, 159, 174,

**PLATO** 172

**Spitzer** 154-156, 174

**Sputnik** 37

**TESS** 171

### Satellites naturels iv, 8, 28, 30, 33,

35, 62, 63, 99, 102, 115, 120,

128-133, 135, 152, 161, 169, 170

**Encelade** 8, 120, 129, 130,  
132, 133, 135, 169, 170

**Europe** 8, 102, 120, 129, 130, 131, 133,  
135, 169, 170

**Ganymède** 129, 130, 132, 169, 170

**Lune** 11, 12, 27, 28, 34, 36, 37, 53, 63,  
92, 115, 150, 151, 158, 163,  
167, 168, 176

**Titan** 99, 102, 120, 129, 131,  
132, 169, 170

Schiaparelli, Giovanni (1835-1910) 13,  
35, 36

Schulze-Makuch, Dirk 151, 188

**Serre (effet de)** 2-5, 31, 37, 48, 52, 73,  
75-78, 104, 105, 108-110,  
113, 114, 116, 121, 123

**SETI** 13, 177

Shakespeare, William (1564-1616) 81

### Sondes spatiales et rovers

**Akatsuki** 48, 49, 124

**Apollo** 37, 167, 168

**Beagle 2** 46

**Cassini-Huygens** 131-133, 169, 170

**Chang'e** 168

**Curiosity** 47, 48, 71, 126, 127,  
162, 163, 166-168

**Europa Clipper** 131, 169

**ExoMars** 47, 162, 163, 166, 167

**Galileo** 130, 131

**InSight** 56, 60

**JUICE** 130, 169, 170

**Magellan** 41, 42, 47, 59, 123

**Mariner** 35, 37, 38, 50, 70

**Mars-96** 41, 45, 46

**Mars Climate Orbiter** 44

**Mars Express** 46, 61, 71, 72, 77, 125

**Mars Global Surveyor** 44, 45, 50, 62,  
71, 77, 125

**Mars Observer** 44

**Mars Odyssey** 45, 46, 70, 125

**Mars Pathfinder** 44

**Mars Polar Lander** 45

**Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)**  
47, 77, 127

**Mars Sample Return** 47, 163

**Mars Science Laboratory** 6, 47

**Mars Surveyor 98** 44

**MAVEN** 47

**Nozomi** 45

**Opportunity** 46, 126

**Phobos** 41

**Phoenix** 47

**Pioneer** 177

**Pioneer Venus** 41, 49, 70

**Schiaparelli** 47

**Sojourner** 44

**Spirit** 46

**Trace Gas Orbiter** 47, 162  
**Venera, Vega** 40-41  
**Venus Express** 47-49, 51, 125  
**Viking** 35, 38-40, 42, 43, 45, 50,  
70, 73, 80, 125, 162, 163, 166  
**Voyager** 130, 131, 177  
Spitzer, Lyman (1914-1997) 16  
**Spectromètre pour exoplanètes** 173  
**Spectre, Spectroscopie** 71, 77,  
153-158, 166, 171, 172, 174,  
176, 180, 183, 184  
**Super-Terres et Neptunes** iii, 6, 28,  
29-31, 137, 139, 145, 147, 150,  
157, 172, 184

**T**

**Télescope** 35, 145, 146, 158,  
171, 172, 181, 184  
**ESO ELT** 173  
**ESO VLT** 19, 173  
**NGTS** 172  
**Observatoire de Haute Provence**  
143, 144  
**STARE** 146  
Torricelli, Evangelista (1608-1647) 52  
**Tourbillons (modèle des)** 13, 14, 16  
**Transit (détection par)** 6, 122, 144-148  
**Transit gravitationnel (détection par)**  
148

**Transit primaire** 6, 122, 144-148,  
153-155, 184  
**Transit secondaire** 153, 154, 156, 184  
Tremaine, Scott, 24

## U

Urey, Harold (1893-1981) 84, 89, 91

## V

Van de Kamp, Peter (1901-1995)  
141, 171  
**Vélocimétrie (détection par)** 13, 14,  
18-21, 23-27, 45, 46, 48, 49,  
109, 161-165, 204  
Verne, Jules (1828-1905) 167  
Voltaire (1694-1778) 12

## W

Wächtershäuser, Günter 93  
Wegener, Alfred (1880-1930) 55  
Weiszäcker, Carl Friedrich von  
(1912-2007), 16  
Wells, Herbert George (1866-1946) 167  
Wilkins, John (1614-1672) 12  
Woese, Carl (1928-2012) 98  
Wolszczan, Alexandre 142