

La grande épopée de l'exploration spatiale

La grande épopée de l'exploration spatiale

Un regard chinois

**YE PEIJIAN (ÉD.), QU SHAOJIE, MA JINAN,
MENG LINZHI, QIN SHANSHAN, ZHANG ZHIPING,
ZHANG HONG, JIA XIAOYU, WANG SHUO
ET WANG JIANZHAO**

Traduit par Olivier Courcelle

The logo for 'edp sciences' features the lowercase letters 'edp' in a stylized, interconnected font, followed by the word 'sciences' in a clean, sans-serif typeface.

17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Cet ouvrage a bénéficié du financement **B&R Book Program**.

Version originale publiée en chinois :
Le voyage : l'histoire de l'exploration spatiale humaine,
édité par Ye Peijian. Beijing : Science Press, 2021.4

Composition et mise en pages : Flexedo

Imprimé en France
ISBN (papier) : 978-2-7598-3117-3
ISBN (ebook) : 978-2-7598-3118-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2023

SOMMAIRE

<i>Préface</i>	9
<i>Introduction</i>	13
1. Ô Terre, ma mère	19
1.1. Une brève histoire de la Terre	19
1.2. <i>Pale blue dot</i>	25
2. Le système solaire	29
2.1. Les huit planètes principales	30
2.2. La loi de Titius-Bode	34
3. La structure de l'Univers	39
3.1. L'étendue du système solaire	40
3.2. Une structure échelonnée	42
3.3. Les règles à mesurer les cieux	47
4. Le plein du vide	51
4.1. Les ceintures de rayonnement	51
4.2. Une particule insaisissable	54
5. Un Soleil colérique	59
5.1. Le vent solaire	59
5.2. Les tempêtes solaires	64
5.3. Un bouclier protecteur	65
5.4. Des conséquences catastrophiques	67
5.5. Entre phantasmes et réalité	72
6. L'observation du ciel	77
6.1. L'observation à l'œil nu	78
6.2. Lunettes et télescopes terrestres	86
6.3. Télescopes spatiaux	92
6.4. Des moyens d'observation toujours plus avancés	96
7. Fusées et lanceurs	105
7.1. Wan Hu	105
7.2. Les débuts de la fusée	108
7.3. Principe de fonctionnement	112
7.4. Les grandes familles de lanceurs dans le monde	114
7.5. Autres moyens d'exploration	128
8. Voguer dans l'espace	133
8.1. Propulsion ionique	134
8.2. Propulsion nucléaire	135
8.3. À la voile sur un océan d'étoiles	138

9. Les engins spatiaux	153
9.1. Qu'est-ce qu'un engin spatial ?	153
9.2. Sous-systèmes de structure et de mécanismes – Squelette et articulations.....	156
9.3. Sous-système de contrôle thermique – Peau	157
9.4. Sous-système de contrôle d'attitude – Cervelet.....	159
9.5. Sous-système de propulsion – Muscles	162
9.6. Sous-système d'alimentation électrique – Cœur	163
9.7. Sous-système de traitement de données – Cerveau	164
9.8. Sous-système de mesure, suivi et contrôle – Téléphone portable.....	165
10. L'odyssée de l'espace	167
10.1. Les vols non habités.....	168
10.2. Les vols habités	188
11. Découvertes spatiales	197
11.1. L'espace environnant	199
11.2. La Lune	202
11.3. Les planètes proches.....	204
11.4. Planètes éloignées.....	212
12. Les retombées de l'exploration spatiale	219
12.1. Expériences en micropesanteur.....	219
12.2. Mutagénèse et agriculture spatiale	221
12.3. Télédétection et observations météorologiques.....	223
12.4. Satellites de télécommunication.....	226
12.5. Positionnement et navigation	228
12.6. Tourisme spatial.....	230
13. Limites techniques	233
13.1. Problème du coût	234
13.2. Augmentation des débris spatiaux	235
13.3. Limites du contrôle dans l'espace lointain	236
13.4. Impact du rayonnement spatial.....	238
14. Les risques de collision	241
14.1. Les débris	241
14.2. Les effets d'une collision	246
14.3. Parer au risque.....	250
15. Le danger guette à chaque pas	259
15.1. La micropesanteur	259
15.2. Les rayonnements.....	262
15.3. Les combinaisons spatiales	266
16. Armageddon	271
16.1. La menace des petits corps célestes.....	273
16.2. L'origine du coupable.....	277
16.3. La protection de la Terre	280
17. Un casse-tête scientifique	285
17.1. Les trous noirs.....	286
17.2. Matière et énergie sombres.....	290
17.3. L'origine de l'Univers et des corps célestes.....	293

18. L'avenir de la Terre	295
18.1. L'humanité va-t-elle survivre ?	295
18.2. La migration planétaire.....	300
19. Où sont-ils tous ?	305
19.1. Origine du paradoxe de Fermi.....	306
19.2. Une hypothèse étonnante.....	312
19.3. Les explications du paradoxe	316
19.4. Le mystère de la sphère de Dyson.....	324
20. Vers l'infini et au-delà !	331
<i>Bibliographie</i>	337

PRÉFACE

La recherche, et la recherche scientifique en particulier, fait partie intégrante de la nature humaine. Les uns à la suite des autres, nous n'avons jamais cessé d'explorer, de progresser, de mieux comprendre le monde. Les conjectures de Kepler sur le mouvement des astres ont inspiré les recherches de Newton sur la loi de la gravitation universelle ; l'existence des ondes gravitationnelles prédite par Einstein a été confirmée un siècle plus tard par les chercheurs de l'Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser (LIGO). La science, en s'appuyant sur des fondements solides, formule des hypothèses audacieuses et des conjectures hardies, qui aboutissent parfois à des découvertes étonnantes, elles-mêmes à la source d'innovations technologiques souvent époustouflantes. Notre désir d'explorer les océans a débouché sur la conception de navires et de sous-marins, jusqu'au Jiaolong, un bathyscaphe chinois capable de dépasser les 7 000 mètres de profondeur, quand notre désir d'explorer l'espace nous a conduit à concevoir des fusées, des satellites et autres vaisseaux spatiaux habités.

Les Chinois sont réputés pour la vivacité de leur imagination. Houyi, un archer mythique, est censé avoir tiré sur des soleils dont la présence asséchait la Terre, tandis que Chang'e, son épouse, serait allée sur la Lune.

Les *Questions au Ciel*, de l'ancien poète Qu Yuan, ou *La Pérégrination vers l'Ouest*, ce grand classique de la dynastie Ying, témoignent aussi de cette créativité débordante. Quant aux étonnants artefacts trouvés sur le site archéologique de Sanxingdui, dans la province du Sichuan, ils n'en finissent pas de susciter de grandes théories plus ou moins farfelues sur les civilisations préhistoriques ou extraterrestres qui les auraient fabriqués... Ces divagations sans doute risibles portent pourtant en germes des questions importantes et sérieuses.

Dans le but de diffuser des connaissances en privilégiant une approche scientifique, l'Académie chinoise des sciences a décidé d'éditer une collection au titre évocateur : *Science d'aujourd'hui et monde de demain : quand les académiciens chinois vulgarisent*. Dans ce cadre, un volume consacré à l'exploration spatiale s'est imposé d'emblée.

Le lancement du premier satellite artificiel par l'Union soviétique en 1957 a en effet marqué le début d'une ère nouvelle. Les missions lunaires américaines Apollo, les sondes Voyager ou New Horizons, la mission européenne Rosetta-Philae, les véhicules spatiaux chinois Tianzhou et Shenzhou entre bien d'autres exemples, ont constitué et constituent encore autant de jalons de cette grande épopée. Depuis quelques dizaines années, le rythme des missions au niveau technologique toujours plus élevé s'accélère, provoquant des retombées dans bien des secteurs de la société. Un nombre sans cesse croissant de citoyens ordinaires prend conscience des enjeux de l'exploration spatiale et passent de la simple curiosité à un suivi passionné. En raison donc à la fois de l'intérêt intrinsèque du sujet mais aussi de l'engouement qu'il suscite, ce volume allait de soi. Partant de ces lointains débuts dans l'Antiquité, il expose les découvertes scientifiques et les avancées technologiques importantes qui ont présidé aux progrès de l'exploration spatiale, décrit les outils et les moyens qui lui sont propres, présente ses problématiques et ses enjeux actuels, raconte à l'occasion quelques événements historiques pertinents pour aboutir à un contenu riche, vivant et captivant.

Le livre a été rédigé par une équipe de jeunes chercheurs menée par l'académicien Ye Peijian, qui a notamment été professeur et directeur à l'Université d'aéronautique et d'astronautique de Pékin. Rares sont les personnes impliquées comme lui et ses collaborateurs dans l'ingénierie spatiale capables en outre de tenir la plume pour expliquer de manière simple et concise des notions parfois complexes à un large public. La passion qu'éprouve cette équipe d'auteurs pour la vulgarisation et le résultat de leurs efforts mérite les plus grands éloges et m'inspire le plus profond respect.

L'industrie spatiale chinoise se développe rapidement et ce mouvement ne pourra que s'intensifier à l'avenir. Je forme le vœu que des ouvrages comme celui-ci puisse éveiller l'intérêt des jeunes pour la science, planter une petite graine dans leur esprit qui se développe jusqu'à porter de très beaux fruits. Puisse ces lecteurs former et renouveler l'industrie spatiale chinoise de demain et par là contribuer à forger le destin de l'humanité tout entière !

Huai Jinpeng
Secrétaire général du comité du Parti communiste au sein
de l'Association chinoise pour la science et la technologie
Membre de l'Académie chinoise des sciences

INTRODUCTION

D'où venons-nous ? Où allons-nous ? L'archéologie nous enseigne que l'humanité s'interroge sur les mystères de son origine et de sa destinée depuis le début de l'histoire du monde. Pour répondre à ces grandes questions, les hommes ont souvent levé les yeux vers les étoiles, imaginant divers mythes et légendes, tant pour se reconforter que pour tenter de comprendre l'immensité de l'Univers.

Si l'homme observe le ciel depuis longtemps, il l'a d'abord fait sans instruments sophistiqués. Les anciens astronomes, qui écrivaient ou gravaient sur des peaux et des os d'animaux, des écailles de tortue, des monuments de pierre, manquaient aussi de moyens pour décrire et consigner avec précision ce qu'ils voyaient. De ce point de vue, tout changea en 1839 avec l'invention par le peintre français Louis Daguerre du *daguerréotype*¹, ou plutôt de la *photographie* pour reprendre le terme forgé un peu plus tard par le mathématicien et astronome britannique John Herschel.

1. Nicéphore Niépce a aussi inventé la photographie. Préférant garder pour lui son « procédé héliographique » jusqu'à sa parfaite mise au point, il s'est fait devancé par Daguerre qui a présenté publiquement sa propre technique le 19 août 1839, technique qui a été acquise par l'État français la même année.

JOHN FREDERICK WILLIAM HERSCHEL

John Frederick William Herschel (John Herschel) est un savant britannique qui s'est illustré en astronomie, en mathématiques, en chimie et en photographie. Son père Friedrich Wilhelm Herschel (William Herschel) et sa tante Caroline Lucretia Herschel étaient tous deux des astronomes réputés. On doit notamment à John Herschel l'utilisation du système des jours juliens pour dater et enregistrer les événements célestes. En photographie, il a découvert le rôle de fixateur du thio-sulfate de sodium sur le bromure d'argent. Il est également à l'origine de termes *photographie*, *négatif* et *positif*.

Durant les 13,8 milliards d'années qui ont suivi le Big Bang, l'Univers a évolué pour aboutir à un panorama d'une beauté à couper le souffle. Les planètes, les étoiles, les constellations et les galaxies ont inspiré et inspirent encore nos arts, notre littérature, comme nos théories scientifiques les plus abstraites. Notre compréhension du cosmos est toutefois longtemps restée très rudimentaire. Il y a quelques siècles à peine que nous savons pourquoi les galaxies prennent des formes différentes, quelques décennies seulement que nos sondes explorent Mars et tout juste quelques années que nous pénétrons un peu mieux les mystères des anneaux de Saturne. Cette connaissance toujours plus fine de l'Univers résulte des efforts de générations de scientifiques, d'ingénieurs et de techniciens talentueux qui ont œuvré sans relâche pour répondre à notre soif de connaissances et de découverte.

Longtemps nous avons rêvé de pouvoir nous envoler dans le ciel, contempler les rivières, les lacs, les montagnes, les vallées et les déserts, puis de nous élever encore et voyager dans l'immensité de l'Univers. Faute de la science et de la technologie adéquates, toutefois, il a fallu attendre le xx^e siècle pour enfin conquérir l'espace.

L'exploration spatiale moderne a débuté dans les années 1950, durant la célèbre « course aux armements » qui se jouait alors entre les États-Unis et l'Union soviétique, et plus précisément dans la foulée de la mise en œuvre des premiers missiles balistiques intercontinentaux.

Les deux superpuissances rivalisaient alors avec férocité pour acquérir une position technologique dominante. L'Union soviétique a lancé son premier satellite artificiel, Spoutnik 1, en 1957, ce qui a poussé les États-Unis à répliquer avec leur propre satellite, Explorer 1, lancé en 1958. Aujourd'hui, au XXI^e siècle, bénéficiant des progrès sans cesse croissants de la technologie, l'homme se tourne encore et plus que jamais vers l'espace.

Nous avons déjà marché sur la Lune, et cela sans l'aide d'aucun super-pouvoir de super-héros de bande dessinée. Il est aussi vrai que notre exploration se limite à une partie infime de l'immensité cosmique. La Terre, notre planète d'origine, n'est qu'un grain de poussière dans l'Univers, notre système solaire pas même une goutte d'eau dans l'océan. Il reste tellement à découvrir... Que se cache-t-il dans notre galaxie, la Voie lactée, et au-delà ?

Imaginez un monde où la gravité serait si forte qu'un grain de sable pèserait autant que l'Everest, la plus haute montagne du monde ? Un monde où nous serions donc aplatis comme une crêpe avant même d'avoir une chance d'exister ? Ou un monde d'une chaleur infernale sur lequel il pleuvrait de l'acide sulfurique ? Ou un monde traversé par des doses mortelles de rayonnement X qui aspire toute la matière environnante ? Ou un monde formé de deux étoiles qui tournent l'une autour de l'autre, comme deux danseurs engagés dans une valse mortelle, et qui échangent entre elles des millions de tonnes de matière gazeuse chaque seconde, jusqu'à ce que l'une des deux finisse par exploser, détruisant par la même occasion toutes les planètes à proximité.

Tous ces mondes existent. Le premier est caractéristique d'une étoile à neutrons, le résidu de l'effondrement gravitationnel du cœur d'une étoile massive. Les nuages d'acide sulfurique se forment dans l'atmosphère de Vénus, la planète la plus proche de la Terre et le deuxième objet le plus lumineux du ciel nocturne après la Lune. L'objet qui aspire tout ce qui se trouve à portée est un trou noir supermassif comme celui qui est probablement présent au centre de

Qǐ-MÍNG ET CHÁNG-GĒNG

La planète Vénus atteint sa luminosité maximale peu avant l'aube ou peu après le crépuscule. En Chine, on la nomme Qǐ-míng le matin, quand elle se trouve à l'est, et Cháng-gēng le soir, quand elle se trouve à l'ouest.

notre galaxie. Quant aux deux étoiles, il s'agit du système binaire Beta Lyrae, visible juste au-dessus de nos têtes par de belles nuits d'été.

Le vaste Univers regorge de telles horreurs ou de telles merveilles, dont bon nombre restent à découvrir. L'exploration spatiale présente toutefois cet inconvénient de coûter cher sur le plan humain, matériel et financier pour un bénéfice immédiat moins évident que la satisfaction des besoins fondamentaux comme l'alimentation, le logement ou les vêtements. On comprend donc que certains rechignent à ce que des sommes colossales soient investies dans d'onéreux projets spatiaux.

En 1970, une religieuse, Sœur Mary Jucunda, écrivit de Zambie au directeur adjoint des sciences du Marshall Space Flight Center de la NASA, le Dr Ernst Stuhlinger, qui travaillait alors sur un projet de vol habité à destination de Mars. Dans sa lettre elle s'interrogeait sur la pertinence de consacrer des milliards de dollars à un programme d'exploration spatiale alors que de nombreux enfants souffrent de la faim sur Terre.

Stuhlinger répondit à la lettre de Mary Jucunda en lui joignant une photographie de la Terre, prise en 1968 par l'astronaute William Anders, alors qu'il tournait autour de la Lune. Sa réponse fut ensuite rendue publique par la Nasa sous le titre « Pourquoi explorer l'espace ? » Stuhlinger y déclarait :

« Chaque année, environ un millier d'innovations techniques générées par le programme spatial sont appliquées à notre technologie terrestre où elles permettent d'améliorer

l'électroménager, les engins agricoles, les machines à coudre, les radios, les bateaux et les avions, les prévisions météorologiques et les avis de tempête, les communications, l'appareillage médical et les outils de la vie quotidienne.

Le voyage vers Mars n'apportera pas directement de la nourriture à ceux qui meurent de faim, mais il apportera tant de nouvelles technologies et potentialités, que les retombées de ce seul projet dépasseront de plusieurs fois les coûts de sa réalisation. »

Le spatial est le seul secteur d'activité à faire progresser aussi rapidement la recherche fondamentale et les nouvelles technologies. Il est certes vrai que la guerre produit le même effet, mais avec cet inconvénient de semer par ailleurs la terreur, la douleur, la mort et la destruction. Si les grandes puissances n'avaient pas rivalisé en matière d'armement, si elles n'avaient pas développé des bombardiers ou des missiles, de nombreuses souffrances inutiles auraient été épargnées. L'exploration spatiale vise *in fine* à nous construire un monde meilleur, et ses retombées technologiques servent à améliorer notre qualité de vie. Outre un nouveau regard qu'elle offre sur nous-mêmes, elle laisse dans son sillage des nouvelles technologies, développe notre goût du défi et nous forge un esprit d'entreprise ainsi qu'une attitude optimiste et confiante face aux réalités difficiles. L'humanité peut reprendre à son compte les célèbres mots d'Albert Schweitzer² : « Lorsqu'on me demande si je suis pessimiste ou optimiste, je réponds qu'en moi la connaissance est pessimiste, mais le vouloir et l'espoir sont optimistes. »

En 2017, lors du 5^e Tencent WE Summit, une grande conférence scientifique internationale qui se tenait cette année-là à Pékin, le célèbre physicien britannique Stephen Hawking a évoqué l'importance

2. Surnommé « le fils de l'Afrique », Albert Schweitzer est un philosophe, théologien, médecin, organiste et militant humanitaire allemand qui reçut le prix Nobel de la paix en 1952 pour son engagement médical envers les défavorisés africains.

de l'exploration spatiale pour la survie de l'humanité. Selon lui, la croissance rapide de la population mondiale devrait à terme rendre la planète inhabitable et la meilleure échappatoire consiste à migrer sur d'autres planètes. Si le genre *Homo* existe depuis deux millions d'années environ, la civilisation proprement dite n'est apparue qu'il y a quelques milliers d'années seulement et n'a jamais cessé de se développer à un rythme toujours plus soutenu depuis lors. Pour vivre encore un million d'années, l'humanité n'aura d'autre choix que de s'aventurer là où elle n'est jamais allée auparavant.

Le ciel étoilé, lorsque nous le contemplons par une belle nuit, nous émerveille par son immensité et sa complexité. Il nous rappelle aussi que notre planète n'est qu'un minuscule grain de poussière parmi d'autres et nous donne à réfléchir sur notre condition, nous qui avons tout de même rendu ce grain de poussière un peu moins ordinaire. Ce ciel nous a inspiré, nous inspire et nous inspirera encore une multitude d'idées et de projets. Le voyage dans l'espace ne fait que commencer et ne s'arrêtera jamais.

1

Ô Terre, ma mère

La Terre est une magnifique planète bleue, dotée de vastes océans, de montagnes imposantes, de rivières sinueuses et de larges prairies qui composent un paysage diversifié. Le climat changeant, marqué par le vent, la pluie, la neige, rythmé par les saisons, ajoute encore des touches de couleur à cette beauté naturelle.

La Terre n'est pourtant qu'une planète perdue parmi d'autres dans l'immensité de l'Univers. Elle nous inspire souvent un sentiment maternel, du fait qu'elle a donné naissance à la vie. Guo Moruo, écrivain et poète chinois, a exprimé cette relation affectueuse dans un célèbre poème, « Ô Terre, ma mère », écrit en 1919, au ton romantique, presque emphatique, qui considère les hommes comme les « fils de la Terre ».

Formée il y a 4,6 milliards d'années, la Terre est encore jeune, relativement à l'histoire de l'Univers. Comme toutes les autres planètes, cependant, elle vieillit inéluctablement.

1.1. UNE BRÈVE HISTOIRE DE LA TERRE

La structure de la Terre peut se décrire par des « sphères », divisées en deux familles : les sphères externes, situées au-dessus de la surface,

et les sphères internes, situées au-dessous. On compte en première approximation trois sphères externes, l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère, ainsi que trois sphères internes, la croûte, le manteau et le noyau (figure 1.1). La partie supérieure du manteau, entre 80 et 400 km sous la surface de la Terre, se caractérise par un ralentissement des ondes sismiques, observé pour la première fois par Beno Gutenberg en 1926. Elle se nomme la *zone de moindre vitesse*. Jointe à la croûte, elle forme la *lithosphère*, une couche constituée de roches dures reposant sur une partie du manteau plus déformable, l'*asthénosphère* (figure 1.2).

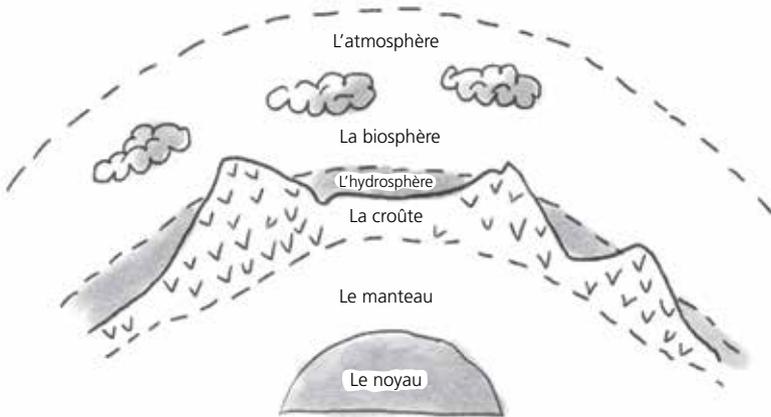


Figure 1.1 | Les principales sphères internes et externes de la Terre.

Les sphères externes et la surface de la lithosphère sont généralement étudiées par observations et mesures directes. Les sphères internes sont principalement étudiées par des méthodes géophysiques telles que la sismologie, la gravimétrie et la géodésie spatiale moderne de haute précision.

La structure et les caractéristiques importantes des principales sphères sont présentées dans le tableau 1.1.

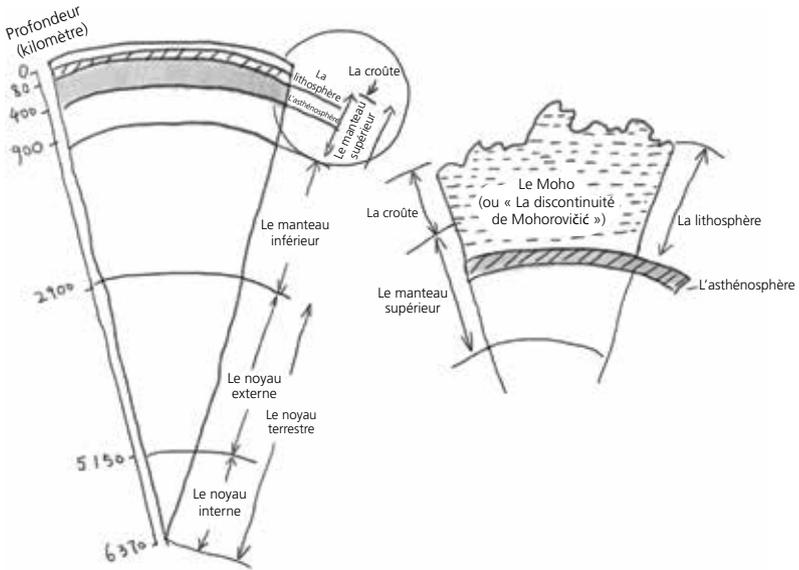


Figure 1.2 | Structure des sphères internes de la Terre.

L'histoire des hommes ne représente qu'une infime fraction des milliards d'années écoulées depuis la formation de la Terre. Quelque chose comme une rognure d'angle d'une personne de taille moyenne... Dans son livre intitulé *Les dragons de l'Eden*, originellement publié en 1977, le célèbre astronome et vulgarisateur scientifique Carl Sagan (figure 1.3) a présenté un calendrier cosmique (tableau 1.2) qui comprime les 13,8 milliards d'années d'existence de l'Univers en une seule. Par cette accélération du temps, une seconde équivaut à 438 ans, une heure à 1,58 million d'années, une journée à 37,81 millions d'années. La vie d'un homme de 80 ans correspond ainsi à 0,18 seconde dans cette représentation de l'Univers.

Selon ce calendrier, Confucius naît le 31 décembre à minuit moins 5,8 secondes, Newton à minuit moins 0,76 seconde. Le réseau Internet apparaît à 0,02 secondes avant minuit. Le 2 mai suivant, le Soleil se transformera en géante rouge. Que sera-t-il alors advenu de l'humanité ?

Tableau 1.1 | Structure et caractéristiques des principales sphères terrestres.

Sphères	Sphères fondamentales	Principales caractéristiques
Sphères externes	Atmosphère	L'atmosphère est la couche gazeuse qui enveloppe la Terre. Principalement constituée d'azote et d'oxygène, c'est une composante essentielle de la vie. La densité de l'atmosphère diminue rapidement avec l'altitude.
	Biosphère	La biosphère est le milieu du vivant. Elle se situe dans la croûte terrestre, l'hydrosphère et l'atmosphère.
	Hydrosphère	L'hydrosphère se caractérise par la présence d'eau, sous forme gazeuse, liquide ou solide. Cette eau se trouve dans l'atmosphère, les océans, les continents ou dans les êtres vivants.
Sphères internes	Croûte	La croûte est la surface solide de la Terre. Elle se divise en croûte océanique et en croûte continentale, la première étant plus mince que la seconde.
	Manteau	Le manteau est la zone située entre la croûte et le noyau. Sa partie supérieure se divise en deux zones, l'une très déformable, l'autre plus solide. La première est probablement la principale source de magma. La seconde, couplée à la croûte, constitue la lithosphère.
	Noyau	Le noyau, d'un rayon de 3470 km, est la partie centrale de la Terre. La densité, la température et la pression y sont très élevées.

Tableau 1.2 | Le calendrier cosmique de Carl Sagan.

Date		Évènement
1 ^{er} janvier		Big Bang
1 ^{er} mai		Formation de la Voie lactée
9 septembre		Formation du système solaire
14 septembre		Formation de la Terre
25 septembre		Apparition de la vie sur Terre
14 décembre		Émergence des organismes multicellulaires
19 décembre		Poissons et premiers vertébrés
22 décembre		Premiers amphibiens et insectes volants
23 décembre		Premiers arbres et reptiles
24 décembre		Apparition des dinosaures
27 décembre		Premiers mammifères
27 décembre		Premiers oiseaux
28 décembre		Premières fleurs, disparition des dinosaures
29 décembre		Premiers primates
30 décembre		Développement du lobe frontal chez les primates, premiers hominidés
31 décembre	22 h 30	Premiers hommes
	23 h 00	Paléolithique
	23 h 46	Domestication du feu
	23 h 59 m 20 s	Apparition de l'agriculture

Date		Évènement
	23 h 59 m 35 s	Néolithique, premières villes
	23 h 59 m 53 s	Âge de bronze, civilisation mycénienne, guerre de Troie, civilisation Olmèque, l'une des plus anciennes de l'Amérique, invention de la boussole
	23 h 59 m 54 s	Âge de fer, Empire assyrien, Royaume d'Israël, fondation de Carthage par les Phéniciens, naissance de Confucius
	23 h 59 m 55 s	Dynastie Ashoka en Inde, dynastie Qin en Chine, Siècle de Périclès en Grèce, naissance du Bouddha
	23 h 59 m 56 s	Géométrie euclidienne, poussée d'Archimède, astronomie de Ptolémée, fondation de Rome, naissance de Jésus
	23 h 59 m 57 s	Invention du zéro et des décimales par les Indiens, chute de l'Empire romain, naissance de Mahomet et développement de la civilisation islamique
	23 h 59 m 58 s	Civilisation maya, dynastie Song en Chine, Empire byzantin, Empire mongol
	23 h 59 min 59 s	Renaissance en Europe, grandes explorations maritimes européennes, voyages de Zheng He sous la dynastie Ming, naissance de la science moderne, naissance de Newton, première révolution industrielle, naissance d'Einstein, premier homme sur la Lune, invention de l'ordinateur et du réseau Internet

GÉANTES ROUGES ET NAINES BLANCHES

Une géante rouge est une étoile vieillissante qui a épuisé ses réserves d'hydrogène. En un laps de temps relativement court, sa taille augmente, sa surface se refroidit, ce qui entraîne un fort rougisement.

Une naine blanche est une étoile en fin de vie qui a épuisé toutes ses réserves d'énergie. Elle se caractérise par une faible luminosité, une température élevée et une très forte densité. Son nom vient de sa couleur blanche et de sa taille réduite. Une naine blanche refroidit, s'assombrit, se cristallise et agonise ainsi très lentement, parfois durant des milliards d'années. Elle peut également s'effondrer en un objet plus dense, une étoile à neutrons ou un trou noir. La gravité d'une naine blanche de la taille de la Terre (comme Sirius B) fait environ 180 000 fois la nôtre. Aucune structure macroscopique ne peut résister à une pression aussi élevée, pas même les atomes qui, écrasés, libèrent leurs électrons.

1.2. PALE BLUE DOT

La Terre vous semble-t-elle immense ? Il est vrai qu'un avion volant à 1 000 km/h met presque deux jours pour en faire le tour le long de l'équateur. Vue des profondeurs de l'espace, cependant, la Terre n'est qu'une planète insignifiante. Sur une photographie prise le 19 juillet 2013 par la sonde spatiale Cassini, qui se trouvait alors près de Saturne à environ 1,4 milliard de kilomètres, la Terre apparaît comme une simple petite étoile peu lumineuse. Quelques années auparavant, le 14 février 1990, la sonde Voyager 1 avait pris une photo célèbre, aujourd'hui appelée *Pale blue dot* (« Un point bleu pâle »), depuis un endroit situé à la limite du système solaire. Nous y voyons, ou plutôt nous y devinons, perdu dans l'immensité obscure de l'Univers, un point à peine perceptible, notre maison commune, la Terre.

Cette photo en couleur fait partie du *Portrait de famille*, une compilation de 60 images du système solaire prises Voyager 1 à 6,4 milliards de kilomètres de la Terre et 32 degrés au-dessus du plan de l'écliptique.

Lors de la prise de vue, la Terre s'est trouvée par hasard au centre d'une bande diffuse de couleur orangée, qui, agissant comme un filtre naturel, a rendu la Terre plus blanche sur la photo. En 1994, Carl Sagan, l'un des scientifiques impliqués dans le projet Voyager, s'est inspiré de cette photo pour écrire un livre précisément intitulé *Pale Blue Dot*. Il y examine les principales étapes de la conquête spatiale, de 1957 à 1994, et prédit que les êtres humains quitteront un jour le système solaire pour se diriger vers des galaxies plus éloignées. Il évoque ainsi la photographie *Pale Blue Dot* :

« Regardez encore ce point. C'est ici. C'est notre foyer. C'est nous. Dessus se trouvent tous ceux que vous aimez, tous ceux que vous connaissez, tous ceux dont vous avez entendu parler, tous les êtres humains qui n'aient jamais vécu. La somme de nos joies et de nos souffrances, des milliers de religions aux convictions assurées, d'idéologies et de doctrines économiques, tous les chasseurs et cueilleurs, tous les héros et tous les lâches, tous les créateurs et destructeurs de civilisations, tous les rois et tous les paysans, tous les jeunes couples d'amoureux, tous les pères et mères, les enfants pleins d'espoir, les inventeurs et les explorateurs, tous les professeurs de morale, tous les politiciens corrompus, toutes les "superstars", tous les "guides suprêmes", tous les saints et les pécheurs de l'histoire de notre espèce ont vécu ici – sur un grain de poussière suspendu dans un rayon de soleil. »

Oui, comme le dit Carl Sagan, notre Terre et les êtres humains sont bien petits face à l'immensité de l'Univers. La contemplation des étoiles relativise nos joies et nos peines, nos moments de bonheur et nos frustrations, nos réussites et nos échecs, nos mérites et nos erreurs, notre grandeur d'âme et nos bassesses.

Notre compréhension de l'Univers a beaucoup évolué avec le temps. Nous pensions à l'origine que la Terre en formait le centre et nous ne connaissions que les planètes et les étoiles visibles à l'œil nu.

Au cours du xvii^e siècle, le système proposé par Copernic, qui plaçait le Soleil au centre du monde, fut largement accepté. Un peu plus tard, les observations d'astronomes comme William Herschel montrèrent que le Soleil n'est qu'une étoile parmi d'autres au sein d'une galaxie en forme de disque. Au xx^e siècle nous avons compris que notre Voie lactée n'est qu'une galaxie parmi des milliards d'autres dans un Univers en expansion. Enfin, les recherches actuelles montrent que, sur les grandes échelles, l'Univers est homogène, c'est-à-dire que toutes ses parties ont la même densité, composition et structure. L'Univers n'a ni « centre » ni « limites », de sorte qu'il est impossible d'y déterminer la position absolue de la Terre. En quittant l'atmosphère terrestre, nous entrons dans ce que l'on appelle communément l'espace. C'est à l'exploration de cet espace – l'exploration spatiale – qu'est consacré ce livre.



Figure 1.3 | Carl Sagan.

2

Le système solaire

Le système solaire est composé de huit planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Ces planètes tournent autour du Soleil à la manière de huit enfants autour de la jupe de leur mère. Avec sa masse presque trois fois supérieure à celle des sept autres planètes réunies, Jupiter est la plus imposante à tout point de vue. Mercure est la plus petite, la plus légère et la plus proche du Soleil.

Une ceinture d'astéroïdes présente entre Mars et Jupiter marque la frontière entre deux types de planètes : à l'intérieur les planètes dites *telluriques* (Mercure, Vénus, la Terre, Mars), principalement constituées de roches et de métaux, et à l'extérieur les planètes dites *géantes* (Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune), plutôt constituées de gaz ou de composés volatils.

En dehors des huit planètes, le système solaire comprend également divers corps célestes tels que des planètes naines, des satellites, des astéroïdes ou des comètes.

Les mouvements des corps célestes dans le système solaire évoquent le ballet des électrons qui orbitent autour des noyaux atomiques dans

le monde microscopique. Cette similitude fascinante sera-t-elle un jour expliquée ?

2.1. LES HUIT PLANÈTES PRINCIPALES

Les planètes que nous avons déjà mentionnées sont les huit planètes principales du système solaire. De la plus proche du Soleil à la plus lointaine, il s'agit de Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. En plus de tourner autour du Soleil, les planètes tournent sur elles-mêmes, en général dans le même sens que leur orbite, c'est-à-dire d'ouest en est, à l'exception de deux d'entre elles : Vénus, qui tourne dans le sens inverse, et Uranus, qui, avec son axe de rotation presque parallèle au plan de l'orbite, tourne horizontalement, couchée sur le côté.

Le système solaire compte en outre de nombreuses planètes plus petites, qui se répartissent dans la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, ou dans une autre ceinture, plus lointaine, au-delà de Neptune, la ceinture de Kuiper, formée de nombreux corps gelés.

Même si la figure 2.1 semble montrer que les corps du système solaire sont très proches les uns des autres, ils sont en réalité très éloignés. Le système solaire est majoritairement composé de vide. Si la distance entre le Soleil et Neptune, la plus lointaine des huit planètes principales, était rapportée à la longueur d'un terrain de football, alors, à l'une des extrémités, le Soleil, des dimensions d'un œuf de caille, concentrerait à lui seul 99,86 % de toute la masse du système. À l'autre extrémité, Neptune mesurerait environ 1 millimètre de diamètre. Quant à la Terre, avec son diamètre de l'épaisseur d'un cheveu, elle serait presque invisible.

Le système solaire comptait autrefois une neuvième planète principale, à savoir Pluton, considérée comme telle depuis sa découverte en 1930. Tout a changé le 24 août 2006, lors de la réunion de clôture de la 26^e assemblée générale de l'Union astronomique internationale (UAI) qui rassemblait à Prague, la capitale de la République tchèque, des astronomes de tous pays. Au terme d'un vote, Pluton passa du



Figure 2.1 | Les principaux corps du système solaire.

statut de planète à celui de planète naine. Cette rétrogradation faisait suite à la découverte de la planète naine Eris par un astronome de Caltech, Michael E. Brown, surnommé depuis lors le *tueur de Pluton*.

En vertu de la nouvelle définition adoptée lors de ce congrès, une planète est désormais un corps céleste qui satisfait aux trois critères suivants :

- il tourne autour d'une étoile ;
- sa masse est suffisante pour le rendre sphérique par gravité ;
- il a nettoyé sa zone orbitale, c'est-à-dire qu'aucun corps plus imposant que lui ne subsiste dans le voisinage de son orbite.

Selon ces trois critères, les seules planètes du système solaire sont Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Pluton n'en est plus une du fait qu'elle ne remplit pas la troisième condition. Les corps célestes en orbite autour du Soleil qui ne satisfont pas aux critères sont communément appelés *petits corps* du système solaire. Ils se subdivisent en planètes naines, satellites, astéroïdes et autres objets plus petits.

LA CEINTURE DE KUIPER

La ceinture de Kuiper est une zone située aux confins du système solaire, nommée en hommage à Gerard Kuiper, l'astronome américain d'origine néerlandaise qui l'a découverte. Caractérisée par la présence de nombreux petits corps en orbite autour du Soleil, elle constituerait le principal réservoir des comètes du système solaire.

En 2015, les observations de la sonde New Horizons, développée par la NASA, qui survolait Pluton pour la première fois, ont montré que la taille de la planète naine avait été sous-estimée, ce qui a rouvert le débat de la classification et conduit certains à réclamer qu'elle soit à nouveau considérée comme une planète à part entière.

Le 20 janvier 2016, des chercheurs de Caltech, Michael E. Brown et Konstantin Batygin, ont publié un article dans lequel ils affirmaient que six corps de la ceinture de Kuiper présentaient des comportements

étranges, un peu comme si les petites aiguilles d'horloges tournant à des vitesses différentes indiquaient la même heure à chaque fois qu'on les regardait. Après avoir éliminé diverses possibilités, ces chercheurs ont avancé l'hypothèse qu'une planète invisible, encore à découvrir, puisse être responsable de ces orbites synchronisées par son attraction gravitationnelle. Cette hypothétique *Planète Neuf* se situerait au-delà de Pluton, dont l'orbite atteint 50 fois la distance de la Terre au Soleil.

ÉTOILES, PLANÈTES NAINES, SATELLITES, ASTÉROÏDES ET COMÈTES

Une étoile est un corps sphérique modelé par sa propre gravité et constitué de plasma incandescent. Le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre.

Une planète naine est des corps satisfaisant aux deux premiers critères de la définition d'une planète mais pas au troisième : elle tourne autour d'une étoile, sa masse est suffisante pour la rendre sphérique par gravité, mais elle n'a pas la capacité d'éliminer les corps proches de son orbite.

Un satellite est un corps qui tourne autour d'une planète selon une orbite fermée et périodique. Il peut être naturel, comme la Lune, ou artificiel, quand il est lancé par l'homme.

Un astéroïde est un corps léger et de petite taille qui tourne autour du Soleil comme une planète.

Une comète est un corps dont la forme et la luminosité varient en fonction de sa distance au Soleil, autour duquel elle gravite. Elle s'observe souvent enveloppée d'un nuage de gaz brillant qui se termine par une queue. Plus de 1 700 comètes ont été répertoriées dans le système solaire. La plus célèbre d'entre elles, la comète de Halley, fait le tour du Soleil en 76 ans.

Ainsi, le système solaire retrouvera peut-être une neuvième planète, même s'il nous faut encore faire preuve de patience et laisser les chercheurs travailler. Cette affaire montre comment la science progresse, parfois en crabe, toujours par une succession d'hypothèses,

de déductions, de réfutations et de démonstrations. En matière d'exploration spatiale, la route est longue mais le moindre pas est une victoire !

2.2. LA LOI DE TITIUS-BODE

La loi de Titius-Bode est une règle mathématique utilisée pour estimer la distance des planètes à leur étoile (ou leur étoile principale) en fonction de leur rang dans le système planétaire. Pour la formuler, considérons d'abord la suite de nombres suivante :

0 ; 3 ; 6 ; 12 ; 24 ; 48 ; 96 ; 192...

Sa règle de construction est simple : à l'exception des deux premiers nombres 0 et 3, chaque terme est le double du précédent.

En ajoutant maintenant 4 à chaque terme, nous obtenons cette nouvelle suite :

4 ; 7 ; 10 ; 16 ; 28 ; 52 ; 100 ; 196...

Pour finir, divisons chaque terme par 10 :

0,4 ; 0,7 ; 1,0 ; 1,6 ; 2,8 ; 5,2 ; 10,0 ; 19,6...

Considérons d'autre part les distances moyennes des sept premières planètes du système solaire au Soleil, exprimées en unités astronomiques¹ : Mercure est à 0,39 ; Vénus à 0,72 ; la Terre est à 1 ; Mars à 1,52 ; la ceinture d'astéroïdes se situe entre 2,17 et 3,64, avec une moyenne de 2,9 ; Jupiter à 5,20 ; Saturne à 9,54 ; Uranus à 19,18.

Nous constatons que cette série de nombres coïncide avec la précédente à une erreur de 5 % près sur chaque terme seulement.

Cette surprenante loi empirique a été formulée par l'astronome allemand Johann Daniel Titius en 1766 et généralisée par Johann Elert Bode, directeur de l'Observatoire de Berlin, en 1772. Elle s'exprime mathématiquement par la formule $A_n = 0,4 + 0,3 \times 2^n$, où A_n désigne la distance en unités astronomiques du Soleil à la n -ième planète comptée à partir du Soleil. Pour Mercure, il ne faut pas prendre $n = 1$ mais $n = -\infty$ (figure 2.2).

1. Une unité astronomique correspond approximativement à la distance entre la Terre et le Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.



Figure 2.2 | La loi de Titius-Bode.

À l'époque, les astronomes ne connaissaient que les planètes les plus brillantes, c'est-à-dire les cinq planètes visibles à l'œil nu : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. En comparant leur distance au Soleil aux nombres donnés par la règle mathématique, Bode remarqua que rien ne correspondait au nombre 2,8. Il conjectura alors non sans audace qu'il devait exister une planète située à une distance de 2,8 unités astronomiques du Soleil. Les recherches des astronomes pour la détecter sont longtemps restées vaines, jusqu'à ce que l'astronome anglais William Herschel, en 1781, découvre par hasard un corps céleste, ressemblant à une comète, dans la constellation du Taureau. Bode supposa alors qu'il s'agissait d'une nouvelle planète et, examinant son orbite à la lueur de la loi de Titius-Bode, remarqua qu'elle correspondait à la position suivant celle de Saturne. Et c'est ainsi que fut découverte Uranus, la septième planète du système solaire. Sa distance au Soleil vaut environ 19,2 unités astronomiques.

La découverte d'Uranus suscita chez les astronomes de l'époque un regain d'intérêt pour la loi de Titius-Bode, qui furent donc convaincus qu'il existait une planète inconnue cachée entre les orbites de Mars et de Jupiter. En 1801, un observatoire isolé en Sicile en Italie annonça qu'un nouveau corps céleste avait été découvert lors d'une observation de routine. Les calculs montrèrent que ce corps était situé à 2,77 unités astronomiques du Soleil, soit une distance très proche des 2,8 attendus par la loi de Titius-Bode. Baptisée Cérès, cette planète naine, avec son rayon d'environ 473 km, s'est révélée être beaucoup plus petite que les planètes connues jusque-là, ce qui est logique car elle aurait autrement été visible à l'œil nu et découverte depuis longtemps. Plus tard, les astronomes découvrirent de nombreux corps célestes de petites tailles entre les orbites de Mars et Jupiter. Nous savons aujourd'hui que la position 2,8 issue de la loi de Titius-Bode n'est pas occupée par une planète mais par une ceinture composée d'un très grand nombre d'astéroïdes. Avec les progrès de la mécanique céleste, les astronomes ont progressivement compris que l'existence de cette ceinture ne doit rien au hasard. L'effet de

déchirure gravitationnelle provoquée par le Soleil et Jupiter, la plus grosse des planètes, empêche la formation de très gros corps dans cette région de l'espace.

La loi de Titius-Bode reçut toutefois un coup fatal un peu plus tard avec la découverte de Neptune. En 1846, l'astronome et mathématicien français Urbain Le Verrier, fort de ses solides connaissances astronomiques, calcula les paramètres orbitaux d'une planète hypothétique qui expliquerait les perturbations alors constatées dans l'orbite d'Uranus. Sa prédiction fut confirmée par les observations, ce qui lui valut une célébrité immense à l'âge de 35 ans. Cette nouvelle planète, Neptune, se trouvait à seulement 30,1 unités astronomiques du Soleil, soit une valeur en-deçà de plus de 20 % des 38,8 unités astronomiques prévues par la loi de Titius-Bode. Comme les dimensions et la masse considérables de Neptune rendaient son statut de planète inattaquable, la loi de Titius-Bode, après 80 ans de gloire, tomba en désuétude et fut progressivement oubliée.

Depuis le début du XXI^e siècle, les progrès des techniques d'observation et d'analyse ont permis de découvrir des dizaines de milliers d'exoplanètes, c'est-à-dire des planètes en orbite autour d'une autre étoile que le Soleil. Certaines sont de taille comparable à Jupiter, d'autres de taille comparable à la Terre. L'échantillon permettant de vérifier la validité de la loi de Titius-Bode a donc considérablement augmenté ! Si certains systèmes planétaires semblent bien se distribuer selon des lois similaires à celle de Titius-Bode, d'autres paraissent ne suivre aucune règle apparente. La signification physique de la loi de Titius-Bode reste donc à élucider.

3

La structure de l'Univers

Qu'y a-t-il à l'extérieur de l'Univers ? Poser la question, c'est déjà admettre qu'il possède une frontière. Autrement, comment pourrait-il exister un dehors, un ailleurs ? Ce difficile et délicat problème est très important en cosmologie, raison pour laquelle il est très étudié.

On a longtemps pensé que l'Univers était fini, que les étoiles en formaient sa dernière limite, qu'il n'y avait rien au-delà d'elles. Dans une certaine mesure, la théorie héliocentrique de Copernic, qui plaçait le Soleil au centre de tout, reposait sur cette hypothèse. Un peu plus tard, du temps de Newton, les savants ont commencé à envisager l'idée d'un Univers de volume infini, sans limites spatiales.

Notre galaxie, la Voie lactée, n'est qu'une galaxie parmi des milliards d'autres, et notre étoile, le Soleil, n'est qu'une étoile parmi les milliards d'autres qui composent cette galaxie. Selon divers travaux scientifiques, la vie pourrait avoir étéensemencée sur Terre par des corps célestes voyageurs, tels que des comètes ou des astéroïdes. Il a ensuite fallu des milliards d'années d'évolution pour passer d'une vie unicellulaire à l'être humain. Le détail de ce long processus, qui renvoie à nos plus lointaines origines, fait encore l'objet de vifs débats.

3.1. L'ÉTENDUE DU SYSTÈME SOLAIRE

La NASA a annoncé le 12 septembre 2013 que la sonde spatiale Voyager 1 avait quitté notre système solaire et qu'elle était officiellement entrée dans l'espace interstellaire (figure 3.1). Cette sonde automatique de 815 kg avait été lancée le 5 septembre 1977. Sa mission consistait à l'origine à étudier et photographier les planètes externes, comme Jupiter et Saturne, ainsi que leurs satellites, avant de poursuivre sa route dans les profondeurs de l'espace. Voyager 1 est aujourd'hui l'engin spatial le plus éloigné de la Terre. En juillet 2023, la sonde se trouvait à environ 23,9 milliards de kilomètres de la Terre, soit près de 160 unités astronomiques, c'est-à-dire 160 fois la distance de la Terre au Soleil, et il fallait environ 20 heures pour que son signal, qui se propage à la vitesse de la lumière, atteigne la Terre. Quant à la sonde Voyager 2, lancée deux semaines avant Voyager 1, elle se trouvait alors à environ 19,7 milliards de kilomètres ou 132 unités astronomiques.

Même si la NASA considère que la sonde a quitté le système solaire, cet avis ne fait pas l'unanimité parmi les spécialistes. Certains remarquent en effet qu'elle subit toujours l'influence gravitationnelle du Soleil et qu'elle ne pourra pas y échapper avant quelques dizaines de milliers d'années.

Alors quelles sont les dimensions de notre système solaire ? Où se situe exactement sa frontière ? Selon la NASA, elle peut se définir de trois manières différentes. La première consiste à délimiter le système solaire par l'orbite de sa planète la plus lointaine, en l'occurrence Neptune, à 30 unités astronomiques du Soleil. De ce point de vue, Voyager 1 a quitté le système solaire en 1990, de même que, beaucoup plus récemment, la sonde New Horizons qui a également franchi cette ligne de démarcation. Cette définition présente toutefois un inconvénient majeur, celui de ne plus inclure dans le système solaire de nombreux corps célestes, comme les comètes et les astéroïdes, qui gravitent au-delà de Neptune.



Figure 3.1 | Voyager 1 fait ses adieux au système solaire.

On peut aussi définir la frontière du système solaire par l'héliosphère, une gigantesque bulle de gaz enveloppant le Soleil due au vent solaire. Dans ce cas, la limite est atteinte quand le vent ne parvient plus à contrer le milieu interstellaire. C'est sur la base de ce critère que la NASA a annoncé que Voyager 1 avait quitté le système solaire. Selon elle, en effet, les instruments de la sonde indiquent qu'elle a dépassé l'héliosphère et qu'elle est donc entrée dans le milieu interstellaire. Certains scientifiques ont toutefois émis quelques réserves sur cette affirmation car l'entrée dans l'espace interstellaire se caractérise par trois paramètres : une baisse rapide de la densité de particules chargées

en provenance du Soleil, une augmentation rapide de la densité de particules de faible énergie provenant de l'extérieur du système solaire, et un changement important de la direction du champ magnétique. Or Voyager 1 n'a jamais détecté cette dernière variation...

Enfin la troisième façon de définir la limite du système solaire passe tout simplement par l'influence gravitationnelle. La frontière est alors franchie quand un corps ne tourne plus autour du Soleil, quand il est moins attiré par lui que par les autres étoiles environnantes. Sur ce critère, la limite du système solaire est traditionnellement fixée au Nuage de Oort, un vaste réservoir froid et glacé de comètes à longue période orbitale, dont l'existence a été conjecturée en 1950 par l'astronome néerlandais Jan Hendrik Oort. Ce nuage s'étendrait jusqu'à 100 000, voire 150 000 unités astronomiques du Soleil. En retenant le premier chiffre, Voyager 1 mettrait donc environ 30 000 ans pour quitter le système solaire.

En termes de communication, la définition du système solaire adoptée par la NASA est sûrement la meilleure des trois, en tout cas la plus à même de retenir l'attention du grand public et de l'impliquer dans la grande épopée de l'exploration spatiale. Que des dizaines de milliers d'années de voyage ne suffisent pas même à sortir du système solaire pourrait en effet décourager les meilleures volontés !

3.2. UNE STRUCTURE ÉCHELONNÉE

Au printemps 1920, des astronomes du monde entier ont convergé vers Washington D.C. pour assister à un congrès organisé par l'Académie des sciences américaine. L'une des questions à l'ordre du jour de ce Grand débat, pour reprendre le nom par lequel il est entré dans l'histoire, était d'estimer la taille de la Voie lactée. Deux camps se faisaient face, tous deux représentés par des astronomes américains : d'un côté, Harlow Shapley, membre de l'Académie nationale des sciences, ancien directeur de l'Observatoire de l'Université Harvard et président de l'Association américaine d'astronomie ; de l'autre, Heber Doust Curtis, un peu moins titré mais néanmoins distingué (figure 3.2).

Shapley soutenait que la Voie lactée mesurait environ 300 000 années-lumière de diamètre et que la nébuleuse d'Andromède était simplement un nuage de corps célestes qui en faisait partie. Curtis prétendait à l'inverse que la Voie lactée ne mesurait que 40 000 années-lumière de diamètre et que la nébuleuse d'Andromède se trouvait au moins à 500 000 années-lumière de la Terre, à l'extérieur de la Voie lactée. Les discussions vigoureuses ont laissé à l'époque chaque partie campée sur ses positions. Au fil des ans, toutefois, la situation s'est éclaircie, et il est apparu que la nébuleuse d'Andromède se situait bien en dehors de la Voie lactée. Sur ce point, Curtis l'emportait sur Shapley. Cependant la question de la taille de la Voie lactée restait encore à trancher. Avec les progrès continus de l'instrumentation astronomique et les observations toujours plus poussées, le diamètre de la Voie lactée n'a fait et ne fait encore qu'augmenter.

Dans un article de recherche publié en 2015, des spécialistes ont encore doublé le diamètre de la Voie lactée, le faisant passer de 100 000 à 200 000 années-lumière. Avec les 300 000 années-lumière désormais en perspective, Shapley pourrait donc bientôt prendre sa revanche ! Dans tous les cas, ce Grand débat aura eu le mérite de marquer l'entrée dans l'histoire d'un Univers composé d'une multitude de galaxies.

Trois ans après ce congrès aux conclusions incertaines apparaissait en effet sur la scène une grande figure, ou plutôt une légende de l'astronomie, Edwin Powell Hubble. En 1923, à l'aide du télescope réflecteur de 254 cm de l'observatoire du Mont Wilson, il photographia la nébuleuse d'Andromède, aussi désignée par M31, et la nébuleuse du Triangle, ou M33. En analysant ensuite les étoiles variables qui se trouvaient à proximité d'elles, il détermina que ces nébuleuses se situaient à des dizaines de milliers d'années-lumière de nous, bien au-delà de la Voie lactée telle qu'on la considérait à l'époque. Il devait donc s'agir d'autres galaxies, extérieures à la nôtre. Hubble est aujourd'hui considéré comme le père spirituel de l'étude des galaxies et de la cosmologie moderne.



Figure 3.2 | Le Grand débat entre Shapley et Curtis, ici représentés au-dessus d'Edwin Hubble.

En 1850, dans son ouvrage intitulé *Cosmos*, le naturaliste allemand Alexander von Humboldt a introduit la notion « d'archipels », pour exprimer de manière imagée la distribution des étoiles dans l'Univers. Lors de la phase d'expansion qui suivit le Big Bang, la matière, inégalement répartie, s'est regroupée sous l'effet de la gravité pour former des galaxies, comme autant d'archipels d'étoiles voguant dans l'Univers.

Alors quelles sont exactement les dimensions de l'Univers ?

Partons de la Terre et dirigeons-nous vers l'extérieur... Nous croisons d'abord la route de notre plus proche voisine, la Lune, qui est environ 49 fois moins volumineuse que notre planète. Avec ses 1 737 km de rayon moyen, elle se classe en cinquième position parmi les autres satellites connus du système solaire, juste derrière Ganymède (rayon moyen de 2 634 km), Titan (rayon moyen de 2 576 km), Callisto (rayon moyen de 2 410 km) et Io (rayon moyen de 1 815 km). Ganymède et Titan ont une taille un peu supérieure à la planète Mercure, Callisto une taille comparable.

Si la Terre avait les dimensions d'une orange, soit environ 8 cm de diamètre, quelles seraient les dimensions des sept autres planètes ?

Vénus, notre plus proche voisine parmi les planètes intérieures, est d'un volume à peu près semblable à celui de la Terre. Disons que Vénus serait une pomme un peu plus petite que l'orange. Quant à Mercure, la planète la plus proche du Soleil, ce serait un litchi, et Mars, notre plus proche voisine extérieure, une prune.

Viennent ensuite les planètes les plus grosses, et d'abord Jupiter, la championne de sa catégorie, qui, avec son diamètre plus de dix fois supérieur à celui de la Terre, est près de 1 300 fois plus volumineuse. Si la Terre avait la taille d'une orange, celle de Jupiter correspondrait en gros à l'espace englobé par deux parapluies ouverts l'un en face de l'autre. Saturne, la voisine de Jupiter, est aussi de dimension respectable. Environ 800 fois plus grosse que la Terre, elle correspondrait à un ballon de football. Quant à Uranus et Neptune, avec leur volume de l'ordre de 63 et 58 fois la Terre, elles ressembleraient à deux petites

pastèques de taille similaire. Et bien sûr, il ne faut pas oublier le plus grand corps du système solaire, le Soleil, et son volume 1,3 million de fois supérieur à celui de la Terre !

Bien que le Soleil paraisse gigantesque à l'échelle du système solaire, il existe ailleurs dans l'Univers des corps beaucoup plus grands, à l'instar de V509 Cassiopeiae, un étoile hypergéante située dans la constellation de Cassiopée, ou encore KY Cygni, dans la constellation du Cygne, ou Mu Cephei, dans la constellation Céphée. Pendant longtemps, VY Canis Majoris, dans la constellation du Chien, avec son rayon 1 420 fois supérieur à celui du Soleil, était la plus grande étoile connue. Elle a été détrônée en 2012 par UY Scuti, au rayon 1 708 fois supérieur à celui du Soleil.

Cette étoile serait-elle le plus grand objet de l'Univers ?

Non ! Seulement la plus grande étoile connue à ce jour. Et elle se situe à moins de 6 000 années-lumière de la Terre, soit une distance qui n'atteint même pas le dixième des 100 000 années-lumière que mesure à minima notre galaxie. Qui elle-même n'est qu'une goutte d'eau dans l'Univers. Les observations montrent que la Voie lactée contient plus de 100 milliards d'étoiles regroupées en une forme spiralée. Notre système solaire, situé sur l'un des bras de cette spirale, tourne, comme les autres étoiles, autour de son centre.

La Voie lactée se situe elle-même dans un groupe de plus de 50 galaxies appelé le *Groupe local*, qui mesure environ 10 millions d'années-lumière. La galaxie d'Andromède est la plus importante du groupe, suivie de la Voie lactée.

Et cette structure échelonnée ne s'arrête pas là ! Le Groupe local est lui-même contenu dans le *Superamas local* (ou superamas de la Vierge), qui rassemble une centaine de groupes ou d'amas dans une immense crêpe de plus de 100 millions d'années-lumière de diamètre. Quant au niveau de structure supérieur aux superamas, la science ne sait encore rien de ferme à ce sujet !

L'Univers se structure donc en poupées russes : la Terre se situe dans le système solaire, le système solaire dans la Voie lactée, la Voie

lactée dans le Groupe local, le Groupe local dans le Superamas local, et le Superamas local peut-être dans une autre couche, encore plus englobante.

Et qu'en est-il à des échelles encore plus larges ? Vous représentez-vous les dimensions de l'Univers ?

GROUPES, AMAS ET SUPERAMAS

Les groupes et les amas de galaxies sont des systèmes composés de nombreuses galaxies liées entre elles par la gravité. Les astrophysiciens entendent généralement par *groupes* les systèmes comprenant moins de cent galaxies et par *amas* les systèmes qui en comptent un nombre supérieur. Le Groupe local, auquel appartient la Voie lactée, est constitué d'une soixantaine de galaxies. Les superamas sont des systèmes de niveau supérieur, composés de plusieurs groupes ou amas de galaxies. Le superamas qui contient le groupe qui contient la Voie lactée se situe dans la constellation de la Vierge, raisons pour laquelle le Superamas local se nomme aussi le superamas de la Vierge.

3.3. LES RÈGLES À MESURER LES CIEUX

L'origine du monde est l'un des sujets les plus anciens et des plus fascinants de l'histoire de l'humanité. Les philosophes, les poètes et les artistes ont émis de nombreuses hypothèses sur ce grand commencement. Selon les scientifiques, notre Univers naquit d'une gigantesque explosion, le Big Bang, qui s'est produite il y a 13,8 milliards d'années environ. Quant à notre système solaire, il s'est formé il y a près de 4,6 milliards d'années, et a évolué peu à peu pour aboutir aux huit planètes que nous observons aujourd'hui. Faute d'observations directes de l'origine de l'Univers, nous pouvons au moins relever et étudier diverses traces laissées par ce Big Bang.

Nous savons ainsi que l'Univers est en expansion, et que cette expansion est de plus en plus rapide. L'observation des galaxies montre en effet qu'elles s'éloignent de nous, et de plus en plus vite

avec le temps. Ce phénomène est confirmé par d'autres voies, comme l'analyse du fond diffus cosmologique, l'étude de la structure à grande échelle de l'Univers, son âge, les supernovas, les propriétés des amas de galaxies observées en rayonnement X, pour ne citer qu'elles. Et si l'Univers est en expansion, il est de plus en plus petit et dense à mesure que l'on remonte le temps, jusqu'à finir par se réduire à un point, à un instant zéro, l'instant à partir duquel l'espace et le temps prennent leur signification.

Par leurs efforts, les scientifiques sont même parvenus à dater le Big Bang, qui serait donc survenu il y a 13,8 milliards d'années environ. Bien que nous ne puissions pas observer directement l'éloignement des galaxies, nous pouvons le déduire par la lumière qu'elles émettent, et plus précisément par son décalage vers le rouge. Pour comprendre le phénomène, pensons à une voiture de pompiers qui roule toutes sirènes hurlantes. La variation de la hauteur du son, le fait qu'il devienne de plus en plus aigu ou de plus en plus grave, nous permet de savoir si la voiture se rapproche ou si elle s'éloigne de nous. Il en va de même avec la lumière émise par les galaxies en mouvement : la fréquence des ondes lumineuses diminue quand les galaxies s'éloignent, ce qui se visualise en analyse spectrale par un décalage des raies vers le rouge.

Comment les scientifiques déterminent-ils la distance d'un objet céleste lointain ?

Si les méthodes de calcul varient selon l'éloignement considéré, elles se regroupent toutefois en deux catégories : celles qui se fondent sur la luminosité et celles qui reposent sur des échelles.

Les premières partent du fait que plus un corps est éloigné, plus il paraît sombre. Elles exploitent par exemple les variations de luminosité que présentent des étoiles variables comme les céphéides, ou les supernovas, notamment celles de type Ia.

Les méthodes d'échelle, à l'instar des méthodes dites de *parallaxe* ou de *triangulation*, partent du fait que plus un corps céleste est éloigné, plus il paraît petit.

LES CÉPHÉIDES

Une céphéide est une étoile variable très brillante dont la luminosité varie de façon périodique avec le temps. La quatrième étoile de la constellation de Céphée, Delta Cephei, est le prototype des céphéides. Son nom chinois, Zaofu, renvoie à un personnage de légende réputé pour ses talents de conducteur de chariot. Comme elles permettent de mesurer les distances intergalactiques, elles sont souvent considérées comme des « règles à mesurer les cieux ».

Et comment détermine-t-on les dimensions d'un un corps céleste lointain ?

Les méthodes varient selon les objets que l'on considère. La première étape consiste donc souvent à déterminer le type de l'objet en question, pour ensuite lui appliquer la plus adaptée des méthodes disponibles. Pour une étoile dite *de séquence principale*¹ *de type A*, par exemple, nous pourrions mesurer sa luminosité et évaluer sa température de surface, puis, en reportant ces données sur un diagramme dit *de Hertzsprung-Russell*, obtenir une estimation de sa masse.

DIAGRAMME DE HERTZSPRUNG-RUSSELL

Le diagramme de Hertzsprung-Russell (ou diagramme H-R) est un graphique qui représente la luminosité des étoiles en fonction de leur température. La luminosité ou la magnitude absolue est placée de façon décroissante en ordonnée, la température de surface ou le type spectral de façon croissante en abscisse. Cet outil important pour étudier l'évolution des étoiles a été baptisé du nom des deux astronomes qui l'ont conçu indépendamment : le Danois Ejnar Hertzsprung en 1911 et l'Américain Henry Norris Russell en 1913.

1. La séquence principale d'une étoile est une phase très stable qui débute quand l'augmentation de sa pression interne due aux réactions de fusion nucléaire équilibre l'effet de la gravitation.

L'étude de l'origine de l'Univers passe aussi par la recherche des traces laissées par ses tout premiers instants, comme le fond diffus cosmologique, un rayonnement électromagnétique observé dans toutes les directions du ciel. Invisible à l'œil nu, il se découvre grâce à de télescopes opérant sur des longueurs d'onde spécifiques. L'Univers émet également d'autres formes d'ondes électromagnétiques, telles que le rayonnement X, infrarouge ou ultraviolet, micro-ondes, etc. La lumière directement accessible à nos yeux ne constitue qu'une toute petite partie du spectre !

4

Le plein du vide

L'espace n'est pas vide. Au-delà de l'atmosphère terrestre, invisibles à l'œil nu, se mêlent un rayonnement cosmique, des plasmas et de la poussière cosmique. Certaines planètes comme la Terre ou Jupiter sont de plus entourées de *ceintures de rayonnement*, des régions dans lesquelles circulent des particules chargées de haute énergie, principalement des protons et des électrons. Le vide contient tous les éléments du tableau périodique, tous les constituants de la matière. Il est aussi traversé par des antiparticules (comme les positrons), par divers champs (magnétiques, électriques, etc.), par la matière sombre et l'énergie noire. L'immensité du vide spatial est beaucoup plus riche et colorée qu'elle en a l'air !

4.1. LES CEINTURES DE RAYONNEMENT

De nombreux corps célestes, à l'instar de la Terre, possèdent un champ magnétique qui se manifeste dans une vaste région environnante. Les particules électriques de haute énergie piégées dans un tel champ forment une bande de rayonnement intense appelée *ceinture*

de rayonnement. Celle de la Terre (figure 4.1), très typique, se constitue de deux composantes : une ceinture intérieure, entre 600 et 6 000 km d'altitude, principalement composée de protons, et une ceinture extérieure, entre 13 000 à 60 000 km d'altitude, principalement composée d'électrons. Ces ceintures sont beaucoup plus fines aux pôles. Leur étendue, leur forme et la quantité de particules piégées dépendent à la fois du champ magnétique terrestre et de l'activité solaire. Elles sont également nommées *ceintures de Van Allen* en hommage à l'Américain James A. Van Allen qui les a découvertes en 1958.

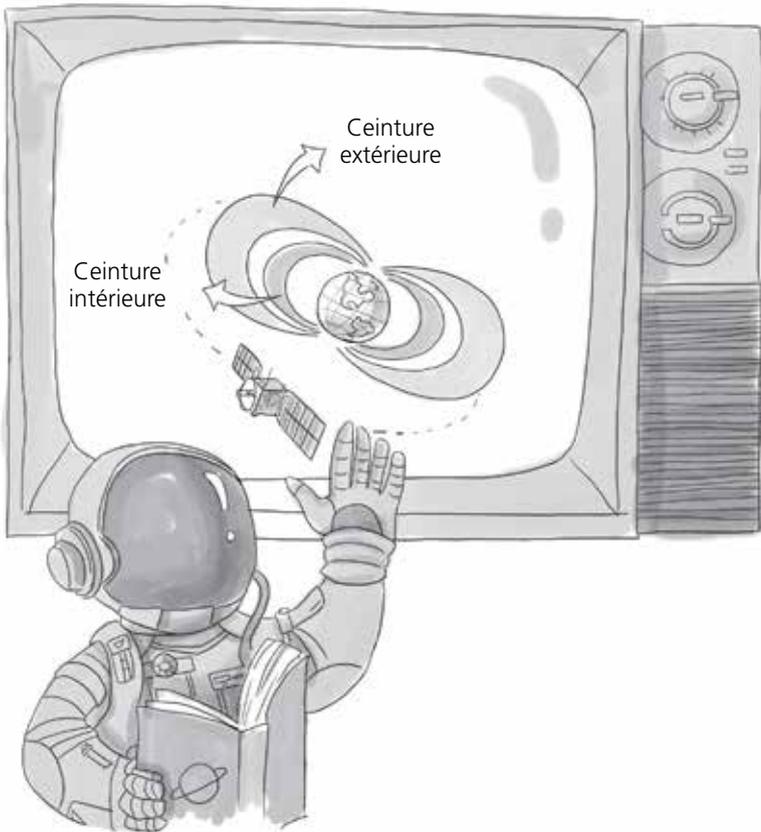


Figure 4.1 | Représentation schématique des ceintures de Van Allen.

LA DÉCOUVERTE DES CEINTURES DE RAYONNEMENT

Au début du xx^e siècle, les scientifiques émirent l'idée que le Soleil soufflait en permanence un vent de particules chargées qui, piégées par le champ magnétique à une certaine distance de la surface de la Terre, formait une espèce de bande ou de ceinture. Après la Seconde Guerre mondiale, en 1958, alors que les États-Unis et l'Union soviétique étaient engagés dans la course à l'espace, un satellite américain, Explorer 1, fut équipé d'un compteur Geiger. Le signal ayant été saturé pendant le vol, plusieurs scientifiques, dont Van Allen, conjecturèrent, non sans une certaine audace, que cette anomalie était due à la présence d'une importante quantité de particules énergétiques dans la zone traversée. Un peu plus tard, grâce aux données fournies par les satellites Explorer 3 et Explorer 4, Van Allen fut en mesure de confirmer l'existence de cette ceinture de rayonnement et d'en préciser la structure et la forme. Il découvrit notamment qu'elle était double, composée d'une ceinture dite *interne* et d'une ceinture dite *externe*, tout simplement parce que la première est plus proche de la Terre que la seconde. Avant cela, le satellite soviétique Spoutnik 2 avait lui aussi été équipé d'un compteur Geiger, qui avait également été saturé durant le vol. Les scientifiques soviétiques avaient toutefois estimé qu'il s'agissait d'un dysfonctionnement probable de l'appareil, les faisant passer du même coup à côté d'une découverte scientifique importante. Cet épisode nous montre qu'il est important en science d'oser formuler des hypothèses hardies !

On a longtemps considéré le champ magnétique terrestre comme un grand barreau aimanté aux lignes de champ très symétriques, qui disparaîtraient progressivement dans l'espace interplanétaire. Cette vision trop simpliste a été corrigée par les observations satellitaires. Le vent solaire façonne en réalité la *magnétosphère*, ainsi qu'est nommée la zone d'action du champ magnétique, en une forme ovoïde du côté du Soleil, qui s'ouvre et s'allonge de l'autre côté (figure 4.2). Les lignes de champ à l'arrière se dispersent sur des centaines de milliers de kilomètres, semblant parer notre mère la Terre d'une immense chevelure...

La magnétosphère nous protège du vent solaire. Elle est source de mécanismes très complexes qui demandent encore à être étudiés.



Figure 4.2 | La magnétosphère terrestre.

4.2. UNE PARTICULE INSAISSABLE

De nombreux corps célestes émettent un flux de particules de haute énergie qui, en circulant dans le milieu interstellaire, forme le *rayonnement cosmique*. C'est le cas du Soleil, par exemple, qui produit en outre un rayonnement électromagnétique, couramment appelé *rayonnement solaire*, et un rayonnement de particules de faible ou de relativement faible énergie, couramment appelé *vent solaire*. Le rayonnement cosmique qui ne provient pas du Soleil est dit *galactique*.

Les particules composant le vent solaire ou les ceintures de rayonnement terrestres sont principalement des électrons, des protons et des ions. Parmi les particules composant le rayonnement cosmique s'en trouve une très petite, à la masse plus d'un million de fois plus faible que celle de l'électron, et qui reste encore à bien des égards très mystérieuse : le neutrino.

En plus de sa lumière, le Soleil nous envoie une quantité phénoménale de neutrinos. Plus de 70 milliards d'entre eux traversent l'ongle de notre pouce chaque seconde. Et tout effort pour s'en prémunir est vain. Quand un neutrino est produit dans le noyau solaire, il lui suffit de deux secondes pour quitter la surface du Soleil et huit minutes pour gagner la Terre à une vitesse proche de celle de la lumière. Il traverse ensuite notre planète en deux centièmes de seconde, sans obstacle pour l'arrêter, notre corps, notamment, lui étant tout à fait transparent.

La science connaît quatre types de forces ou interactions fondamentales : la gravitation, l'électromagnétisme, la force faible et la force forte. Les deux dernières ne se manifestant qu'à l'échelle atomique, nous ne pouvons normalement pas les ressentir. En dehors de la gravitation, les neutrinos n'interagissent que par la force faible (beaucoup, beaucoup plus faible que la force forte). Ils pourraient traverser un mur de plomb épais d'une année-lumière sans heurter aucune autre particule.

C'est précisément en raison du peu d'interaction des neutrinos avec la matière que leur existence a longtemps été ignorée. Dans les années 1920, de nombreuses expériences montraient que la désintégration bêta ne vérifiait pas la loi de la conservation de l'énergie. En théorie, lorsque des neutrons se décomposent en protons et en électrons ($n \rightarrow p + e$), l'énergie des électrons devrait être égale à la différence d'énergie entre les neutrons et les protons. Les mesures réalisées sur les électrons donnaient toutefois un résultat toujours plus petit qu'attendu, comme si une partie de leur énergie disparaissait de manière inexplicable. Les physiciens commencèrent donc à

douter de la loi de conservation de l'énergie, ou plutôt à penser qu'elle n'était peut-être pas aussi universelle qu'ils le croyaient.

Le 4 décembre 1930, Wolfgang Ernst Pauli écrivit une lettre destinée à des collègues physiciens réunis en congrès en Allemagne. Pour retrouver l'énergie qu'il manquait dans la désintégration bêta, il y suggérait qu'une nouvelle particule, encore inconnue, était produite en plus de l'électron et du proton lors de la désintégration. Il admettait que « [s]on remède puisse paraître invraisemblable car on aurait dû voir ces [nouvelles particules] bien plus tôt si réellement elles existaient ». Ne prenant pas lui-même cette hypothèse au sérieux, il ne l'a jamais formulée dans un article scientifique. En 1933, toutefois, Enrico Fermi jugea l'idée intéressante, la reprit à son compte et baptisa cette particule *neutrino*, de l'italien « petit neutron ».

Vingt-six ans après la conjecture de Pauli, en 1956, l'existence des neutrinos fut finalement confirmée expérimentalement par Clyde Cowan et Frederick Reines, entre autres chercheurs. Ils utilisèrent un réacteur nucléaire pour produire les neutrinos et deux réservoirs de 100 litres d'eau pour les détecter. Les neutrinos interagirent avec les protons dans les réservoirs, causant une désintégration bêta qui créa des neutrons et un rayonnement gamma. Pauli eut la chance de voir les neutrinos détectés de son vivant, même s'il mourut peu de temps après.

La plupart des détecteurs de neutrinos sont enterrés très profondément. Pourquoi ? Parce que la Terre est heurtée par de nombreuses particules de haute énergie provenant de l'espace qui produisent des signaux similaires à ceux des neutrinos. En enterrant les détecteurs, on peut utiliser la surface de la Terre pour bloquer ces particules et réduire les interférences.

À ses tous premiers instants, l'Univers se constituait d'une soupe très chaude de différentes particules (y compris de neutrinos) qui se créaient et s'annihilaient en permanence. Environ une seconde plus tard, après une phase d'expansion brutale, la densité de particules a drastiquement chuté et les neutrinos ont cessé d'entrer en collision avec les autres particules. Flottant alors librement dans l'Univers, ils

ont alors constitué ce qui se nomme le *fond cosmologique de neutrinos*. Vous avez peut-être entendu parler d'une autre forme de rayonnement issu du Big Bang : le *fond diffus cosmologique*, surtout composé de micro-ondes, créé lorsque les photons ont commencé à circuler sans plus rencontrer d'obstacles. Ce fond diffus est toutefois apparu environ 380 000 ans après la naissance de l'Univers, bien après le fond cosmologique de neutrinos.

Bien que les neutrinos issus du Big Bang surgissent de toutes les directions, ils restent très difficiles à détecter, raison pour laquelle ils sont souvent qualifiés de « particules fantômes ». Ces neutrinos cosmologiques sont en particulier bien plus difficiles à détecter que les neutrinos produits par le Soleil, du fait de leur énergie beaucoup plus faible, qui les empêche de heurter les noyaux atomiques constituant nos meilleurs détecteurs.

Outre les particules fondamentales, l'Univers est composé de divers éléments, et notamment de l'hydrogène et de l'hélium, formés peu après le Big Bang dans des proportions en masse de 3/4 et 1/4. Par la suite, nombre de ces atomes se sont progressivement regroupés et ont donné naissance aux étoiles et aux galaxies. Au cœur des étoiles, par une succession de fusions nucléaires, l'hydrogène et l'hélium ont ensuite produit des éléments plus lourds tels que l'oxygène, l'azote, le carbone, etc. À la mort des étoiles, ces éléments, ainsi qu'une grande partie de l'hydrogène et de l'hélium restants, ont été éjectés et dispersés dans l'espace. L'hydrogène reste l'élément le plus abondant, quoi qu'il soit relativement rare, avec environ un atome pour dix centimètres cubes en moyenne.

Depuis le Big Bang, en raison de l'expansion, la température globale de l'Univers n'a cessé de baisser. Les étoiles émettent certes localement de la chaleur, mais leur nombre limité et leur durée de vie tout aussi limitée ne suffit pas à réchauffer l'Univers dans son ensemble. Aujourd'hui, plus de 10 milliards d'années après le Big Bang, l'espace est un environnement froid. L'étude du fond diffus cosmologique montre que sa température moyenne est de $-270,3$ degrés Celsius.

L'espace se distingue aussi par une très faible pesanteur ou micropesanteur générale avec une accélération gravitationnelle incomparablement plus faible que celle ressentie à la surface terrestre. En plus du rayonnement qui le traverse, de sa très basse température, de son grand vide, de sa quasi-absence de pesanteur, le milieu spatial se caractérise par des poussières et des micrométéorites se déplaçant à grande vitesse. Fort de son importante énergie cinétique, une micrométéorite d'un milligramme peut transpercer une plaque d'aluminium de trois millimètres d'épaisseur.

Avec le développement de l'industrie spatiale, un nombre croissant de satellites artificiels et d'étages de fusées sont abandonnés en orbite. Certains de ces débris sont conçus pour être détruits à distance, d'autres finissent par se disloquer, mais tous donnent lieu à des fragments qui continuent longtemps à tourner autour de la Terre, rendant la gestion de l'environnement spatial proche de plus en plus délicate. Ces débris, avec leur vitesse élevée, constituent une menace très sérieuse pour les véhicules spatiaux en cas d'impact.

Les environnements des corps célestes sont très différents les uns des autres, bien moins uniformes que le milieu spatial. Dans le système solaire, la Terre mise à part, certaines planètes ou certains satellites sont dépourvus d'atmosphère, comme Mercure et la Lune, d'autres présentent une atmosphère très mince, comme Mars, tandis que d'autres encore, comme Vénus et Jupiter, se caractérisent par une atmosphère très dense. Ces atmosphères varient également en beaucoup composition, avec principalement du dioxyde de carbone pour Vénus et Mars ou de l'hydrogène pour Jupiter. Certains corps possèdent un champ magnétique global, d'autres seulement local ; certains présentent une surface solide (comme Mercure, Vénus, Mars et la Lune), d'autres non (comme Jupiter, Uranus et Neptune) ; certains affichent des températures de surface très élevées (comme Vénus et ses 470 degrés Celsius), d'autres extrêmement basses (comme Pluton à -253 degrés Celsius) ; les comètes sont constituées de poussières et de blocs de glace, etc.

5

Un Soleil colérique

La composition du milieu spatial dans le système solaire dépend principalement de l'activité du Soleil. Ce dernier émet en permanence et dans toutes les directions, ou de façon plus occasionnelle lors d'éruptions par exemple, une quantité importante de particules chargées très rapides, qui perturbent l'entourage des corps célestes à proximité, y compris la Terre (figure 4.2). Bien que le champ magnétique terrestre nous protège de ce flux, il arrive de temps à autres que « des poissons passent à travers les mailles du filet », que des particules franchissent le bouclier, avec un impact notable sur notre quotidien, allant même jusqu'à provoquer un sentiment de panique, voire une peur de l'apocalypse, chez certaines personnes mal informées. Pour se prémunir des colères de la grosse boule jaune capricieuse qui se tient au-dessus de nos têtes, il importe de bien la connaître et de comprendre son fonctionnement.

5.1. LE VENT SOLAIRE

Il faut prendre le mot « vent » accolé à « solaire » pour ce qu'il est, une analogie, une simple image, car le vent dont il s'agit n'est en rien

semblable aux grands mouvements d'air qui brassent notre atmosphère. En termes simples, le vent solaire désigne un flux de particules projetés en permanence dans l'espace par la couronne solaire, la couche la plus extérieure de l'atmosphère solaire. L'expression « vent solaire » provient en fait de l'observation des comètes. Avec le temps et les progrès de l'instrumentation scientifique, les astronomes ont en effet découvert que la queue d'une comète est toujours diamétralement opposée au Soleil et qu'elle s'allonge à mesure qu'elle s'en approche. Ils ont donc présumé que ce phénomène s'expliquait par une espèce de vent soufflant à proximité du Soleil.

Aussi, quand en 1958 des détecteurs embarqués sur un satellite américain ont révélé que le Soleil émettait un flux de particules, l'astronome Eugene Parker a choisi ce nom de baptême très imagé. Pour d'autres étoiles, on parle de *vent stellaire*.

Les particules composant ce flux sont électriquement chargées, c'est-à-dire que le vent solaire est un plasma. Principalement constitué d'ions et d'électrons, ces particules sont certes plus petites et plus élémentaires que les molécules de gaz constituant notre atmosphère, mais leur mouvement agit un peu comme le vent sur Terre, d'où une dénomination finalement pas si imméritée.

La densité du vent solaire est très faible, presque insignifiante au regard de celle du vent qui souffle sur Terre. Dans l'espace interplanétaire proche de notre planète, il est formé de quelques dizaines de particules par centimètre cube en moyenne contre environ $2,7 \times 10^{19}$ molécules par centimètre cube pour le vent terrestre. Sa vitesse est en revanche bien supérieure. Il souffle en effet généralement de 350 à 450 kilomètres par seconde à proximité de notre planète, avec parfois des pointes à 800 kilomètres par seconde. En comparaison, le dernier niveau de l'échelle de Beaufort, utilisée pour classer la force des tempêtes, correspond à 32 mètres par seconde, soit une vitesse au bas mot des dizaines de milliers de fois plus faible que celle du vent solaire.

En dépit de leur faible densité, les particules chargées composant le vent solaire peuvent interagir avec le champ magnétique terrestre.

Et pour bien comprendre la formation du vent solaire, il importe en premier lieu de comprendre la structure en couches de l'atmosphère solaire.

Le Soleil est traditionnellement divisé en six couches qui, en partant du centre, se nomment le noyau, la zone de rayonnement, la zone de convection, la photosphère, la chromosphère et la couronne. Les trois premières couches sont dites *internes*, les trois dernières sont dites *externes* et constituent ce que l'on nomme aussi l'*atmosphère* du Soleil. Le noyau, qui s'étend du centre au quart ou au cinquième du rayon des couches internes, représente le dixième de la masse du Soleil et y produit plus de 99 % de son énergie. La photosphère est la surface brillante du Soleil, celle que nous voyons quand on le regarde, et c'est elle qui produit toute la lumière visible.

C'est dans la couronne, la couche la plus extérieure de l'atmosphère du Soleil, que prend naissance le vent solaire. Elle est visible durant une éclipse totale, quand la Lune cache le Soleil sauf un très mince anneau de couleur tirant vers le rouge. Dans cette région très chaude, la vitesse élevée des particules leur permet de vaincre la gravité du Soleil et de gagner l'espace, en formant un flux stable et permanent : le vent solaire. Ces particules suivent les lignes de champ du champ magnétique du Soleil. Quand il est encore proche de la couronne, le vent solaire se déplace généralement radialement, puis, à mesure qu'il s'en éloigne, adopte un mouvement spiralé en raison de la rotation du Soleil. Environ un million de tonnes de matière s'échappe du Soleil sous forme de vent solaire chaque seconde, ce qui est peu comparé à l'énergie qui s'échappe sous forme de rayonnement. Convertie en masse, cette énergie de rayonnement équivaut en effet à 4,5 millions de tonnes par seconde.

Historiquement, on l'a vu, l'existence du vent solaire fut suspectée quand on remarqua que la queue des comètes s'opposait toujours au Soleil. À la fin des années 1950 et au début des années 1960, les scientifiques prouvèrent l'existence du vent solaire grâce à divers satellites et engins spatiaux d'observation. Dans les années 1970, l'astronomie

en rayonnement X a révélé la présence sur les clichés de zones plus sombres de la couronne que l'on appelle des *trous coronaux*. Le rayonnement électromagnétique et l'intensité lumineuse y sont plus faibles que dans les régions environnantes, ce qui reflète une distribution inégale de la matière coronale. Ces trous coronaux sont des zones où le champ magnétique est *ouvert*, c'est-à-dire que les lignes de champ ne reviennent pas vers le Soleil pour former une boucle mais se dirigent à tout jamais vers l'espace. Ces trous agissent comme une autoroute pour le vent solaire, qui y est projeté en grande quantité et très rapidement. Si la vitesse des particules à la base des trous est d'environ 16 km par seconde, elle dépasse les 350 kilomètres par seconde aux environs de l'orbite terrestre. Le vent solaire souffle très loin dans l'espace, jusqu'aux confins du système solaire, au-delà de l'orbite de Neptune.

Plus généralement, le Soleil libère de fortes quantités d'énergie via les taches solaires et lors d'autres phénomènes naturels comme les éruptions solaires. Ces activités, caractérisées par l'émission d'un fort rayonnement, sont étudiées grâce à des satellites d'observation.

Les particules du vent solaire capturées par le champ magnétique terrestre sont stockées dans les ceintures de Van Allen. Par leurs interactions avec la haute atmosphère près des pôles, elles causent les aurores polaires. Ainsi, les planètes qui comme la Terre possèdent un champ magnétique connaissent elles aussi de telles aurores.

Par son souffle, le vent solaire fait autour du Soleil et du système solaire tout entier comme une grande « bulle » dans le milieu interstellaire (par ailleurs principalement composé d'hydrogène et d'hélium) que l'on nomme *héliosphère*. La zone limite où le vent solaire ne parvient plus à contrer le milieu interstellaire est l'*héliopause*. On la considère généralement comme la frontière du système solaire. Sa localisation exacte, qui varie en fonction de l'intensité du vent solaire et de la densité locale du milieu interstellaire, n'a pas encore été déterminée avec précision mais se situe très au-delà l'orbite de Neptune.

Le vent solaire est aussi à l'origine de la queue des comètes. Des satellites d'observation ont confirmé que le vent solaire souffle les poussières et les gaz environnant une comète vers l'arrière quand celle-ci se rapproche du Soleil. Le vent solaire peut également dévier la trajectoire prévue des satellites artificiels à la fois volumineux et légers, à l'instar de celle d'Echo 1 en 1960.

Dans l'héliopause, la rencontre du vent solaire et de la matière interstellaire provoque une onde de choc, appelée *arc de choc*, un peu similaire à la vague d'étrave qui se forme à l'avant d'un navire qui fend l'eau. La sonde Voyager 1, lancée en 1977, a traversé en 2003 une zone d'arcs de choc située à près de 15 milliards de kilomètres du Soleil.

Lorsque le vent solaire arrive à proximité de la Terre, son interaction avec le champ magnétique terrestre a pour effet de repousser les lignes de champ sans toutefois parvenir à les briser. Le champ magnétique agit ainsi en bouclier qui empêche le vent solaire de pénétrer dans l'atmosphère terrestre. En raison du vent solaire, le champ magnétique terrestre a la forme d'un œuf, avec un côté plus aplati que l'autre.

Le Soleil connaît parfois des *tempêtes solaires*, des regains d'activités soudains et intenses, qui, en se propageant vers la Terre et en interagissant avec son champ magnétique, peuvent nous provoquer diverses nuisances : défaillance de satellites de communication, endommagement de réseaux électriques, détérioration des communications radio, etc.

Dans l'Univers, de nombreuses autres étoiles et même de nombreuses galaxies génèrent leur propre vent, en perdant de la matière dans l'espace interstellaire ou dans l'espace intergalactique environnant. Le vent solaire reste toutefois le seul vent stellaire directement observé à ce jour.

Nos activités dans l'espace proche de la Terre étant appelées à se développer dans les années à venir, il faudra mettre au point un système de « prévision météorologique spatiale ». À cette fin, il sera

crucial de comprendre l'origine et les mécanismes d'élévation de température et d'accélération du vent solaire.

La découverte du vent solaire est l'une des plus importantes de l'astronomie du ^{xx}e siècle. Si, après des années d'étude, nous comprenons mieux les propriétés physiques fondamentales qui le régissent, nous ne savons pas encore très bien comment il est alimenté en matière et en énergie, ni comment il interagit précisément avec le champ magnétique terrestre. Ces questions restent des sujets de recherche importants qui, à plus long terme, permettront de mieux comprendre la nature et la dynamique du plasma cosmique.

5.2. LES TEMPÊTES SOLAIRES

Les tempêtes solaires sont de violentes éruptions du Soleil, qui surviennent lors des pics d'activité des taches solaires et qui libèrent de grandes quantités de particules chargées circulant à grande vitesse dans l'espace. Ces flux peuvent affecter gravement l'environnement spatial terrestre, en détruisant la couche d'ozone, en perturbant les communications radio ou en nuisant à notre santé. Les scientifiques comparent souvent ce phénomène à un « éternuement » du Soleil.

En 1859, alors qu'il observait les taches solaires, l'astronome britannique Richard Carrington remarqua l'apparition d'un petit éclat particulièrement lumineux qui brilla durant environ cinq minutes. Il pensa tout simplement qu'une météorite de grande taille venait de tomber sur le Soleil.

Au début du ^{xx}e siècle, grâce à leurs instruments toujours plus précis, les astronomes découvrirent que ces flashes sur le Soleil étaient très courants et qu'ils étaient souvent corrélés à l'activité des taches solaires. Le développement de la *spectrométrie* leur a également permis de distinguer les longueurs d'onde particulières de la lumière émise par le Soleil, et d'en déduire que son atmosphère contient de l'hydrogène et du calcium. Après quelques recherches complémentaires, ils comprirent que ces éclats n'avaient aucun rapport avec les météorites et qu'il s'agissait d'explosions soudaines libérant de l'hydrogène très chaud.

Ces flashes lumineux peuvent être observés plus de cent fois par jour dans les zones où abondent taches solaires, surtout quand ces dernières sont en phase de croissance. Beaucoup plus rares, les éclats importants et durables, comme celui remarqué par Carrington, se produisent quelques fois par an seulement.

Les flashes apparaissent parfois au centre de la surface solaire, de sorte que la matière libérée par l'éruption se dirige directement vers la Terre. Durant plusieurs jours, les aurores polaires peuvent alors être très intenses, visibles jusque dans les régions de latitude moyenne. Les aiguilles de boussoles sont aussi souvent perturbées et oscillent de manière aléatoire, raison pour laquelle ce phénomène est souvent appelé *tempête* ou *orage magnétique*. Avec les progrès de la technologie, les aurores polaires perdent peu à peu de leur mystère. Ce spectacle magnifique est interprété par un duo constitué du Soleil et de la haute atmosphère. Le champ magnétique terrestre canalise les particules chargées issues de l'éruption solaire vers les deux pôles magnétiques de la Terre. Leur passage ionise la haute atmosphère, ce qui produit la lumière formant les aurores boréales, au pôle Nord, et australes, au pôle Sud.

Les tempêtes solaires sont d'une importance capitale pour la Terre dans la mesure où, pour le dire de façon imagée, un simple éternuement du Soleil provoque chez nous une forte fièvre. Elles suivent le cycle d'activité des taches solaires, avec un pic tous les 11 ans environ.

Avant le ^{xx}e siècle, leur impact sur les activités humaines était très modéré. Il en a été autrement ensuite avec le développement technologique, les tempêtes solaires affectant la qualité des transmissions par ondes radio et le fonctionnement des équipements électroniques. Comme nous sommes de plus en plus dépendants de ces équipements, l'impact des tempêtes solaires ne fait qu'augmenter.

5.3. UN BOUCLIER PROTECTEUR

Le champ magnétique terrestre agit malgré tout comme un bouclier qui empêche la plupart des tempêtes solaires de causer trop de dégâts.

Même s'il n'est pas sans défaut. Pour prendre une image, il serait comme une maison nous protégeant des tempêtes, dont une fenêtre serait forcée par la violence du vent de temps en temps.

Tout dépend en fait de l'orientation du champ magnétique induit par la tempête solaire par rapport à celle du champ magnétique terrestre. Dès 1961, les chercheurs de l'*Imperial College* de Londres avaient prédit que si ces deux directions étaient opposées, la « reconnexion magnétique » des deux champs pouvait provoquer des brèches par lesquelles les particules chargées composant le vent solaire pourraient s'engouffrer. L'existence de ces brèches a été confirmée un peu plus tard, même si leur durée de vie et leur fréquence d'apparition restent encore à déterminer.

Grâce aux observations du satellite IMAGE de la NASA et des satellites CLUSTER de l'ESA, une équipe menée par Harald Frey, chercheur de l'Université de Californie à Berkeley, a pu identifier une brèche du champ magnétique restée ouverte plusieurs heures. Les calculs ont montré qu'elle se situait à environ 60 000 km de la surface terrestre, qu'elle mesurait deux fois la superficie de la Terre, et qu'en pénétrant dans l'ionosphère au-dessus du pôle Nord, les particules chargées qu'elle laissait passer produisaient des aurores protoniques d'une taille équivalente à la Californie.

Les tempêtes solaires perturbent le champ magnétique terrestre, ce qui provoque des changements significatifs de son intensité. Elles affectent également la haute atmosphère de la Terre, et notamment l'ionosphère, en la privant de sa capacité à réfléchir les ondes radio, ce qui entraîne des interruptions de transmission. Elles dégradent enfin la couche d'ozone, avec des effets qui se propagent de couche en couche jusqu'à la surface de la Terre, ce qui induit diverses anomalies climatiques, voire géologiques, comme des tremblements de terre et des éruptions volcaniques.

Le 21 juillet 1959, par exemple, la matière libérée par une violente éruption solaire observée quelques jours plus tôt, atteignit la Terre, qui ralentit sa rotation de 0,85 milliseconde. Ce même jour, de nombreux

séismes furent enregistrés un peu partout dans le monde. Les graves perturbations engendrées sur le champ magnétique terrestre ont en outre brutalement interrompu les réseaux de télécommunication, rendant de fait de nombreux avions et bateaux sourds et aveugles. Comme ces conséquences ne résultent que de « quelques poissons passés à travers les mailles du filet », on imagine la puissance d'une tempête solaire dans l'espace interplanétaire, hors de la protection du champ magnétique terrestre.

5.4. DES CONSÉQUENCES CATASTROPHIQUES

En dépit de leur éloignement, les tempêtes solaires d'envergure ont parfois un impact important, si ce n'est catastrophique, sur nos vies quotidiennes. Comme nous l'avons déjà indiqué, la grande quantité de particules de haute énergie éjectée à cette occasion, en perturbant le champ magnétique de la Terre, peut provoquer un « orage » dans l'ionosphère qui affecte les communications, en particulier les transmissions radio à ondes courtes. Ces perturbations peuvent aussi générer des courants électriques indésirables dans de grandes structures au sol, comme les réseaux de lignes électriques ou les pipe-lines, affectant ainsi la distribution de l'électricité, du pétrole et du gaz (figure 5.1). Le rayonnement qu'elles induisent menace aussi le fonctionnement des satellites opérant dans l'espace ainsi que celle des êtres humains sur Terre. Une surdose, en effet, réduit la résistance immunitaire, provoque des troubles de l'attention, qui peuvent aller jusqu'à causer des accidents de la route. Enfin une tempête solaire, tout en formant parfois de magnifiques aurores polaires, augmente la densité de l'atmosphère terrestre et, par-là, sa température.

La tempête solaire qui a frappé la Terre du 6 au 19 mars 1989 a été particulièrement virulente. Les perturbations du champ magnétique ont provoqué la destruction d'un important transformateur positionné sur la principale ligne électrique du Québec au Canada. En moins de 90 secondes, le réseau entier a été paralysé. La panne



Figure 5.1 | Les effets d'une tempête solaire sur le réseau électrique.

de courant a duré 9 heures, touché 6 millions d'habitants et causé des pertes économiques directes d'environ 500 millions de dollars. Les réseaux électriques d'autres régions du globe ont également été endommagés à des degrés divers, comme les transformateurs de la centrale nucléaire de Salem, dans le New Jersey, aux États-Unis, ou ceux de la Compagnie d'électricité de Tokyo, au Japon. Des réseaux électriques ont également sauté en Suède.

Ce flux massif de particules de haute énergie en orbite basse a également affecté à des degrés divers de nombreux satellites. Ainsi, le 13 mars, GOES-7, un satellite géostationnaire météorologique américain, a perdu la moitié de ses ressources énergétiques, ce qui a réduit d'autant sa durée de vie. Les circuits de commande du satellite de communication japonais CS-3B ont été endommagés quelques jours plus tard, le 17 mars. Quant au satellite américain d'observation du Soleil SMM, son orbite a chuté d'environ 5 000 mètres, ce qui a entraîné sa désintégration prématurée dans l'atmosphère. Cette tempête solaire a également causé la rupture quasi totale des communications radio dans les régions de basse latitude, c'est-à-dire proches de l'équateur. Rendus inopérants, les systèmes de navigation civils et militaires ont donc perturbé les trajectoires de nombreux avions et bateaux. Les courants électriques induits par l'orage magnétique ont endommagé les pipelines de transport de pétrole en Australie, tandis que de fortes impulsions ont été observées sur les câbles sous-marins du Pacifique et de l'Atlantique.

En septembre 1989, lors d'une tempête solaire, les astronautes de la navette américaine *Atlantis* ont eu les yeux sévèrement irrités par les particules chargées qui ont frappé leur rétine. Au même moment, le niveau de radiation mesuré sur un vol entre Paris et Washington à bord du Concorde, le célèbre avion supersonique, a pour la première fois dépassé le niveau d'alerte. Les passagers ont reçu une dose six fois supérieure à celle d'un trajet habituel, soit l'équivalent d'une radio du thorax. D'août à octobre 1989, les performances des cellules solaires des satellites américains GOES-7, GOES-8 et GOES-9 ont

brutalement chuté. Du côté soviétique, 69 satellites de la famille Cosmos ont également connu des anomalies de fonctionnement.

Du 6 au 11 janvier 1997, une autre tempête solaire a rendu inopérant Telstar 401, un satellite de communication en orbite géosynchrone de la compagnie américaine AT&T d'une valeur de 200 millions de dollars. Prévu pour durer 12 ans, il n'aura servi que 3 ans. Le 19 mai 1998, le satellite de communication américain Galaxy IX fut aussi perdu.

Le 14 juillet 2000, jour de la fête nationale française, a éclaté une tempête solaire ultérieurement baptisée *Bastille Day*, qui a gravement endommagé des satellites scientifiques de première importance, dont ACE, SOHO et WIND, tous trois dédiés à l'observation du milieu spatial. Les Japonais ont perdu le satellite de recherche astrophysique ASCA, tandis qu'un de leurs autres satellites, Akebono, spécialisé dans l'observation des aurores polaires, connaissait aussi quelques dysfonctionnements.

LA TEMPÊTE SOLAIRE BASTILLE DAY

Une violente éruption solaire s'est produite le 14 juillet 2000, jour anniversaire de la prise de la Bastille en France, raison pour laquelle elle fut nommée *Bastille Day*.

La plupart des communications par satellite furent interrompues et des aurores polaires ont été observées de l'Arctique jusqu'au sud de la Floride aux États-Unis.

Lors d'une éruption solaire survenue entre la fin octobre et le début novembre 2003, et pour cette raison baptisée « éruption solaire d'Halloween », environ la moitié des satellites en circulation ont subi des anomalies de fonctionnement. Les données recueillies par des satellites importants pour la recherche scientifique en Europe et aux États-Unis, comme, cette fois encore, les satellites GOES, ACE, SOHO ou WIND, furent définitivement perdues ou gravement corrompues. La sonde spatiale Mars Odyssey, développée par la NASA, a

automatiquement basculé en mode sécurisé durant sa mission. La sonde spatiale européenne SMART-1, à destination de la Lune, a reçu une dose élevée de radiations sur son orbite de transfert, ce qui a entraîné une extinction automatique du système. Le satellite allemand CHAMP a également connu une interruption temporaire ; le satellite japonais ADEOS-II a été définitivement perdu ; l'altitude de la capsule spatiale chinoise Shenzhou 5 a considérablement chuté. Les secteurs de la communication, de l'énergie et des transports ont été affectés à un degré ou à un autre. Le système d'appels de détresse maritime est tombé en panne ; la communication avec une expédition sur l'Everest a été interrompue ; la précision du système de positionnement mondial (GPS) a laissé à désirer ; 50 000 Suédois ont été privés d'électricité. Une éruption solaire aussi intense est historiquement très rare.

Le 13 décembre 2006, une autre éruption a sévèrement affecté les communications radio à ondes courtes en Chine. Celles-ci furent coupées trois heures durant dans les villes de Canton et Chongqing, ainsi que dans la province de Hainan. Les satellites chinois ont aussi été touchés, à l'instar du satellite météorologique Fengyun-1 et du satellite de communication Asia-Pacific-2, tous deux définitivement perdus.

En mars 2012, une violente éruption s'est produite dans la région du Soleil baptisée AR11429. Avec ses 100 000 km de long sur 50 000 km, soit une superficie plus vaste que la surface de la Terre, cette zone est celle qui compte le plus grand nombre de taches solaires. Elle a connu un pic de 11 éruptions en 7 jours, avant que la fréquence commence à diminuer.

Les protons hautement énergiques qu'elle a éjectés ont frappé la Terre au terme d'une trentaine d'heures de voyage. Bien qu'elle ait atteint une vitesse de 2 200 kilomètres par seconde, la libération de masse coronale, par chance, n'a pas causé d'orage magnétique de grande ampleur. N'étant pas directement dirigée vers la Terre, elle n'a eu qu'un impact limité sur notre planète.

5.5. ENTRE PHANTASMES ET RÉALITÉ

En 2012, avec la sortie mondiale du blockbuster hollywoodien *2012*, des rumeurs sur une apocalypse qui surviendrait cette année-là ont commencé à se propager. Certains ont ainsi prophétisé qu'une éruption solaire d'une ampleur sans précédent se produirait le 22 septembre 2012, avec des conséquences désastreuses pour l'humanité. Une enquête diligentée à cette occasion a permis de clarifier la situation.

Il apparaît donc que l'origine de cette prophétie remonte à décembre 2008, époque à laquelle une rumeur circulant sur Internet prétendait que la NASA avait découvert la formation d'un immense trou dans la magnétosphère terrestre. Grand comme quatre fois la Terre, s'accroissant sans cesse, ce trou laisserait pénétrer un flux toujours plus important de particules nocives de l'espace, qui dès lors iraient mortellement frapper la surface terrestre et tout ce qui s'y trouvait. La rumeur fut alimentée un peu plus tard par un article publié en mars 2009 sur le site web du *New Scientist*. L'auteur y décrivait non sans un certain sensationnalisme les conséquences catastrophiques d'une gigantesque tempête solaire éclatant le 22 septembre 2012. Il n'affirmait pas que ce cataclysme aurait vraiment lieu et entendait surtout alerter sur les dangereux impacts potentiels des événements météorologiques spatiaux, s'appuyant pour cela sur un rapport intitulé « Événements météorologiques spatiaux graves – Comprendre les impacts sociaux et économiques », alors tout juste publié par l'Académie des sciences américaine.

De nombreuses personnes ont également considéré que la date de la fin du monde était donnée par l'ancien calendrier maya et qu'elle surviendrait le 21 décembre 2012 (figure 5.2). Là encore, ce n'était qu'une rumeur. La date correspond simplement à un recalage du calendrier maya, à une fin de cycle qui annonce plus sûrement le début d'une nouvelle ère que la fin du monde.

Toutes ces rumeurs sur une fin du monde prévue en 2012 ont alors encouragé les producteurs hollywoodiens à réaliser des films



Figure 5.2 | Rumeurs de fin du monde sur fond de calendrier maya.

catastrophes comme *Le jugement dernier* ou *2012*, qui font la part belle aux scènes apocalyptiques. À la surprise générale, toujours un peu avant 2012, un scientifique affirma que ce type de scénarios de fin du monde ne se produirait pas en 2012 mais en 2013. Selon lui, après une période paisible de demi-sommeil, l'activité solaire allait se réveiller pour reprendre de plus belle. L'année 2013 serait donc marquée par de violentes éruptions solaires, d'une puissance équivalente à 100 milliards de bombes à hydrogène, qui frapperaient presque immédiatement le champ magnétique terrestre, avec des conséquences effrayantes difficiles à imaginer. Durant le pic d'activité, le flux de particules libérées par les gigantesques éjections de masse coronale pourrait plonger la Terre dans le noir. Plus d'électricité, plus d'électronique, plus de communications, plus de GPS... Plus de téléphones, plus d'ordinateurs... Les hôpitaux, les banques et les aéroports bloqués...

Le niveau actuel de la connaissance scientifique ne permet toutefois pas de prédire avec précision les tendances à long terme de l'activité solaire, sans même parler de prédire telle éruption particulière à l'échelle de quelques années. De plus, les données d'observation des taches solaires montrèrent autour de 2012 qu'elles restaient très paisibles, et divers signes indiquaient que le niveau d'activité solaire global durant le 24^e cycle (commencé en novembre 2008 et se terminant en décembre 2019) était et resterait relativement faible. Ces données suggéraient en outre que le pic d'activité se produirait plus tard qu'annoncé, plus près de 2014 que de 2012 ou 2013.

Aujourd'hui, avec le recul du temps, nous savons que ces prédictions apocalyptiques ne se sont pas réalisées, que le Soleil n'a pas connu les éruptions dévastatrices prévues par certains pour 2012 ou 2013, et que notre sécurité n'a jamais été menacée. Entretemps, la NASA avait pris soin de rassurer le public, indiquant qu'il n'y avait pas lieu de céder à la panique, précisant que cette prédiction d'une éruption solaire dévastatrice le 22 septembre 2012 ne reposait sur aucun fondement scientifique.

Les astronomes savent que l'activité des taches solaires suit un cycle de 11 ans, et que la Terre a déjà affronté une violente tempête solaire en 1859. Elle avait causé peu de dommages à l'époque, l'électricité et les réseaux de communication étant encore très peu développés. Avec notre dépendance chaque jour grandissante aux appareils électroniques, les perturbations dues aux tempêtes solaires se font toutefois de plus en plus manifestes. Les services GPS et les communications téléphoniques sont inévitablement interrompus, par exemple, tandis que les vols internationaux passant par le pôle Nord ou le pôle Sud doivent être détournés ou retardés. Les scientifiques commencent à surveiller le Soleil de très près en raison des graves conséquences que peuvent causer ses éruptions. Les satellites sont de plus en plus souvent conçus pour basculer dans un mode sécurisé lors d'un tel événement, afin de limiter les dégâts. Depuis déjà plusieurs décennies, les efforts technologiques portent également sur l'amélioration des prévisions météorologiques spatiales.

Toutes les éruptions solaires n'ont pas le même impact. La direction de l'éjection, la quantité d'énergie qui reste quand la tempête atteint la Terre, entre autres, sont autant de facteurs à prendre en compte. En dehors de l'atmosphère, les dégâts concernent les satellites et autres engins spatiaux ; sur Terre, on l'a vu, l'électricité et les communications principalement.

La Chine n'a pas encore connu de pannes d'électricité causées par une tempête solaire, toutes les précédentes coupures ayant touché des régions de latitude plus élevées. Cependant, avec l'évolution de la distribution énergétique du pays, comme la construction de pipelines entre la Chine et la Russie, ou la ligne électrique à très haute tension Est-Ouest, des conséquences sont à craindre pour l'avenir.

Par chance, les tempêtes solaires ne peuvent causer de blessures directes aux personnes ni affecter considérablement les biens des particuliers. Et pour limiter les impacts, les gouvernements ou les grosses compagnies pourraient prendre un certain nombre de mesures, celle de réduire la tension électrique, par exemple.

6

L'observation du ciel

L'exploration spatiale a commencé quand un homme a pour la première fois levé les yeux vers les étoiles. Les moyens d'observation ont beaucoup progressé avec le temps, passant de l'œil nu aux lunettes astronomiques, des télescopes aux sondes spatiales, des sondes aux vols habités. Le spectre s'est en outre élargi, avec un regard captant la simple lumière visible, puis l'infrarouge, le rayonnement X, le rayonnement gamma et aujourd'hui les ondes gravitationnelles. Tout cela est allé de pair avec une compréhension du monde toujours plus affinée, qui a délaissé l'admiration béate ou soumise des mystères du ciel étoilé au profit des théories scientifiques et technologies avancées qui nous permettent de remonter à l'origine de l'Univers, de le cartographier sous toutes ses coutures, et de prédire dans une large mesure son évolution.

Ce chapitre est consacré à l'évolution des moyens d'observation. Il fait la part belle aux lunettes astronomiques et aux télescopes qui, pendant longtemps, ont été les instruments privilégiés par les astronomes pour percer les secrets de l'Univers.

6.1. L'OBSERVATION À L'ŒIL NU

Bien avant l'invention des lunettes astronomiques et autres dispositifs d'assistance optique, les plus curieux de nos ancêtres exploraient le ciel étoilé avec leur regard pour seul instrument. En cette lointaine époque, l'immensité des cieux formait un terrain de jeu à la mesure de leur imagination et de leur créativité. Les hommes pensaient alors que les trajectoires des astres étaient liées à leur destinée. Superstition mise à part, les étoiles leur servaient aussi à s'orienter et à mesurer le temps.

6.1.2. *Astres et navigation*

L'homme est loin d'être la première et seule espèce à avoir levé les yeux au ciel. Depuis la formation de la Terre, il y a 4,6 milliards d'années, de nombreuses créatures ont avant nous remarqué la présence des astres et tiré parti de leur lumière pour se guider. Des insectes variés se sont dirigés et se dirigent encore grâce à la lumière du Soleil, de la Lune ou des étoiles, comme en témoignent tous ceux qui, la nuit venue, se jettent la tête la première vers une source lumineuse un peu forte. En raison de leur éloignement, les rayons de la Lune et des étoiles paraissent parallèles. Ainsi, pour s'assurer qu'ils progressent en ligne droite, il suffit à certains papillons de nuit de vérifier qu'ils font un angle fixe par rapport aux étoiles. Et c'est parce qu'ils confondent la lumière de la flamme d'une bougie avec celle des astres qu'ils se précipitent vers une destinée tragique. Maintenir un angle constant par rapport à une source lumineuse ponctuelle conduit en effet à un vol en spirale¹ qui aboutit en son centre (figure 6.1). Cette utilisation de la lumière nocturne à des fins d'orientation est inscrite dans les gènes des insectes.

Les hommes aussi se sont servis et se servent encore des étoiles pour se guider. En observant avec attention les trajectoires des astres, ils en ont découvert un qui restait presque immobile : l'Étoile polaire.

1. En mathématiques, une telle spirale est dite *équiangle* ou *logarithmique*. Elle a été découverte par René Descartes et étudiée en détail par Jacques Bernoulli.

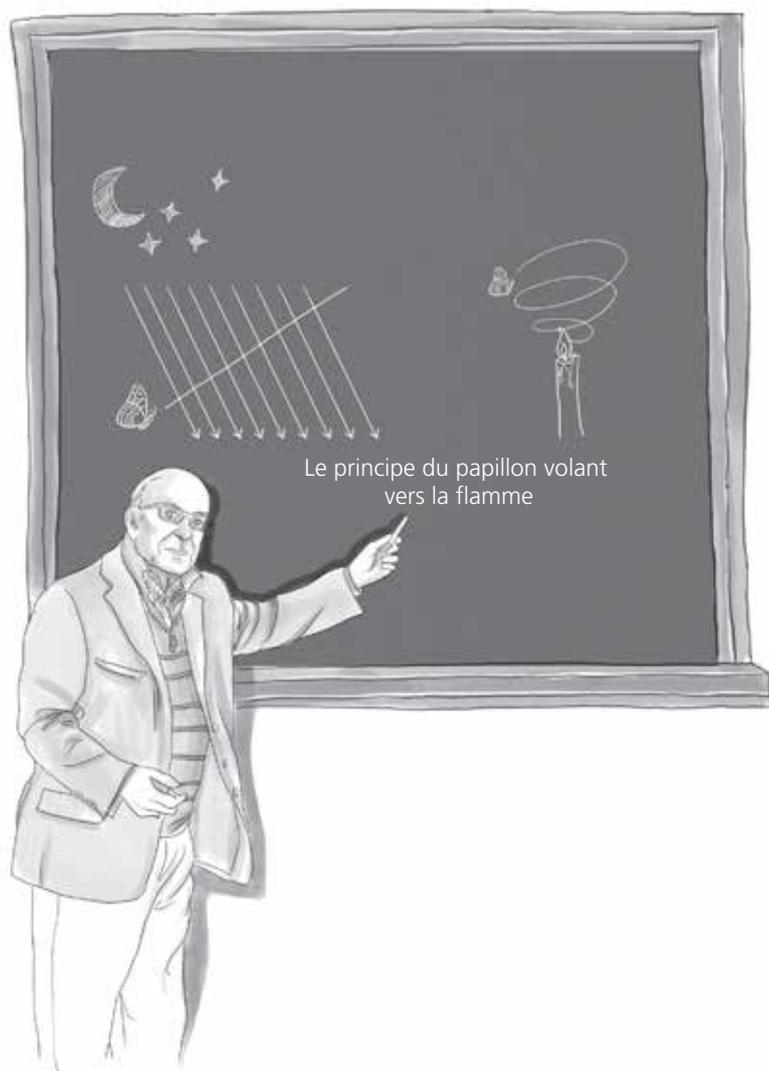


Figure 6.1 | La flamme et le papillon.

Planètes exceptées, le mouvement apparent d'un astre lumineux dans le ciel est principalement causé par la rotation de la Terre. Pour un observateur positionné au sol, une étoile semble tourner autour de l'axe de la Terre, comme on peut le constater sur une photographie prise en pose longue. L'étoile particulière qui se trouve dans le prolongement de l'axe ne semble donc pas bouger. Dans l'hémisphère nord, cette étoile fixe qui indique en permanence le Nord est l'Étoile polaire.

Cette particularité, remarquée depuis des milliers d'années par nos ancêtres, a été utilisée pour se diriger en mer dans les premiers temps de la navigation, alors que la boussole et le gyroscope n'avaient pas encore été inventés. Les marins qui naviguaient en Méditerranée il y a 3 500 ans se servaient du Soleil pour s'orienter pendant la journée et de l'Étoile polaire pendant la nuit. Et si les mauvaises conditions météorologiques empêchaient de voir ces points de repères, il fallait s'arrêter ! La perspective toujours présente de perdre le ciel de vue dans une mer démontée rendaient donc les longs voyages incertains et périlleux.

L'Étoile polaire n'a pas seulement permis aux hommes de l'hémisphère nord de se diriger mais aussi de déterminer la latitude du lieu où ils se trouvaient. La méthode repose sur un fait très simple : la latitude est l'angle que fait l'Étoile polaire avec l'horizon, ce qu'on appelle sa hauteur. Pour déterminer sa latitude, il suffit donc de mesurer la hauteur de l'Étoile polaire. Jusqu'à très récemment, et parfois aujourd'hui encore, la détermination de la latitude par l'observation des étoiles constituait un moment privilégié de toute course maritime. Elle se faisait à l'aide d'un sextant, un instrument de conception ingénieuse qui permettait de mesurer avec précision la hauteur d'une étoile par tous les temps. Malgré l'apparition de la boussole, du gyroscope, de la navigation radio et du positionnement par satellite, le sextant reste vaillamment en usage dans la marine et en aéronautique.

L'orientation est également un problème incontournable du vol spatial. Comment déterminer sa direction dans l'espace ? Sur Terre,

même si nous éprouvons parfois des difficultés pour distinguer le nord du sud et l'est de l'ouest, nous savons au moins ce qui est en haut et ce qui est en bas. Dans l'espace, cependant, en l'absence de pesanteur, le haut et le bas n'ont plus de signification absolue...

Le milieu spatial nous offre tout de même quelques avantages : pas de nuages, pas de brouillard, ni aucun obstacle de nature géologique. De plus, le Soleil et les autres étoiles forment des balises très fiables et très simples d'utilisation. Les véhicules spatiaux actuels sont tous équipés de capteurs solaires ou stellaires, capables de reconnaître le Soleil et des étoiles spécifiques, puis d'en déduire l'orientation de l'engin.

COMMENT TROUVER L'ÉTOILE POLAIRE ?

Par une nuit claire, il faut d'abord repérer la Grande Ourse, une immense casserole formée par sept étoiles principales. En suivant la ligne passant par les deux étoiles constituant le bout opposé à la queue, on tombe sur l'Étoile polaire (figure 6.2).

Différentes étoiles polaires

L'axe de rotation de la Terre varie très lentement avec le temps, si bien qu'il ne pointe pas éternellement vers la même étoile. L'Étoile polaire diffère donc selon les époques. Il y a 5 000 ans, du temps des Mésopotamiens, l'Étoile polaire était l'étoile Alpha de la constellation du Dragon (α Draconis). L'Étoile polaire actuelle est Alpha de la Petite Ourse (α Ursae Minoris), à laquelle succèdera, vers l'an 3000, Gamma de Céphée (γ Cephei).

Et l'étoile polaire australe ?

De la même façon qu'il pointe vers l'Étoile polaire dans l'hémisphère nord, l'axe de la Terre pointe vers une seconde étoile polaire dans l'hémisphère sud, en l'occurrence l'étoile Sigma de la constellation de l'Octant (σ Octantis). Alors pourquoi n'entendons-nous jamais parler de l'étoile polaire australe ? Il se trouve que sa luminosité est 20 fois plus faible que celle de l'étoile polaire boréale. À peine visible à l'œil nu, et donc sans aucune utilité pratique pour la navigation et le positionnement, on comprend qu'elle fasse très peu parler d'elle.



Figure 6.2 | L'Étoile polaire nous montre le chemin.

Pour déterminer une position, le système le plus couramment utilisé sur Terre est aujourd'hui le GPS (Global Positioning System – Système mondial de positionnement), développé par les États-Unis, et le BDS (Beidou) développé par la Chine. Dans l'espace, une technologie en cours de développement tire parti des « phares » naturels que sont les pulsars, de petites étoiles à neutrons qui tournent rapidement sur elles-mêmes en émettant un fort rayonnement électromagnétique. La régularité de leur rotation en fait d'excellentes horloges. Un véhicule spatial, équipé de détecteurs de rayonnement adéquats, peut déterminer sa position en comparant les temps d'arrivée des bouffées de rayonnement émises par différents pulsars bien connus.

Ce type de navigation spatiale est promis à un bel avenir en raison de sa grande portée et de son extrême précision. La Chine, à commencer par son satellite expérimental XPNV 1, lancé en 2016, participe activement à son développement. Il est ainsi probable que les hommes se servent bientôt des pulsars pour se repérer dans l'immensité de l'océan étoilé...

6.1.2. Astres et calendriers

Les étoiles nous permettent non seulement de nous repérer dans l'espace mais aussi dans le temps. Elles sont même à l'origine du calendrier. La responsabilité de sa tenue, comme de l'établissement de l'heure officielle, incombe aux astronomes. Alors quel est donc le lien entre cieux et temporalité ?

Les phénomènes météorologiques, dès les débuts de la civilisation, ont été associés aux observations du ciel diurne et nocturne. Nos lointains ancêtres ont très tôt remarqué que les saisons ou les crues des rivières dépendent de la position du Soleil, de la Lune et des étoiles. Durant l'Antiquité, l'observation intensive des mouvements célestes était surtout motivée par l'agriculture. Se repérer dans le temps et établir un agenda fondé sur les mouvements célestes pour guider la production agricole venaient au premier rang des priorités des sociétés d'alors. Or la simple observation de la nature environnante

(flore, météorologie...) permettait tout au plus de diviser l'année en saisons : il fallait faire mieux !

L'apparence de la Lune varie de façon cyclique, avec une phase de croissance, de la nouvelle lune à la pleine lune, et une phase de décroissance, de la pleine lune à la nouvelle lune. Ces cycles ont donné naissance à la notion de *mois*. Un calendrier fondé sur la Lune est dit *lunaire*. Dans l'Égypte antique, le calendrier entremêlait phases de la Lune et lever de l'étoile Sirius. Le début d'un mois était fixé par le début de la nouvelle lune et durait donc 29 ou 30 jours. Chaque jour portait un nom, souvent en rapport avec la Lune. Une année comptait 12 ou 13 mois. De nombreuses autres civilisations antiques ont établi leur calendrier en divisant l'année selon le cycle lunaire.

En plus de se repérer dans le temps, on l'a dit, le calendrier servait surtout à l'agriculture. Un problème survenait toutefois du fait que la durée de l'année d'un calendrier lunaire n'est pas constante. En effet, la position de la Terre sur son orbite autour du Soleil à une date donnée varie légèrement d'une année sur l'autre. Avec le temps, les agriculteurs ne pouvaient plus se fier à la date indiquée pour les semis, par exemple, ce qui rendait ce type de calendrier peu pratique.

Une amélioration fut apportée par l'adoption du calendrier *solaire* (ou *soli-lunaire*). Les Égyptiens avaient remarqué que les crues du Nil commencent cinquante ou soixante jours après que Sirius se lève pour la première fois en même temps que le Soleil. Ils ont donc pris pour année la période séparant deux premières apparitions concomitantes de Sirius et du Soleil, puis l'ont scindé en douze mois de 30 jours et 5 jours supplémentaires, soit un total de 365 jours. Ce fut le premier calendrier solaire de l'histoire de l'humanité. Il restait toutefois une erreur d'un quart de jour par rapport à l'année solaire proprement dite, le temps que met la Terre à boucler une orbite autour du Soleil, ce qui entraînait une divergence d'un mois tous les 120 ans environ, soit une nouvelle synchronisation au bout de 1 460 ans. Les Égyptiens avaient parfaitement conscience des insuffisances de ce calendrier,

mais, après des années et des années d'utilisation, il leur était difficile d'en changer et préférèrent donc procéder à des ajustements par voie officielle. En 46 av. J.-C., partant du calendrier égyptien, les Romains ont fondé le calendrier julien qui, au ^{xvi}e siècle, fut réformé pour donner naissance au calendrier grégorien, aujourd'hui en usage dans la plupart des pays du monde.

En Chine, le calendrier qui était traditionnellement utilisé pour guider la production agricole repose sur un système de vingt-quatre *termes solaires* et se nomme le *T'ai chū*. Élaboré à partir d'un précédent système qui comprenait déjà les termes de l'équinoxe de printemps, de l'équinoxe d'automne, du solstice d'été et du solstice d'hiver, sa forme définitive lui fut donnée en 104 av. J.-C. par Deng Ping, qui fixa le nombre de termes à vingt-quatre et leur assigna des positions astronomiques précises. Partant de l'équinoxe de printemps, quand le Soleil frappe l'équateur à la verticale, un terme est donné par une progression de la Terre de 15 degrés sur son orbite autour du Soleil. Une révolution complète ramène à l'équinoxe de printemps et représente 360 degrés, ce qui divise donc l'année solaire en 24 termes.

Nous savons qu'une année solaire comporte en réalité 365 jours, 5 heures, 48 minutes et 45 secondes. L'arrondir à 365 jours conduit donc à un décalage d'environ 24 heures tous les quatre ans, que le calendrier grégorien efface en ajoutant un jour les années bissextiles. Mais comment nos aînés chinois se sont-ils affranchis du problème avec leurs 24 termes par an ? Ils n'avaient pas à s'en soucier car les termes solaires correspondent moins à une durée fixe exprimée en nombre de jours, comme nous l'entendons habituellement, qu'à un intervalle de temps qui sépare deux événements astronomiques précis. Prenons l'exemple du printemps. Il commence le jour de l'équinoxe de mars, c'est-à-dire quand au mois de mars le Soleil traverse le plan équatorial de la Terre. Et les anciens Chinois avaient établi que les débuts du printemps de deux années consécutives diffèrent de 365 jours et 6 heures, soit une durée effectivement très proche de l'année solaire.

Le calendrier traditionnel chinois utilise par ailleurs le mois lunaire, c'est-à-dire qu'un mois correspond au passage d'une nouvelle lune à une autre. En ajoutant un mois à certaines années, le calendrier soli-lunaire chinois suit d'assez près l'année solaire. Il est tout à fait remarquable qu'un système fondamentalement astronomique aussi précis ait pu être élaboré bien avant l'invention de la lunette ou du télescope, donc avec des moyens très limités.

Comme chacun sait, les saisons proviennent de la rotation de la Terre autour du Soleil. Se pourrait donc qu'il existe des « saisons » similaires en raison de la rotation du système solaire autour du centre de la Voie lactée ? De nombreux chercheurs le pensent. Lorsque le Soleil rencontre une zone plus dense en matière interstellaire, sa luminosité diminue, et par voie de conséquence, la température du milieu environnant, ce qui pourrait conduire à une période glaciaire comme celles que la Terre a connues. Mais l'histoire des hommes est encore trop courte pour conclure de manière formelle. Ainsi que l'a remarqué le très sage Tchouang Tseu : « Le champignon d'un matin ne connaît pas l'alternance du jour et de la nuit. La chrysalide ne connaît pas l'alternance du printemps et de l'automne. » Dans très longtemps qui sait, notre calendrier tiendra peut-être compte du mouvement du système solaire dans la Voie lactée, pour, comme le sage le dit encore, « prendre 8 000 ans pour un printemps et 8 000 ans pour un automne ».

6.2. LUNETTES ET TÉLESCOPES TERRESTRES

En 1608, un apprenti travaillant dans un atelier de lunettes de vue en Hollande découvrit par hasard qu'en observant un objet à travers deux lentilles, il le voyait de plus près. Fort de cette constatation, il inventa la lunette d'approche, aussi appelée longue-vue. Son patron, un homme intelligent, prit rapidement conscience de l'importance de ce nouvel instrument et le présenta au gouvernement. Grâce à cette lunette, la faible marine hollandaise vainquit la puissante flotte espagnole, ce qui permit au pays d'acquérir son indépendance. Pour éviter que d'autres pays ne copient cette invention, les Hollandais

tentèrent de cacher soigneusement son mode de fonctionnement. Mais c'était sans compter Galilée, un grand ingénieur, physicien et astronome italien.

En mai 1609, alors qu'il enseignait à l'Université de Padoue, Galilée apprit par un correspondant qu'un Hollandais aurait inventé une longue-vue capable de voir les objets éloignés. Avec peut-être déjà en tête l'idée d'utiliser cet instrument pour observer le ciel, Galilée gagna son laboratoire.

Trois mois plus tard, Galilée avait fabriqué une lunette de 4,2 cm de diamètre et d'environ 1,2 mètre de longueur. Elle était simplement constituée d'une lentille concave et d'une lentille convexe situées de part d'autre d'un tube. La lentille concave, collée à l'œil, faisait fonction d'oculaire, tandis que la lentille convexe, pointée vers l'objet à observer, faisait fonction d'objectif. Le facteur de grossissement d'une telle lunette est égal au rapport de la distance focale de la lentille objectif (β) sur la distance focale de la lentille oculaire (α). Avec son tube assez court, la lunette de Galilée avait pour avantage une image peu déformée mais pour principal inconvénient un champ de vision limité.

Si Galilée n'est pas à proprement parler l'inventeur de la lunette, il est le premier à s'en être servi pour observer le ciel (figure 6.3). Et cet acte marqua le début d'une ère nouvelle ! Nos connaissances sur le ciel et l'Univers, qui jusque-là reposaient sur l'observation à l'œil nu, firent des progrès décisifs. La lunette nous a permis de découvrir et d'observer de nombreux phénomènes astronomiques inconnus. En confirmant la théorie héliocentrique, c'est-à-dire que la Terre tourne autour du Soleil et non l'inverse, la lunette a ébranlé le monde d'alors, gouverné par la religion. Elle a aussi jeté les solides fondements de la science moderne. Pour reprendre un bon mot : « Christophe Colomb a peut-être découvert le Nouveau monde, mais Galilée a découvert le Nouvel univers ! »

Galilée a d'abord pointé sa lunette vers la Lune. Ce qui passait pour un sublime disque brillant et argenté aux yeux de tous a alors révélé son vrai visage : un globe défiguré par des reliefs montagneux.

Difficile de penser que Dieu ait pu créer une telle imperfection ! La Lune, comme la Terre, présente une surface accidentée. Les bords circulaires déchiquetés de couleur assez claire furent bientôt baptisés *cratères*, tandis que les vastes étendues de couleur plus sombre furent appelées *mers*. Une terminologie encore en vigueur aujourd'hui !

Galilée pointa ensuite son instrument en divers autres endroits du ciel nocturne. Bien que les étoiles ressemblent toujours à des étoiles



Figure 6.3 | Galilée observant le ciel à la lunette.

quand on les observe à la lunette, elles se montrent plus brillantes et surtout plus nombreuses qu'à l'œil nu. Il fut ainsi le premier à révéler au monde le mystère de la Voie lactée, notre galaxie, ce long fleuve opalin en réalité constitué d'étoiles innombrables.

Puis Galilée observa la petite surface orangée de Jupiter, une petite surface, certes, mais une surface qui montrait que les planètes sont beaucoup plus proches de la Terre que les étoiles. Dans le même temps, il découvrit quatre points plus petits, presque alignés, toujours positionnés à côté de Jupiter. En les observant plusieurs mois durant, Galileo comprit qu'ils tournaient autour de Jupiter comme la Lune autour de la Terre, qu'il s'agissait donc de satellites. Ainsi, tout ne tournait pas autour de notre planète !

En souvenir de cette découverte, ces quatre satellites furent dits *galiléens*. Tous sauf le second sont plus grands que la Lune.

En août 1610, après avoir remarqué sa forme en croissant, Galilée s'intéressa de plus près à Vénus. Comme il avait encore besoin d'un peu de temps, et selon une pratique courante de son époque pour se réserver la priorité d'une découverte, il résuma ses résultats sous la forme sibylline d'une formule latine : *Haec immatura a me iam frustra leguntur OY*, soit quelque chose comme « Ces lettres prématurées ont jusqu'ici été lues en vain par moi : o, y ». Que pouvait signifier cette obscure phrase de 35 lettres ? Quel résultat Galilée avait-il obtenu ? Il est très difficile à deviner. Galilée donna la solution du mystère en décembre de la même année. Il s'agissait en fait d'une anagramme de *Cynthiae figuras aemulatur mater amorum*, soit « La mère des amours imite les figures de Cynthia ». Dans un cadre mythologique, la mère des amours désigne Vénus et Cynthia renvoie à la Lune. Vénus connaît donc des phases similaires à celles de la Lune. Le détail de ce phénomène ne pouvait s'expliquer que parce que Vénus tournait autour du Soleil et non de la Terre.

Galilée découvrit enfin les taches solaires, et par voie de conséquence le mouvement de rotation du Soleil sur lui-même.

L'invention de la lunette astronomique, en raison du savoir nouveau qu'elle a apporté sur l'Univers, marque la naissance et le

développement de l'astronomie moderne. Le titre de *Christophe Colomb des cieux*, souvent attribué à Galilée, est amplement mérité.

Durant les quelque 400 années écoulées depuis, les instruments d'observation ont évolué, subissant leur lot de transformations plus ou moins radicales, pour aboutir à des télescopes au diamètre de plus en plus grand et au pouvoir de résolution de plus en plus fort. Le cliché puis l'imagerie électronique ont également remplacé la vision directe par l'œil. Certains télescopes ne sont même plus équipés d'oculaires.

Mais pourquoi le diamètre des télescopes a-t-il toujours augmenté ? Parce que la théorie impose une limite supérieure au pouvoir de résolution d'un télescope de diamètre donné. Quelle que soit la sophistication de sa conception, quel que soit le soin apporté à sa construction, cette limite ne pourra pas être dépassée. Elle est due à la diffraction et dépend à la fois de la longueur d'onde de la lumière considérée et du diamètre du télescope : plus ce diamètre est important, plus la limite supérieure de résolution est élevée. Ainsi, pour distinguer les points lumineux de plus en plus éloignés dans le ciel, la seule possibilité consiste à augmenter toujours plus le diamètre des télescopes. Dans le même temps, cette augmentation améliore leur capacité à collecter la lumière et donc à mieux voir les corps célestes plus sombres.

Cependant, la taille d'un télescope ne peut croître indéfiniment, du fait d'une série de contraintes techniques. Le miroir de 5 mètres qui équipe l'emblématique télescope Hale sur le Mont Palomar, pèse à lui seul 14,5 tonnes. Le poids de la partie mobile du télescope dépasse les 500 tonnes quand le poids total atteint les 800 tonnes.

L'augmentation de la taille et donc du poids du télescope le rend non seulement plus difficile à manœuvrer, mais affecte également la forme de sa lentille, avec un impact notable sur la qualité de l'image. En outre, les petites inégalités de température sur le corps du télescope peuvent aussi entraîner de légères distorsions de la surface du miroir qui, là encore, détériorent la qualité de l'image. Côté construction, par les méthodes traditionnelles, les coûts augmentent presque

proportionnellement au carré ou même au cube de la taille. Pour dépasser une certaine dimension, il faudra donc trouver de nouvelles technologies.

Aujourd'hui, le plus grand télescope optique construit par l'homme a un diamètre de 10,4 mètres. Il s'agit du Gran Telescopio Canarias (GTC, GranTeCan – Grand Télescope des îles Canaries), situé sur l'île de La Palma de l'archipel des Canaries en Espagne. Son pouvoir de résolution extrêmement élevé lui permet de distinguer les phares d'une voiture à 20 000 km de distance environ. Les imperfections sur le polissage du miroir ne dépassent pas les 15 nanomètres, soit l'équivalent de montagnes ou de vallées de quelques centimètres de hauteur ou de profondeur à la surface de la Terre. Parmi les télescopes d'environ 10 mètres de diamètre, citons encore :

- le télescope Hobby-Eberly (HET) qui, en dépit d'un miroir de diamètre légèrement inférieur à celui du GTC, le dépasse en performance pour certaines observations. Capable de mesurer des vitesses radiales de l'ordre de 1 m/s, il a permis de découvrir et d'analyser le spectre de nombreuses *exoplanètes*, c'est-à-dire des planètes qui tournent autour d'une étoile autre que le Soleil. Il fait aussi merveille pour l'observation des supernovas de type Ia et pour la mesure de l'expansion de l'Univers ;
- les deux télescopes Keck, à savoir Keck I et Keck II, construits en 1991 et 1996 au sommet du volcan Mauna Kea sur l'île d'Hawaï. Ces deux télescopes identiques peuvent fonctionner de concert pour les observations interférométriques. Ils sont particulièrement utiles pour remonter le temps et observer les débuts de l'Univers ;
- le Very Large Telescope (VLT – Très grand télescope), développé par l'European Southern Observatory (ESO – Observatoire Européen Austral) à partir de 1986. Il est constitué d'un alignement de quatre télescopes principaux, aux miroirs de 8,2 mètres de diamètre, formant un réseau d'interférométrie, équivalent à un télescope optique de 16 mètres de diamètre ;

- l'Extremely Large Telescope (ELT – Télescope géant européen), lui aussi développé par l'ESO, actuellement en construction. Il disposera d'un miroir de 39 mètres de diamètre, composé de près de 800 petits miroirs hexagonaux. À sa mise en service, prévue en 2027, il deviendra le plus grand télescope optique du monde.

En Chine, le plus grand télescope optique est aujourd'hui le Guo Shoujing, aussi connu sous le nom de Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope (LAMOST – Télescope spectroscopique multi-objets à fibres optiques grand champ). Bien que son diamètre soit de seulement 4 mètres, c'est l'un des plus grands télescopes du monde par son champ de vision, qui atteint 5 degrés. Il peut ainsi obtenir jusqu'à 4 000 spectres d'objets célestes en une seule exposition, soit le meilleur rendement au monde en la matière. Le télescope Guo Shoujing se trouve à l'Observatoire de Xinglong, dans la province du Hebei, à environ deux heures de route de Pékin.

6.3. TÉLESCOPES SPATIAUX

Positionner un télescope dans l'espace plutôt que sur Terre présente l'avantage de s'affranchir des perturbations atmosphériques qui nuisent à la qualité des observations. De ce point de vue, le télescope spatial Hubble a marqué une étape importante de l'histoire de l'astronomie. Doté d'un miroir de 2,4 mètres de diamètre, pesant au total de 12,5 tonnes pour un coût de 1,5 milliards de dollars, ce géant fut placé en orbite autour de la Terre par la navette spatiale Discovery en 1990. Grâce à l'absence d'atmosphère, son pouvoir de résolution théorique est 10 fois supérieur à celui des télescopes optiques de même diamètre positionnés au sol. Ses immenses qualités ont permis aux spécialistes de résoudre de nombreux problèmes astronomiques fondamentaux et de mieux comprendre la physique spatiale.

Comme de nombreux autres projets exceptionnels avant lui, le télescope spatial Hubble a connu des débuts difficiles. Peu après son lancement, les scientifiques découvrirent que les images qu'il renvoyait n'étaient pas aussi nettes qu'attendues. Ils pensèrent d'abord que le

télescope nécessitait quelques réglages complémentaires. Cependant, en dépit de tous les ajustements possibles, le télescope persistait à leur envoyer des images floues. Après une étude technique approfondie, il est apparu que le composant le plus essentiel du télescope, à savoir son miroir principal, présentait un défaut de polissage d'environ deux microns.

Ce miroir avait été fabriqué par la société Perkin-Elmer, qui jouissait d'une riche expérience et d'une excellente réputation en matière d'instrumentation scientifique. La NASA lui avait donc laissé une grande latitude pour le polissage du miroir. Et le pire s'était produit ! Tout est parti d'une goutte de peinture qui a accidentellement chuté dans l'instrument destiné à mesurer la courbure du miroir, provoquant une erreur de calibre d'environ 1 mm, qui s'est répercutée par un défaut de polissage du miroir d'environ 2 microns. Pressée par les délais de lancement, la NASA n'a pas conduit les tests avec toute la rigueur requise et a expédié le miroir défectueux dans l'espace.

Un défaut de 2 microns, soit 2 % du diamètre d'un cheveu, peut paraître bénin. Pour le télescope Hubble, ce fut catastrophique. Ces deux microns dépassaient de loin les capacités du système de correction dont il était pourtant pourvu. Si le problème ne pouvait pas être résolu, le télescope ne constituerait rien de plus qu'un gros débris spatial de 12,5 tonnes et 1,5 milliards de dollars. Du jour au lendemain, la NASA devint la risée des grands médias américains, au point même que certains craignirent un temps pour son avenir.

Le problème une fois mis en évidence, il restait à le résoudre. Et à le résoudre de manière techniquement satisfaisante pour un coût le plus faible possible. Après avoir écarté des solutions trop onéreuses comme le remplacement du miroir voire la construction d'un autre télescope spatial, les ingénieurs proposèrent une solution aussi audacieuse qu'astucieuse : équiper le télescope Hubble d'une paire de « lunettes ».

Les images renvoyées par le télescope étaient en effet acquises par un appareil répondant au doux sigle de WFPC 1. Pour obtenir une

image nette, il suffisait donc, par un dispositif optique adéquat, de corriger l'image formée par le miroir défectueux avant son passage dans le WFPC 1. Dans son principe, c'est exactement mettre des lunettes au bout du nez d'une personne myope.

Ce dispositif à deux miroirs nommé COSTAR fut installé en 1993 par les astronautes de la navette spatiale Endeavour en même temps que WFPC 2, une version améliorée du système d'acquisition, qui comprenait également quelques dispositifs de correction (figure 6.4).

Dès lors, le télescope put enfin nous montrer l'Univers dans toute sa richesse et sa diversité. De 1990 à 2015, il a tourné près de 137 000 fois autour de la Terre, soit un parcours de plus de 5,4 milliards de kilomètres. Il a effectué plus de 1,2 million de missions, concernant pas moins de 38 000 objets célestes et générant en moyenne 830 Go de données d'observation par mois. Parmi les cibles observées par le télescope spatial Hubble, la plus lointaine est une galaxie primitive, formée très peu de temps après le Big Bang, située à 13 milliards d'années-lumière de la Terre. On lui doit également la preuve de la présence courante des trous noirs supermassifs, la récolte de données précises sur l'expansion, l'introduction du concept d'*énergie sombre*, ainsi que bien d'autres contributions à des projets de recherche dignes du prix Nobel.

Comme le télescope Hubble a un peu vieilli, sa mission est désormais assurée par son successeur, le télescope spatial James Webb (JWST – James Webb Space Telescope). Longtemps attendu, le JWST dispose d'une capacité d'observation renforcée dans le domaine infrarouge, ce qui lui permet de mieux voir des corps célestes plus éloignés et de plus faible luminosité. Il a coûté près de 10 milliards de dollars et a été lancé le 25 décembre 2021. On lui doit déjà la photographie la plus profonde et la plus détaillée jamais obtenue d'une région de l'Univers ou encore la plus ancienne galaxie jamais observée, formée 320 millions d'années seulement après le Big Bang. Ce télescope promet une riche moisson de résultats et nous aidera sûrement à percer bien d'autres secrets de l'Univers !

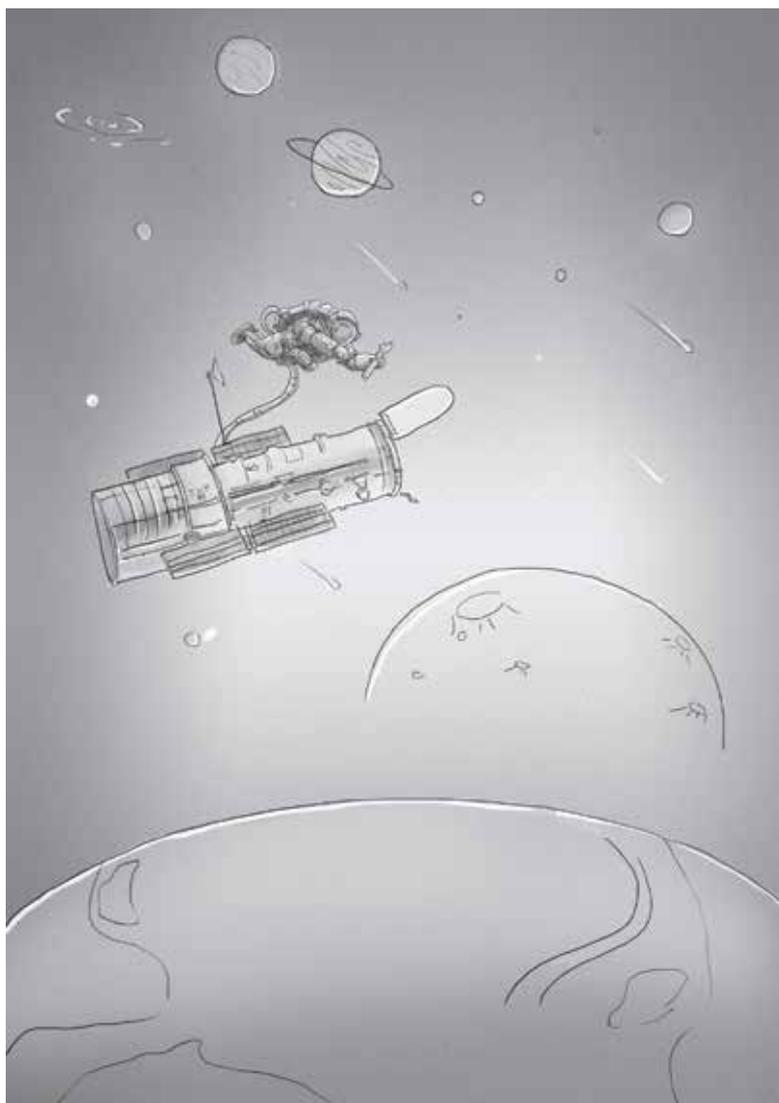


Figure 6.4 | Un astronaute à l'œuvre sur le télescope spatial Hubble.

6.4. DES MOYENS D'OBSERVATION TOUJOURS PLUS AVANCÉS

La lumière visible est une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 700 nanomètres. Les phénomènes naturels émettent des ondes électromagnétiques dans de nombreuses autres gammes de rayonnement, dites aussi *plages spectrales*, comme celles des rayonnements gammas, X, ultraviolets, infrarouges et micro-ondes (figure 6.5). Outre ces ondes électromagnétiques, les particules de haute énergie, les neutrinos et les ondes gravitationnelles peuvent également refléter des événements se produisant dans l'espace. Le terme de télescope englobe de nos jours tous les instruments capables de détecter ces types d'émission.

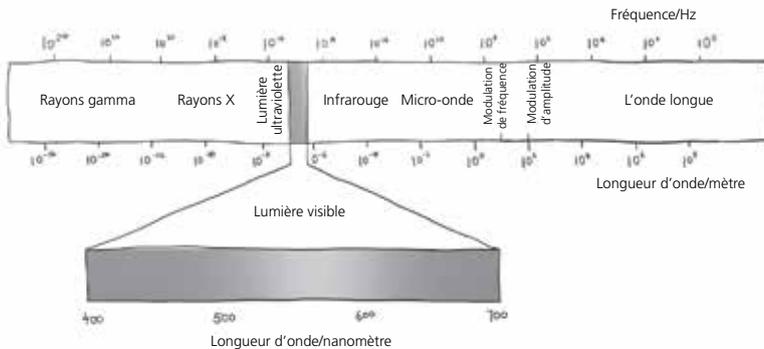


Figure 6.5 | Le spectre électromagnétique.

6.4.1. Les radiotélescopes

Bien que le spectre électromagnétique soit très large, seules la lumière visible et les ondes radio de longueur d'onde comprises entre 40 millimètres à 30 mètres peuvent traverser l'atmosphère. Avec le temps, les *radiotélescopes*, les télescopes capables d'observer dans le spectre radio, ont pris une place importante en astronomie.

La caractéristique la plus évidente d'un radiotélescope est son énorme antenne. Comme l'objectif pour un télescope optique, elle fait fonction d'œil, en collectant non pas la lumière visible mais les faibles signaux radio provenant de l'espace. Cette antenne fonctionne

comme celle d'une radio ordinaire, à ceci près qu'elle est plus stable et plus sensible. Le signal reçu est ensuite transmis à une *station de réception* qui l'amplifie, le nettoie du bruit parasite et l'enregistre. Le résultat se présente sous la forme d'un ensemble de courbes sinusoïdales, que les astronomes analysent pour obtenir diverses informations sur les corps célestes.

Le principe de la radioastronomie remonte aux années 1930, alors que Karl Jansky, un ingénieur de la compagnie téléphonique américaine Bell, menait des recherches sur les interférences qui pouvaient altérer les communications téléphoniques internationales transmises par ondes courtes. Il remarqua que le signal enregistré par l'antenne directionnelle géante qu'il avait construite pour l'occasion contenait une composante inconnue mais régulière. En étudiant attentivement un certain temps et en la rapportant à une carte du ciel, Jansky comprit que le rayonnement provenait de la Voie lactée, et que sa direction la plus intense désignait son centre, du côté de la constellation du Sagittaire. Et c'est ainsi que tout a commencé !

Dans les années 1960, les radiotélescopes ont été à l'origine de quatre découvertes astronomiques majeures : les pulsars, les quasars, le fond diffus cosmologique et les molécules organiques interstellaires.

Avec le développement des technologies liées aux radiofréquences, ils ont connu dans les années 1950-1960 une série de perfectionnements qui a abouti à de nouveaux types de télescopes tels que le radio-interféromètre, le radio-interféromètre à très longue base ou le radiotélescope à synthèse d'ouverture. Développés à partir des années 1980, le réseau européen d'interférométrie à très longue base (European VLBI Network), son homologue américain (VLBA) ou le radiotélescope spatial qui intervient dans le programme de radio-interférométrie à très longue base japonais (VSOP) sont emblématiques de cette nouvelle génération de radiotélescopes. Leur sensibilité, leur résolution et leur bande d'observation sont bien supérieurs à celles de leurs prédécesseurs. Le réseau américain VLBA, par exemple, est composé de dix antennes paraboliques réparties sur une zone de

8 000 kilomètres de long entre Hawaï à Sainte-Croix, dans les Îles Vierges. Sa résolution angulaire, c'est-à-dire sa capacité à distinguer de fins détails, est 500 fois supérieure à celle du télescope spatial Hubble et 600 000 fois supérieure à celle de l'œil humain. Ce pouvoir de résolution équivaut à une personne capable de lire un journal à 4 000 kilomètres de distance.

Si l'on ne tient pas compte des réseaux, le radiotélescope à un seul appareil le plus imposant et le plus performant du monde est aujourd'hui FAST, un radiotélescope sphérique chinois de 500 mètres de diamètre. Par sa sensibilité 2,25 fois supérieure, il a détrôné le célèbre radiotélescope d'Arecibo et ses 300 mètres de diamètre. En outre, FAST couvre une zone d'observation bien plus importante, définie par 40 degrés d'angle zénithal contre seulement 20 seulement pour son prédécesseur. Pour cette raison, il est aussi bien adapté à une mise en réseau. Il devrait occuper cette position de premier plan durant encore 20 ou 30 ans, offrant ainsi des opportunités de découvertes et de percées scientifiques dans de nombreux domaines, aussi bien dans la physique à grande échelle que dans la structure intime de la matière ou l'environnement Terre-Soleil. Il fera également partie intégrante du dispositif de défense nationale.

L'avenir verra apparaître des radiotélescopes toujours plus grands. À partir de 2026, le monde devrait entrer dans l'ère du Réseau d'un kilomètre carré (Square Kilometer Array – SKA). Le réseau sera composé de plus de 130 000 antennes élémentaires de type « dipôle » pour les basses fréquences et de 2 500 antennes paraboliques de 15 mètres de diamètre pour les moyennes fréquences. Fort de ses plus de 3 000 kilomètres de ligne de base et d'une surface collectrice totale d'un kilomètre carré, SKA s'étendra sur trois continents.

6.4.2. *L'astronomie X*

Un peu partout dans l'Univers, des pulsars, des sursauts gamma, des restes de supernovas, des trous noirs, entre autres objets célestes, émettent des rayonnements X. Collecter et analyser cette forme de

rayonnement permet d'en apprendre beaucoup sur la source qui l'a produite. C'est en pointant des télescopes à rayonnement X vers des trous noir, par exemple, que l'on parvient à esquisser les contours de ces objets mystérieux. Cette technique nécessite toutefois de placer les instruments d'observation en orbite, ou du moins à très haute altitude, du fait que cette plage de rayonnement ne traverse pas notre atmosphère.

Le premier satellite d'astronomie en rayonnement X, ou plus simplement astronomie X, fut Uhuru, lancé par les États-Unis le 12 décembre 1970 depuis le Kenya. Initialement baptisé Explorer 42, aussi connu sous le nom de Small Astronomy Satellite 1, il a été renommé Uhuru, un mot qui signifie « liberté » en swahili, pour commémorer le septième anniversaire de l'indépendance du Kenya, qui coïncida avec le jour du lancement. Équipé de deux détecteurs positionnés dans des directions opposées l'une à l'autre, le satellite utilisa son mouvement de rotation pour balayer entièrement le ciel, ce qui lui a permis de localiser environ 350 sources de rayonnement X. Il a ainsi découvert de nombreuses étoiles doubles à rayonnement X dans la Voie lactée, des émissions en provenance d'amas de galaxies très lointains, ainsi que le premier candidat au statut de trou noir : Cygnus X-1. La mission très réussie du satellite Uhuru a marqué pour toujours l'histoire de l'astronomie X.

D'autres satellites d'astronomie X ont par la suite été lancés comme le britannique Ariel 5, le néerlandais ANS (Astronomische Nederlandse Satelliet), les américains SAS-3 (Small Astronomy Satellite 3), HEAO-1 et HEAO-2 (High Energy Astronomy Observatory 1 et 2), l'européen EXOSAT (X-ray Observatory Satellite) ou le japonais Hakucho, pour ne citer qu'eux. Le satellite HEAO-2, renommé Einstein après son lancement en 1978, le premier à être équipé d'un télescope à rayonnement X de type réflectif (télescope Wolter), fut le plus productif des années 1970.

Au cours des années 90, le satellite BeppoSAX, développé conjointement par l'Italie et les Pays-Bas, détecta le rayonnement X résiduel des

sursauts gamma. Un autre satellite important fut le Röntgensatellit, ou ROSAT, baptisé ainsi en l'honneur de Wilhelm Konrad Röntgen, le découvreur du rayonnement X. Développé par l'Allemagne en coopération avec le Royaume-Uni et les États-Unis, mis en service en juin 1990, il a achevé le premier recensement systématique des sources de rayonnement X « mou », c'est-à-dire de plus faible énergie. Et ce n'est là qu'une partie de sa riche moisson scientifique ! En 1993, le satellite japonais ASCA fut le premier à être équipé d'un capteur CCD pour l'imagerie. L'année 1999 fut exceptionnelle avec le lancement coup sur coup de deux satellites aujourd'hui les plus performants en astronomie X : l'américain Chandra et l'euro-péen XMM-Newton. Le premier se caractérise par son excellente résolution spatiale (inférieure à 1 seconde d'arc) et une large gamme d'énergies (100-1 000 électronvolts), le second par sa résolution spectrale très élevée. À eux deux, ils ont obtenu quantité de résultats de recherche importants.

En Chine, le premier satellite d'astronomie X, HXMT (Hard X-ray Modulation Telescope), a été lancé le 15 juin 2017 et mis en service le 30 janvier 2018. Capable d'observer le rayonnement X dans la gamme de 1 000 à 250 000 électronvolts et le rayonnement gamma entre 200 000 à 3 000 000 électronvolts, il a été conçu pour assurer quatre missions distinctes :

- la traque dans notre galaxie de nouvelles sources de haute énergie et de nouvelles activités d'objets déjà connus ;
- l'observation des variations de rayonnement et des propriétés spectrales de corps célestes de haute énergie tels que les trous noirs et les étoiles à neutrons ;
- l'acquisition de données d'observations spectrales et de variations temporelles sur les sursauts gamma et autres éruptions dans la gamme des rayonnements X durs et des rayonnements gamma mous. Ces données permettent d'étudier les processus de formation de trous noirs résultant de la mort d'une étoile massive ainsi que la fusion d'étoiles à neutrons ;

- l'évaluation du principe de navigation autonome des véhicules spatiaux par l'utilisation des pulsars X.

6.4.3. *L'astronomie infrarouge*

Dépasser l'obstacle de l'atmosphère permet aussi d'observer les sources qui émettent des ondes électromagnétiques dans la gamme de l'infrarouge, qu'il s'agisse de corps du système solaire, d'étoiles, de régions contenant de l'hydrogène ionisé, de nuages moléculaires, de nébuleuses planétaires, de galaxies, de noyaux de galaxies, de quasars, etc. Le premier satellite d'astronomie infrarouge, IRAS (Infrared Astronomical Satellite), développé en coopération par les Pays-Bas, le Royaume-Uni et les États-Unis, a été lancé le 25 janvier 1983. Durant ses 10 mois de fonctionnement, il a notamment découvert de vastes nuages de poussière en suspension dans le milieu interstellaire, six nouvelles comètes, des étoiles en formation et plusieurs centaines de milliers de nouvelles sources de rayonnement infrarouge. Ces premiers résultats nous ont permis de mieux comprendre l'Univers tout en stimulant le développement de ce type d'astronomie.

6.4.4. *L'astronomie gravitationnelle*

Les ondes gravitationnelles sont des oscillations de la courbure de l'espace-temps qui se propagent à grande distance de leur point de formation, transportant avec elles une énergie dite de *rayonnement gravitationnel*. Leur existence avait été prédite en 1916 par Einstein sur la base de la théorie de la relativité générale qu'il venait d'élaborer. Comme les ondes gravitationnelles pénètrent des milieux hors d'atteinte des ondes électromagnétiques, elles pourraient nous fournir des informations nouvelles sur les trous noirs et autres astres exotiques échappant aux moyens traditionnels d'observation. Plus globalement, l'astronomie gravitationnelle nous permettra de mieux comprendre la dynamique de l'Univers, y compris à ses tout débuts. La mesure précise des caractéristiques des ondes gravitationnelles validera en outre plus complètement la théorie de la relativité générale.

Les ondes gravitationnelles ont été détectée pour la première fois par le LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory – « Observatoire d’ondes gravitationnelles par interférométrie laser »), un gigantesque instrument de recherche qui utilise des interféromètres laser pour parvenir à ses fins. Il est plus précisément composé de deux interféromètres situés à 3 000 kilomètres l’un de l’autre, le premier à Livingston sur la côte sud des États-Unis, le second à Hanford dans le nord-ouest du pays. Ils ont tous deux la forme d’un *L*, avec des bras de 4 000 mètres de long. Chaque bras est constitué d’un tube en acier d’un diamètre de 1,2 mètres. Pour l’optique, il utilise des lasers de haute puissance, des miroirs à faible absorption extrêmement précis, des cavités résonnantes Fabry-Pérot et un miroir de recyclage de puissance. Sur le plan mécanique, il utilise des techniques d’isolation passive et active et des technologies de vide.

Le LIGO détecta son premier passage d’ondes gravitationnelles le 14 septembre 2015, puis un deuxième le 26 décembre suivant. Dans les deux cas, les ondes provenaient de la fusion de deux trous noirs. Un peu plus tard, le 17 août 2017, il enregistra le passage de nouvelles ondes gravitationnelles, issues de la fusion de deux étoiles à neutrons cette fois.

En Chine, trois grands projets de détection d’ondes gravitationnelles sont aujourd’hui en cours de développement. Le premier, Taiji, est mené par l’Académie chinoise des sciences, et plus particulièrement par les académiciens Hu Wenrui et Wu Yueliang. D’inspiration similaire au projet européen eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna), il prévoit de déployer en orbite autour du Soleil trois satellites formant un interféromètre aux bras de plusieurs millions de kilomètres de long. Un premier satellite, Taiji-1, a été lancé en août 2019 et mène des essais préliminaires. Le deuxième projet, Tianqin, initié par l’Université Sun Yat-sen de Canton et dirigé Luo Jun, dans le même esprit que le précédent, sera composé de trois satellites, formant un triangle équilatéral de 170 000 kilomètres de côté, en orbite à environ 100 000 kilomètres au-dessus de la Terre. Un premier

satellite, Tianqin-1 a été lancé le 20 décembre 2019 et a achevé une première série de tests prometteurs. Le troisième projet, Ali, mené par l'Institut de physique des hautes énergies de l'Académie chinoise des sciences, consiste à placer un radiotélescope de taille relativement modeste mais à grand champ de vision dans la région d'Ali au Tibet.

7

Fusées et lanceurs

L'espace est un secteur en pleine expansion, riche de promesses pour l'avenir de l'humanité. Mais les hommes rêvent de voler depuis toujours. Ils ont d'abord conquis l'atmosphère et visent désormais les profondeurs de l'espace. Les fusées, qui pointent vers le ciel et percent les nuages, constituent la première étape incontournable de cette grande épopée.

Voler est simple en théorie mais difficile en pratique. Même si les ballons, les avions et les fusées sont apparus au XIX^e siècle seulement, les principes du vol ont été maîtrisés et mis en œuvre depuis bien plus longtemps, comme témoignent les cerfs-volants, les lanternes célestes et autres dragons cracheurs de feu. Si le vol spatial repose aujourd'hui sur des bases aussi solides, nous le devons aux efforts inlassables, si ce n'est aux sacrifices, de bien des générations de nos ancêtres !

7.1. WAN HU

Wan Hu, aussi appelé Tao Chengdao, qui vivait en Chine sous la dynastie Ming, passe pour être le premier homme à avoir jamais

volé dans une fusée. Ce courageux prédécesseur d'Elon Musk, le grand visionnaire du secteur spatial d'aujourd'hui, conçut à la fin du xv^e siècle l'idée de s'élever dans le ciel grâce à des fusées à poudre noire et d'atterrir en douceur à l'aide de cerfs-volants. Il s'installa donc dans un fauteuil équipé de 47 fusées de sa fabrication, prit les commandes de deux énormes cerfs-volants et ordonna à ses assistants munis de torches d'allumer les mèches (figure 7.1). Sans aucune expérience préalable sur laquelle s'appuyer, sans aucune mesure de sécurité envisagée, la réussite et la survie tenaient au miracle. Hélas, le miracle ne se produisit pas, et le fauteuil s'écrasa au terme d'une brève trajectoire erratique. L'homme qui voulait voler dans le ciel a payé de sa vie le prix de son rêve !

Paradoxalement, les traces historiques du vol Wan Hu sont aussi rares en Chine que foisonnantes à l'étranger. Ainsi, James McDonnell, le célèbre ingénieur en aéronautique américain, fait de Wan Hu le « premier spécialiste des fusées et le premier à s'y être embarqué pour un vol habité ». Dans leur *Introduction à la technologie des fusées*, publiée en 1958, les deux experts russes V.I. Feodosiev et Gr. B. Shinyalev, rappellent que les Chinois ont non seulement inventé les fusées mais qu'ils ont aussi été les premiers à imaginer les utiliser pour transporter des hommes dans les airs. Pour le spécialiste britannique W. Maxwell, l'exploit de Wan Hu marque le début de l'histoire des fusées. Willy Ley, un auteur scientifique et passionné d'aéronautique américain d'origine allemande, a également rappelé dans un livre publié en 1958 la mort courageuse de Wan Hu, vers l'an 1500, alors qu'il testait un engin volant de sa conception et fabrication. L'importante contribution inaugurale de Wan Hu au vol spatial est donc bien reconnue à l'étranger. Pour en commémorer le souvenir, l'Union astronomique internationale a d'ailleurs nommé un cratère Wan Hu de la Lune dans les années 1970.

Il est indéniable que la tentative de Wan Hu, en dépit de son échec, reposait sur le principe de propulsion qui anime encore les fusées actuelles. En langage moderne, on dirait que son fauteuil était équipé de moteurs à propergol solide.



Figure 7.1 | Wan Hu préparé au décollage.

Dans le monde scientifique et technique, toutefois les idées et les premiers prototypes ne suffisent pas. Sans recherches de plus en plus systématiques, sans tests de plus en plus poussés, le travail et le sacrifice de Wan Hu seraient restés sans lendemain. Au cours des siècles qui ont suivi, l'idée qui avait germé dans son esprit a connu une lente phase de maturation avant d'éclore, permettant ainsi à l'homme de surmonter l'attraction gravitationnelle terrestre et de s'aventurer dans l'espace.

7.2. LES DÉBUTS DE LA FUSÉE

L'histoire de la fusée moderne remonte à la Seconde Guerre mondiale, avec le développement par l'Allemagne du tristement célèbre V2 (figure 7.2), utilisé comme missile en 1944. D'une portée de 190 km, il atteignait 85 km d'altitude. En dépit de certains défauts, et même si elle n'a pas réussi à assurer la victoire de l'Allemagne, cette fusée, par la concrétisation de travaux restés jusque-là purement théoriques, a marqué une étape importante de l'histoire de l'aéronautique

À la fin de la guerre, l'Union soviétique comme les États-Unis se sont emparés des plans du V2, ont saisi des exemplaires déjà construits et se sont alliés des experts allemands qui avaient œuvré à leur développement, notamment Wernher von Braun du côté américain. Les programmes spatiaux de ces deux puissances furent fondés sur ces bases. Avec le début de la guerre froide, le développement des missiles intercontinentaux a bénéficié de larges ressources humaines et matérielles, ce qui a également beaucoup contribué au progrès technologique des fusées spatiales.

Ainsi, le 4 octobre 1957, l'Union soviétique lançait le premier satellite artificiel de l'histoire, Spoutnik 1, grâce un missile intercontinental modifié pour l'occasion. D'un poids de 83,6 kg, le satellite a tourné autour de la Terre à une altitude variant de 228,5 km pour son point le plus bas à 964,1 km pour le point le plus haut.

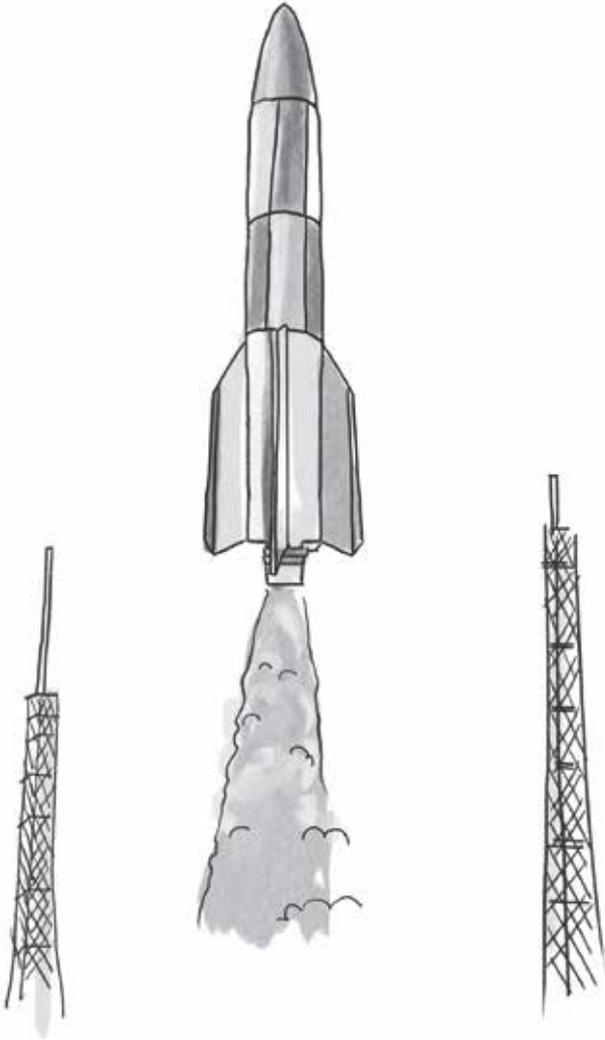


Figure 7.2 | Le V2 allemand.

Dans les années qui ont suivi, la compétition spatiale entre les États-Unis et l'Union soviétique n'a fait que s'intensifier. Des crédits colossaux furent débloqués, ce qui amena de nouveau une série de progrès technologiques considérables. Au début des années 80, les États-Unis et l'Union soviétique avaient chacun développé six à sept familles de lanceurs, dont les très célèbres Saturn V et Energia.

En matière d'histoire du vol spatial, il est impossible de ne pas mentionner celui qui est considéré comme le père de la cosmologie moderne, à savoir le scientifique soviétique Konstantin Tsiolkovski (figure 7.3). En une phrase célèbre, « La Terre est le berceau de l'humanité, mais on ne passe pas sa vie entière dans un berceau. », il a nourri chez l'homme quantité de rêves pour l'espace. Tsiolkovski fut le premier à théoriser scientifiquement la possibilité d'explorer l'espace à l'aide de fusées, de lancer des satellites artificiels et de placer des stations spatiales en orbite terrestre. On lui doit en outre une série de conceptions techniques importantes sur la structure des fusées et de leurs moteurs.

Tsiolkovski s'est intéressé aux fusées et au voyage spatial dès son plus jeune âge, à la suite de la lecture d'un roman de science-fiction, ainsi qu'il s'en est souvenu plus tard. D'abord vagues et frivoles, ses réflexions ont pris un tour de plus en plus sérieux. Essentiellement autodidacte, il apprit seul la troisième loi de Newton, aussi appelé le principe de l'action et de la réaction, ce qui lui fit comprendre en un éclair le principe de fonctionnement des fusées. Ainsi qu'il l'a écrit de façon imagée dans son journal :

« Si l'on pratique un petit trou dans le fond d'un tonneau rempli de gaz à haute pression, le gaz expulsé par cette ouverture produira une force de réaction qui déplacera le tonneau dans la direction opposée. »



Figure 7.3 | Constantin Tsiolkovsky.

CONSTANTIN TSIOLKOVSKY

Tsiolkovsky fut un enfant vif et agile, qui aimait lire, réfléchir et surtout imaginer en toute liberté. Selon son propre témoignage : « J'étais même prêt à payer mon frère pour qu'il écoute mes fantasmes. Je m'imaginai doté d'une grande force physique, capable de grimper très haut à la corde et de voir très loin. » Il ne fréquenta l'école de son village que très peu de temps. À l'âge de 10 ans, en raison du froid, il contracta une grave pneumonie qui a entraîné une scarlatine et finalement une perte quasi totale de l'ouïe. Depuis lors, il vécut presque coupé du monde extérieur. Ainsi qu'il l'a noté : « Ma surdité m'a cependant amené à lire et à réveiller éveillé sans fin. Je me sentais isolé, même humilié, tel un paria de la société. Cela m'a fait me retirer au plus profond de moi-même, afin de poursuivre de grands objectifs pour mériter l'approbation et le respect des autres et ne pas être méprisé par mes pairs. »

Un cratère lunaire porte aujourd'hui son nom, de même, ainsi qu'un astéroïde (n° 1590).

7.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une fusée fonctionne selon un principe très simple : elle est poussée par des gaz éjectés à haute vitesse par le moteur. Les performances d'une fusée s'évaluent au regard de trois critères principaux : la force de poussée, l'impulsion spécifique et l'impulsion totale. Ces termes sont plus faciles à comprendre qu'ils en ont l'air. La force de poussée, ou plus simplement la poussée, désigne la force axiale résultant de toutes les pressions exercées par les molécules de gaz dans la chambre du moteur. C'est une mesure de la force exercée par le moteur. L'impulsion spécifique est la quantité de mouvement produite par rapport à la quantité de carburant consommée par le moteur. C'est une mesure de l'efficacité du moteur. Plus l'impulsion spécifique est élevée, plus la quantité de mouvement produite pour une quantité de carburant donnée est importante. À caractéristiques globalement égales, sa valeur dépend principalement du carburant

utilisé. Enfin, l'impulsion totale est définie comme le produit de la poussée moyenne du moteur pendant sa durée de fonctionnement. Elle mesure la capacité globale de la fusée.

Selon leur type d'énergie utilisé, on peut distinguer les fusées à propulsion chimique, électrique, nucléaire, solaire et autres. Les fusées chimiques sont aujourd'hui, et de loin, les plus répandues, raison pour laquelle on les qualifie aussi de fusées traditionnelles. Nous décrirons bientôt quelques membres éminents de cette grande famille, chacun ayant ses propres avantages selon son type de mission.

Les gaz éjectés par le moteur d'une fusée à propulsion chimique sont produits par la combustion d'un carburant et d'un comburant – les *ergols*, qui, mélangés, forment le *propergol*. Ce type de fusées se décline en trois types, déterminés par la forme des ergols qu'elles utilisent : les fusées à propergol solide, les fusées à ergols liquides et les fusées hybrides.

Le propergol des fusées à propergol solide est simplement stocké près du moteur et enflammé à l'aide d'un allumeur pour produire la poussée. Il peut être chargé avant la sortie du site de production, ce qui permet ensuite une utilisation immédiate de la fusée, sans avoir à attendre le remplissage des réservoirs. Les moteurs sont également plus simples à concevoir et plus légers que les moteurs des fusées à ergols liquides. Outre ces avantages de structure, les moteurs de fusée à propergol solide ont aussi pour eux une grande maturité de développement et une fiabilité élevée. Ils pèchent en revanche par une impulsion spécifique relativement faible et un manque de contrôle précis de leur poussée durant le vol.

Les avantages des moteurs de fusée à ergols liquides tiennent d'une part au grand pouvoir calorifique et à la facilité de production du carburant, souvent directement issu du pétrole ou autres matières premières, et d'autre part à leur forte poussée et leur grande durabilité. C'est pourquoi la plupart des lanceurs lourds dans le monde utilisent ce type de moteurs, à l'instar de la famille des Longue Marche en Chine, même s'ils peuvent être aussi équipés en complément de

moteurs auxiliaires à propergol solide. Au chapitre des inconvénients des ergols liquides, mentionnons un remplissage et un stockage du carburant plus délicat, une technologie requise plus élevée et un risque d'accidents plus important. En raison de la volatilité et de la toxicité des ergols liquides, des fuites ont en effet provoqué la mort d'un certain nombre de techniciens. Les dimensions des moteurs et des fusées sont en outre plus importantes, ce qui complique le transport des sites de production aux sites de lancement.

Les scientifiques ont combiné les avantages et les inconvénients des fusées à propergol solide et à ergols liquides pour concevoir des fusées hybrides. Leurs moteurs sont eux-mêmes divisés en deux types : les moteurs liquide-solide, quand le carburant est liquide et le comburant solide, et les moteurs solide-liquide, dans la situation inverse. En termes de performances, l'impulsion spécifique se situe entre celle du propergol solide et des ergols liquides. En termes de système et de structure, les moteurs de fusées hybrides ont l'avantage de la simplicité de la compacité, mais l'inconvénient d'un moindre rendement de combustion, d'un mélange carburant/comburant difficile à contrôler et d'une perte d'énergie importante lors de la régulation de la poussée.

Les fusées, aujourd'hui souvent composées de plusieurs étages, nous ouvrent les portes de l'espace. Elles ont déjà lancé des satellites artificiels, des vaisseaux spatiaux habités, des stations spatiales, des sondes spatiales, etc. Alors quels sont les modèles les plus typiques ou les plus célèbres, en Chine comme dans le reste du monde ?

7.4. LES GRANDES FAMILLES DE LANCEURS DANS LE MONDE

7.4.1. La famille Longue Marche chinoise

Bien que la Chine passe avec Wan Hu pour le premier pays à avoir fait voler un homme dans le ciel et qu'elle ait inventé la poudre à canon, elle ne s'est lancée dans l'exploration spatiale au sens moderne du terme que bien après les États-Unis et l'Union soviétique. De plus, en raison du contexte historique et international de l'époque, la Chine

n'a pu compter que sur ses propres forces scientifiques et technologiques pour assurer le développement de ses fusées.

La famille des lanceurs chinois a été baptisée Chang Zheng, soit Longue Marche, un nom choisi par leurs premiers concepteurs dans les années 1960 pour rendre hommage à la Longue Marche de Mao Zedong. Ils ont pensé que l'esprit de bravoure des soldats de l'Armée rouge, qui pendant ce périple d'une année n'ont cessé courageusement de progresser en dépit des pires difficultés, pourrait être le symbole de la conquête spatiale chinoise. En baptisant leurs lanceurs Longue Marche, ils espéraient bien eux aussi triompher de toutes les difficultés pour atteindre leur objectif.

La famille des Longue Marche en est aujourd'hui à sa quatrième génération. Le pays dispose d'une panoplie complète de lanceurs robustes et fiables comprenant entre autres :

- la série Longue Marche 2, adaptée au lancement de divers véhicules spatiaux en orbite basse, comme ceux du programme de vol habité Shenzhou ;
- la série Longue Marche 3, adaptée au lancement de satellites en orbite géostationnaire ;
- la série Longue Marche 4, adaptée au lancement de satellites en orbite polaire et en particulier héliosynchrone (l'angle entre le plan orbital et la direction du Soleil reste constant) ;
- la série Longue Marche 5 qui, avec son vol inaugural réussi en novembre 2016, est utilisée pour des missions demandant beaucoup de puissance comme la phase 3 de l'exploration lunaire, le lancement de sondes martiennes, le lancement de modules de la station spatiale chinoise et le lancement de satellites du système de navigation Beidou.

La première génération des lanceurs chinois est constituée de la série Longue Marche 1 et pour partie de la série Longue Marche 2. Cette génération fondatrice porte encore beaucoup l'empreinte des missiles intercontinentaux à partir desquels elle a été développée. La Chine doit au modèle Longue Marche 1 le lancement de son premier

satellite artificiel, Dong Fang Hong 1, le 24 avril 1970. En dépit de leur charge utile limitée, de leur difficulté de maintenance et d'utilisation, les faiblesses de cette première génération de lanceurs paraissent bien insignifiantes au regard des remarquables services qu'elle a rendus. Son développement a nécessité la mobilisation dans tout le pays de milliers de scientifiques et de techniciens, qui ont mené toute une série d'études et d'essais dans le désert de Gobi, dans des conditions souvent difficiles et sans aucune expérience préalable. Nombre d'entre eux avaient rédigé leur testament avant de s'embarquer dans l'aventure, prêts à sacrifier leur vie à tout moment pour la cause spatiale de leur pays. Tous ont une histoire émouvante qui mériterait d'être contée.

La deuxième génération, formée des modèles Longue Marche 2C, 2D et 2E et d'une partie de la série Longue Marche 3, a connu toute une série d'améliorations par rapport à celle qui l'a précédée, même si elle porte encore quelques traces de ses ancêtres missiles intercontinentaux. Le modèle Longue Marche 2C a inspiré les modèles suivants de cette génération. Tous ont adopté une configuration similaire à deux étages, une propulsion utilisant les ergols facilement stockables mais toxiques que sont le peroxyde d'azote et le diméthylhydrazine asymétrique (UDMH) ainsi qu'un système de contrôle numérique.

Si le modèle 2C a été très utilisé par les militaires, le modèle 2E a été surtout conçu dans un but civil, pour lancer des satellites commerciaux et ouvrir la voie des vols habités. Développé en 18 mois, peu après l'explosion de la navette spatiale américaine Challenger en 1986 qui a cloué les États-Unis au sol durant une longue période d'enquête et de vérifications, il a pu prendre le relais et lancer des satellites initialement programmés sur des vols américains. Après avoir été testé avec succès en 1990, le modèle Longue Marche 2E a lancé plusieurs satellites étrangers entre 1992 et 1995.

La troisième génération de lanceurs comprend le modèle Longue Marche 2F, le modèle Longue Marche 3A et la série Longue Marche 4.

Cette génération, fondée sur la précédente, a été rendue plus fiable et adaptable à une plus grande variété de missions. La sécurité, en particulier, a été revue pour répondre aux exigences du vol habité. L'utilisation de ces lanceurs, leur maintenance ainsi que la phase préparatoire sur le site de lancement ont été simplifiées. Les sept premières missions du vaisseau spatial habité Shenzhou ont été assurées par le modèle Longue Marche 2F, qui a ainsi marqué à jamais l'histoire spatiale de la Chine. Une version légèrement améliorée du modèle 2F a ensuite pris le relais pour les missions 8 à 11 de Shenzhou, puis des missions 1 et 2 de la station spatiale Tiangong. Et la belle histoire de cette troisième génération de lanceurs ne s'arrête pas là ! Elle s'est poursuivie avec le modèle Longue Marche 3A, lancé avec succès pour la première fois le 8 février 1994, qui, le 22 avril 2019, est devenu le premier lanceur chinois à cumuler plus de 100 lancements réussis.

La quatrième et dernière génération de lanceurs comprend les séries Longue Marche 5, Longue Marche 6, Longue Marche 7, Longue Marche 8 et Longue Marche 11. Elle a pour particularité d'utiliser des ergols non toxiques et non polluants, ce qui réduit les dommages causés à l'environnement. Outre leur système de communication unifié et l'ajout d'équipements électroniques avancés, leur charge utile maximale a considérablement augmenté.

Souvent surnommée « la grosse 5 », la Longue Marche 5 est aujourd'hui la plus puissante des fusées chinoises. La version de base à deux étages et demi a effectué son premier vol réussi le 3 novembre 2016. Sa deuxième mission a été un échec mais, fidèle à son nom de famille, aucun obstacle ne l'arrêta dans son long périple. De fait, lors de sa troisième mission, le 27 décembre 2019, elle plaça le satellite Shijian 20 sur son orbite prévue. Le 23 juillet 2020 et le 24 novembre 2020, elle a également lancé avec succès la sonde martienne Tianwen 1, comprenant le rover explore actuellement la surface de Mars, et la sonde lunaire Chang'e-5, qui a récolté et rapporté sur Terre des échantillons de sol lunaire. Quant

au modèle à un étage et demi, Longue Marche 5B, il a effectué son vol inaugural le 5 mai 2020, au terme duquel il a placé en orbite un prototype du *Vaisseau spatial habité chinois de nouvelle génération*. En 2021 et 2022, il a emporté dans l'espace trois modules de la station spatiale chinoise. La série des Longue Marche 5 est encore appelée à jouer un rôle important dans le lancement des satellites du système de navigation Beidou et de l'exploration de l'espace profond.

7.4.2. Les lanceurs ailleurs dans le monde

Outre la famille des Longue Marche chinois, il existe de nombreux lanceurs, plus ou moins anciens, plus ou moins célèbres dans d'autres pays du monde.

7.4.2.1. Saturn V, le plus célèbre

Le lanceur Saturn V, développé par les États-Unis dans le cadre du programme Apollo, a acquis une célébrité indépassable après avoir envoyé les premiers hommes sur la Lune – douze en tout au fil des missions. Cette fusée mesurait 110 mètres de haut, 10 mètres de diamètre et pesait 3 000 tonnes au décollage. Elle pouvait placer jusqu'à 120 tonnes en orbite basse et jusqu'à 47 tonnes, dont les vaisseaux spatiaux habités Apollo, en orbite lunaire. Elle a réussi la totalité des 17 missions qui lui ont été assignées, consistant pour la plupart à envoyer un vaisseau spatial vers la Lune. En raison de ses coûts élevés de production, et de sa technologie dépassée des années 1960, les États-Unis l'ont définitivement abandonnée. Une rumeur, persistante malgré les dénégations de la NASA, prétend que les plans de Saturn V ont été perdus ou détruits. Il faut peut-être y voir un signe de nostalgie pour cette fusée de légende et le vœu secret d'un retour triomphant sur le devant de la scène !

7.4.2.2. Energia, un monstre de puissance

Le lanceur Energia, développé par l'Union soviétique est l'un des plus puissants jamais construits. Il était capable de placer une

charge utile de 105 tonnes en orbite basse, que ce soit des gros satellites ou de lourds vaisseaux habités. Après un premier vol réussi en 1987, Energia a expédié la navette spatiale soviétique Bourane dans l'espace en 1988. Avec l'effondrement de l'Union soviétique et la crise économique qui s'ensuivit en Russie, la production du lanceur a été stoppée et il n'a plus jamais volé depuis. Assez tristement, le seul exemplaire restant a longtemps pris la poussière dans un entrepôt, dont le toit a fini par s'effondrer, faisant ainsi disparaître à tout jamais, sans doute, l'une des reines des fusées.

7.4.2.3. La famille Titan

Développée à partir du missile balistique intercontinental Titan II, la famille de lanceurs américains Titan se compose de différentes séries et modèles tels que Titan II GLV, Titan III, Titan III Version commerciale ou Titan IV. Le lanceur Titan IV est capable de placer une charge utile de 21,6 tonnes en orbite basse et de 5,7 tonnes en orbite géostationnaire. Bien que cette famille ait surtout connu un usage militaire, elle a toutefois assuré un certain nombre de missions civiles, comme le lancement des sondes Voyager, Mars Observer ou Cassini-Huygens. Les lanceurs Titan ont volé 368 fois depuis leur vol inaugural en 1959. Elles ont pris une retraite bien méritée après un dernier lancement, depuis la base de Vandenberg en Californie, le 19 octobre 2005.

7.4.2.4. La famille Atlas

Le premier vol d'un lanceur de la famille américaine Atlas a eu lieu le 18 décembre 1958. C'est à elle que l'on doit le lancement du premier satellite de communication au monde, le premier vol habité en orbite des États-Unis et bien d'autres missions remarquables. Très largement utilisée, elle a connu une série d'évolutions techniques qui ont abouti à l'Atlas V, lancé avec succès pour la première fois le 21 août 2002. De structure, très modulaire, à deux ou deux étages et demi, avec des boosters d'appoint ou non, l'Atlas V est capable de placer une charge utile de 13 tonnes en orbite géostationnaire.

7.4.2.5. La famille Delta

Initialement développée à partir du missile balistique Thor, la famille de lanceurs américains Delta a débuté sa longue et riche carrière spatiale, toujours en cours, dans les années 1960. Très adaptée aux lancements de satellites de taille moyenne, elle a assuré, de sa mise en service à 2019, plus de 300 missions, avec un taux de réussite supérieur à 95 %. La série Delta III a connu deux échecs sur trois lancements entre 1998 et 2000, ce qui a rapidement conduit à son remplacement par la série Delta IV, beaucoup plus performante. La série Delta II, plus ancienne, apparue en 1989, par son adaptabilité, sa fiabilité et son coût raisonnable a pris une place très importante sur le marché international et dans le système spatial américain jusqu'en 2018. C'est avec la Delta II, par exemple, que l'armée de l'air américaine a déployé ses satellites GPS. Quant à la série Delta IV, elle se décline en trois versions : Medium, Medium + et Heavy. Toutes ont deux étages formés d'un moteur et d'un réservoir, le second étant surmonté de la charge utile et de divers équipements électroniques. Dans sa version Heavy, le lanceur Delta IV est capable de placer une charge utile de 13 tonnes en orbite géostationnaire.

7.4.2.6. La famille Vostok

La famille de lanceurs soviétiques Vostok est tout simplement la première au monde, celle qui a notamment envoyé le premier homme dans l'espace, Youri Gagarine, le 12 avril 1961. Nommée d'après la capsule ou le vaisseau Vostok inaugurant ce vol habité, elle a bien d'autres premières mondiales à son actif : lancement du premier satellite artificiel, de la première sonde lunaire, de la première sonde vénusienne, de la première sonde martienne, du premier vaisseau spatial habité, donc, du premier vaisseau cargo, le Progress, pour ne citer qu'eux. Les célèbres lanceurs Soyouz, les plus anciens des lanceurs polyvalents et les plus utilisés de l'histoire, forment une sous-famille des Vostok.

7.4.2.7. La famille Proton

La famille de lanceurs soviétiques Proton est la première à ne pas descendre directement d'un missile. Elle se décline en versions à deux, trois ou quatre étages. La première version à trois étages, baptisée Proton K, capable de placer jusqu'à 22 tonnes en orbite basse, a été inaugurée le 16 novembre 1968. On doit à cette famille les premiers lancements de stations spatiales en orbite au monde, de Saliout 1 à Saliout 7, ainsi que les modules de la station Mir ou le premier module de la Station spatiale internationale, le 20 novembre 1998. Elle a expédié quantité d'autres charges importantes en orbite basse, comme les satellites de communication Gonets et Ekran. Depuis le milieu des années 60, la famille Proton a en fait servi de lanceur principal aux grands véhicules spatiaux en Union soviétique et en Russie. Durant la course aux armements américano-soviétique, par exemple, c'est elle qui a lancé la plupart des sondes lunaires.

La famille Proton se propulse au peroxyde d'azote et au diméthylhydrazine asymétrique (UDMH), des ergols très toxiques pouvant causer de graves pollutions dans les zones concernées en cas d'accident. Entre 2010 et 2015, les lanceurs Proton ont malheureusement essuyé une série d'échecs qui a ébranlé leur position sur le marché international du vol spatial. La Russie a bien tenté de réagir avec le lanceur Proton M, une version améliorée, mais une part de marché considérable avait déjà été perdue. En conséquence, le pays a misé sur la famille Angara qui, se propulsant grâce au couple kérosène / d'oxygène liquide, est plus respectueuse de l'environnement.

En 2019, Khrunichev, le constructeur des lanceurs Proton, a annoncé qu'il en fabriquerait encore 11 exemplaires avant de cesser sa production et de passer définitivement à la famille Angara. La famille Proton va ainsi disparaître progressivement. Elle restera toutefois dans l'histoire comme un lanceur lourd particulièrement réussi qui, en plus de 400 lancements, a grandement contribué à l'exploration spatiale.

7.4.2.8. La famille Zenit

La famille de lanceurs soviétiques Zenit, en dépit de qualités évidentes, a pâti de la dissolution de l'Union soviétique en 1991, du fait que ses sites de production se situent pour la plupart en Ukraine. Elle se compose du lanceur Zenit 2 à deux étages et du Zenit 3 à trois étages. Le premier est capable d'envoyer une charge utile d'environ 13,7 tonnes en orbite basse. Quant au second, dans sa version Zenit 3SL, destiné aux lancements en mer et développé conjointement par les États-Unis, la Norvège, la Russie et l'Ukraine, elle peut envoyer une charge utile de six tonnes en orbite géostationnaire. Son vol inaugural a eu lieu le 28 mars 1999. Le Zenit 3SL se propulse à l'oxygène liquide et au kérosène, un couple d'ergols non toxiques et relativement peu polluants. C'est le deuxième lanceur, après le Tsiklon soviétique, à pouvoir être levé sur sa plate-forme de lancement et lancé de façon entièrement automatisée, ce qui réduit de beaucoup les risques de blessures et pertes humaines en cas d'accident.

7.4.2.9. La famille Ariane

Le programme Ariane, initié en juillet 1973 par la France et onze autres pays d'Europe, visait à se libérer de la dépendance des États-Unis en matière spatiale et même à les concurrencer sur le marché du lancement de satellites. De sa création à 2023, cette famille de lanceurs a connu cinq versions, numérotées de Ariane 1 à Ariane 5. Une sixième version, Ariane 6, est en cours de développement et devrait connaître son vol inaugural fin 2023.

Lancée pour la première fois le 15 juin 1988, Ariane 4 pouvait placer une charge utile de 7 tonnes en orbite basse et de 4,9 tonnes en orbite géostationnaire. Elle a été retirée du service le 15 février 2003 après 116 lancements, dont 3 seulement ont échoué, soit un excellent taux de réussite. Quant à Ariane 5, lancée pour la première fois le 4 juin 1996, capable de placer une charge utile de 21 tonnes en orbite basse et de 10,5 tonnes en orbite géostationnaire, elle a effectué son dernier vol le 5 juillet 2023.

Assurant à elle seule environ 50 % des lancements de satellites commerciaux, la famille Ariane occupe une place de choix importante sur le marché spatial.

7.4.2.10. Le Space Launch System

Le Space Launch System (SLS – « Système de lancement spatial ») est un nouveau lanceur lourd développé par la NASA qui reprend des composants utilisés par la navette spatiale. Il visait initialement à remplacer cette navette, retirée du service, et à assurer les missions de retour à la Lune du projet Constellation¹. Dans une première phase, le SLS pourra placer de 70 à 110 tonnes en orbite basse, puis plus de 130 tonnes, voire 165 tonnes, ensuite. En raison du covid-19, le vol inaugural du SLS, initialement prévu pour 2020, a été retardé. Il a finalement eu lieu le 16 novembre 2022. Le premier vol habité, prévu pour 2024, devrait ouvrir un nouveau chapitre de l'histoire spatiale.

7.4.2.11. La famille H

La famille japonaise des lanceurs H se compose en autres des versions H-I, H-II, H-IIA, H-IIB. Elles ont été et sont encore développées en portant une attention particulière au coût et à la fiabilité. Si la version H-I pouvait expédier une charge utile de 1,1 tonnes en orbite géostationnaire, son utilisation était restreinte aux seuls lancements de satellites nationaux, du fait qu'elle incorporait des éléments américains. Mise en service en 1986, elle a achevé sa carrière en 1992. La version H-II est le premier lanceur à ergols liquides composé de deux étages à avoir été développé en toute indépendance par le Japon. Elle a principalement servi à placer des satellites de 1 à 2 tonnes en orbite géostationnaire. En raison de ses coûts trop élevés, de son manque de fiabilité et de sa complexité opérationnelle, elle n'a volé que de 1994 à 1999. Lui ont succédé les versions H-IIA et H-IIB, qui

1. Le programme d'exploration spatiale Constellation, abandonné en 2010 par la NASA en raison des contraintes budgétaires du gouvernement américain, comprenait une série de nouveaux lanceurs et vaisseaux spatiaux adaptés à une variété de missions, visant notamment la Station spatiale internationale et la Lune.

ont respectivement volé pour la première fois en août 2001 et en septembre 2009.

Comme sa désignation le laisse deviner, la version H-IIA a été développée à partir de la version H-II. Grâce à sa conception modulaire, elle se décline en plusieurs modèles, qui tous comportent deux étages se propulsant à l'oxygène et à l'hydrogène liquides. Elle peut transporter jusqu'à 10 tonnes en orbite basse et 6 tonnes en orbite géostationnaire. Toujours en service en 2023, elle lance des charges utiles civiles et militaires pour le gouvernement japonais, notamment des satellites de communication, des satellites de reconnaissance, des sondes lunaires et interplanétaires, et assure aussi un certain nombre de missions commerciales. La version H-IIB en est une mouture améliorée, avec une capacité maximale de lancement en orbite géostationnaire d'environ 8 tonnes. Elle devrait être bientôt remplacée par la version H-III, encore en cours de développement.

7.4.2.12. Le Polar Satellite Launch Vehicle

Le Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV – « Véhicule de lancement de satellite polaire ») est un lanceur développé par l'Inde. Capable de placer une charge utile de trois tonnes en orbite basse et d'une tonne en orbite héliosynchrone, il a effectué son vol inaugural le 20 septembre 1993, même si, en raison d'un dysfonctionnement, le satellite qu'il portait n'a pu être mis en orbite. Il a ensuite enchaîné de nombreux lancements réussis, allant jusqu'à établir en 2017 un record mondial 104 satellites placés d'un coup en orbite. Ce lanceur, composé de quatre étages, mesurant 45 mètres et pesant jusqu'à 320 tonnes au décollage, est le plus fiable de l'Inde.

7.4.2.13. La famille Falcon de SpaceX

Depuis la dislocation de l'Union soviétique et la baisse de tension politique qui s'en est suivie, le gouvernement américain a beaucoup réduit ses investissements en matière spatiale, ralentissant d'autant le développement technologique du secteur. Pour s'adapter, l'industrie spatiale a dû optimiser ses dépenses et trouver des modèles de

rentabilité pour attirer les capitaux privés. La famille de lanceurs Falcon, développée par la société SpaceX, est un exemple particulièrement réussi de cette intégration. Les lanceurs de SpaceX comptent parmi les meilleurs du monde, et notamment les célèbres Falcon 9 et Falcon Heavy.

Le Falcon 9 est un lanceur adapté aux charges moyennes. Il a marqué l'histoire par la faculté de son premier étage à revenir sur Terre pour être réutilisé, ce qui a été réalisé pour la première fois le 22 décembre 2015. Si le lanceur entier pouvait être ainsi récupéré, le coût d'un lancement devrait chuter de 99 %. Avant le Falcon, ce prix pouvait atteindre les 500 millions de dollars aux États-Unis, soit une somme qui décourageait le gouvernement d'investir dans la NASA. L'arrivée du Falcon 9 réduit les coûts non seulement par ses solutions techniques mais aussi par la concurrence qu'elle impose, forçant par exemple les familles Atlas et Delta à revoir conceptions et méthodes. Le 24 janvier 2021, le Falcon 9 a réussi à lancer 143 satellites en une seule fois, battant ainsi le record mondial de 104 satellites établi auparavant par l'Inde.

Le lanceur Falcon Heavy, d'une hauteur de 70 mètres, très adapté aux charges lourdes, est capable de placer jusqu'à 63 tonnes en orbite basse. C'est le lanceur fonctionnel le plus puissant jamais construit depuis que l'homme a marché sur la Lune. Il est prévu pour transporter des passagers et du fret vers la Lune, Mars et même Pluton.

Le 6 février 2018 à 16 h 45 heure de la côte est des États-Unis, après deux reports temporaires, le Falcon Heavy a décollé depuis le centre spatial Kennedy en Floride, expédiant dans l'espace une Tesla Roadster rouge, un modèle de voiture produit par le PDG de SpaceX, Elon Musk (figure 7.4). Les deux propulseurs d'appoint sont revenus simultanément sur leur zone de récupération prévue, une scène d'anthologie qui a attiré l'attention du monde entier. Le premier étage central, en raison de l'extinction du moteur de décélération, n'a pu être récupéré et a sombré dans l'Atlantique. Mais il ne pouvait déjà plus être réutilisé et sa perte n'a eu aucun impact important sur la mission.

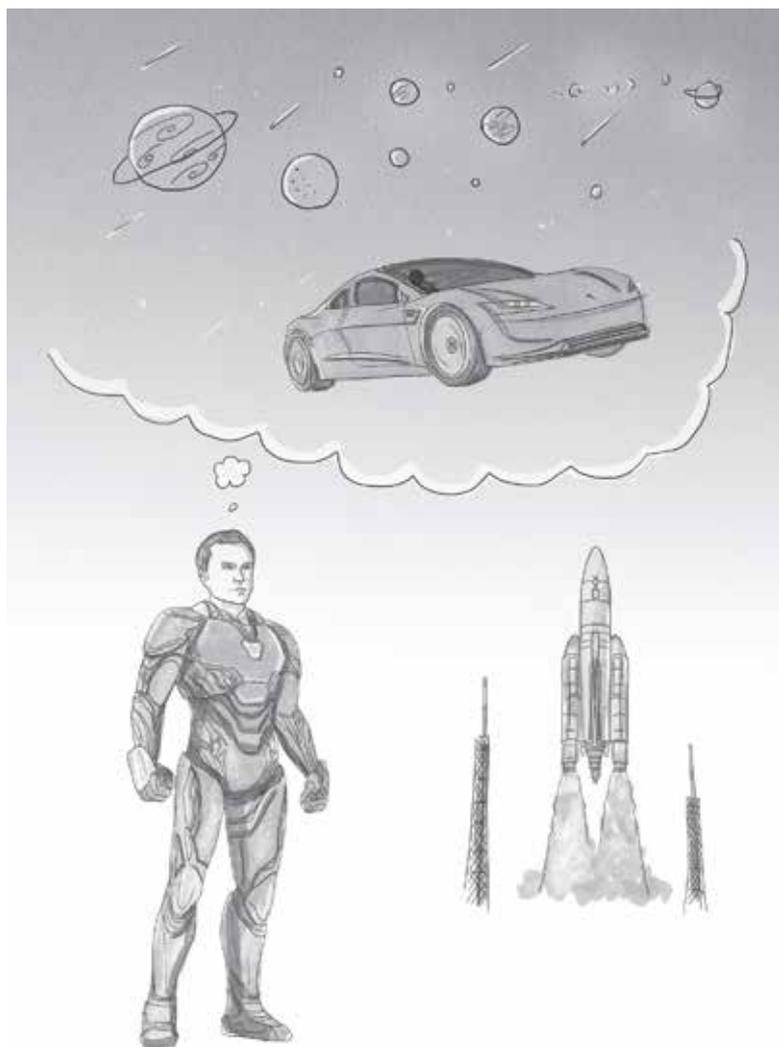


Figure 7.4 | Le Falcon Heavy lance une Tesla Roadster dans l'espace.

ELON MUSK

« Si vous n'avez pas encore de super-héros, regardez donc du côté d'Elon Musk », conseillait un jour le *Daily Telegraph*, un célèbre quotidien britannique. De fait, nombre de personnes vouent une admiration sans bornes à cet Iron Man qui ne vise rien de moins que de rendre l'espèce humaine multi-planétaire.

Alors que certains raillent ses projets de colonisation de Mars, de conception d'un train supersonique ou de percements de tunnels souterrains, alors que d'autres vont jusqu'à le qualifier d'escroc, beaucoup voient en lui l'un des rares entrepreneurs responsables.

Elon Musk a conçu les voitures électriques Tesla pour répondre à la pollution croissante et à l'épuisement des réserves de pétrole, qui conduit à des guerres pour le contrôle de l'énergie fossile.

Si l'électricité continuait toutefois de dépendre de ressources naturelles telles que le pétrole, le charbon ou même l'énergie nucléaire, outre des guerres incessantes qu'elles provoqueraient, ces ressources s'épuiseraient un jour, la planète se réchaufferait et la couche d'ozone s'amincirait toujours plus. Elon Musk investit donc aussi beaucoup dans les panneaux solaires.

Par sa cupidité sans limite, l'homme pourrait finir par détruire la planète et devrait survivre ailleurs dans l'espace. Elon Musk investit donc dans les lanceurs.

Pour qu'une civilisation humaine puisse prospérer, elle doit compter au moins un million de personnes. C'est dans la perspective d'envoyer ce million d'hommes sur Mars qu'Elon Musk cherche tant à réduire les coûts de ses lanceurs en le récupérant et en les réutilisant.

Cet homme qui ne craint pas l'échec et à l'esprit solide comme un roc ne prête guère attention aux critiques incessantes qui l'assaillent. Seul compte pour lui de savoir si le miracle aura lieu quand l'humanité n'aura plus aucun recours sur la Terre.

Une interview qu'il a donnée à la télévision il y a une bonne dizaine d'années et encore visible aujourd'hui sur internet a inspiré d'innombrables entrepreneurs. Elon Musk y révèle non sans émotion la grande tristesse que lui a procuré, dans les débuts de Space X, les critiques

...

émises par deux de ses propres héros, Neil Armstrong, et Eugene Cernan, respectivement les premier et dernier hommes à s'être rendus sur la Lune. Devant la caméra, Musk, au bord des larmes, ajoute cependant : « Je ne pourrais jamais abandonner, sauf à ma mort. »

Space X vise encore plus lourd avec le lanceur Super Heavy, destiné à propulser le vaisseau Starship, deux projets aujourd'hui en cours de développement. Nul doute qu'ils fassent bientôt beaucoup parler d'eux et qu'ils soient promis à un grand avenir !

7.5. AUTRES MOYENS D'EXPLORATION

Les fusées ne sont pas les seuls outils capables d'expédier des instruments de détection ou d'exploration en haute altitude et au-delà de l'atmosphère.

7.5.1. Les ballons stratosphériques

Les ballons stratosphériques sont des aéronefs non propulsés capables d'atteindre et d'évoluer dans la stratosphère, soit à une altitude souvent comprise en 40 et 50 km, bien au-dessus de celle des avions. Peu coûteux, faciles à tester et à mettre en œuvre, ils sont de plus en plus appréciés par les scientifiques. Leur champ d'action très large inclut l'astrophysique des hautes énergies, le rayonnement cosmique, l'astronomie infrarouge, la physique et la chimie de l'atmosphère, la télédétection terrestre, la physique de haute altitude, la biologie, l'expérimentation en micropesanteur, etc. Ils sont également d'une grande aide pour la conception et les tests préliminaires des équipements à vocation plus proprement spatiale.

La technologie des ballons stratosphériques a été principalement développée dans les années 1960 et 1970, pour offrir un moyen de transport et de support d'équipements scientifiques alternatif aux fusées sondes et aux satellites artificiels. Durant leur plus d'un demi-siècle d'utilisation, ils ont connu des phases d'amour et d'abandon. Le contexte économique, énergétique et environnemental actuel leur offrent de nouvelles opportunités.

7.5.2. Les fusées-sondes

Les fusées-sondes sont des fusées utilisées pour effectuer des mesures et des expériences dans l'environnement immédiat de la Terre. Elles permettent par exemple de déterminer la structure et la composition des couches de l'atmosphère, d'étudier l'ionosphère, le champ magnétique terrestre, le rayonnement cosmique, les rayonnements ultraviolets et X émis par le Soleil, les poussières météorologiques, etc. Les fusées-sondes évoluent à une altitude intermédiaire entre celle des ballons stratosphériques et celles des satellites artificiels en orbite basse, avec un rayon d'action d'efficacité maximum situé entre 30 à 200 km. Elles sont classées en différentes catégories selon leur utilisation : les fusées météorologiques, qui servent principalement aux analyses atmosphériques à des altitudes ne dépassant pas 100 km ; les fusées biologiques, souvent équipées pour détecter ou étudier la vie en haute altitude ; et les fusées géophysiques, dédiées à l'étude des paramètres terrestres, qui évoluent généralement à une altitude supérieure à 120 km.

7.5.3. Les navettes spatiales

Une navette spatiale est un véhicule spatial opérant en orbite basse, qui revient se poser à la surface de la Terre comme un planeur. Il est composé d'un réservoir de carburant externe non réutilisable, de deux propulseurs d'appoints réutilisables et d'un orbiteur réutilisable en forme d'avion. Si les Américains et les Soviétiques ont tous deux développé leur propre système de navette spatiale, seuls les premiers l'ont véritablement exploité. La navette soviétique Bourane n'a effectué qu'un seul vol d'essai de deux orbites terrestres, sans équipage, le 15 novembre 1988, après avoir été expédiée dans l'espace par un lanceur Energia. En raison de la dissolution de l'Union soviétique et des difficultés économiques qui s'ensuivirent en Russie, le projet fut annulé en 1993.

Tout comme les lanceurs classiques, une navette spatiale a la capacité de placer des satellites artificiels et autres engins spatiaux en

orbite. Elle peut aussi servir de vaisseau spatial habité, planer dans l'atmosphère et, pour être déplacée, portée par un avion de ligne de grande taille.

Dans les années 1960 et 1970, alors que des sommes considérables étaient engagées dans le programme Apollo, une politique de réduction des coûts a rapidement fait consensus aux États-Unis. Dans cette optique, la NASA proposa en avril 1969 de construire un lanceur spatial réutilisable qui porterait le prix d'un lancement à quelques millions de dollars seulement. L'idée fut officiellement adoptée en janvier 1972 et aboutit, après cinq ans de développement, à un prototype d'orbiteur, l'Enterprise. À partir de juin 1977, celui-ci, lancé par un Boeing 747, a effectué une série de tests en atmosphère. Quoiqu'il n'ait jamais volé dans l'espace, l'Enterprise s'est montré précieux pour la mise au point de son successeur, Columbia.

Le premier lancement de la navette Columbia, le 12 avril 1981, depuis le Centre spatial Kennedy, a marqué une étape historique du développement de la technologie spatiale. Elle s'est malheureusement désintégrée dans l'atmosphère au retour d'une mission, le 1^{er} février 2003, en raison d'une brèche dans l'isolant thermique qui couvrait la surface extérieure du fuselage. Les sept membres d'équipage ont tous péri.

Le deuxième exemplaire de la navette, Challenger, a été livré au Centre spatial Kennedy en juillet 1982. Lors de sa dixième mission, le 28 janvier 1986, 73 secondes après le décollage, à la suite d'une réaction en chaîne causée par la rupture d'un joint sur l'un des propulseurs d'appoint, elle a explosé et s'est désintégrée en vol, causant là aussi la mort des sept membres d'équipage.

Les navettes suivantes, Discovery et Atlantis, puis Endeavour, construites après l'accident de Challenger pour la remplacer, ont effectué leurs premières missions en 1984, 1985 et 1992 respectivement. Le lancement réussi d'Atlantis, le 8 juillet 2011, fut le 135^e et dernier de toutes les navettes spatiales américaines. Son retour sur Terre le 21 juillet 2011 a mis un terme définitif au programme.

Une navette offre le grand avantage de faire à la fois office de lanceur, de satellite et d'avion. Elle peut être lancée verticalement comme une fusée pour atteindre l'espace, tourner autour de la Terre comme un satellite, et atterrir comme un avion en planant dans l'atmosphère. Au cours de leurs 135 missions, dont quelques-unes pour les militaires, les navettes spatiales américaines ont placé de nombreuses charges utiles en orbite, qu'il s'agisse de satellites commerciaux, de modules de stations spatiales, de télescopes spatiaux ou de sondes scientifiques. Elles ont participé à de nombreuses opérations de récupération et de maintenance en orbite, ainsi qu'à des expériences scientifiques et des projets de recherche. On leur doit nombre d'avancées scientifiques et technologiques majeures.

En dépit de toutes ses qualités, la navette a eu l'inconvénient de ne pas tenir ses promesses initiales de réduction des coûts. Le budget alloué au programme fut au départ de 43 milliards de dollars (en dollars de 2011), avec un coût de lancement estimé à 54 millions de dollars. En raison de sa complexité technique (plus de 2,5 millions de pièces !), le projet a nécessité une quantité de main-d'œuvre et de ressources matérielles bien plus importante que prévue. Selon la NASA, de 1972 à la dernière mission de l'Atlantis en 2011, la navette spatiale a coûté 196 milliards de dollars. La construction d'un exemplaire demandait environ 12 milliards de dollars et un lancement environ 450 millions de dollars. Ces coûts très élevés ont conduit à la fin du programme. Sa conception trop complexe présentait en outre un risque pour la sécurité, comme l'ont démontré les tristes accidents de Challenger et Columbia.

8

Voguer dans l'espace

Comme aucune forme de résistance ne s'oppose au mouvement, se déplacer dans le vide spatial est assez facile. C'est le lancement du véhicule depuis la Terre qui pose problème. Plus sa masse est importante, plus la force de poussée doit être importante pour l'arracher à l'attraction et à l'atmosphère terrestres. Si les propulseurs chimiques sont bien adaptés à cette phase de lancement, ils brûlent toutefois une quantité importante de carburant en quelques minutes, et en manquent ensuite pour continuer leur périple dans l'espace. Il convient donc d'envisager des moyens de propulsion plus innovants.

De ce point de vue, les spécialistes ne manquent pas d'imagination. Outre les propulseurs ioniques et nucléaires, déjà entrés en phase de développement, ils planchent entre autres sur les voiles solaires et les voiles laser. Et si dans un avenir plus lointain, nous voyagions grâce à des moteurs à antimatière ou par des trous de vers, il n'y aurait pas vraiment lieu d'en être surpris. Fort de son intelligence, l'homme est déjà parvenu par divers moyens à s'affranchir de la gravité terrestre

et cherche toujours à aller toujours plus loin. Qui sait si ces modes de déplacement aujourd'hui très hypothétiques ne deviendront pas réalité dans l'avenir !

8.1. PROPULSION IONIQUE

Le moteur ionique est aujourd'hui le propulseur le plus prometteur pour les futurs déplacements dans le vide spatial.

Un moteur classique fait avancer un vaisseau en expulsant par l'arrière des gaz à haute vitesse produits par la combustion d'un carburant. Un moteur ionique repose sur le même principe, mais en éjectant un flux de particules chargées plutôt que des gaz de combustion. Si la force de poussée qu'il délivre est assez faible, ce moteur offre toutefois l'avantage de consommer beaucoup moins de « carburant » qu'un moteur traditionnel. Ainsi, en maintenant ses capacités d'accélération pendant une longue période, il finit par faire atteindre au vaisseau des vitesses élevées.

On distingue trois grands types de propulsion ionique : électrothermique, électrostatique et électromagnétique. Comme leur nom le laisse penser, ils utilisent tous un champ électrique pour accélérer les ions qu'ils éjectent. Leur différence vient de la façon dont ils génèrent ces ions. Un moteur électrothermique le fait en créant un plasma grâce à un arc électrique, le moteur électrostatique grâce à une grille électrostatique. Quant au moteur électromagnétique, il se divise en deux catégories : le propulseur à effet Hall et le propulseur à plasma magnétique. Le premier utilise un champ magnétique pour piéger des électrons et le champ électrique orthogonal produit par l'effet Hall pour générer un plasma. Le propulseur à plasma magnétique génère un plasma par induction haute fréquence.

Le propulseur ionique a déjà équipé certains engins d'exploration spatiale, comme la sonde japonaise Hayabusa, à destination d'un astéroïde, ou la sonde européenne SMART-1, à destination de la Lune. Elle devrait beaucoup progresser sur le plan technologique dans les années à venir. La recherche actuelle fonde de grands

espoirs sur la propulsion magnéto-plasmique à impulsion spécifique variable (Variable specific impulse magnetoplasma rocket – VASIMR), qui se distingue par un générateur radiofréquence pour chauffer, ioniser et accélérer un gaz. Selon ses promoteurs, un vaisseau spatial habité propulsé par VASIMR pourrait atteindre la planète Mars en 39 jours.

8.2. PROPULSION NUCLÉAIRE

8.2.1. Propulsion nucléaire pulsée

De l'avis général, la propulsion nucléaire pulsée serait la plus dangereuse et la plus irresponsable qui soit. Pour cette raison, et bien qu'elle soit technologiquement à portée de main, elle n'est envisagée qu'avec la plus extrême précaution.

Le principe de la propulsion nucléaire pulsée consiste à éjecter régulièrement des bombes nucléaires et à les faire exploser à l'arrière d'une fusée pour la faire avancer grâce au souffle ainsi généré. Cette idée incroyable a été réellement envisagée en 1955 aux États-Unis par la *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA – « Agence pour les projets de recherche avancée de défense »).

Le Projet Orion, ainsi qu'il avait été baptisé, visait à développer un mode de propulsion rapide, adapté aux voyages interplanétaires, sinon interstellaires. Dans la version finale proposée par la DARPA, la fusée était conçue comme un gigantesque amortisseur, doté d'une épaisse protection contre les radiations pour garantir la sécurité des passagers.

S'il était *a priori* réalisable, le projet présentait toutefois l'inconvénient de pouvoir causer une grave pollution radioactive dans l'atmosphère. Il n'a donc pas été mis en œuvre. En dépit de ses défauts évidents, certains continuent de travailler sur cette technologie qui a tout de même pour elle quelques avantages. Ainsi, en théorie, la vitesse d'un vaisseau spatial à propulsion nucléaire pulsée pourrait atteindre 10 % de la vitesse de la lumière, ce qui correspond à un voyage d'une quarantaine d'années pour atteindre l'étoile la plus proche.

8.2.2. Propulsion par fusion nucléaire

Les systèmes de propulsion nucléaire qui ont été étudiés ne se limitent pas à la propulsion pulsée. Un réacteur nucléaire installé sur un vaisseau pourrait produire la chaleur nécessaire pour éjecter des gaz et générer une force de poussée plus classique. Cette chaleur proviendrait soit de réactions de fission, soit, plus avantageusement, de réactions de fusion nucléaire. Dans le second cas, il s'agit de contraindre des noyaux à fusionner, ce qui libère une énorme quantité d'énergie. Sur Terre, la plupart des réacteurs de fusion sont conçus autour d'un *Tokamak*, un dispositif de confinement magnétique au sein duquel sont déclenchées les réactions¹. En raison de son poids important, cette technologie n'est toutefois pas applicable aux moteurs spatiaux. D'autres méthodes sont donc envisagées, comme la fusion par confinement inertiel qui utilise un faisceau à haute énergie, généralement un laser, en lieu et place du champ magnétique dans le Tokamak. Après fusion, les ions chauds sont dirigés par électromagnétisme vers l'arrière du véhicule afin d'être éjectés et assurer la propulsion.

Un moteur spatial nécessite deux éléments : de l'énergie et une masse à éjecter. Dans les moteurs à propulsion chimique classiques, le carburant fait à la fois office d'énergie et de masse propulsive. Bien que ce type de moteurs présente l'avantage d'une structure simplifiée, ils sont limités par la loi de la conservation de la quantité de mouvement, en vertu de laquelle l'impulsion spécifique est proportionnelle à la vitesse de la masse éjectée, et que cette vitesse est elle-même limitée. Dans un moteur à fusion nucléaire, en revanche, énergie et masse propulsive sont distinctes : l'énergie dégagée par la fusion sert à chauffer la masse propulsive, afin de l'éjecter à la vitesse la plus haute possible et produire une force de poussée d'autant plus forte – même si les produits de la réaction de fusion nucléaire peuvent faire partie de la masse éjectée.

1. Historiquement de forme toroïdale, son nom vient du russe *toroidalnaïa kamera s magnitnymi katouchkami*.

Les moteurs à fusion dégagent trois types d'énergie :

- l'énergie thermique du plasma, la plus importante et directement utilisable, qui résulte de l'ionisation du combustible lors de la fusion ;
- l'énergie neutronique, dangereuse pour le matériel, mortelle pour les humains et souvent considérée comme perdue, qui résulte du rayonnement de neutrons produits lors des réactions de fusion ou lors de réactions secondaires ;
- l'énergie du *rayonnement de freinage*, également dangereuse pour l'homme et souvent considérée comme perdue, qui résulte de la collision des ions et des électrons, ce qui convertit ainsi de l'énergie thermique utile en rayonnement X dangereux et en ions froids sans valeur.

Selon les besoins, un moteur à fusion peut fonctionner de trois façons différentes :

- par fusion pure, en utilisant uniquement l'énergie thermique du plasma et sa masse propulsive, sans égard à l'énergie neutronique et l'énergie du rayonnement de freinage, toutes deux perdues. Ce mode de fonctionnement permet d'atteindre le rapport de vitesse d'éjection sur impulsion spécifique le plus élevé et le rapport de poussée sur débit de masse propulsive le plus faible ;
- par fusion assistée, en utilisant uniquement l'énergie thermique du plasma, pour chauffer cette fois une partie additionnelle de masse propulsive, là encore sans égard à l'énergie neutronique et l'énergie du rayonnement de freinage, toujours perdues ;
- par une fusion assistée utilisant l'énergie thermique du plasma, l'énergie neutronique et l'énergie de rayonnement de freinage pour chauffer la masse à éjecter.

Les deux derniers modes nécessitent une chambre de combustion supplémentaire pour chauffer la masse propulsive additionnelle, ce qui augmente la poussée mais fait baisser l'impulsion spécifique. Le dernier mode peut en général commuter avec le mode de fusion pure.

En raison de la température très élevée qu'elle dégage, il est nécessaire de confiner la fusion. Les moteurs se distinguent donc aussi par la forme ou la méthode employée pour le faire, qu'il s'agisse de confinement toroïdal, sphérique ou axial, de confinement inertiel laser, inertiel z-pinch, par miroir magnétique, magnéto-inertielle, etc.

8.3. À LA VOILE SUR UN OCÉAN D'ÉTOILES

8.3.1. Voile solaire

Bien que les photons soient des particules sans masse, ils possèdent une quantité de mouvement. Lorsqu'ils frappent une surface plane, ils sont réfléchis, changent de direction et transmettent à la surface une force de réaction correspondante. La propulsion spatiale par voile solaire tire parti de cet effet de pression en se servant des photons émis par le Soleil. Un peu à la manière des bateaux à voiles traditionnels qui avancent grâce à la force du vent, un vaisseau à voile solaire avance grâce à l'énergie lumineuse du Soleil (figure 8.1). Cette technologie permet en théorie d'atteindre des vitesses très élevées, et cela sans devoir embarquer beaucoup de carburant. Elle demande en revanche un certain temps pour atteindre ces hautes vitesses.

Peut-être vous demandez-vous pourquoi nous ne nous déplaçons pas sur Terre dans des véhicules poussés par des voiles solaires, puisque nous sommes chaque jour exposés aux rayons du Soleil. Cela tient à la poussée très faible que produisent les photons. Sur Terre, la pression exercée par la lumière solaire sur une voile d'un mètre carré ne représente même pas le poids d'une fourmi. Divers effets comme la gravité, la résistance de l'air ou la pression atmosphérique noient la pression exercée par la lumière du Soleil, qui devient dès lors imperceptible. Dans l'espace, en revanche, un vaisseau se trouve en état d'apesanteur et n'est pas ou très peu affecté par la résistance de l'air. Même si elle est très faible, la pression lumineuse peut donc l'accélérer. Et comme la lumière solaire est constante, cette accélération est continue, ce qui permet au vaisseau d'acquérir une vitesse de

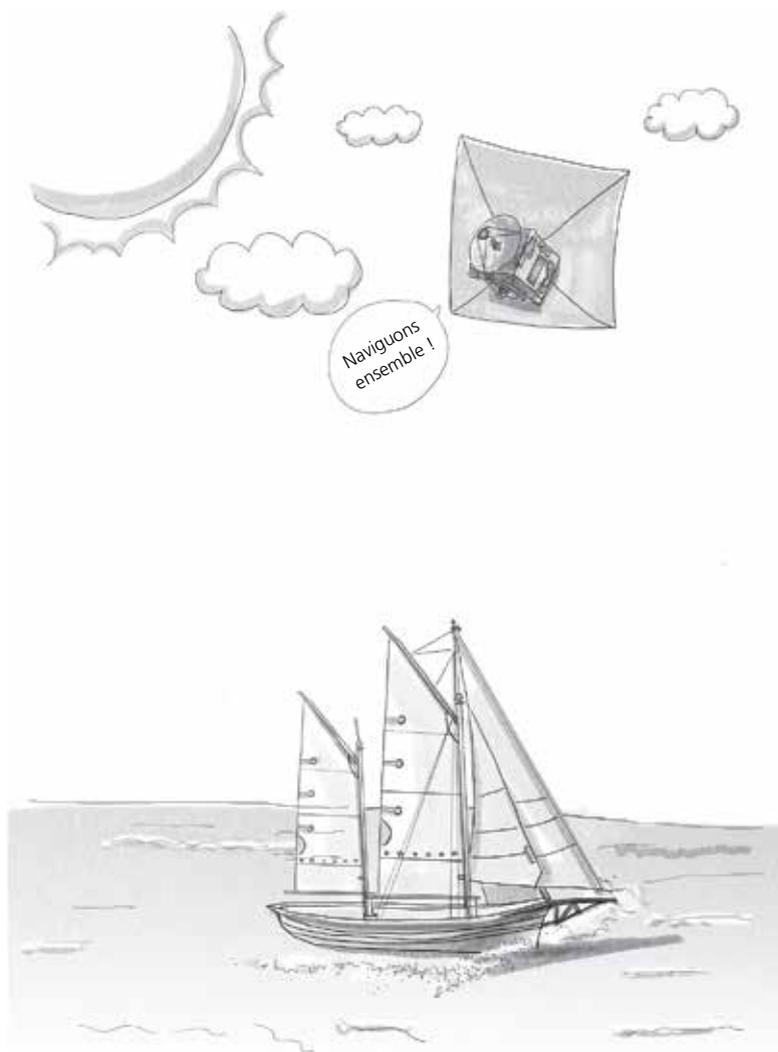


Figure 8.1 | Bateau et vaisseau à voile.

plus en plus élevée. Et plus la surface de la voile est importante, plus la force, donc l'accélération puis la vitesse augmentent également. Selon certaines études, des vaisseaux spatiaux équipés de grandes voiles solaires pourraient atteindre les 240 000 km/h, soit une vitesse bien supérieure aux meilleurs véhicules actuels. Les changements de direction s'opèreraient en ajustant l'angle entre la voile et la lumière solaire.

En résumé, la propulsion par voile solaire agit par un effet boule de neige, à partir d'une vitesse initiale très faible, qui augmente continuellement avec le temps, jusqu'à atteindre une vitesse proche de celle de la lumière. C'est pourquoi elle est envisagée depuis longtemps dans le cadre des longs voyages interstellaires. Elle permettrait en théorie d'accomplir les objectifs les plus ambitieux de l'exploration spatiale.

De fait, le concept de voile solaire n'est pas nouveau. Il y a déjà 400 ans, le célèbre astronome Johannes Kepler avait émis l'idée de faire naviguer un vaisseau spatial en utilisant la lumière du Soleil. Sur un plan plus pratique, les travaux de recherche et de développement en la matière ont également une certaine histoire derrière elle.

Le premier satellite à voile solaire du monde, Cosmos 1, a été lancé le 21 juin 2005 depuis un sous-marin nucléaire russe. N'ayant pas réussi à se séparer du troisième étage de sa fusée, il s'est malheureusement écrasé en mer. La première mission réussie est celle du satellite expérimental IKAROS, conçu et développé par la JAXA, l'agence spatiale japonaise, qui a été lancé le 21 mai 2010 depuis la base de lancement de Tanegashima par une fusée H-IIA, en compagnie de la sonde vénusienne Akatsuki. Le 11 juin suivant, la JAXA annonçait que la voile solaire avait été entièrement déployée. Au cours des six mois suivants, les tests d'accélération et de contrôle d'altitude ont montré que le satellite naviguait avec sa voile solaire comme prévu. Un autre satellite propulsé par voile solaire, LightSail 2, développé grâce à une campagne de financement participatif menée par la Planetary Society américaine, a été lancé le 25 juin 2019 par une fusée

Falcon Heavy de la société SpaceX. Ce satellite de type CubSat, équipé d'une caméra et de matériel de communication, a déployé le 23 juillet suivant sa voile solaire de 32 mètres carrés en film de polyester. En deux semaines, selon un communiqué de la Planetary Society, grâce à la seule poussée de la lumière du Soleil, LightSail 2 avait augmenté son altitude de 3 kilomètres.

En dépit de leurs nombreux avantages, les voiles solaires présentent un certain nombre d'inconvénients. Pour éviter que la traînée atmosphérique ne prenne le pas sur la pression lumineuse, l'orbite de croisière doit être supérieure à 800 kilomètres d'altitude. De plus, la surface des voiles doit être très importante pour que la poussée suffise à déplacer le vaisseau spatial, surtout si celui-ci est lourdement chargé. Le déploiement de voiles aussi grandes reste aujourd'hui encore un grand défi à relever.

Du fait de la constance de la lumière émise par le Soleil, les voiles sont toutefois sans doute promises à un grand avenir. Qui sait si un jour l'humanité ne voyagera pas d'étoiles en étoiles grâce à elles...

8.3.2. Voile laser

La voile laser est une version améliorée de la voile solaire. Elle propulse un véhicule spatial sur un principe identique, à ceci près que la lumière est fournie par un faisceau laser et non par le Soleil.

Par rapport à la lumière ordinaire, le laser présente l'avantage d'une luminosité plus élevée et d'une focalisation plus forte. Les pointeurs laser fréquemment utilisés lors de conférences sont des générateurs de faisceaux laser simples. S'il fallait choisir entre une bougie et un tel pointeur pour éclairer un objet lointain, le choix du second s'imposerait d'emblée. Cela n'a pas échappé aux spécialistes, bien sûr, qui ont, depuis quelque temps déjà, envisagé qu'un faisceau laser puisse propulser une voile spatiale avec plus d'efficacité que la lumière solaire. Ainsi, dès 1984, Robert Forward, physicien au laboratoire de recherche de la Hughes Aircraft Company, suggéra d'utiliser cette technologie dans le cadre des voyages interstellaires.

En théorie, un faisceau laser pourrait pousser un vaisseau spatial jusqu'à Alpha du Centaure² et même beaucoup plus loin. Dans la droite ligne de Forward, Robert H. Frisbee, du Jet Propulsion Laboratory de la NASA, présenta un projet de vol habité vers 55 Cancri, une étoile de la constellation du Cancer. Il préconisait à cette fin de propulser le vaisseau par une voile en aluminium de 600 miles³ de large, que pousserait un laser à haute énergie installé en orbite terrestre ou sur la surface de la Lune. Ce laser fonctionnerait en continu pendant plusieurs années jusqu'à ce que le vaisseau atteigne sa vitesse requise, ferait une pause ensuite, puis fonctionnerait de nouveau plusieurs années à proximité de la destination pour ralentir le vaisseau cette fois.

Le matériau employé pour la fabrication d'une voile laser doit faire l'objet d'une attention particulière du fait que l'énergie élevée qu'elle reçoit la rend de plus en plus chaude. En plus de cette bonne capacité de dissipation thermique, il doit être aussi léger que possible et facilement déployable sur une surface importante.

Outre la voile en aluminium conçue par Robert H. Frisbee, les ingénieurs de la NASA ont également tourné leurs vues vers des films de niobium ou de diamant, autant de matériaux résistants à de hautes températures, capables de supporter le rayonnement d'un laser au faisceau plus étroit mais de densité d'énergie plus élevée. La voile en diamant assure la même fonction que la voile en aluminium de Frisbee, tout en accélérant plus rapidement le vaisseau, ce qui raccourcit le temps de voyage interstellaire. Ainsi, non content de briller parmi les plus précieux des bijoux, le diamant éclairera peut-être la route de l'espace lointain !

2. Également connu sous le nom de *Alpha Centauri*, ce système stellaire à trois étoiles est le plus proche du Soleil. Il fait partie de la constellation du Centaure, dans l'hémisphère sud. L'une des étoiles qui le constitue, Alpha Centauri C, aussi appelée Proxima Centauri ou Proxima du Centaure, est la plus proche du système solaire, à 4,22 années-lumière. Elle a été découverte en Afrique du Sud par l'astronome Robert Innes en 1915.

3. 1 mile = 1,609 344 kilomètre.

Le faisceau laser qui pousserait cette voile jusqu'à l'étoile 55 Cancri devrait être incroyablement puissant. Selon les estimations de Robert Frisbee, il devrait atteindre en sortie les 17 000 térawatts. Pour le produire, il envisageait un dispositif destiné à concentrer l'énergie solaire pour pomper le laser⁴. De fait, des physiciens de l'Université de Chicago ont déjà développé un tel système qui multiplie par 84 000 la densité de la lumière ordinaire.

Si cette technologie était maîtrisée, nous n'aurions plus à nous soucier des problèmes de carburant pour les voyages lointains. Robert Frisbee estimait encore qu'un vaisseau spatial équipé d'une voile laser pouvait atteindre la moitié de la vitesse de la lumière en moins de 10 ans. Il faudrait compter 12 ans et demi pour gagner Alpha du Centaure avec une voile de 200 miles de diamètre, 86 ans pour parvenir à une planète semblable à la Terre proche de 55 Cancri avec une voile de 600 miles de diamètre.

Le 12 avril 2016, depuis One World Observatory à New York, le physicien britannique Stephen Hawking et le milliardaire russe Yuri Milner ont annoncé le lancement d'un projet baptisé *Breakthrough Starshot*. D'un coût final qui pourrait se situer entre 5 et 10 milliards de dollars, il vise à développer une petite sonde spatiale à voile photonique, StarChip, capable d'atteindre 1/5 de la vitesse de la lumière, soit 60 000 km/s, et de rejoindre en 20 ans environ l'étoile Alpha du Centaure. Les informations qu'elle nous transmettrait seraient reçues sur Terre près de quatre ans plus tard. Cette information très intéressante a été publiée sur le compte Weibo de Stephen Hawking.

En fait, une forme préliminaire du projet Breakthrough Starshot avait déjà été proposée une dizaine d'années auparavant. Ces projets interstellaires ont pour objectif de lancer des sondes vers les étoiles les plus proches du système solaire à des vitesses d'au moins 1/10 de la vitesse de la lumière, soit un voyage à l'échelle de la vie humaine.

4. Le processus de pompage optique consiste à utiliser la lumière pour élever le niveau d'énergie d'un électron d'un atome ou d'une molécule. Le terme évoque la pompe ordinaire qui permet d'élever de l'eau d'un niveau à un autre.

UN MESSAGE DE STEPHEN HAWKING

Voici le message publié le 13 avril 2016 par l'astrophysicien britannique Stephen Hawking sur son compte Weibo :

Salutations à tous en Chine depuis New York. Au *One World Observatory* à New York, Yuri Milner et moi avons lancé un programme à destination des étoiles. Mark Zuckerberg nous a apporté son soutien en rejoignant le conseil d'administration de notre nouveau projet, *Breakthrough Starshot*.

D'ici la prochaine génération, Breakthrough Starshot devrait développer un nanovaisseau – une sonde spatiale robotique de l'ordre du gramme – et un faisceau lumineux qui le propulsera à 20 % de la vitesse de la lumière. Si nous réussissons, une mission de survol pourrait atteindre Alpha du Centaure 20 ans environ après le lancement et renvoyer des images des planètes découvertes dans le système.

Albert Einstein a autrefois imaginé chevaucher un faisceau de lumière, et son expérience de pensée l'a conduit à la théorie de la relativité restreinte. Près d'un siècle plus tard, nous avons la chance d'atteindre une fraction significative de cette vitesse : 100 millions de miles par heure. Ce n'est qu'en allant si vite que nous pouvons atteindre les étoiles à l'échelle d'une vie humaine.

C'est excitant de participer à un projet aussi ambitieux, qui repousse les limites de l'ingéniosité et de l'ingénierie !

8.3.3. Voile magnétique

Une voile magnétique n'est pas poussée par la lumière mais par le champ magnétique que crée le flux de particules électriquement chargées constituant le vent solaire. Le principe consiste alors à générer un champ magnétique de direction opposée autour du vaisseau, et par là une force de répulsion qui le fait avancer.

Cette technologie offre l'avantage d'une poussée plus forte que celle obtenue par les voiles solaires. Le vaisseau pourrait également modifier sa trajectoire grâce à l'interaction des champs magnétiques des planètes, un peu à la manière d'un bateau à voile qui navigue au plus près entre des îles.

Comme les voiles solaires, cependant, les voiles magnétiques ne sont pas adaptées aux voyages interstellaires, du fait que la poussée diminue beaucoup à mesure que le vaisseau s'éloigne du Soleil. Hors du système solaire, au-delà du rayon d'action du champ magnétique, le vaisseau spatial manquerait de puissance pour atteindre d'autres étoiles.

8.3.4. Voile électrique

La voile électrique est une technologie de propulsion révolutionnaire proposée en 2006 par le physicien finlandais Pekka Janhunen. Comme la voile magnétique, elle tire profit des particules chargées du vent solaire, mais cette fois par un champ électrique généré par des fils conducteurs sous tension qui, en déviant les protons émis par le Soleil, engendre une poussée par échange de quantité de mouvement. Contrairement à la voile solaire dont l'emploi nécessite des matériaux à haute réflectivité, la voile électrique ne demande que des fils conducteurs.

Le projet actuel prévoit une voile constituée de fils métalliques très fins mais très longs, de 25 microns de diamètre pour 20 kilomètres de longueur, ainsi que des panneaux solaires et un canon à électrons ne consommant que quelques centaines de watts. En libérant des électrons dans l'espace, ce canon assurera que la voile soit toujours chargée positivement. Ainsi, lorsque des particules chargées négativement du vent solaire la rencontreront, se heurtant contre elle comme sur un obstacle, elles lui transféreront leur quantité de mouvement, accélérant ainsi un peu plus le vaisseau et l'éloignant du Soleil. Quoique très faible, cette accélération a le mérite de s'accroître avec le temps.

En raison de l'existence du champ magnétique terrestre, ce concept ne fonctionne pas dans l'environnement immédiat de notre planète. Le vaisseau doit donc être envoyé dans l'espace à l'aide d'un lanceur traditionnel, avant qu'il déploie sa voile électrique pour voguer dans l'espace plus lointain. Comme les voiles solaires, les voiles électriques présentent toutefois l'avantage de pouvoir librement changer de

direction. Lorsque les particules solaires frappent la face avant de la voile, le vaisseau spatial navigue dans la direction opposée au soleil, et vice versa.

8.3.5. Propulsion à l'antimatière

Dans le film *Anges et Démons*, des terroristes dérobent un quart de gramme d'antimatière au CERN dans l'objectif de détruire la totalité du Vatican. Par chance, un serviteur du pape parviendra in extremis à faire exploser la bombe en haute altitude. Bien que cette fiction prenne quelques libertés avec la réalité, elle a au moins le mérite de faire saisir au grand public l'énorme et mystérieux pouvoir de l'antimatière. Imaginez que cette prodigieuse quantité d'énergie soit au service de la propulsion des vaisseaux spatiaux, quelle innovation ce serait !

L'antimatière est l'opposée de la matière ordinaire, en ce sens qu'elle est constituée d'antiparticules qui ont même masse que les particules ordinaires mais une charge électrique opposée. La rencontre de l'antimatière et de la matière ordinaire provoque une annihilation mutuelle, c'est-à-dire une explosion qui convertit toute la masse en énergie, en vertu de la célèbre équation d'Einstein $E = mc^2$. De ce point de vue, le pouvoir explosif de l'antimatière est bien supérieur à celui d'une bombe nucléaire. Un autre avantage potentiel de la propulsion à antimatière tient à ce que l'annihilation se produit spontanément, sans recours aux délicates mises en œuvre que nécessite la propulsion nucléaire. Plus besoin, donc, de gros et complexes réacteurs qui alourdissent le vaisseau spatial. En l'état de nos connaissances actuelles, l'antimatière est le plus efficace des « carburants ».

À poids équivalent, l'énergie produite par annihilation d'antimatière est 1 000 fois plus importante que celle produite par fission dans les centrales nucléaires et 300 fois plus que celle produite par fusion au cœur du Soleil. Autant dire qu'une goutte d'antimatière suffirait à propulser un vaisseau spatial sur des centaines d'années-lumière.

Selon les estimations, un voyage de la Terre à Mars pourrait ainsi prendre quelques dizaines de jours contre six à neuf mois avec des modes de propulsion plus traditionnels. Depuis 1953, date à laquelle le grand ingénieur en aéronautique autrichien Eugen Sänger émit l'idée d'équiper les vaisseaux spatiaux de moteurs à l'antimatière, ce mode de propulsion est particulièrement cher au cœur des écrivains de science-fiction.

De nombreux et redoutables problèmes techniques restent toutefois à surmonter. Il faut tout d'abord produire de l'antimatière. Aujourd'hui, on ne sait le faire qu'en inversant le processus d'annihilation, c'est-à-dire en partant de l'énergie pour arriver à de la masse, grâce à des accélérateurs de particules. Comme l'énergie requise est colossale, presque inconcevable, seul un milliardième de gramme d'antimatière est produit chaque année dans le monde, ce qui suffirait à peine à chauffer une bouilloire à thé. Se pose ensuite le problème du stockage de l'antimatière, du fait qu'elle ne peut être contenue dans de la matière ordinaire sous peine d'annihilation immédiate. Actuellement, on ne sait confiner des antiparticules que par des champs magnétiques, comme ceux mis en œuvre dans le piège à ions de Penning, très utilisé pour les antiprotons mais inadaptés aux positrons. Pour toutes ces raisons, les voyages interstellaires propulsés à l'antimatière ne sont pas pour demain. Si quelques milligrammes d'antimatière suffiraient pour se déplacer dans le système solaire, il en faudrait plusieurs tonnes pour gagner l'étoile la plus proche, une production qui dépasse de loin nos capacités actuelles.

En l'absence de percées révolutionnaires dans la fabrication et le stockage de l'antimatière, il serait toutefois envisageable de combiner son usage avec celui de la propulsion nucléaire. Ainsi, une quantité même faible d'antimatière pourrait servir à déclencher plus facilement les réactions nucléaires. Sans doute moins efficace qu'une propulsion à l'antimatière seule, cette approche combinée présente toutefois l'avantage d'une mise en œuvre plus aisée.

8.3.6. Voyages par trous de ver

Emprunter un trou de ver est sans doute le mode de voyage spatial préféré des fans du film *Interstellar* (figure 8.2). Un trou de ver, aussi appelé pont d'Einstein-Rosen ou tunnel spatio-temporel, est un passage étroit qui relierait deux régions distinctes de l'espace-temps. Le physicien autrichien Ludwig Flamm passe souvent pour avoir été le premier à proposer le concept, dès 1916. Mais l'idée de l'utiliser pour des voyages spatio-temporels n'a été formalisée que dans les années 1930, par Albert Einstein et Nathan Rosen, alors qu'ils étudiaient les équations du champ de gravitation.

En termes simples, un trou de ver est un tunnel spatio-temporel qui connecte deux zones éloignées de l'Univers, un peu à la manière d'un tourbillon qui rapproche la surface du fond de l'océan. Ce type de raccourci réduirait de façon drastique le temps de voyage dans l'espace et dans le temps.

Cependant, à ce jour, les scientifiques n'ont jamais observé de trous de ver. Einstein lui-même doutait de leur existence réelle. Durant des décennies, les trous de ver ont donc été considérés comme de simples curiosités mathématiques. De plus, Robert W. Fuller et John A. Wheeler ont montré dans un article publié en 1962 que les trous de ver étaient instables. D'un autre côté, en 1963, le mathématicien néo-zélandais Roy Patrick Kerr a découvert que les trous noirs en rotation ne s'effondreraient pas en un seul point, comme le pensait Schwarzschild, mais en une structure d'anneau, ce qui a relancé l'intérêt porté à ces objets. Comme les êtres humains, les étoiles subissent un processus de vieillissement et de mort. Kerr pensait qu'une étoile approchant de sa mort en continuant de tourner pourrait former un « trou noir dynamique », semblables à ceux représentés dans les films.

Quand un objet est envoyé dans un trou noir le long de son axe de rotation, à l'instar du vaisseau piloté par Cooper dans *Interstellar*, s'il parvient à dépasser la limite du champ de gravité au centre du trou noir, il pénètre dans un « Univers miroir », ce qui équivaut à un voyage spatio-temporel.



Figure 8.2 | Présentation schématique d'un trou de ver.

Quand bien même les trous de ver existeraient sous une forme stable, les franchir resterait extrêmement périlleux. Le rayonnement électromagnétique atteint en effet des niveaux très élevés, de sorte qu'une personne serait brûlée par des rayonnements X et gamma. Diverses recherches de nature très spéculative ont montré que le puissant champ de force du trou de ver pourrait être neutralisé de manière à stabiliser son champ d'énergie, grâce à de l'énergie négative fournie par de l'antimatière.

À l'instar des trous de ver, on a longtemps considéré l'énergie négative comme un artifice théorique. Plusieurs laboratoires dans le monde ont toutefois montré qu'elle pouvait exister et des traces en ont même déjà été détectées dans l'espace. Selon les scientifiques, si l'Univers comptait des trous de ver par millions, peu d'entre eux seraient de diamètre supérieur à 100 000 kilomètres, la taille minimale pour une navigation spatiale sûre. La découverte de l'énergie négative ouvre de nouvelles perspectives sur les trous de ver car elle pourrait servir à les élargir et de les stabiliser, permettant ainsi le passage d'un vaisseau spatial.

Les trous de ver sont encore certes hypothétiques mais la science ne peut progresser sans conjectures audacieuses. On pensait autrefois que l'atome était l'élément fondamental de la matière, puis on a découvert qu'il se décomposait en particules comme les neutrons et les protons. De même, on a longtemps cru que l'Univers se constituait seulement de matière ordinaire, puis l'existence de la matière noire a contredit cette conclusion. Poser des hypothèses scientifiques, c'est se libérer des contraintes existantes, se remettre toujours en question et douter de soi-même, afin de devenir meilleur et progresser dans la compréhension du monde.

Face à l'immensité de l'Univers, l'homme est insignifiant, ce qui ne l'a pas empêché de partir à sa conquête, d'abord par la pensée. Depuis le très ancien rêve illusoire de Wan Hu, nous sommes parvenus à envoyer des véhicules spatiaux hors de l'atmosphère, puis hors du système solaire. Alors qui sait si des idées folles d'aujourd'hui ne

deviendront pas les réalités de demain. Pour atteindre de nouveaux systèmes stellaires, découvrir de nouvelles molécules ou de nouvelles formes de vie similaires, il nous faudra développer des modes de propulsion avancés sinon presque impensables.

9

Les engins spatiaux

9.1. QU'EST-CE QU'UN ENGIN SPATIAL ?

Un engin spatial est un appareil qui suit une trajectoire de vol contrôlée autour de la Terre ou plus loin dans l'espace. Cette famille comprend entre autres les lanceurs, les satellites artificiels, les navettes spatiales, les stations spatiales et les vaisseaux habités. Le milieu spatial soumet les vaisseaux à des conditions très différentes de celles qui règnent plus près de la surface de la Terre, comme des températures extrêmement basses, une pression très faible et une absence de pesanteur.

Les engins spatiaux se composent de plusieurs sous-systèmes ayant des rôles différents. On distingue généralement ceux qui équipent la *charge utile* de ceux qui assurent le fonctionnement de la *plateforme*. La charge utile désigne les instruments et autres matériels spécifiques à une mission. Dans ce cadre, les sous-systèmes peuvent être des télescopes, des détecteurs de particules, des caméras multispectrales et infrarouges de satellites militaires, des radiomètres infrarouges et micro-ondes de satellites météorologiques, des antennes et des

répéteurs des satellites de communication. Occupant un rôle particulièrement important, ces charges utiles se comparent souvent au système sensoriel du corps humain. Selon les caractéristiques des charges utiles, on peut atteindre différents objectifs et s'assurer que le vaisseau puisse « voir », « entendre » et « sentir » les informations en provenance de la Terre ou du milieu spatial environnant. C'est en fonction de la charge utile à embarquer que se conçoivent et se développent les plus importants des véhicules spatiaux. Le télescope spatial Hubble, par exemple, en servant « d'œil » aux astronomes, nous a permis de recueillir une quantité phénoménale de données d'observation, dont l'analyse et l'interprétation ont enrichi nos connaissances et notre compréhension de l'Univers, tant sur son âge que sur la naissance et la mort des étoiles, l'évolution des trous noirs ou la quête de la matière noire.

Quant aux sous-systèmes de plateforme, ils ont vocation à assurer le bon fonctionnement général de l'engin, de son lancement jusqu'à la fin de sa durée de vie. Ces sous-systèmes comprennent les systèmes de structure et de mécanismes, le contrôle thermique, le contrôle d'attitude, la propulsion, l'alimentation électrique, la gestion des données, la télémétrie et la commande. Pour garantir la bonne marche de l'engin, chaque sous-système doit pouvoir répondre de manière appropriée à la tâche qui lui est assignée. Le sous-système de structure, par exemple, assure la cohésion d'ensemble et protège tous les autres sous-systèmes, et notamment ceux de la charge utile. Le sous-système de contrôle thermique veille à maintenir une température correcte, et cela dans un environnement spatial à la température extrêmement basse. Le sous-système de propulsion fournit la puissance nécessaire à maintenir ou modifier l'orbite et l'attitude de l'engin spatial en l'absence de pesanteur, etc. Les différents sous-systèmes se comparent aux organes du corps humain (figure 9.1). De la même manière que le fonctionnement normal des organes permet de vivre en bonne santé, le fonctionnement normal des sous-systèmes assure la réussite d'une mission spatiale.

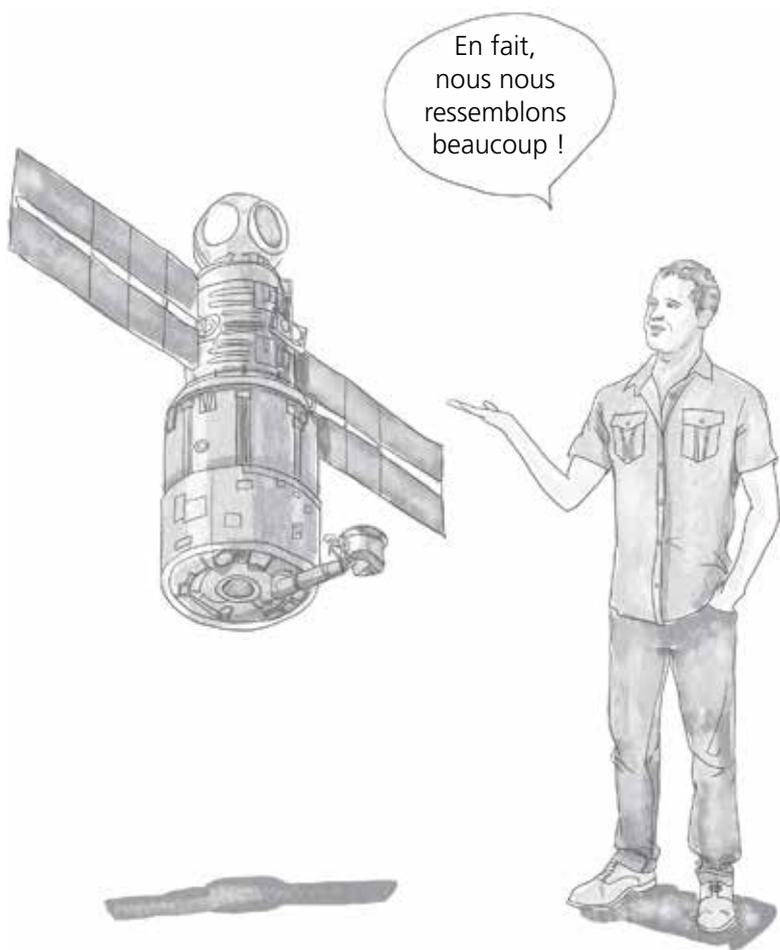


Figure 9.1 | Sous-systèmes de véhicules spatiaux et organes du corps humain.

9.2. SOUS-SYSTÈMES DE STRUCTURE ET DE MÉCANISMES – SQUELETTE ET ARTICULATIONS

9.2.1. *Structure*

Le sous-système de structure est un composant essentiel, semblable à notre squelette, qui donne à l'engin spatial sa forme générale et assure sa cohésion globale. Ses principales fonctions consistent à supporter et répartir toutes les charges qui pèsent sur l'ensemble ; à fournir l'espace et les moyens nécessaires à l'installation et la protection de la charge utile et des autres sous-systèmes ; à répondre à des contraintes spécifiques pour des charges utiles ou sous-systèmes particuliers, telles que garantir la précision de positionnement d'antennes, d'optiques et de capteurs, ou garantir certaines performances, par exemple de type thermique, électrique, etc.

La colonne vertébrale d'un vaisseau est généralement sa structure principale, qui affecte souvent une forme cylindrique. Sa conception a un impact direct sur celle des autres sous-systèmes structurels. Ce cylindre porteur central demande donc une grande attention lors du processus de développement d'un vaisseau spatial.

9.2.2. *Mécanismes*

Un mécanisme est un composant mécanique qui assure un mouvement ou une action bien définie. Il demande au moins une pièce mobile, une source d'énergie et un dispositif de rétroaction. Tout ce qui bouge dans l'engin le doit à des mécanismes. Comparables aux articulations dans le corps humain, ils permettent de relier ou de séparer des parties mobiles, de les faire avancer ou reculer. Tout comme nous pouvons marcher, courir ou sauter grâce aux articulations, l'engin spatial accomplit ses mouvements de base grâce aux mécanismes.

Parmi divers types de mécanismes, citons entre autres les mécanismes de compression et de déploiement, pour déployer des panneaux solaires ou des antennes par exemple ; les mécanismes d'ouverture et de verrouillage ; les mécanismes de connexion et de séparation de différents modules ; les mécanismes d'entraînement...

Parmi leurs principales fonctions, citons entre autres le fait d'établir ou de libérer des connexions entre composants de l'engin ; d'assurer la séparation entre l'engin et la fusée qui le lance ; d'assurer le déploiement de composants d'un satellite dans la position ou dans la forme voulue ; de maintenir un composant d'un satellite dans une direction spécifiée...

Ainsi, un panneau solaire, qui a été replié sur lui-même pour gagner de la place lors de la phase de lancement, demandera à être déplié après la mise en orbite. Il faut donc un mécanisme pour assurer ce déploiement de manière stable et contrôlée, afin d'assurer un fonctionnement optimal des panneaux.

9.3. SOUS-SYSTÈME DE CONTRÔLE THERMIQUE – PEAU

Le sous-système de contrôle thermique protège la structure et les équipements de l'engin en veillant à ce que tout fonctionne dans la plage de températures appropriée. Il est comparable à la peau du corps humain, qui empêche le vaisseau d'entrer en hypothermie ou de développer une forte fièvre.

Deux grandes méthodes sont généralement mises en œuvre : le contrôle thermique passif et le contrôle thermique actif.

9.3.1. Contrôle thermique passif

Le contrôle thermique passif n'emprunte pas d'énergie à l'engin. De la même façon que nous enfilons ou enlevons des vêtements en fonction des variations de la température ambiante, le contrôle thermique passif assure une température correcte de l'engin par des revêtements thermiques, des isolants multicouches, des caloducs et des matériaux à changement de phase.

Les revêtements thermiques, aussi appelés revêtements de température, sont très utilisés et généralement appliqués à la surface des vaisseaux. Comme les vêtements pour les humains, ils demandent à être bien choisis, de manière à être au chaud sans transpirer.

Comme leur nom le suggère, les isolants multicouches sont constitués de plusieurs couches de matériaux à haute réflectivité. La chaleur

est ainsi réfléchi à plusieurs niveaux, ce qui augmente la résistance thermique globale de façon correcte dans l'espace.

Comme leur nom l'évoque également, les caloducs servent à transférer la chaleur d'un point à un autre. Il s'agit généralement d'une structure tubulaire empli d'un composé chimique qui conduit la chaleur par un cycle de vaporisation et de condensation.

Le contrôle thermique passif présente l'avantage de la simplicité et la fiabilité, mais l'inconvénient d'un contrôle peu précis et d'une incapacité à s'adapter automatiquement aux variations de température.

9.3.2. Contrôle thermique actif

Pour répondre aux besoins spécifiques des instruments ou équipements sensibles à la température, il est parfois nécessaire de recourir au contrôle thermique actif, c'est-à-dire d'installer le « chauffage » et la « climatisation ». Ce système est généralement constitué d'un capteur de température, d'un contrôleur, d'un actionneur, le contrôle s'effectuant grâce à des persiennes thermiques, des caloducs électroniques, des chauffages électriques et des commutateurs thermiques.

Le mode de transmission de la chaleur détermine trois grandes familles technologiques : radiative, conductive et convective.

Le contrôle thermique actif radiatif maintient la température du véhicule dans la plage voulue en modifiant la capacité de dissipation de chaleur, grâce à des persiennes thermiques, par exemple.

Le contrôle thermique actif conductif consiste essentiellement à transmettre la chaleur interne du vaisseau spatial vers la surface extérieure par conduction, puis à la dissiper dans l'espace. Le facteur de transmission de la chaleur peut être modifié pour ajuster la température grâce à des commutateurs thermiques de contact et des caloducs à conductivité variable.

Le contrôle thermique actif convectif consiste à réguler la température par la circulation de fluides. Du fait de l'environnement spatial dans lequel évolue l'engin, le système de transfert de chaleur convectif ne peut pas être conçu de la même manière que sur Terre. Pallier

l'absence de pesanteur, par exemple, nécessite d'exercer une force externe pour faire circuler le fluide, ce qui rend le système de contrôle thermique à la fois plus complexe, donc moins fiable, et plus consommateur d'énergie. Ce type de dispositif se révèle toutefois très efficace dans les cas nécessitant un contrôle précis de la température et un échange de chaleur important.

9.4. SOUS-SYSTÈME DE CONTRÔLE D'ATTITUDE – CERVELET

L'attitude désigne l'orientation ou la direction d'un engin spatial par rapport à un système de coordonnées de référence dans l'espace. Le rôle dévolu au sous-système de contrôle d'attitude consiste à veiller à ce que l'engin adopte à tout instant l'attitude spécifiée par sa mission. Il est en cela comparable au cervelet qui, en coordonnant et en synchronisant nos mouvements, leur assure précision et efficacité.

Le sous-système de contrôle d'attitude doit donc s'assurer que l'orientation du vaisseau soit conforme aux objectifs de la mission en cours, orientation qui est elle-même déterminée par la charge utile. Entre autres exemples, citons une antenne de communication qui doit pointer vers telle zone spécifique de la surface terrestre ; un instrument d'observation qui doit se focaliser ou balayer telle région selon des règles définies ; un détecteur qui doit viser une direction spécifique, etc. Pour cela, il faut d'abord que l'engin s'oriente pour acquérir la cible, puis, ceci fait, qu'il assure son suivi. La tâche qui consiste à maintenir l'engin sur une orientation de référence en compensant les éventuelles perturbations internes et externes se nomme la *stabilisation d'attitude*. La tâche qui consiste à modifier l'orientation de l'engin en cas de besoin, se nomme *manœuvre* ou *réorientation d'attitude*. Un changement d'orbite, par exemple, qui demande d'allumer un moteur pour augmenter la vitesse dans une direction donnée, nécessitera auparavant de modifier de manière adéquate l'orientation du véhicule.

Le sous-système de contrôle d'attitude est dit *actif* ou *passif* selon qu'il emprunte ou non de l'énergie (électrique ou chimique) à l'engin

pour fonctionner. Il peut être également *semi-passif* ou *semi-actif* s'il fonctionne selon les deux modes.

9.4.1. Contrôle d'attitude passif

Certains systèmes de contrôle d'attitude fonctionnent grâce à la dynamique propre du vaisseau, en utilisant son moment cinétique et son moment d'inertie, ainsi que des moments externes générés par son interaction avec l'environnement. Cette façon de procéder limite beaucoup l'apport énergétique nécessaire. Le contrôle d'attitude passif, également appelé stabilisation passive d'attitude, prend diverses formes telles que la stabilisation par giration, la stabilisation par gradient de gravité, la stabilisation magnétique, la stabilisation aérodynamique et la stabilisation semi-passive, pour ne citer qu'elles.

9.4.1.1. Stabilisation par giration

Sur le principe du gyroscope, la stabilisation par giration se fonde sur le moment cinétique généré par la rotation de l'engin spatial pour maintenir son axe de rotation, en l'absence de couples externes, ou conserver une certaine vitesse angulaire, c'est-à-dire compenser toute accélération, dans le cas contraire. La stabilisation par giration est une méthode simple, économique et fiable. Une fois la rotation de l'engin initiée, souvent par le dernier étage de la fusée de lancement, le maintien de l'axe de rotation dans l'espace inertiel ne demande aucune ressource complémentaire.

L'astronaute chinoise Wang Yaping, dans l'un des cours qu'elle a donné en orbite durant la mission Shenzhou 10, a illustré le principe de base à l'aide d'une toupie rouge et jaune. Dans un premier temps, elle l'a juste laissée suspendue en l'air, sans la faire tourner sur elle-même, puis lui a donné une pichenette, ce qui l'a fait avancer cahin-caha en tourneboulant selon une trajectoire plus ou moins erratique. Dans un second temps, elle a d'abord fait tourner rapidement la toupie sur elle-même, avant de la suspendre dans l'air puis de lui donner un petit coup. Dans ce dernier cas, la toupie avançait de manière régulière en ligne droite sans jamais passer cul

par-dessus tête. Wang Yaping a ensuite expliqué que ce type de propriétés cinétiques étaient largement utilisées en astronautique. La station spatiale Tiangong 1, par exemple, était équipée d'une variété de gyroscopes qui assuraient avec grande précision le maintien de son attitude.

9.4.1.2. Stabilisation par gradient de gravité

La stabilisation par gradient de gravité repose sur les variations de gravité que fait subir la Terre à différentes parties de l'engin spatial et qui ont pour effet d'aligner son axe de moment d'inertie minimal avec la verticale locale. Les premiers satellites GPS, par exemple, étaient stabilisés par gradient de gravité.

9.4.1.3. Stabilisation magnétique

La stabilisation magnétique repose sur la propriété qu'ont les objets aimantés de s'orienter selon les lignes du champ magnétique terrestre. Bien utilisés, ils permettent donc de stabiliser un engin spatial. Le satellite scientifique GOCE, développé par l'Agence spatiale européenne, par exemple, était équipé d'un tel système de contrôle.

9.4.1.4. Stabilisation aérodynamique

En orbite basse, des molécules d'air frappent encore la surface d'un engin spatial. Une distribution de masse et une forme aérodynamique bien conçues permettent donc de maintenir constante la direction du flux d'air sur le bord d'attaque de la surface de l'engin. Telle est en substance le principe de la stabilisation aérodynamique. Elle n'est bien sûr envisageable qu'en orbite basse, à une altitude généralement inférieure à 500 km, et pour des engins présentant une surface frontale importante. Les capsules de retour dans l'atmosphère, par exemple, se stabilisent souvent de cette façon.

9.4.1.5. Stabilisation semi-passive

Un contrôle d'attitude semi-passif est un contrôle passif augmenté de moyens consommateurs d'énergie dans le but d'améliorer ses

performances. Ainsi, une roue de réaction électriquement motorisée qui tourne à grande vitesse dans la direction perpendiculaire à l'axe d'inertie minimal pourra venir compléter le contrôle d'attitude d'un engin stabilisé par gradient de gravité.

9.4.2. Contrôle d'attitude actif

Le contrôle d'attitude actif se distingue du contrôle d'attitude passif par l'énergie dont il a besoin pour fonctionner. Cette énergie, électrique ou issue de la masse propulsive, pourra alimenter des actionneurs gyroscopiques ou autres dispositifs de contrôle de couple, comme les roues de réaction mentionnées juste au-dessus, en réponse appropriée à une information d'attitude obtenue directement ou indirectement.

Un système de contrôle d'attitude actif est une boucle fermée composée de capteurs d'attitude, de contrôleurs, d'actionneurs, c'est-à-dire de dispositifs de contrôle de couple, et du corps de l'engin spatial.

Un tel système est complexe et coûteux à mettre en œuvre. Sa fiabilité et une longue durée de vie sont en conséquence plus difficiles à assurer. En raison de sa grande précision et de sa rapidité de réaction, ainsi que de la complexité des tâches qu'il peut effectuer et son aptitude à affronter des événements imprévus, c'est toutefois aujourd'hui le système le plus utilisé.

9.5. SOUS-SYSTÈME DE PROPULSION – MUSCLES

Le sous-système de propulsion d'un engin spatial désigne tout ce qui, par le principe de l'action et la réaction, fournit l'énergie nécessaire au maintien ou au changement de trajectoire et d'attitude de l'engin spatial. Composant essentiel du mouvement, il est comparable aux muscles du corps humain.

La station spatiale chinoise, par exemple, est équipée d'un système de propulsion qui assure son maintien à une altitude proche des 400 kilomètres. Autrement, en raison de l'attraction gravitationnelle terrestre et de la résistance de l'air, elle descendrait de plus en plus.

Trois techniques de propulsion sont aujourd'hui d'utilisation courante.

La première et la plus simple de toutes est la *propulsion à gaz froid*. Un réservoir muni d'une vanne est rempli de gaz à haute pression. Lorsque la vanne est ouverte, le gaz expulsé crée une poussée.

La deuxième technique est la *propulsion chimique*. Elle consiste à produire par combustion de composés chimiques des gaz à haute température et haute pression qui, éjectés, créent une poussée. Elle n'emprunte rien au milieu environnant, la source énergétique faisant office de masse propulsive. L'énergie chimique est convertie en énergie thermique lors de la combustion puis en énergie cinétique lors de l'éjection. La masse propulsive peut être liquide ou solide.

La troisième technique est la *propulsion électrique*. Un champ magnétique accélère un plasma et, ce faisant, crée une poussée. Fondamentalement, il s'agit de la propulsion ionique exposée au chapitre 8. La source d'énergie est cette fois indépendante de la masse propulsive. Les atomes constituant cette masse propulsive sont ionisés puis accélérés par l'énergie électrique en provenance de la source, ce qui produit de l'énergie cinétique. Cette technique offre l'avantage d'une économie de poids et de volume, c'est-à-dire d'un gain pour la charge utile.

En pratique, un engin spatial combine souvent plusieurs formes de propulsion, selon les besoins de sa mission. Le système de propulsion de la sonde lunaire européenne SMART-1, par exemple, se composait de système de propulsion principal électrique et d'un système de propulsion auxiliaire, lui-même mixte à gaz froid et électrique.

9.6. SOUS-SYSTÈME D'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE – CŒUR

Le système d'alimentation électrique désigne le système qui génère, stocke, transforme, régule et distribue l'électricité à bord de l'engin spatial. Cette électricité provient principalement de panneaux solaires, mais peut aussi être fournie par des batteries embarquées, voire des générateurs nucléaires. À la manière du cœur dans le corps humain,

le système d'alimentation fait circuler sans interruption l'électricité partout où elle est demandée.

Actuellement, les panneaux solaires, formés de cellules photovoltaïques qui convertissent la lumière du soleil en électricité, sont très utilisés pour fournir l'énergie nécessaire aux plates-formes comme aux charges utiles d'une large catégorie d'engins spatiaux. Ils peuvent répondre aux besoins énergétiques sur des périodes allant de plusieurs mois à plusieurs décennies pour une puissance de quelques dizaines watts à plusieurs dizaines de kilowatts. Pendant les périodes d'éclairage, les cellules photovoltaïques, en plus de fournir l'électricité désirée, rechargent des batteries de stockage.

Selon leur mode d'installation, les panneaux solaires sont généralement classés en panneaux solaires déployables et panneaux solaires intégrés. Comme leur nom l'indique, les premiers sont déployés hors de la structure proprement dite, tandis que les seconds sont installés sur la coque externe de l'engin et peuvent donc parfois prendre des formes irrégulières. Si l'environnement thermique des panneaux intégrés est meilleur que celui des panneaux déployables, leur surface effective d'exposition aux rayons solaires est plus réduite, ce qui entraîne une puissance de sortie plus faible.

9.7. SOUS-SYSTÈME DE TRAITEMENT DE DONNÉES – CERVEAU

Le système de traitement de données est comparable au cerveau du corps humain, qui coordonne diverses activités telles que la gestuelle et la parole afin de communiquer et d'interagir avec le monde extérieur.

Un engin spatial relativement important nécessite de nombreuses voies de communication, pour transmettre des milliers de résultats de mesures et agir sur des centaines de commandes distantes. Jadis, cette communication était assurée voie à voie par un réseau de câbles, ce qui prenait non seulement beaucoup de place mais posait également des problèmes de fiabilité et de compatibilité électromagnétique.

Dans les années 1970, avec le développement rapide de l'électronique et de l'informatique, les capacités des microprocesseurs se sont

améliorées. Une transformation fondamentale s'est opérée, qui a vu le regroupement de la gestion des télémesures et des télécommandes, ainsi que d'autres types d'information en une unité de traitement embarquée, pilotée par des microprocesseurs, c'est-à-dire un ordinateur de bord. Au début des années 80, l'ESA et la NASA ont respectivement développé un Système de traitement de données (On-board data handling – OBDH) et un Système de traitement de commande et de données (Command & Data-handling Systems – C&DH). L'OBDH relie à l'unité centrale de l'ordinateur de bord via un *bus* une série d'unités situées près des objets à mesurer et à contrôler, formant effectivement un système de traitement de données embarqué. Les fonctions de télémesure, d'autocontrôle, de télécommande, de synchronisation des données, etc. sont centralisées afin d'assurer un partage de l'information et de réagir de manière plus efficace et plus rationnelle.

Dans le cadre de la Station spatiale internationale, l'ESA a développé un système de traitement de données pour le segment russe qui, au-delà de ce seul segment, complète la gestion des données de toute la station spatiale. Ce système assure entre autres la collecte et le traitement des données de la plate-forme et des instruments scientifiques, la gestion du temps, de la latence et de la synchronisation, la gestion courante des missions et la réparation en cas de panne, le soutien aux commandes de contrôle provenant des stations terrestres ou d'autres engins spatiaux.

9.8. SOUS-SYSTÈME DE MESURE, SUIVI ET CONTRÔLE – TÉLÉPHONE PORTABLE

Le sous-système de mesure, suivi et contrôle (Telemetry, tracking, and command – TT&C) a pour mission de surveiller et de corriger l'orbite de vol, l'attitude de l'engin et le fonctionnement de tous ses sous-systèmes, garantissant ainsi que la mission s'exécute selon le cahier des charges prévu. Il est assez comparable au téléphone portable, bien qu'il ne s'agisse pas (encore !) d'un organe du corps

humain, qui a pris une telle place dans la société moderne qu'il devient de plus en plus difficile de se déplacer sans lui. Le système TT&C se compose de quatre sous-systèmes principaux : le suivi de trajectoire, la télémétrie, la télécommande, la communication Terre-espace. Si chaque fonction peut être assurée par une unité autonome, il devient de plus en plus courant d'en unifier plusieurs. Ainsi, le système unifié en bande S (Unified S-band – USB) se sert d'une antenne et d'un canal de transmission communs pour envoyer et recevoir des signaux d'informations produits par toutes les unités.

10

L'odyssée de l'espace

Du seul point de vue de la distance, nous avons déjà parcouru un certain chemin : en juillet 2023, la sonde spatiale la plus éloignée jamais lancée, Voyager 1, se situait à 23,9 milliards de kilomètres de la Terre, soit 160 fois la distance de la Terre au Soleil. Cependant, par rapport à l'immensité de l'Univers, nous n'en sommes qu'à nos débuts : Voyager 1 se traîne encore aux confins du système solaire et, à sa vitesse actuelle, il lui faudrait plusieurs dizaines de milliers d'années pour atteindre l'étoile la plus proche du Soleil, dans le système stellaire Alpha du Centaure. Quant à sortir de la Voie lactée, il ne faut pas même y songer !

En matière d'exploration spatiale, l'homme n'a fait que sortir de son berceau, la Terre, pour découvrir non sans curiosité ni enthousiasme sa chambre, le système solaire. Un jour, il apprendra à marcher, c'est-à-dire à voyager à une vitesse proche de celle de la lumière, et même à utiliser des moyens de transport, comme les trous de ver, pour sortir de la Voie lactée, quitter le Groupe local de galaxies, dépasser le Superamas local, voire gagner un autre Univers...

La route de l'exploration est encore longue et sinueuse. Alors que nous sommes à la veille d'entrer dans une nouvelle ère, il vaut la peine de nous retourner pour mesurer le chemin parcouru, comprendre ses principales étapes et porter un regard d'ensemble sur l'évolution de nos moyens techniques.

10.1. LES VOLS NON HABITÉS

Après avoir mis au point des lanceurs capables de dépasser l'atmosphère et d'atteindre l'espace, nous ou nos machines avons quitté l'environnement terrestre, nous sommes posés sur la Lune et avons exploré une à une les autres planètes du système solaire, ainsi que des astéroïdes, des comètes, des planètes naines et autres corps célestes particuliers.

Dans le contexte historique de la Guerre froide, l'espace a fait office d'arène pour les superpuissances qui souhaitaient montrer les muscles, exhiber leur force. Pendant plus de 40 ans, du fait de cette rivalité, la technologie spatiale a connu des progrès fulgurants et de nombreux concepts ingénieux, parfois presque impensables, sont devenus réalité. Au cours de cette période, l'humanité a visité toutes les planètes du système solaire – hormis Pluton, qui a depuis été rétrogradée en planète naine ; des sondes ont été envoyées vers les confins du système solaire ; des astronautes sont allés dans l'espace ; des stations spatiales adaptées aux séjours prolongés ont été assemblées ; et des hommes ont marché sur la Lune et ramené des échantillons de son sol.

Ce développement technologique rapide est allé de pair avec des investissements massifs, de sorte que la course aux armements et à l'espace, à la fin de la Guerre froide, a conduit l'Union soviétique au bord d'un gouffre économique et placé les États-Unis dans une situation difficile. Cependant, les retours sur investissement ont été à la hauteur des sommes engagées, car le développement du secteur spatial a entraîné celui d'autres domaines d'activité avec lui, qui ont profondément modifié nos modes de vie. Entre autres exemples de retombées directes, citons les communications, la radiodiffusion, la

navigation, la télédétection, la gestion plus efficace des cultures... Les retombées indirectes sont encore plus nombreuses et vont du stylo à bille à tous les produits électroniques. Il est juste de dire que la technologie spatiale est étroitement liée à la révolution informatique et à la prospérité de l'après-guerre froide, pour ne citer que cela.

Depuis la dissolution de l'Union soviétique en 1991, qui a marqué la fin de la guerre froide il y a plus de 30 ans, un grand nombre de satellites de télédétection, de communication, de navigation ou autres ont été lancés, qui offrent des services dans le monde entier. Des pays ou des régions tels que l'Europe, la Chine, le Japon, l'Inde, etc. ont également développé des moyens pour accéder à l'espace.

10.1.1. La course à la Lune

La Lune, qui est à la fois le plus brillant des astres du ciel nocturne et notre plus proche voisin, a constitué un enjeu majeur de la course spatiale américano-soviétique. Le 4 janvier 1959, moins d'un an et demi après le lancement du premier satellite au monde, l'Union soviétique marquait un point important avec le survol de la Lune à environ 6 000 kilomètres de distance par la sonde Luna 1. Ce corps artificiel est également le premier du genre à s'être libéré de la pesanteur terrestre et tourne depuis autour du Soleil à la manière d'une micro-planète.

En plus de la Lune, l'Union soviétique prit l'avantage sur les États-Unis en matière de vol habité. Le 12 avril 1961, en effet, Youri Gagarine devint le premier homme à atteindre l'espace, au cours d'un vol de 108 minutes dans le vaisseau Vostok, avant de retourner sain et sauf sur Terre. Les États-Unis n'étaient toutefois pas très loin derrière : moins d'un mois plus tard, le 5 mai, l'américain Alan Shepard, aux commandes du Freedom 7, accéda lui aussi à l'espace¹. Et contrairement-

1. Le 9 février 1971, à l'âge de 47 ans, Alan Shepard retourna dans l'espace comme commandant de la mission Apollo 14, qui effectua le troisième alunissage de l'histoire. En dépit de l'inconfort de ses gants et de l'inconfort de sa combinaison spatiale, il parvint à frapper deux balles de golf sur le sol lunaire, devenant ainsi le premier et, à ce jour, l'unique joueur de sa catégorie.

ment à Gagarine, dont le vol était entièrement automatisé, Shepard disposait d'une certaine marge de manœuvre sur son vaisseau. À ce stade, cependant, l'Union soviétique avait remporté les trois grandes courses, celle du lancement du premier satellite, celle de l'exploration lunaire et celle du vol habité. Et comme toujours en pareil cas, le gagnant recevait tous les honneurs sous le regard silencieux de son rival. Les États-Unis, qui ne pouvaient pas rester éternellement à la traîne de l'Union soviétique, se devaient réagir vite et fort.

De fait, en 1961, les États-Unis initièrent le programme Apollo, avec pour objectif d'envoyer un homme sur la Lune dans les dix ans. Ils prenaient là une longueur d'avance sur l'Union soviétique, qui ne lança son propre programme de voyage habité vers la Lune qu'en 1964. Pour préparer la mission d'Apollo, les États-Unis lancèrent deux séries de sondes lunaires, neuf Ranger et sept Surveyor.

Au cours des années qui suivirent l'annonce de ces projets, l'Union soviétique conserva toutefois l'avantage. Ainsi, en 1966, elle parvint pour la première fois au monde à poser en douceur un engin spatial sur la Lune, en l'occurrence la sonde Luna 9, et à en positionner un en orbite autour de la Lune, en l'occurrence Luna 10.

En 1967, avec la construction de la fusée Saturn V, la plus puissante de l'histoire, les États-Unis acquirent un avantage décisif. Dans le même temps, la fusée N-1 prévue pour le programme soviétique essuya quatre échecs successifs lors des tests, ce qui contraignit le pays à se retirer tristement de la course au premier homme sur la Lune.

Le 16 juillet 1969 décolla la Saturn V portant l'équipage américain de la mission Apollo 11. À 2 h 56 UTC, le 21 juillet, l'astronaute Neil Armstrong posa son pied sur la Lune (figure 10.1) en prononçant ces mots devenus légendaires : « C'est un petit pas pour l'homme, mais un bon de géant pour l'humanité. »

L'alunissage réussi a marqué la victoire des États-Unis dans la course à la Lune ; le programme Apollo a établi la domination du pays dans l'espace. Cet exploit restera à jamais comme une grande date de l'histoire de l'humanité.



Figure 10.1 | Le premier homme sur la Lune grâce à la mission Apollo 11.

L'évènement est en effet majeur pour la civilisation. Pour la première fois, l'homme quitte sa maison, la Terre, pour se poser sur un autre corps céleste, à la fois étrange et familier. Il représente le summum des capacités d'ingénierie et d'organisation du xx^e siècle.

La réussite a toutefois eu son prix. Les sommes investies dans le programme Apollo auraient pu doubler le nombre de porte-avions de la marine américaine de l'époque. Après avoir ainsi repris l'avantage dans la course à la Lune, les États-Unis décidèrent finalement d'annuler les missions Apollo 18 à 20, afin de concentrer leurs forces sur l'exploration planétaire et le programme de navettes spatiales.

Si la fin de la guerre froide a sans doute ralenti l'exploration lunaire, elle n'en a pas sonné le glas pour autant. L'Europe, le Japon, l'Inde et la Chine se sont aussi lancés dans la course. Et l'alunissage réussi de la sonde Chang'e-3 le 14 décembre 2013 (figure 10.2) a placé la Chine en tête de cette nouvelle manche !

Le pays ne s'est pas arrêté là. La sonde Chang'e-4 fut ensuite la première au monde à alunir en douceur sur la face cachée pour l'explorer. La Lune faisant obstacle aux communications dans ce cas de figure, le satellite Queqiao avait été auparavant lancé, le 20 mai 2018, puis positionné sur le deuxième point de Lagrange² du système Terre-Lune, afin de servir de relais. Chang'e-4 fut lui-même lancé le 7 décembre 2018 depuis la base de lancement de Xichang en Chine. Le 3 janvier 2019, l'atterrisseur et le rover Yutu 2 se sont posés près du cratère Von Kármán, dans le bassin Aitken, lui-même situé dans l'hémisphère sud de la Lune. Les données collectées par Chang'e-4

2. Les points de Lagrange, également appelés points de libration, sont des solutions particulières du célèbre problème des trois corps en mécanique céleste. Elles correspondent aux positions sur lesquelles un petit corps reste immobile sous l'effet de la gravité combinée de deux corps plus massifs. Ces points de Lagrange sont au nombre de cinq, traditionnellement notés de L1 à L5, dont deux seulement sont stables, ce qui signifie que le petit corps reste immobile même s'il est légèrement perturbé par des forces extérieures. Les trois premiers points de Lagrange (L1, L2 et L3) ont été déterminés par le mathématicien suisse Leonhard Euler en 1767, les deux derniers (L4 et L5) par le mathématicien français Joseph-Louis Lagrange en 1772.



Figure 10.2 | L'atterrisseur Chang'e-3 et le rover lunaire Yutu se prenant mutuellement en photo.

permettent aux scientifiques de mieux comprendre la composition des roches lunaires. De plus, l'environnement électromagnétique étant très propre sur la face cachée de la Lune, diverses recherches et expérimentations sur les basses fréquences ont été menées, qui devraient aboutir à terme à des avancées significatives dans ce domaine.

Au 19 février 2021, Chang'e-4 avait travaillé sur la surface lunaire pendant 778 jours terrestres et Yutu 2 avait parcouru 652,62 mètres, ses paramètres étant toujours restés nominaux et ses instruments scientifiques fonctionnant normalement. Cette production continue de données scientifiques de première main répondra en profondeur à sortes de questions qui se posaient sur la face cachée de la Lune.

Le 23 novembre 2020, ce fut au tour de la sonde Chang'e-5 d'être lancée dans l'espace par une fusée Longue Marche 5. Son point d'orgue fut le retour sur Terre d'une capsule, le 16 décembre 2020 au matin dans la bannière de Siziwang en Mongolie-Intérieure, qui rapportait des échantillons de sol lunaire, une première depuis le programme américain Apollo. Dans le même temps, la mission de l'orbiteur fut étendue, avec pour objectif le premier point de Lagrange du système Terre-Soleil, situé à environ 1,5 million de kilomètres de nous. Le succès de la mission Chang'e-5 montre ainsi que la Chine est capable d'aller sur la Lune, d'y atterrir et de revenir ensuite sur Terre. Il ouvre un nouveau chapitre de l'histoire spatiale chinoise et jette les bases d'un projet de séjour habité sur la Lune.

Le 25 novembre 2020, lors d'un Forum international de l'aéronautique et de l'aérospatial qui a eu lieu dans la province de Hainan, en Chine, l'Agence spatiale chinoise, tout en confirmant la poursuite progressive du programme Chang'e, et notamment le déploiement des missions Chang'e-6, Chang'e-7 et Chang'e-8, a annoncé qu'elle projetait également de construire sur la Lune une base internationale de recherche. Dans le futur, la Chine mènera également des missions de collecte d'échantillons sur Mars, ainsi que des missions d'exploration de petits corps célestes, du système de Jupiter et du milieu interplanétaire.

10.1.2. Le difficile voyage vers Mars

Mars est aujourd'hui l'objet de tous les regards. En dehors de la Terre, c'est la seule planète dont les conditions ne sont pas trop difficiles. Mercure, trop proche du Soleil, est dépourvue d'atmosphère ; la surface de Vénus est brûlante ; Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune sont trop éloignées du Soleil et très froides : il est presque impossible de survivre sur ces planètes. En comparaison, Mars, avec son atmosphère, sa température relativement propice à la vie et la présence éventuelle d'eau, fait office de petit paradis.

La route vers Mars a été exceptionnellement difficile. Le 10 octobre 1960, 20 mois seulement après la première visite de la Lune par la sonde Luna 1, l'Union soviétique lançait une sonde à destination de Mars. Mais cette mission échoua, de même que les quatre qui ont rapidement suivi. Les États-Unis ne furent guère plus heureux : en novembre 1964, leur première sonde martienne, Mariner 3, dévia de sa trajectoire prévue. Mais après ces six échecs consécutifs, Mars le guerrier³ rendit enfin les armes. Le 14 juillet 1965, la sonde Mariner 4 survola la planète à une altitude de 9 800 kilomètres et renvoya les premières photos de sa surface. Les États-Unis lancèrent ensuite Mariner 5, Mariner 6 et Mariner 7 dans la foulée, accumulant toujours plus de données. Quant à l'Union soviétique, ses deux autres sondes martiennes, lancées en 1969, ont explosé.

En 1971, les États-Unis lancèrent Mariner 8, sans succès, puis Mariner 9, qui devint le premier engin spatial à orbiter avec succès autour de Mars et qui permit d'étudier en détail sa surface. La même année, l'Union soviétique, en dépit ses échecs répétés, effectua trois nouvelles tentatives : Cosmos 419, qui échoua faute d'avoir pu se séparer du dernier étage de son lanceur ; Mars 2 qui réussit enfin à atteindre l'orbite martienne ; et surtout Mars 3, le premier engin spatial à atterrir sur Mars, bien qu'il ait perdu le contact avec la Terre après 20 secondes d'activité seulement. Par la suite, les États-Unis lancèrent Viking 1 et Viking 2, qui atterrirent également sur Mars et

3. Mars tient son nom du dieu de la guerre dans la mythologie grecque.

purent récolter une belle moisson de données scientifiques. Du côté de l'Union soviétique, la série noire a continué. Aucune des six sondes lancées avant la dissolution n'a atteint leurs objectifs prévus.

Durant les années 90, le taux d'échec des missions martiennes est resté élevé : la sonde russe Mars 96, la sonde japonaise Nozomi et les sondes américaines Mars Observer, Mars Climate Orbiter, Mars Polar Lander et Deep Space 2 ont toutes échoué. Certaines sondes ont toutefois atteint leurs objectifs : Mars Global Surveyor et Mars Pathfinder, toutes deux lancées par les États-Unis en 1996, la dernière embarquant Sojourner, le premier rover à avoir roulé sur Mars.

Après le passage de l'an 2000, l'exploration martienne s'est poursuivie sur cette voie plus favorable. Les États-Unis ont lancé la sonde 2001 Mars Odyssey, les rovers Spirit et Opportunity, les sondes Mars Reconnaissance Orbiter et Phoenix, ainsi que le rover Curiosity. La mission européenne Mars Express réussit partiellement : si l'orbiteur a réussi à atteindre Mars, l'atterrisseur Beagle 2 a perdu tout contact avec la Terre. En 2013, l'Inde s'est également jointe à l'exploration martienne avec le lancement réussi de la sonde Mangalyaan, qui a atteint l'orbite de Mars en 2014. En février 2021, la sonde Mars Hope, lancée par les Émirats arabes unis, et la sonde Tianwen 1, lancée par la Chine ont successivement réussi à atteindre l'orbite martienne, tandis que le rover américain Perseverance parvenait à se poser à proximité du cratère Jezero, un exploit spectaculaire qui a suscité un nouvel engouement pour l'exploration de Mars.

Même si depuis le ^{xx}e siècle, de nombreuses sondes lancées sur Mars ont fourni de grandes quantités de données, il reste encore beaucoup à faire, et notamment sur ce qui concerne la présence de l'eau et de la vie. Le taux d'échecs des missions martiennes reste élevé, avec seulement un tiers des plus de 30 missions ayant atteint leurs objectifs prévus. Il faudra peut-être compter encore plusieurs décennies, voire plus d'un siècle, pour que les êtres humains puissent atterrir et vivre sur Mars.

10.1.3. Un messenger pour Mercure

Mercury étant très proche de la Terre à vol d'oiseau, il semble à première vue qu'une sonde spatiale puisse l'atteindre sans consommer beaucoup de carburant, en profitant de la gravité du Soleil. En réalité, c'est tout le contraire : la quantité de carburant requise dépasse celle qu'il faudrait utiliser pour se rendre sur les planètes géantes plus éloignées. De plus, la proximité même du Soleil pose un gros problème de protection thermique. De fait, l'exploration de Mercure constitue un énorme défi.

Le 3 novembre 1973, les États-Unis ont lancé la première sonde à destination de Mercure, Mariner 10, qui a d'ailleurs inauguré une stratégie dite d'*assistance gravitationnelle*. Pour économiser du carburant, la sonde a d'abord utilisé la gravité de Vénus pour réduire sa vitesse par rapport au Soleil, puis la gravité du Soleil pour atteindre l'orbite de Mercure. Cette mission a été un énorme succès. Le 29 mars 1974, Mariner 10 a effectué son premier survol rapproché de Mercure, à une distance d'environ 700 kilomètres d'altitude. Le 16 mars 1975, la sonde a survolé Mercure à une distance d'environ 300 kilomètres seulement, une distance incroyable relativement à un voyage de plusieurs centaines de millions de kilomètres.

Durant le temps limité dont elle disposait, Mariner 10 a pris environ 2 800 photos de Mercure, soit environ 40 % de sa surface, dévoilant ainsi le spectacle d'un paysage aride et désolé. Grâce au spectromètre dont elle était équipée, Mariner 10 pu mettre en évidence de grands écarts de température entre la face ensoleillée et la face cachée. Elle a également constaté la présence d'un faible champ magnétique et d'une atmosphère très ténue.

Le 3 août 2004, la Nasa a également lancé la sonde Messenger, qui a atteint l'orbite de Mercure en mars 2011 après avoir parcouru 7,9 milliards de kilomètres en 6 ans et demi. Elle a bénéficié durant le voyage de l'assistance gravitationnelle de Vénus et de la Terre, exactement comme si elle avait sauté plusieurs fois sur des trampolines pour aller plus loin. Pour limiter sa consommation de carburant, puis

intégrer à vitesse réduite l'orbite de Mercure, elle a eu recours six fois à l'assistance gravitationnelle.

On doit à Messenger nombre de travaux précieux, dont une cartographie tridimensionnelle très détaillée de la surface de la planète et la reconstitution de son histoire géologique, passée par des éruptions volcaniques. Elle a également étudié avec précision son champ magnétique et son atmosphère, même si l'un et l'autre sont négligeables comparés à ceux de la Terre. La découverte la plus surprenante à cet égard est sans doute la présence d'une certaine quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, ainsi que la présence d'eau et de composés organiques dans des cratères d'impact près du pôle nord – même si nous sommes encore très loin de la découverte d'une forme de vie. Après environ quatre ans de bons et loyaux services en orbite, tombée à court de carburant, Messenger a finalement terminé sa mission en s'écrasant au sol, laissant derrière elle un cratère d'environ 15 mètres de diamètre.

Le 19 octobre 2018, le lanceur Ariane 5 a lancé la sonde BepiColombo, baptisée ainsi en l'honneur de l'ingénieur et scientifique italien Giuseppe « Bepi » Colombo (1920-1984), qui est précisément à l'origine de l'utilisation de l'assistance gravitationnelle en matière de voyage spatial. Développée conjointement par l'Europe et le Japon, elle comprend deux orbiteurs, le Mercury Planetary Orbiter (MPO), sous la responsabilité de l'ESA, l'Agence spatiale européenne, et le Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO), sous la responsabilité de la JAXA, l'Agence spatiale japonaise. Le voyage de BepiColombo jusqu'à Mercure devrait prendre sept ans et bénéficier de l'assistance gravitationnelle de la Terre, de Vénus, deux fois, et de Mercure, six fois, tout cela pour que la sonde ajuste progressivement sa trajectoire et intègre l'orbite de ce voisin faussement proche en 2025. Si tout se passe bien, une fois parvenue en orbite autour de Mercure, BepiColombo se scindera en ses deux composantes qui œuvreront durant une année. Le MPO s'attellera à une cartographie globale de Mercure, en observant sa surface et les

couches peu profondes sous plusieurs longueurs d'onde. L'opération aidera les scientifiques à mieux comprendre l'histoire de Mercure et son évolution par rapport au Soleil, dont elle est la planète la plus proche, c'est-à-dire au fond la naissance du système solaire. Quant au MMO, il se concentrera principalement sur l'étude du champ magnétique très ténu de Mercure et de la magnétosphère résultant du vent solaire. Les mécanismes qui président à la production et à l'évolution du champ magnétique restent en effet encore pour partie bien mystérieux. BepiColombo, avec la plus vaste et la plus détaillée étude de Mercure effectuée à ce jour, apportera sans doute son lot de découvertes majeures.

L'ASSISTANCE GRAVITATIONNELLE

Augmenter ou diminuer la vitesse d'un engin spatial demande en principe une grande quantité de carburant, et cela d'autant plus que la variation envisagée est importante. L'utilisation de la gravité d'un corps céleste permet toutefois de modifier la vitesse de façon significative et à moindre coût énergétique, par le bénéfice de ce qu'on appelle *l'effet de fronde gravitationnelle* ou encore *l'assistance gravitationnelle*.

Son principe, assez simple, peut se visualiser en considérant l'engin spatial comme une balle de ping-pong et le corps céleste comme une raquette. Si la balle se dirige vers une raquette immobile, en supposant la collision élastique, elle rebondit avec la même vitesse. Mais lorsque la raquette se déplace dans la direction de la balle, la vitesse de rebond sera différente, en l'occurrence plus importante. En jouant sur les différences de vitesse et de direction des deux objets, on peut accélérer ou ralentir la balle, ou plutôt l'engin spatial.

La façon d'utiliser l'assistance gravitationnelle varie selon les missions. Une exploration des confins du système solaire, par exemple, demandera d'augmenter fortement la vitesse, afin d'échapper à la gravité du Soleil. Pour explorer Mercure, il faudra au contraire viser à réduire la vitesse afin d'intégrer son orbite.

10.1.4. Le périple de Voyager

La sonde Voyager 1 marque le point le plus lointain atteint par l'homme dans l'espace. Située à environ 160 unités astronomiques de la Terre en juillet 2023, elle continue de s'éloigner à une vitesse de 3,6 unités astronomiques par an. Ses signaux électromagnétiques mettent 20 heures à nous parvenir.

L'objectif initial de la mission Voyager consistait à exploiter une configuration planétaire qui ne se produisait que tous les 176 ans et qui permettait, par assistance gravitationnelle, à une seule sonde de survoler successivement Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Les sondes Voyager 1 et Voyager 2 ont été lancées pour profiter pleinement de cette occasion favorable.

Voyager 2 fut la première à partir, le 20 août 1977, suivie par Voyager 1, le 5 septembre. Cette dernière atteignit Jupiter en janvier 1979 ; l'autre, un peu plus tard, en juillet de la même année. Les deux sondes explorèrent Jupiter, étudiant son champ magnétique, son environnement électromagnétique et ses satellites. Elles percèrent les mystères de la Grande Tache rouge, découvrirent les anneaux de Jupiter et l'activité volcanique de son satellite Io.

En novembre 1980, après avoir tiré parti de l'assistance gravitationnelle de Saturne, Voyager 1 avait achevé sa visite des planètes et s'est rapidement dirigée vers la limite du système solaire. En août 1981, Voyager 2 arriva à son tour près de Saturne et étudia la partie supérieure de son atmosphère, recueillant des données sur sa température et sa densité. La sonde poursuivit alors son voyage et atteignit Uranus en 1986, dont elle découvrit plus de 10 satellites, la présence d'un champ magnétique et de ceintures de rayonnement. En 1989, elle atteignit Neptune, la dernière grande planète du système solaire qui restait à explorer (depuis la rétrogradation de Pluton en planète naine), avant de se diriger elle aussi vers la limite du système solaire.

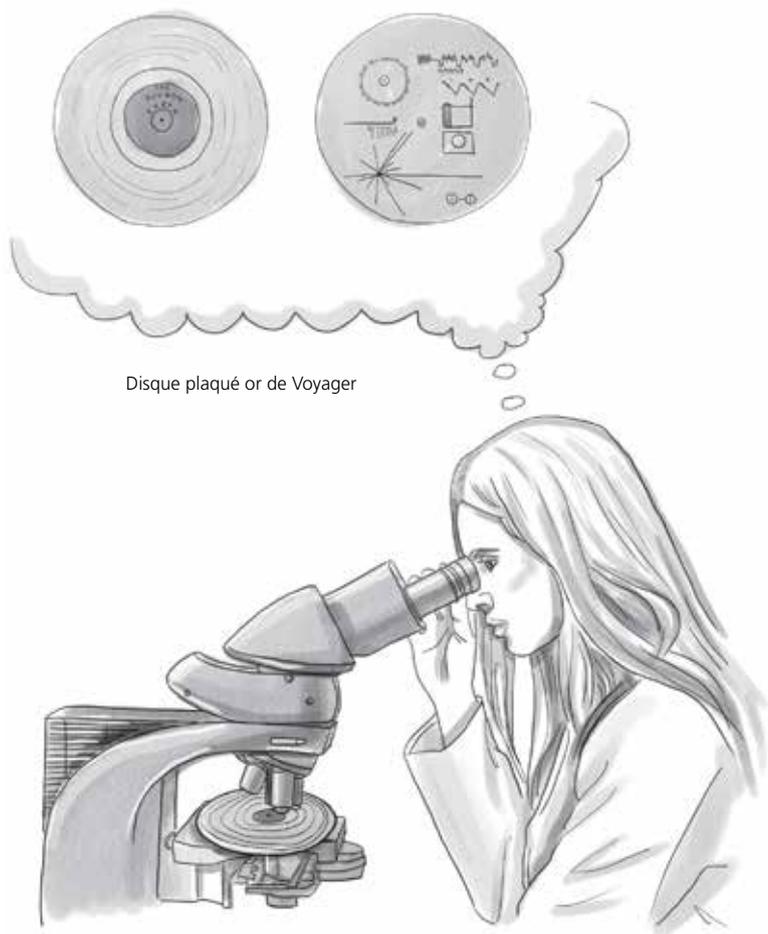
En février 2011, Voyager 1 observa le début d'un ralentissement du vent solaire. Le 12 septembre 2013, la NASA confirma que la sonde

était effectivement parvenue à la limite de l'héliosphère et entrait dans l'espace interstellaire.

Voyager 1 et Voyager 2 ont chacune embarqué un disque de cuivre plaqué or de 30 centimètres de diamètre portant un message de l'humanité à destination d'éventuelles créatures extraterrestres. Représentatif de la diversité de la vie sur Terre et des cultures humaines, il contient des salutations en 55 langues, dont quatre chinoises (mandarin, minnan, cantonais et wu) et certaines très rares comme l'akkadien jadis parlé Mésopotamie antique. On y entend aussi durant 90 minutes une variété de sons naturels et 27 échantillons de compositions musicales d'époques différentes, allant de *La Flûte enchantée*, de Mozart, à *Johnny B. Goode*, de Chuck Berry, en passant par *Gao Shan Liu Shui*, joué sur un instrument traditionnel chinois. Le message comprend aussi 115 images représentant des planètes du système solaire, des végétaux, des animaux, des hommes en diverses situations, des réalisations techniques, etc. Sur les couvercles en aluminium protégeant les disques, conçues pour résister aux impacts de micrométéorites, figurent également des instructions sur la façon de lire les disques, grâce au stylet à pointe de diamant dont ils sont accompagnés. Leur qualité sonore devrait ainsi perdurer un milliard d'années. Un échantillon d'uranium 238 hautement purifié y a également été joint, qui permettra à ceux qui le trouveront, grâce à sa demi-vie – le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux se désintègrent – de dater de lancement des sondes (figure 10.3).

Un message de Kurt Waldheim, alors secrétaire général de l'ONU, et de Jimmy Carter, le président américain, ont aussi été gravés sur les disques. Le début du second discours peut se traduire ainsi :

« Ceci est un présent d'un petit monde éloigné, un aperçu de nos sons, de notre science, de nos images, de notre musique, de nos pensées et de nos sentiments. Nous essayons de survivre à notre temps de sorte que nous puissions vivre un peu dans le vôtre. »



Disque plaqué or de Voyager

Figure 10.3 | Une technicienne inspectant un disque de Voyager.

10.1.5. Le rêve d'Icare

Le programme Helios, développé conjointement par l'Allemagne et la NASA, a été conçu pour étudier le Soleil et le milieu interplanétaire qui lui est proche, par la détection du vent solaire, du champ magnétique, du rayonnement cosmique, de la poussière interplanétaire, etc. Il est composé de deux sondes quasi-jumelles, Helios 1 et Helios 2, qui ont pour principale caractéristique de pouvoir endurer la chaleur très élevée du rayonnement solaire. Pour donner une idée, la température peut atteindre les 400 degrés Celsius alors que les cellules solaires fonctionnent normalement à une température de 128 degrés. Les sondes ont été respectivement lancées le 10 décembre 1974 et le 15 janvier 1976 depuis le Centre spatial Kennedy, à Cape Canaveral en Floride, aux États-Unis.

Le 17 avril 1976, la sonde Helios 2 a établi le record de proximité avec le Soleil, en passant à 0,29 unités astronomiques de sa surface, soit environ 43,5 millions de kilomètres. Les objectifs principaux du programme Helios ont été atteints au début des années 1980. Les sondes ont transmis des données jusqu'en 1985 et, quoique ne fonctionnant plus, sont restées en orbite elliptique autour du Soleil depuis lors.

Les sondes américaines Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1 et Voyager 2 avaient également pour mission partielle d'observer le Soleil. Une autre sonde américaine, Ulysses, qui lui était entièrement dédiée, a été lancée par la navette spatiale Discovery en octobre 1990. D'un poids de 371 kg, alimentée par un réacteur nucléaire au plutonium, elle a atteint le pôle Sud du Soleil quatre ans plus tard et a pu mener à bien une observation complète de notre étoile. Conçue pour durer cinq ans, la sonde a fonctionné en réalité pendant 17 ans, avant de s'éteindre faute d'énergie.

La NASA a également lancé la sonde solaire Parker en août 2018. Le 29 octobre suivant, l'engin a battu le record de proximité avec le Soleil établi par la sonde Helios 2 en 1976, en le portant à 42,7 millions de kilomètres de sa surface. L'objet artificiel le plus proche du Soleil

jamais envoyé, se rapprochant toujours plus au fil de ses orbites, s'est trouvé en 2023 à 8,5 millions de kilomètres de la surface, avec pour résultat une moisson de données nouvelles sur l'activité de la couronne solaire, et à travers elle une meilleure compréhension de l'origine du vent solaire et de la physique des particules de haute énergie.

10.1.6. Autres missions

En plus des grandes planètes, le système solaire comprend des planètes naines, des comètes et des astéroïdes, autant de corps célestes que l'exploration spatiale n'a pas oubliés !

La sonde américaine New Horizons a été lancée le 19 janvier 2006 avec pour objectif principal Pluton, puis son plus grand satellite, Charon, et des corps de la ceinture de Kuiper. Après avoir battu le record de vitesse initiale, c'est-à-dire de vitesse à la séparation du dernier étage du lanceur, elle a traversé le système plutonien en 2015. Poursuivant sa route vers la ceinture de Kuiper, elle y a alors ciblé un astéroïde appelé 2014 MU₆₉, (486958) Arrokoth ou plus simplement Ultima Thulé, qu'elle a frôlé le 1^{er} janvier 2019 à une distance de 3 500 km et à une vitesse d'environ 50 000 km/h. Cette grande première sur la ceinture de Kuiper s'est déroulée à environ 6,5 milliards de kilomètres du Soleil et 1,6 milliard de kilomètres de Pluton.

New Horizons n'était toutefois pas le premier engin spatial à visiter une planète naine. Dès le 7 mars 2015, la sonde américaine Dawn avait visité Cérès qui, comme Pluton, jouit de ce statut depuis l'assemblée générale de l'Union astronomique internationale en 2006 – elle était auparavant considérée comme le plus grand astéroïde connu.

La visite des comètes a commencé dans les années 1980 avec le lancement des sondes soviétiques Vega 1 et Vega 2, de la sonde européenne Giotto, des sondes japonaises Sakigake et Suisei, et de la sonde américaine International Cometary Explorer (ICE). Cette flottille avait été développée à l'occasion du retour de la comète de Halley en

1986. Par la suite, les comètes ont reçu les visites de diverses sondes, dont les américaines Stardust, qui a réussi à ramener sur Terre des échantillons de queue, puis Deep Impact, la première à produire un cratère d'impact. Mais la plus remarquable est sans doute la sonde européenne Rosetta, la première à s'être placée en orbite autour d'une comète et à atterrir sur sa surface. Elle tient bien sûr son nom de la pierre de Rosette, une stèle gravée portant un même texte en hiéroglyphes égyptiens, en démotique et en grec ancien, qui a permis le déchiffrement des hiéroglyphes et ouvert la voie à la compréhension de l'Égypte antique. En se focalisant ainsi sur une comète, un corps qui préservent des informations primordiales durant des milliards d'années, les scientifiques européens, quant à eux, visaient à mieux comprendre la formation et l'évolution du système solaire.

Lancée le 2 mars 2004, Rosetta a intégré l'orbite de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko dix ans plus tard, le 6 août 2014, au terme d'un parcours de 6,4 milliards de kilomètres. Après être restée plus de 3 mois en orbite, la sonde a largué à sa surface l'atterrisseur Philae. Celui-ci est parvenu à se poser mais a rebondi par malchance près d'une paroi, d'où il ne put récupérer suffisamment de lumière solaire pour fonctionner correctement. Après 57 heures de fonctionnement, ses batteries épuisées, Philae est entré dans un état d'hibernation éternel.

Des observations de Rosetta sur la forme et la topographie de 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, les scientifiques ont déduit que comète résultait probablement de la collision de deux autres. Grâce aux mesures effectuées par Philae du rapport deutérium-hydrogène sur la comète, très différent du rapport mesuré sur Terre, ils estiment que les eaux terrestres et cométaires sont d'origine différentes.

On considère aussi que les astéroïdes, comme les comètes, portent trace d'informations très anciennes et précieuses sur la naissance du système solaire. Formés en même temps que le Soleil, il y a environ 4,6 milliards d'années, leur surface rocheuse n'a pas subi de processus géologiques complexes, contrairement à celle de la Terre, de sorte

qu'ils jouent un peu le rôle de « fossiles » témoignant de l'évolution du système solaire. Leur exploration pourrait ainsi nous livrer des indices sur des questions scientifiques majeures telles que l'origine de l'eau et de la vie.

Le premier survol jamais effectué d'un astéroïde, en l'occurrence (951) Gaspra, est celui de la sonde américaine Galileo, alors qu'elle était en chemin vers Jupiter, sa destination finale. La première sonde spatiale spécialisée dans l'exploration de petits corps célestes est la sonde NEAR Shoemaker qui, lancée par la NASA en 1996, a observé sous toutes les coutures l'astéroïde Eros en 2000 et 2001. Quant au premier survol d'un astéroïde par la Chine, il a été réalisé par la sonde Chang'e-2, à la suite de sa mission lunaire. Grâce à un excès de carburant, elle s'est d'abord dirigée vers le deuxième point de Lagrange du système Terre-Lune, puis a continué sa route vers l'astéroïde (4179) Toutatis, et a établi un record en le frôlant à une distance de 3,2 kilomètres seulement. Par la même occasion, la Chine devint la quatrième puissance à mener une mission d'exploration d'astéroïdes après les États-Unis, l'Europe et le Japon. En avril 2019, l'Agence spatiale chinoise a annoncé qu'elle lancerait une sonde vers 469219 Kamo'oalewa (aussi baptisé 2016 HO₃), un astéroïde qui orbite autour de la Terre. Elle atterrira à sa surface et collectera des échantillons qui seront rapportés par une capsule de retour. Utilisant l'assistance gravitationnelle de la Terre et de Mars, la sonde se dirigera ensuite vers la ceinture principale d'astéroïdes afin d'y étudier *in situ* la comète 133P/Elst-Pizarro. De classe spectrale inconnue, l'astéroïde 469219 Kamo'oalewa mesure de 40 à 100 mètres de diamètre, pour une densité d'environ 2,7 grammes par centimètre cube. Il s'agit d'un « quasi-satellite » de la Terre, qui orbite autour d'elle de façon relativement proche et très stable. Quant à la comète 133P/Elst-Pizarro, c'est la première à avoir été découverte dans la ceinture principale d'astéroïdes. Elle possède à la fois les caractéristiques orbitales des astéroïdes et les caractéristiques d'activité des comètes. Le diamètre maximal de son noyau est

d'environ 5,4 kilomètres, avec une densité d'environ 1,4 gramme par centimètre cube. Les comètes de la ceinture principale forment une catégorie récemment découverte de petits corps du système solaire.

La plus emblématique des rares missions d'exploration des petits astéroïdes reste aujourd'hui celle menée par la sonde japonaise Hayabusa. Lancée en 2003, elle a pour la première fois au monde collecté puis renvoyé sur Terre un échantillon du sol d'un astéroïde, en l'occurrence l'astéroïde (25143) Itokawa. La mission n'a pas été de tout repos, c'est le moins qu'on puisse dire, avec des pannes de moteur, l'échec du largage du robot Minerva, des fuites de carburant, des pertes de contrôle de l'attitude, des interruptions de communication, une fenêtre de retour manquée, un retard de trois ans pour le retour sur Terre, une défaillance de la batterie, une panne de carburant et des problèmes avec le propulseur ionique. En dépit de toutes ces difficultés, Hayabusa est parvenue en 2010 à ramener sur Terre environ 1 500 particules prélevées sur Itokawa.

Une grande partie de la mission consistait à valider diverses technologies propres à l'exploration d'objets célestes mineurs. Fort de cette première expérience, l'Agence spatiale japonaise a lancé en 2014 la sonde Hayabusa 2, avec pour objectif l'astéroïde (162173) Ryugu, susceptible de renfermer de l'eau et des composés organiques. Parvenue à destination en juin 2018 et après une phase d'étude, elle a largué deux mini-rovers, une nouvelle première sur un astéroïde, et un atterrisseur, MASCOT, avant de se poser elle-même deux fois en février et juillet 2019. Elle a alors prélevé des échantillons, dont une fois en sous-sol après avoir créé un cratère d'impact, qui ont été rapportés sur Terre par une capsule le 5 décembre 2020.

La première sonde dédiée à l'étude des petits corps célestes développée par la NASA, OSIRIS-REx, a été lancée le 8 septembre 2016. Après plus de deux ans de voyage, elle a atteint sa cible, l'astéroïde (101955) Bénou en décembre 2018. Le nom de cette sonde, acronyme de Origins-Spectral Interpretation-Resource Identification-Security-Regolith

Explorer (« Origines – Interprétation spectrale – Identification des ressources – Sécurité – Explorateur de régolithe ») fait bien entendu référence au dieu égyptien Osiris, associé à la fois à la fertilité et à l'au-delà, ce qui n'est pas inadapté pour une mission en lointaine quête d'informations sur l'origine de la vie.

Bénou est un astéroïde de type C, c'est-à-dire riche en carbone, d'un diamètre d'environ 500 mètres, à la surface irrégulière mais très ancienne. Les scientifiques estiment qu'il s'est formé il y a 4,5 ou 4,6 milliards d'années, ce qui en fait un bon témoin des débuts du système solaire. Les calculs montrent que Bénou a 1 chance sur 2 700 de heurter la Terre au ^{XXII}^e siècle, ce qui en fait un potentiel « astéroïde de l'Apocalypse ».

Le 20 octobre 2020, OSIRIS-REx a prélevé un échantillon d'environ 400 grammes de sol, au terme d'un contact de 6 secondes. Cet échantillon devrait arriver sur Terre en septembre 2023.

Les sondes Rosetta et Hayabusa ont dû surmonter de nombreux obstacles et vivre de nombreux rebondissements pour venir à bout de leur mission. Percer les mystères de l'Univers ne se fait pas sans difficultés et demandera toujours plus de missions d'exploration, afin d'étudier de manière aussi complète que possible les comètes, les astéroïdes et les objets de la ceinture de Kuiper. Outre leur importance pour la recherche scientifique, les astéroïdes regorgent également de ressources précieuses qui attendent encore d'être exploitées.

10.2. LES VOLS HABITÉS

10.2.1. *Les pionniers*

Bien sûr, les sondes que nous avons lancées ont exploré les huit grandes planètes et progressent toujours plus loin vers les limites du système solaire, mais quoi de mieux pourtant que de nous rendre en personne dans l'espace ? Nous autres, mortels et laborieux humains, aspirons depuis toujours à voler en toute liberté dans le ciel, à nous libérer de la pesanteur terrestre et à voguer dans la vaste immensité de l'Univers.

Ce rêve est en cours de réalisation depuis le début du xx^e siècle : en 1903, les frères Wright font décoller un avion ; en 1961, Youri Gagarine gagne l'espace à bord du Vostok 1 ; en 1969, Neil Armstrong pose le pied sur la Lune grâce à Apollo 11 ; en 2003, Yang Liwei, le premier astronaute chinois s'embarque à bord du vaisseau Shenzhou 5. Un jour peut-être, tout un chacun pourra vadrouiller en orbite pour y contempler les merveilles de l'Univers.

Le vol spatial habité ne se limite toutefois pas à la concrétisation d'un rêve mais s'inscrit dans un contexte pratique aux enjeux majeurs. Il étend le rayon d'action de l'humanité, jette les bases de l'exploitation des ressources spatiales et acquiert une importance stratégique pour le développement politique, économique et technologique des nations. À ce jour, seuls la Russie, les États-Unis et la Chine ont la capacité d'envoyer des êtres humains dans l'espace. Les deux premiers, les pionniers, ont commencé à le faire durant la guerre froide ; la Chine, par un développement indépendant, rattrape peu à peu son retard.

À strictement parler, toutefois, les premiers astronautes n'étaient pas des humains, mais des animaux. Du fait de la charge utile limitée des premiers lanceurs, les capsules spatiales étaient en effet relativement étroites. Dès lors, les animaux de petite taille ayant une forte capacité d'adaptation environnementale étaient plus à même d'inaugurer le vol spatial habité. Ainsi, dès 1948, les États-Unis ont placé dans une fusée V2 un singe, Albert, qui est malheureusement mort asphyxié en vol. Quelques années plus tard, en 1969, après plusieurs autres tentatives, ils ont ensuite envoyé le singe Bonny dans l'espace, qui a succombé au terme de huit jours de mission. Les vétérinaires qui l'ont examiné ont alors découvert qu'il n'était pas mort d'un problème physiologique, mais principalement de solitude. Les spécialistes ont progressivement compris que la condition psychologique importait autant sinon plus que la condition physique pour supporter l'environnement particulier du voyage spatial.

Entretemps, en 1959, un macaque rhesus nommé Abie et une femelle singe écureuil nommée Miss Baker sont revenus sains et saufs

après avoir été lancés par une fusée Jupiter à 480 km de la Terre, ce qui a fait d'eux les premiers « astronautes » survivants. Plus remarquable, encore, un chimpanzé nommé Ham a été envoyé dans l'espace le 31 janvier 1961 avec cette fois une tâche spéciale à exécuter : actionner un levier lorsqu'il voyait une lumière bleue sur le tableau de bord. Mission parfaitement accomplie pour Ham, dont la capsule est ensuite revenue sur Terre comme prévu.

Alors que les États-Unis ont souvent choisi des singes, l'Union soviétique a préféré les petits chiens. Le 3 novembre 1957, elle a envoyé la chienne Laïka dans l'espace, son corps bardé de capteurs pour surveiller son rythme cardiaque et respiratoire, dans une capsule pressurisée spécialement conçue pour elle, équipée d'une caméra. Selon la version officielle, Laïka aurait accompli sa mission d'une semaine, culminant à une altitude de 1 600 km d'altitude et, conformément au plan prévu, serait morte paisiblement après avoir mangé son dernier repas, empoisonné pour lui éviter de souffrir de la chaleur infernale lors du retour dans l'atmosphère. En 2002, cependant, Dimitri Malachenkov, l'un des responsables scientifiques de la mission, révéla que Laïka n'avait pas survécu aussi longtemps qu'annoncé. Elle est morte en réalité seulement quelques heures après le décollage, sous l'effet conjugué du stress et de la chaleur, résultant d'une combinaison spatiale insuffisamment isolée. Les capteurs fixés à son cou ont mesuré un rythme cardiaque trois fois plus rapide que d'habitude. Les indicateurs de pression et autres instruments ont montré sans équivoque que Laïka a beaucoup souffert avant de s'éteindre. Bien qu'elle n'ait survécu que quelques heures après le lancement, son court vol a prouvé que les mammifères sont capables d'endurer, au moins dans une certaine mesure, l'environnement extrême d'un voyage spatial, ce qui a ouvert la voie aux vols habités.

La Chine a également choisi des chiens comme premiers « astronautes ». Dès 1966, au terme d'une sélection et un entraînement rigoureux, les chiots Xiao Bao et Shan Shan ont été envoyés par une fusée sonde à une altitude de 70 kilomètres, avant de revenir sains et saufs sur Terre.

Tous ces animaux ont constitué une source d'information précieuse pour les scientifiques. Ils ont prouvé à moindre coût la faisabilité du vol habité et jeté les bases de la conquête spatiale. Par l'expérience acquise grâce à eux, l'homme est parvenu à gagner l'espace, à atterrir sur la Lune et même à se promener en combinaison hors d'un vaisseau. Cette première a été réalisée, durant 12 minutes, le 18 mars 1965, par le soviétique Alexei Leonov. En ce qui concerne la Chine, la première sortie extravéhiculaire a été effectuée par Zhai Zhigang lors de la mission Shenzhou 7 en 2008. Les plus célèbres sorties extravéhiculaires restent toutefois celles de la réparation du télescope spatial Hubble.

Même s'il a bénéficié d'une avant-garde formée par des animaux, le parcours du vol habité humain ne s'est pas fait sans heurts ni obstacles. Les pionniers ont payé un lourd tribut à la conquête spatiale. Que ce soit dans l'espace ou sur Terre, les astronautes comme le personnel au sol, ont été confrontés à toutes sortes de dangers.

Le premier astronaute à décéder est le soviétique Valentin Bondarenko qui, le 23 mars 1961, a péri lors d'un incendie accidentel durant une séance d'entraînement. Trois astronautes américains ont aussi perdu la vie dans les mêmes circonstances, au centre spatial Kennedy, le 27 janvier 1967. Quelques mois plus tard, le 24 avril 1967, le soviétique Vladimir Komarov n'a pas survécu à la défaillance du parachute, lors de la phase d'atterrissage de Soyouz 1. L'accident le plus tragique de l'histoire spatiale soviétique a eu lieu le 30 juin 1971, quand une dépressurisation de Soyouz 11 a provoqué la perte par asphyxie de ses trois occupants. Le 28 janvier 1986, la navette spatiale américaine Challenger a explosé 73 secondes après son décollage du centre spatial Kennedy, tuant les sept astronautes de l'équipage, dont une enseignante. Le 1^{er} février 2003, c'est au tour de la navette Columbia de se désintégrer, dans le ciel du Texas, 16 minutes avant l'heure prévue de son atterrissage, tuant là encore les sept membres de l'équipage.

En dépit de tous ses périls, le vol spatial habité ne fait que commencer, même s'il sera difficile de quitter le système solaire à court terme.

Fort de leur esprit d'entreprise et de leur insatiable curiosité, des hommes toujours plus nombreux iront toujours de plus en plus loin.

10.2.2. Les premières stations spatiales

La période la plus intense et la plus spectaculaire de l'histoire de l'exploration spatiale est sans aucun doute la course à la Lune menée entre les États-Unis et l'Union soviétique durant la guerre froide. Après leur victoire, acquise à un coût financier très élevé, les États-Unis décidèrent de recentrer leur programme sur les navettes spatiales, censées faire baisser de manière drastique le prix du voyage. Quant à l'Union soviétique, qui avait dû s'incliner à la suite de l'échec de son lanceur N-1, elle décida de se concentrer sur les stations spatiales.

Et c'est ainsi que l'Union soviétique lança Saliout 1, la toute première station spatiale au monde, en 1971. Les États-Unis répliquèrent peu après par la mise en orbite de la station Skylab en 1973. La Chine a lancé ses propres stations un peu plus tard, à commencer par Tiangong 1 en 2011 puis Tiangong 2 en 2016.

Les stations spatiales sont conçues dès le départ dans la perspective de rester dans l'espace sur la durée, d'accueillir des visiteurs qui viennent y travailler, y expérimenter ou l'occuper un certain temps. Elles ne sont généralement pas équipées d'un système d'atterrissage mais de ports d'amarrage auxquels viennent se fixer des vaisseaux spatiaux habités. Leur grande taille relative et leur équipement complexe permettent de mener de nombreuses expériences scientifiques en micropesanteur dans des domaines aussi variés que la biologie, la physiologie, la physique, l'astronomie, la météorologie, pour ne citer qu'eux.

Parmi les stations spatiales jadis mises en service, outre celles déjà évoquées, mentionnons la suite des Saliout, de Saliout 2 à Saliout 7, puis Mir, toutes du côté soviétique. Celles aujourd'hui en fonction sont la Station spatiale internationale, fruit de la coopération de plusieurs pays, ainsi que la Station spatiale chinoise, dont le troisième module a été lancé en 2022.

SALIOUT 7

La station Saliout 7 a été lancée le 19 avril 1982. Grâce à l'expérience acquise avec les premiers modèles de la série, les sept missions habitées qui s'y succédèrent au cours des deux années suivant la mise en orbite se déroulèrent très bien. Le 11 février 1985, toutefois, la station, alors inoccupée, perdit tout contact avec le sol. Pour tenter de la sauver, un équipage formé de Vladimir Djanibekov et Viktor Savinykh décolla à bord d'un vaisseau Soyouz sans savoir dans quel état ils allaient la trouver.

Arrivés à proximité, les deux hommes découvrirent que les panneaux solaires de la station n'étaient plus orientés en direction du Soleil, ce qui la privait de son alimentation électrique, et qu'elle tournait sur elle-même de manière incontrôlée, rendant le processus d'amarrage particulièrement délicat. De fait, les simulations exécutées au sol dans ce genre de circonstances avaient toutes échouées. La manœuvre prenait donc un petit air de mission suicide. N'écoutant que son courage, l'équipage accomplit toutefois un petit miracle et une grande première en parvenant à s'amarrer à une cible non-coopérante.

À l'intérieur, l'équipage découvrit une situation pire que prévue. Sans électricité, il faisait un froid extrême et l'eau avait gelé. Dans ces conditions, les deux hommes ne disposaient que de 7 jours de réserve pour tenter de sauver la station. Il leur fallait se concentrer sur la restauration de l'alimentation électrique, sans laquelle les systèmes de communication, de contrôle, de ventilation et d'approvisionnement en eau ne pourraient être rétablis. Leur méthode de réparation fut brutale mais efficace : après avoir repéré les batteries encore en état de fonctionner, ils les connectèrent directement par des câbles aux panneaux solaires afin de les recharger. Encore fallait-il orienter les panneaux solaires dans la bonne direction ! Pour ce faire, les astronautes retournèrent dans leur vaisseau Soyouz et, grâce à ses moteurs et son système de contrôle d'attitude, placèrent la station et ses panneaux en bonne position. Après la réparation du système électrique, la plupart des autres problèmes furent résolus plus ou moins

...

facilement. En raison d'une défaillance de l'élément chauffant du système d'alimentation en eau, les astronautes durent improviser avec des matériaux disponibles à portée de main. De retour sur Terre après leur mission de sauvetage réussie, Djanibekov et Savinykh reçurent tous deux le titre de héros de l'Union soviétique.

10.2.3. La Station spatiale internationale

La Station spatiale internationale est un projet conjointement développé par les agences spatiales américaine, russe, japonaise, canadienne et européenne, soient la NASA, Roscosmos, la JAXA, la CSA et l'ESA. Sa construction a commencé en 1998 et s'est poursuivie par l'envoi en orbite et l'assemblage progressifs d'un certain nombre de modules fonctionnels. Avec ses 108,5 mètres de long, ses 74 mètres de large, son volume pressurisé de 900 mètres cube et son poids de 450 tonnes, c'est aujourd'hui la plus grande station spatiale jamais construite. Comme elle tourne autour de la Terre à une altitude relativement faible, c'est aussi l'objet artificiel le plus lumineux du ciel nocturne : il est même visible à l'œil nu par nuit claire.

La Station spatiale internationale est une plate-forme idéale pour observer la Terre et l'espace. La présence humaine permet l'ajustement des paramètres des instruments et la réparation ou le remplacement des équipements défectueux. Son rôle est également irremplaçable en matière d'expérimentation en micropesanteur et en biologie. L'environnement est de ce point de vue bien plus efficace que celui des navettes spatiales.

Cet énorme projet a nécessité un investissement qui, au total, a dépassé les 160 milliards de dollars en 2018, la part la plus substantielle étant apportée par les États-Unis. Depuis 1998, la Station spatiale internationale a passé près de 25 ans en orbite et devrait encore rester en fonction jusqu'en 2028.

Après le retrait de la navette spatiale américaine en 2011, le transport des équipages vers la station a été assuré par des vaisseaux russes Soyouz. En raison du prix très élevé du billet, la NASA a confié

SALIOUT 7 AU CINÉMA

Ces dernières années, d'excellents films à thématique spatiale ont été tournés, qu'il s'agisse de *Gravity*, d'*Interstellar* ou de *Seul sur Mars*. Si la plupart d'entre eux sont de pures fictions, la production russe *Salyut 7*, sorti en 2017, s'inspire de la véritable histoire du sauvetage de la station Saliout 7. Pour son film suivant, encore en cours de production, le réalisateur, Klim Chipenko, a lui-même embarqué à bord d'un vaisseau Soyouz pour tourner à bord de la Station spatiale internationale.

aux sociétés SpaceX et Boeing le développement d'autres vaisseaux spatiaux habités.

En mars 2019, le vaisseau Crew Dragon de SpaceX s'est amarré avec succès à la Station spatiale internationale, réussissant là un premier vol d'essai, sans équipage. En mai 2020, le premier vol habité a suivi, qui fut lui aussi un succès, comme tous ceux qui se sont succédé depuis lors.

Quant au vaisseau développé par Boeing, le Starliner, il a effectué son premier vol d'essai non habité en décembre 2019, sans toutefois pouvoir atteindre la station en raison d'un problème logiciel. Il est toutefois parvenu à retourner sur Terre sans dommage, après avoir résisté à une température de 1 600 degrés Celsius lors de la rentrée dans l'atmosphère, avoir déployé trois principaux parachutes pour le ralentir et avoir activé ses airbags pour amortir le choc de l'atterrissage. Il n'a à ce jour encore envoyé aucun astronaute sur la station.

10.2.4. La Station spatiale chinoise

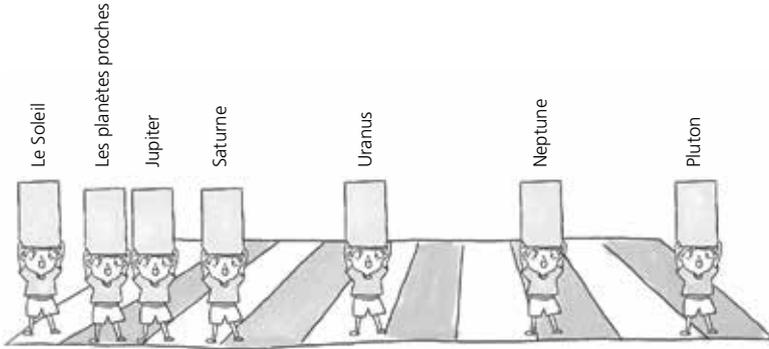
La Station spatiale chinoise est une station en trois modules dont l'assemblage a été terminé le 1^{er} novembre 2022. Elle succède à deux petits laboratoires spatiaux développés par le Chine, Tiangong 1, placé en orbite en 2011 et désintégré dans l'atmosphère en 2018, et Tiangong 2, lancé en 2016 et retombé en 2019. Conçue pour réaliser des expériences en micropesanteur et préparer les astronautes chinois

aux vols de longue durée, elle tourne autour de la Terre à une altitude qui varie de 300 à 400 km. Le module central a été placé en orbite le 29 avril 2021, les deux autres les 24 juillet et 31 octobre 2022. En juillet 2023, elle avait déjà accueilli quatre équipages, arrivés à bord grâce au vaisseau spatial habité Shenzhou. Les missions de ravitaillement sont assurées par le vaisseau cargo Tianzhou.

11

Découvertes spatiales

Grâce aux progrès technologiques toujours croissants, l'homme ne cesse d'approfondir sa compréhension de l'Univers. Les lancements de sondes et de satellites depuis la Terre sont désormais presque banals. Des milliers d'engins spatiaux appartenant à différents pays nous ont déjà permis d'explorer l'espace bien au-delà de la Lune. Les sondes ont rendu visite aux huit grandes planètes du système solaire, ainsi qu'à des planètes naines comme Pluton, des comètes et des astéroïdes. La plus éloignée d'entre elles, Voyager 1, quitte déjà le système solaire. En raison de contraintes liées à la vitesse de vol, au carburant ou à la longévité du matériel, toutefois, leur rayon d'action demeure encore assez limité. De ce point de vue, les télescopes sont encore irremplaçables pour explorer l'Univers plus profond. Le télescope spatial Hubble, en orbite depuis de nombreuses années, nous a fourni quantité de magnifiques images de l'espace lointain, qui ont considérablement fait progresser nos connaissances sur l'Univers. Approchant de la fin de sa durée de vie, il a depuis peu été remplacé par le télescope spatial James Webb, plus avancé.



Sur Pluton, midi est comme une nuit au clair de lune sur Terre, et le flux lumineux solaire atteignant Pluton est 1 000 fois plus petit que celui sur Terre !



Figure 11.1 | La distance des corps célestes au Soleil.

Le vol habité n'est pas en reste ! La Station spatiale internationale fait office d'ilot spatial, un refuge ou une maison que peut habiter l'homme sur une longue période en dehors de la Terre. Grâce au programme Apollo, nous avons même pu séjourner brièvement plusieurs fois sur la Lune, le seul corps extraterrestre à ce jour qui porte l'empreinte du pied de l'homme. Plus excitant encore, avec l'émergence de la société SpaceX se profile le voyage vers Mars, sa transformation en planète habitable et le grand rêve cher à Elon Musk de faire de l'humanité une espèce multi-planétaire. Oui, quantité de projets qui semblaient hier impossibles sont en train de se réaliser.

Notre champ d'exploration actuel peut être grossièrement divisé en fonction de la distance à la Terre : l'espace environnant, la Lune, les planètes proches, les planètes éloignées, la frontière du système solaire et l'au-delà. L'Univers est si vaste que nous éprouvons les pires difficultés à ne serait-ce que traverser le minuscule système solaire (figure 11.1). Et pour chaque pas de plus vers l'extérieur, la difficulté technologique augmente de façon exponentielle. Mais dans la région qui est aujourd'hui à sa portée, l'homme a déjà effectué nombre de découvertes fructueuses et acquis des résultats importants.

11.1. L'ESPACE ENVIRONNANT

Avant de partir explorer d'autres planètes, il nous faut d'abord comprendre l'espace environnant la nôtre, c'est-à-dire la région située entre 100 et 36 000 km d'altitude. C'est une zone que l'homme connaît bien, celle où orbitent la plupart des engins spatiaux, une zone de transition entre atmosphère et espace proprement dit.

Cette transition s'opère par l'*ionosphère*, une couche de l'atmosphère constituée de gaz partiellement ionisé, qui se démarque ainsi de la couche située au-dessous d'elle, composée de gaz électriquement neutres. De manière générale, en effet, plus on s'approche de la Terre, plus la densité de particules est élevée et plus ces particules

se présentent sous forme de molécules de gaz électriquement neutre ; à l'inverse, plus on s'éloigne de la Terre, plus la densité de particules est faible, et plus ces particules se présentent sous forme ionisée, par suite de collisions avec d'autres particules.

L'INVERSION DU CHAMP MAGNÉTIQUE ET LES EXTINCTIONS MASSIVES

Des informations sur le champ magnétique terrestre ancien sont enregistrées dans les roches vieilles de plusieurs milliards d'années et dans les poteries fabriquées durant l'Antiquité, il y a des milliers d'années. En les étudiant, les scientifiques ont découvert que le champ magnétique terrestre variait au fil du temps, que les pôles nord et sud s'inversaient parfois, ce processus s'accompagnant d'une diminution puis d'une augmentation de l'intensité du champ magnétique. Durant une période d'inversion, les mouvements de convection du noyau externe sont perturbés, ce qui fait souvent comparer le phénomène à une « arythmie » du cœur de la Terre. Une inversion dure en moyenne un peu plus de 7 000 ans, provoquant une baisse d'environ 90 % de l'intensité du champ magnétique, et se produit très irrégulièrement, au plus tous les 10 000 ans, au moins tous les 40 millions d'années. Les scientifiques ont également découvert une forte corrélation entre le taux d'extinction biologique et le taux d'inversion magnétique. Si l'inversion des pôles du champ magnétique est l'une des causes importantes des grandes extinctions, ce n'est toutefois pas la seule. En ce qui concerne les cinq dernières, dont celle qui a vu la disparition des dinosaures, la communauté scientifique considère généralement qu'elles résultent de plusieurs causes simultanées, comme des impacts d'astéroïdes, des éruptions volcaniques, l'inversion des pôles magnétiques, etc. Quelle est la cause de l'arythmie cardiaque de la Terre ? La réponse reste à découvrir. La cause de l'extinction des dinosaures et la raison de l'inversion magnétique font partie des 125 questions scientifiques les plus difficiles recensées par le magazine américain *Science*.

Au-delà de l'ionosphère, l'espace environnant est traversé par des particules chargées et se situe dans la *magnétosphère*, la zone d'influence du champ magnétique créé par les mouvements de convection dans noyau terrestre. Ce champ magnétique protecteur, par ces interactions avec le vent solaire et le rayonnement cosmique en provenance de l'espace profond, repousse la plupart des particules chargées qui arrivent de l'espace à haute vitesse.

L'espace environnant a toujours constitué un champ de recherche important. La composition des très hautes couches de l'atmosphère s'étudie par des ballons stratosphériques, des fusées météorologiques et des fusées-sondes, celle de l'ionosphère par des stations radar au sol. La structure et l'évolution du champ magnétique terrestre s'observent *in situ* grâce à des satellites.

Le bon fonctionnement des engins spatiaux en orbite impose de prendre en compte les particules qui traversent l'espace environnant. Il arrive que d'importantes quantités de protons et électrons très énergétiques, par des interactions complexes, provoquent des pannes ou des pertes complètes de matériel.

Les particules chargées qui composent le vent solaire, par un phénomène de décharge électrique à grande échelle, sont également à l'origine des aurores polaires qui s'observent près des pôles Nord et Sud. Parvenues à proximité de la Terre, en effet, elles sont canalisées par les lignes de champ magnétique vers les pôles, pénètrent dans la haute atmosphère, entrent en collision avec les atomes et les molécules dont elle est composée, ce qui provoque leur excitation et des éclats lumineux, et *in fine* les aurores polaires. Celles-ci apparaissent le plus souvent dans les deux zones annulaires proches des 67 degrés de latitudes nord ou sud.

S'il produit des aurores polaires parfois magnifiques, le vent solaire est parfois source de catastrophes météorologiques spatiales. Les éruptions solaires ou autres éjections de masse coronale émettent une quantité particulièrement importante de particules de haute énergie. Selon l'orientation du champ magnétique interplanétaire par rapport

à celle du champ magnétique terrestre, il arrive que ces particules puissent pénétrer dans la magnétosphère avec des effets violents sur l'atmosphère.

11.2. LA LUNE

Le chapitre de l'exploration lunaire a été ouvert dans les années 1950 par l'Union soviétique et les États-Unis. Si les Soviétiques ont lancé en 1959 la première sonde à destination de notre brillante voisine, le programme américain Apollo reste le seul à ce jour à avoir assuré des missions habitées. Entre juillet 1969 et décembre 1972, les six missions Apollo 11, Apollo 12, Apollo 14, Apollo 15, Apollo 16 et Apollo 17 ont déposé à chaque fois deux hommes sur la Lune, soit douze en tout. Plus de 380 kg d'échantillons de roches et de sol ont été rapportés sur Terre, une collecte qui a permis de mieux comprendre la structure, l'origine et l'évolution de notre unique satellite naturel. La Lune, distante d'environ 380 000 km, est en rotation synchrone avec la Terre, si bien qu'elle nous présente toujours la même face. Cette face visible est recouverte de mers de lave sombres, entrecoupées de hauts plateaux plus clairs et de cratères d'impact très visibles. L'étude de la Lune est d'une importance capitale pour comprendre entre autres la formation et l'évolution du système solaire, ainsi que l'histoire de notre planète.

Du fait de son absence d'atmosphère et de sa faible activité géologique, la Lune conserve en effet des informations sur les débuts du système solaire qui, sur Terre, ont été altérées par les séismes, les éruptions volcaniques ou l'érosion. L'analyse des cratères sur la Lune, par exemple, permet de mieux comprendre le déroulement de la période dite des *grands impacts*, survenue dans les premiers temps du système solaire.

Il a longtemps été admis que son absence d'atmosphère et les variations de température extrêmes qu'elle subit excluaient la présence d'eau à la surface de la Lune. Des décennies d'observations et de recherches ont toutefois confirmé que de l'eau était bien présente, sous forme de

glace, surtout près des pôles, dans les zones situées en permanence à l'ombre des cratères. L'eau lunaire pourrait provenir de trois sources potentielles : des comètes et des astéroïdes, qui l'auraient libérée en heurtant sa surface, et des particules d'hydrogène provenant du vent solaire par combinaison avec l'oxygène présent dans le sol lunaire.

La présence d'eau a ravivé l'intérêt des scientifiques pour la Lune. Des ressources en eau abondantes et accessibles permettent en effet d'envisager établir de grandes bases habitées. En conséquence, les programmes spatiaux de certains pays font la part belle aux régions polaires de la Lune, en particulier son pôle sud. Il en va ainsi de la Chine qui, par la mission Chang'e-4, a réalisé une grande première en alunissant sur la face cachée, et par la mission Chang'e-5, qui est parvenue à ramener sur Terre des échantillons.

En 2019, à l'occasion du 50^e anniversaire de l'alunissage de la mission Apollo 11, la NASA a dévoilé son programme Artémis, qui vise à retourner sur la Lune pour y établir une base permanente, utilisée comme étape intermédiaire pour atteindre Mars. Selon le traité aujourd'hui en vigueur sur l'espace extra-atmosphérique, tous les pays peuvent se rendre librement sur la Lune afin d'y mener des activités pacifiques d'exploration.

La richesse des ressources minières incite également à retourner sur la Lune. Elle abrite en effet plus de métaux rares que la Terre. On y trouve principalement trois types de roches : les basaltes riches en fer et en titane, les anorthosites riches en potassium, terres rares et phosphore, qui se trouvent principalement sur les hauts-plateaux, et les « brèches », un conglomérat de composé de particules de roche de 0,1 à 1 mm de diamètre. L'hélium 3, rare sur Terre mais abondant sur la Lune, constitue une nouvelle source d'énergie nucléaire sûre, efficace et propre, qui pourrait servir de carburant lors de longs voyages interstellaires voire, qui sait, bouleverser les structures de production énergétiques sur Terre. Selon certaines estimations préliminaires, en effet, le sol lunaire abriterait plus 100 000 tonnes d'hélium, quand 100 tonnes suffiraient à couvrir la consommation mondiale annuelle

d'énergie actuelle. À long terme, la Lune pourrait donc faire office de station-service sur la route des étoiles.

Outre ses richesses minérales, la Lune jouit de particularités environnementales au potentiel intéressant : importantes variations de température, vide spatial, faible gravité, bonne exposition au rayonnement cosmique, etc.

La Chine a toujours accordé une grande importance à la Lune. Misant sur une stratégie progressive en trois étapes, elle a d'abord visé la mise en orbite, puis l'atterrissage et enfin l'atterrissage avec retour sur Terre. Ce troisième objectif a été brillamment atteint avec la sonde Chang'e-5, qui a ramené des échantillons de sol lunaire afin de mieux comprendre la formation et l'évolution du système Terre-Lune. Lancée le 23 novembre 2020 par une fusée Longue Marche 5, Chang'e-5 est revenue 23 jours plus tard avec à son bord 1731 grammes d'échantillons.

L'un des éléments clés du succès a été la mise au point d'une technique de rentrée atmosphérique originale dite « à grande vitesse ». Validée en 2014 par la mission Chang'e-5-T1, cette méthode semi-balistique consiste à ralentir une capsule de retour arrivant à grande vitesse par une série de ricochets sur l'atmosphère, à la manière d'une pierre correctement jetée à la surface d'un étang (figure 11.2).

11.3. LES PLANÈTES PROCHEs

La plupart des planètes proches sont des planètes solides à l'instar de la Terre. Par leur proximité même, leur exploration permettra de mieux comprendre la formation de la nôtre. Vénus possède une atmosphère dense, très acide en raison d'un fort effet de serre. L'atmosphère de Mars est au contraire très ténue, en raison de son âge avancé. Quelle est celle des deux qui pourrait à l'avenir accueillir l'humanité ? Une étude s'impose !

11.3.1. Vénus

Vénus est à vol d'oiseau la planète la plus proche de la Terre. Elle lui ressemble beaucoup quant à la taille, la densité, la masse et

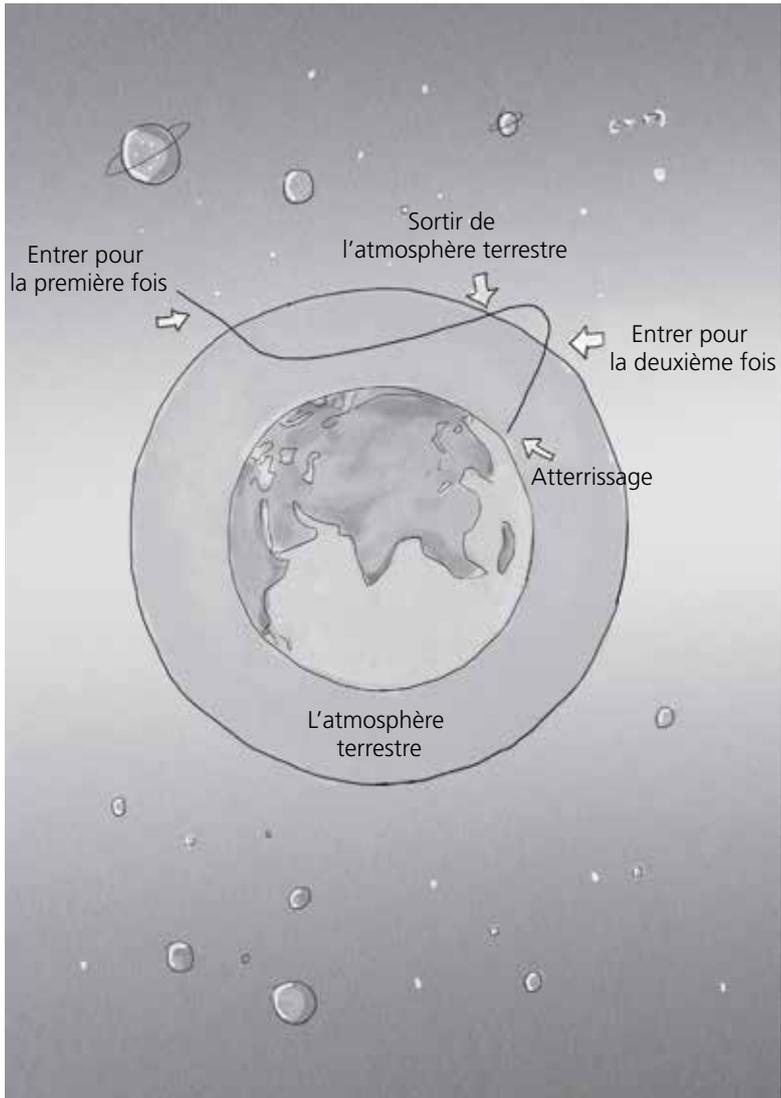


Figure 11.2 | Principe d'un retour par rebond atmosphérique.

l'apparence générale. Son étude est donc de première importance pour comprendre l'évolution de notre planète.

L'exploration des mystères de Vénus a commencé dans les années 1960 et a donné lieu à une compétition féroce entre l'Union soviétique et les États-Unis. Depuis lors, plus de 40 sondes ont été lancées qui l'ont au moins survolée ou plus longuement étudiée, ce qui a permis d'accumuler une importante quantité de données scientifiques la concernant.

La sonde Venera 4, notamment, lancée le 12 juin 1967 par l'Union soviétique, a largué un module d'atterrissage qui, durant les 94 minutes de descente, a pu mesurer la température et la pression de l'atmosphère vénusienne, et en déterminer la composition chimique. Un peu plus tard, la sonde Venera 7, lancée le 17 août 1970, en plus de traverser les denses couches nuageuses de Vénus, a réussi à se poser en douceur à sa surface. Une grande première dans cet environnement brûlant ! Venera 7 nous a ainsi appris que la pression atmosphérique à la surface de Vénus est au moins 90 fois supérieure à celle régnant sur Terre et que la température y atteint les 470 degrés Celsius. Lancée le 14 septembre 1978, la sonde Venera 12 a pour sa part détecté des coups de tonnerre et de très fréquents éclairs, en l'occurrence plus de 1 000 entre 11 km et 5 km d'altitude. Grâce à leur atterrisseur muni d'appareils de forage automatisés, les sondes Venera 13 et Venera 14, lancées respectivement les 30 octobre et 4 novembre 1981, ont pu pénétrer en profondeur le sol de Vénus et y collecter pour analyse des échantillons de roches. Leurs études ont montré que le volcanisme est important sur Vénus et que le magma contient de l'eau. Entre 30 à 45 km d'altitude, l'atmosphère est formée d'une couche très corrosive de brouillard d'acide sulfurique. Les sondes ont aussi révélé l'existence de vents violents, soufflant d'est en ouest dans la zone équatoriale jusqu'à 110 mètres par seconde. L'atmosphère de Vénus est composée à 97 % de dioxyde de carbone et contient aussi de faibles quantités d'azote, d'argon, de monoxyde de carbone et de vapeur d'eau. Cette forte présence de CO₂ produit un effet de serre qui empêche

la chaleur de s'échapper, ce qui aboutit à une température et une pression élevées en surface. Enfin les sondes Venera 15 et Venera 16, lancées les 2 et 7 juin 1983, ont pu cartographier environ 25 % de la surface de Vénus au nord de son 30^e parallèle. En décembre 1984, l'Union soviétique a encore lancé deux sondes, Vega 1 et Vega 2, nommées ainsi d'après les abréviations russes de leur double objectif : Vénus et la comète de Halley. En juin 1985, elles ont survolé Vénus et largué chacune un ballon-sonde et un module d'atterrissage qui ont étudié son atmosphère. Les caméras embarquées ont révélé une circulation atmosphérique de haute altitude tournant à une vitesse de 320 km/h dans la même direction que la planète. Les atterrisseurs ont également foré et analysé le sol de Vénus. Après avoir accompli cette partie de leur mission, les deux sondes ont tiré parti de la gravité de Vénus pour se diriger vers la comète de Halley, qu'elles ont étudiée en mars 1986.

Du côté américain, la sonde Mariner 2, lancée le 27 août 1962, a été la première à mesurer la température de l'atmosphère de Vénus et à en prendre des photos panoramiques. Lancée le 3 novembre 1973, la sonde Mariner 10 a survolé la planète à une distance de 5 760 kilomètres et en a pris des milliers de photos en gros plan. Le 20 mai et le 8 août 1978, les États-Unis ont respectivement lancé Pioneer Venus 1 et Pioneer Venus 2. Parvenue en orbite autour de son objectif le 4 décembre suivant, la première a observé durant 244 jours les nuages, l'atmosphère, l'ionosphère et le champ magnétique de la planète, ainsi que son interaction avec le vent solaire, tout cartographiant sa surface à l'aide de radars. Quant à Pioneer Venus 2, elle a largué quatre modules de descente dans l'atmosphère de Vénus, dont l'un a fonctionné pendant 67 minutes après avoir touché le sol, qui ont pu révéler divers phénomènes atmosphériques tels que des pluies acides et de la foudre, ainsi que diverses structures géologiques comme que des plaines et des canyons.

En 1989, la navette spatiale américaine Atlantis a lancé dans l'espace la sonde Magellan, qui a entamé ensuite son voyage vers Vénus

afin d'en étudier la géologie et la géophysique. Équipée d'un système radar avancé, capable de percer les nuages et de cartographier des objets de la taille d'un terrain de football avec une résolution dix fois supérieure aux systèmes précédents, elle reste aujourd'hui encore la sonde la plus performante et la plus aboutie qui ait jamais été envoyée sur cette planète.

Du fait des conditions extrêmes qui règnent sur Vénus, la durée de vie des atterrisseurs est très courte, ce n'en facilite pas l'exploration, un enjeu scientifique pourtant majeur.

11.3.2. Mars

Mars se situe en moyenne à 1,53 unités astronomiques du Soleil. Sa période orbitale est de 1,88 années terrestres, son axe est incliné de 25,19 degrés et le jour y dure en moyenne de 24 heures 39 minutes et 35 secondes. Tous ces paramètres sont comparables aux valeurs terrestres. De fait, Mars est la planète du système solaire la plus similaire à la nôtre, ce qui en fait une candidate de choix pour une éventuelle migration humaine. Pour cette raison, son exploration est souvent jugée prioritaire.

L'Union soviétique puis la Russie, les États-Unis, l'Europe et le Japon ont lancé des dizaines de sondes spatiales pour étudier la morphologie, la géologie et le climat martiens. Certaines s'y sont satellisées, des modules de descente s'y sont posés, des rovers y ont roulé et un hélicoptère y a même volé. À ce jour toutefois, les États-Unis, qui restent le seul pays à y avoir atterri, sont les champions toutes catégories de cette planète.

En 1975, la NASA a lancé les deux sondes du programme Viking, chacune constituée d'un orbiteur et d'un atterrisseur. Les orbiteurs, en fonction pendant 6 et 3 ans, ont dressé des cartes encore en usage aujourd'hui. Après s'être posés en 1976, les deux atterrisseurs ont transmis la première photo en couleur du paysage martien.

En novembre 1996, la NASA a lancé la très réussie mission Mars Global Surveyor (MGS), qui, après avoir atteint ses objectifs de

cartographie en 2001, a été prolongée trois fois jusqu'à sa perte de contact définitive intervenue le 2 novembre 2006.

En 2001, la NASA a lancé Mars Odyssey, principalement dédiée à l'étude de la composition chimique de la planète. Son spectromètre à rayons gamma a détecté dans le sol une quantité importante d'hydrogène à un mètre de profondeur, que les scientifiques ont estimé correspondre à de la glace d'eau.

En 2003, la NASA a lancé deux rovers identiques baptisés Spirit et Opportunity. Après avoir tous deux réussi leur atterrissage en janvier 2004, ils ont renvoyé des preuves irréfutables de la présence d'eau sur Mars. Les panneaux solaires dont ils étaient équipés ont à la fois été salis par la poussière, qui réduisait leur production d'énergie, et nettoyés par les tempêtes de cette même poussière, ce qui en définitive a permis à la mission de perdurer bien au-delà de ce qui était prévu.

En 2005, la NASA a lancé la sonde Mars Reconnaissance Orbiter, qui, en mars 2006, a entamé un travail de deux ans en orbite martienne. Équipée d'un système de communication à large bande passant très avancé, elle a transmis beaucoup plus de données que toutes les missions précédentes réunies. Sa caméra haute résolution a notamment produit des images d'une avalanche survenue le 19 février 2008 sur la calotte glaciaire du pôle Nord.

La sonde Phoenix, lancée par la NASA en août 2007, s'est posée en mai 2008 dans la région polaire nord de Mars, à une latitude de 68 degrés. Le bras robotisé dont elle était équipée pouvait s'étendre jusqu'à 2,5 mètres de long et creuser à un mètre de profondeur dans le sol. Phoenix transportait en outre un microscope très performant pour analyser les échantillons recueillis. Le 20 juin 2008, Phoenix a confirmé la présence de glace d'eau sur la surface de Mars, en identifiant sans plus de doute la substance blanche qui avait été observée précédemment.

L'année 2011 a vu le lancement par la NASA de la mission Mars Science Laboratory, marquée par l'atterrissage réussi le 6 août 2012

du rover Curiosity dans le cratère Gale. Doté de nombreux instruments de pointe, il pouvait analyser la composition d'une roche située à 12 mètres de distance par spectrométrie laser.

Enfin beaucoup plus récemment, le 30 juillet 2020, la NASA a lancé la sonde Mars 2020 qui, avec le rover Perseverance embarquait un petit hélicoptère de 2 kg baptisé Ingenuity. L'atterrissage sur Mars, qui a eu lieu le 18 février 2021, s'est parfaitement bien déroulé. Un parachute s'est d'abord déployé, un bouclier thermique éjecté puis des rétro-propulseurs activés. À vingt mètres du sol environ, la sonde étant presque immobile, le rover, suspendu par trois câbles, a été posé sur le sol. Après une phase de vérification, les premiers tours de roue du rover ont eu lieu le 4 mars suivant et le premier vol de l'hélicoptère le 19 avril. Des échantillons de sols seront collectés puis, si tout se passe bien, ramenés sur Terre par une autre mission en 2031.

UN ATERRISSAGE DÉLICAT

Si de nombreuses sondes ont été lancées à destination du sol martien, moins de la moitié d'entre elles ont réussi leur atterrissage. Contrairement à la Lune, Mars possède une atmosphère, même si elle est ténue, avec sa densité inférieure à 1 % de celle de l'atmosphère terrestre et une pression atmosphérique en surface de 500 à 700 Pa. Elle est principalement composée de dioxyde de carbone, puis d'azote, d'argon, ainsi que d'une faible quantité d'oxygène et de vapeur d'eau. La présence de cette atmosphère induit de nombreuses incertitudes lors de l'atterrissage d'une sonde sur Mars. La manœuvre comprend trois étapes : l'entrée dans l'atmosphère, la descente et l'atterrissage proprement dit. La première nécessite une bonne conception aérodynamique et un angle d'entrée précis, et se déroule jusqu'à une altitude de 10 km ou moins. Lors de la deuxième phase, la sonde déploie un parachute pour ralentir. Parvenue à quelques centaines ou dizaines de mètres au-dessus du sol, la sonde active un système de rétropropulsion ou déploie des airbags pour enfin se poser.

La société privée Space X, portée par le récent essor des vols spatiaux commerciaux, a également la planète Mars en ligne de mire. Elle prévoit d'y faire atterrir une première mission habitée d'ici 2030. Le vaisseau habité serait d'abord lancé en orbite terrestre basse, où le plein de carburant serait assuré par des vaisseaux ravitailleurs réutilisables, puis partirait pour Mars. Cette opération de ravitaillement est une étape cruciale, qui permet de réduire la masse initiale au décollage. Le carburant nécessaire au voyage retour devrait être produit grâce aux ressources martiennes.

La Chine mène également une mission d'exploration active sur Mars. En raison des contraintes liées à la mécanique céleste, il ne se présente qu'une fenêtre de lancement tous les 26 mois pour aller vers Mars. L'année 2020 représentait de ce point de vue une bonne opportunité de lancement, raison pour laquelle plusieurs pays, en l'occurrence les Émirats arabes unis, la Chine et les États-Unis ont expédié des sondes sur Mars.

La première sonde martienne chinoise, Tianwen 1, qui comprend un orbiteur et un rover, a décollé le 23 juillet 2020 avec trois objectifs assignés : atteindre l'orbite, réussir l'atterrissage et explorer. Le 5 février 2021 a été publiée sa première photo de la planète, qui se situait alors à environ 2,2 millions de kilomètres. Le 10 février, elle s'est correctement placée sur une grande orbite elliptique autour de Mars, passant au plus près à une altitude d'environ 400 km, d'une période de 10 jours terrestres environ et d'une inclinaison d'environ 10 degrés. Le premier objectif était atteint ! Tianwen 1 est ainsi devenu le premier satellite artificiel chinois de la planète Mars. Le deuxième objectif a suivi quelques mois plus tard, le 15 mai, quand, après une phase d'étude des sites d'atterrissage possibles, le rover s'est posé sans dommage sur le sol martien. Quelques jours plus tard, il commençait sa mission d'exploration... La sonde pèse environ 5 tonnes et transporte 13 instruments scientifiques, 7 sur l'orbiteur, 6 sur le rover. L'orbiteur est équipé de deux caméras, d'un radar à pénétration de sol, d'un spectromètre infrarouge, d'un magnétomètre et de deux détecteurs de particules.

Le rover est pour sa part équipé d'une caméra multispectrale, d'un radar à pénétration de sol, d'un spectromètre, d'un magnétomètre, d'une station météorologique et d'une caméra de terrain.

À eux deux, l'orbiteur et le rover étudieront la morphologie et la structure géologique de Mars ; la composition chimique des sols et la distribution de la glace d'eau en surface ; l'ionosphère et le climat ; ainsi que sa structure interne, son champ magnétique et l'évolution de sa géologie.

11.4. PLANÈTES ÉLOIGNÉES

11.4.1. *Jupiter*

Jupiter est la cinquième planète à partir du Soleil et la plus grosse planète du système solaire. On lui connaît 92 satellites confirmés en 2023, dont Io, Europe, Ganymède et Callisto, les quatre plus grands, découverts par Galilée en 1610, et baptisés pour cette raison *satellites galiléens*. Comme le système jovien ressemble beaucoup à un petit système solaire, les scientifiques pensent que son étude permettra de mieux comprendre tant l'origine des systèmes planétaires que la formation et l'évolution du système solaire.

Seules des sondes non habitées ont été jusqu'à maintenant envoyées pour explorer Jupiter. Les premières à la survoler furent issues des programmes Pioneer et Voyager. Juno est en 2023 la sonde la plus récente à lui avoir rendu visite. Lancée en août 2011, elle a rejoint son orbite au terme de cinq ans de vol, avant de commencer son exploration du système jovien, aujourd'hui toujours en cours, passant notamment par le satellite Europe, soupçonné d'abriter un océan souterrain recouvert de glace.

Mais les premières sondes à avoir atteint Jupiter furent Pioneer 10 et Pioneer 11, lancées en 1972 et 1973. Très polyvalentes, elles étaient bien adaptées à l'exploration de divers systèmes planétaires, et notamment ceux de Jupiter et Saturne. En 1973, après s'être approché à une distance de 13 000 kilomètres, Pioneer 10 prit la première photo en gros plan de Jupiter. Quant à Pioneer 11, elle a ensuite continué sa route jusqu'à Saturne, qu'elle a atteint le 1^{er} septembre 1979. Après

avoir parcouru 10 milliards de kilomètres durant un quart de siècle, la mission de Pioneer 11 a pris fin, bien qu'elle poursuive aujourd'hui encore son voyage dans les confins du système solaire.

En août et septembre 1977, une deuxième série de sondes, Voyager 2 et Voyager 1, fut lancée afin de poursuivre l'exploration. Équipées d'instruments plus avancés, elles ont pu observer des aurores polaires et la Grande Tache rouge. Après avoir survolé Jupiter et Saturne, Voyager 2 a également rendu visite à Uranus et Neptune, réalisant ainsi l'exploit d'un quadruple voyage interplanétaire. Les deux sondes ont désormais quitté l'héliosphère pour entrer dans l'espace interstellaire.

LA DIFFICILE EXPLORATION DE JUPITER

L'exploration de Jupiter doit surmonter deux grands obstacles. Le premier tient au fait que les engins spatiaux ne peuvent suivre que des trajectoires elliptiques, paraboliques ou hyperboliques dans l'espace, si bien qu'ils doivent parcourir un itinéraire compliqué pour atteindre Jupiter. De plus, en raison de sa vitesse insuffisante, une sonde doit souvent être accélérée par assistance gravitationnelle, ce qui signifie qu'elle doit passer par d'autres planètes, et parfois plusieurs fois. La sonde Galileo, par exemple, a bénéficié de l'assistance gravitationnelle de Vénus et de la Terre. Ces détours se traduisent par d'importantes distances supplémentaires à parcourir et demandent donc du temps. L'autre difficulté provient du champ magnétique de Jupiter, qui est environ 20 fois plus intense que celui de la Terre. En conséquence, les ceintures de rayonnement sont bien plus énergétiques, avec des flux de protons 10 fois plus importants que sur Terre et des flux d'électrons de haute énergie qui peuvent atteindre plusieurs centaines de millions d'électronvolts. Pour donner une idée, on estime généralement que l'énergie des électrons dans les ceintures de rayonnement terrestres ne dépasse pas 10 millions d'électronvolts. Les conséquences potentiellement fatales d'une exposition à de telles particules contraignent généralement les engins spatiaux à adopter une orbite très elliptique pour éviter les zones de rayonnement les plus dangereuses.

Ne transportant pas de modules d'atterrissage avec elles, les premières sondes n'ont pu étudier qu'à distance les planètes qu'elles survolaient comme Jupiter et Saturne, avec les inconvénients d'une exploration limitée dans le temps, d'un manque de détails sur les images et d'une collecte de données incomplète. D'autre part, le survol de Jupiter se fait généralement le long d'une orbite très allongée pour éviter des ceintures de rayonnement très énergétiques, potentiellement fatales pour les sondes, provoquées par le champ magnétique de Jupiter, qui est environ 20 fois plus intense que celui de la Terre.

Pour répondre en partie à cette problématique, les États-Unis ont lancé en 1989 la sonde Galileo, toute entière dédiée à l'étude de Jupiter, composée d'un orbiteur et d'une sonde atmosphérique. Cette dernière, après s'être séparée en juillet 1995, a pénétré l'atmosphère de Jupiter en décembre de la même année et y a effectué des mesures *in situ* durant 75 minutes. Une grande première dans l'histoire de l'humanité ! Quant à l'orbiteur, il a tourné 34 fois autour de Jupiter et s'est approché à plusieurs reprises de ses principaux satellites. Faute de carburant, il a terminé sa course dans l'atmosphère de Jupiter en septembre 2003. Galileo a observé Jupiter d'une position environ 20 fois plus proche que celles des sondes Voyager et a transmis des photos de 20 à 100 fois plus nettes, ce qui nous a permis de découvrir Jupiter, ses satellites et son champ magnétique de manière complète. Assurément l'une des missions d'exploration planétaire les plus importantes du ^{xx}e siècle !

Jupiter est la planète du système solaire qui possède le plus grand nombre de satellites. Plusieurs d'entre eux présentent des caractéristiques notables, qu'il est important d'étudier de près. Io, par exemple, se distingue par une forte activité géologique et ses éruptions volcaniques, dont les cendres sont parfois emportées dans l'espace par l'action de Jupiter. Le satellite Europe, quant à lui, est recouvert d'une couche de glace et pourrait posséder un océan souterrain, ce qui laisse envisager aux scientifiques que des formes

de vie primitives aient pu s'y développer. Ganymède est le satellite du système solaire possédant le champ magnétique le plus important, et par là très intéressant pour mieux comprendre les caractéristiques et l'évolution des magnétosphères à différentes échelles dans le système solaire.

Le 5 juillet 2016, la sonde Juno, développée par la Nasa, s'est placée en orbite autour de Jupiter, entamant ainsi une campagne d'observation de 37 révolutions en 20 mois. Le 27 août, lors d'un survol à basse altitude, elle a renvoyé la première image du pôle Nord. Par la suite, elle a transmis d'importantes informations sur le champ magnétique, l'atmosphère et la météorologie de la planète. L'instrumentation infrarouge dont elle est équipée, dédiée à l'étude des aurores polaires, a pu détecter en décembre 2019 la présence de glace amorphe au pôle Nord de Ganymède, ouvrant ainsi une nouvelle piste à la recherche d'une forme de vie extraterrestre.

LA DÉLICATE TRAJECTOIRE DE JUNO

Pour éviter les effets potentiellement irrémédiables de la ceinture de rayonnement de Jupiter tout en passant au plus près de la planète afin d'obtenir de bonnes données d'observation, la sonde Juno a dû exploiter l'espace de quelques milliers de kilomètres situé juste au-dessus de la couche nuageuse. Du point de vue d'un engin spatial en provenance d'une lointaine planète bleue située à des millions de kilomètres de là, cela équivalait à passer par le chas d'une aiguille. Des calculs très précis et un enchaînement de manœuvres délicates ont été nécessaires pour réaliser cet exploit. Après avoir gagné l'orbite de Jupiter, Juno s'est temporairement déplacée pour se positionner sur une orbite de travail durant 14 jours. Elle a alors observé la surface de Jupiter selon un premier découpage en huit bandes étroites tous les 48 degrés durant huit orbites, puis a resserré l'intervalle à 24 degrés durant huit autres orbites, puis à 12 degrés durant 16 orbites. Ces 32 orbites ont permis d'observer Jupiter sous toutes ses coutures, sans angles morts.

11.4.2. Saturne

Saturne, la plus grande planète du système solaire après Jupiter, est l'une des plus explorées parmi les planètes éloignées. Entourée de ses magnifiques anneaux, elle conserve comme Jupiter une grande quantité de matériaux primitifs témoignant des débuts du système solaire, ce qui fait d'elle un objet d'étude particulièrement intéressant. La première sonde à lui avoir rendu visite est Pioneer 11, en 1979, qui a découvert un nouvel anneau et de nouveaux satellites. Voyager 1 et Voyager 2 ont suivi, approfondissant toujours plus nos connaissances sur cette planète. La première mission spécifiquement dédiée au système saturnien, Cassini-Huygens, développée conjointement par les États-Unis et l'Europe, a décollé en 1997. Elle était composée d'un orbiteur, Cassini, équipé de douze instruments scientifiques, et d'un atterrisseur, Huygens, équipé de six instruments. Cassini-Huygens

LE MYSTÈRE DE LA VIE SUR TITAN

Titan, le plus grand satellite de Saturne, était la principale cible visée par la mission Cassini-Huygens. Sous de nombreux aspects, Titan est l'un des corps célestes les plus comparables à la Terre. Il est doté d'une atmosphère épaisse et riche en matières organiques, comme jadis la Terre, il y a des milliards d'années, lorsqu'elle était encore gelée et sans oxygène dans l'atmosphère. En outre, Titan est le seul autre corps céleste du système solaire qui possède des océans et des lacs liquides à sa surface, quoi qu'ils soient principalement composés de méthane et non d'eau. Enfin, des molécules organiques assez importantes ont été découvertes dans l'atmosphère de Titan à une altitude de 1 000 kilomètres, qui pourraient être des composés de transition vers une forme de vie.

Cela dit, Cassini-Huygens n'ayant pas été soumis à une quarantaine spatiale, il est possible que sa surface porte des micro-organismes d'origine terrestre. Pour éviter de menacer la vie potentielle sur Titan, Cassini a utilisé ses dernières ressources en carburant pour plonger dans l'atmosphère de Saturne, l'étudier *in situ* et s'y désintégrer.

s'est placé en orbite autour de Saturne en juillet 2004, puis, quelques mois plus tard, en janvier 2005, Huygens a été largué sur Titan, le plus grand satellite de ce système planétaire. Au cours de la descente de plus de deux heures, la sonde a recueilli nombre de données précieuses, montrant que si l'atmosphère de Titan est assez similaire à celle de la Terre, sa composition est toute même plus complexe et plus hiérarchisée. De 2005 à 2008, Cassini a bouclé plus de 70 orbites autour de Saturne, traversé plusieurs fois ses anneaux et approché neuf de ses satellites. L'orbiteur a transmis environ 800 000 images qui ont permis aux scientifiques de lever progressivement le voile sur les mystères de Saturne.

12

Les retombées de l'exploration spatiale

Si elle obéit avant tout à un but scientifique, l'exploration spatiale n'en reste pas moins sans conséquences sur notre vie quotidienne. Les couches, les sachets de légumes déshydratés, la mousse à mémoire de forme dans les oreillers, les chaussures de sport à coussin d'air, ainsi que les thermomètres infrarouges et les détecteurs de fumée, pour ne citer que ces innovations, sont autant de produits dérivés de l'exploration spatiale. L'exploration spatiale compte de nombreuses retombées scientifiques et techniques !

12.1. EXPÉRIENCES EN MICROPESEANTEUR

Un vaisseau spatial qui orbite dans l'espace est en état de *micropesanteur*. Lui et tous les objets qu'il contient ne subissent alors aucune force de traction, de compression ou de cisaillement. De ce fait, l'espace forme un laboratoire idéal où les scientifiques peuvent mener des expériences difficiles voire impossibles à réaliser sur Terre. C'est pour eux, au sens premier du terme, un véritable don du ciel. L'espace

permet de produire de nouveaux matériaux ou des médicaments plus efficaces. Entre bien d'autres domaines concernés, citons les métaux et les alliages, la céramique, les matériaux optiques, les supraconducteurs, les cristaux électroniques, la structure cristalline des semi-conducteurs, les cristaux d'ultra-ions, les zéolithes, les cristaux de protéines, l'insuline, l'interféron...



Figure 12.1 | Expérience scientifique en micropesanteur.

Des expériences biologiques importantes sont aussi réalisées dans l'espace, afin d'étudier la régulation des organismes vivants, de comprendre comment la micropesanteur affecte leur formation, leur croissance et leur comportement, d'observer les dommages

causés par le rayonnement hautement énergétique de l'espace, etc. De plus, la culture de tissus biologiques en micropesanteur permet d'éviter divers effets indésirables de convection et de sédimentation, ce qui aboutit à de meilleurs résultats. Par ce type d'expériences scientifiques et de recherches appliquées en micropesanteur, le secteur spatial produit d'importants bénéfices tant sur le plan économique que social. Si la Chine expérimente la micropesanteur depuis 1987, d'abord dans des satellites récupérables, puis dans des vaisseaux habités Shenzhou (figure 12.1), elle est passée à un stade supérieur avec le récent assemblage de sa station spatiale.

12.2. MUTAGÉNÈSE ET AGRICULTURE SPATIALE

La mutagénèse spatiale consiste à envoyer des graines ou des boutures dans l'espace afin de provoquer des mutations génétiques, puis de les ramener sur Terre pour qu'elles donnent naissance à de nouvelles variétés de plantes. Le vide, le rayonnement cosmique, le champ magnétique et le grand niveau de propreté de l'environnement spatial favorisent de telles mutations, qui surviennent plus souvent et de façon plus variée que sur Terre. Elles conduisent à des plantes au rendement plus élevé, de meilleure qualité, plus résistantes aux maladies et au développement plus rapide.

Cette mutagénèse s'inscrit plus généralement dans ce qui se nomme l'*agriculture spatiale*, le secteur le plus avancé de l'agriculture actuelle, au carrefour des biotechnologies et des technologies spatiales. Seuls quelques pays, tels que les États-Unis, la Russie et la Chine, maîtrisent en toute indépendance la technologie des capsules de retour sur Terre et ont mené avec succès des expériences de sélection spatiale.

Les scientifiques estiment que la conjonction d'un fort rayonnement, d'une faible pesanteur et du vide spatial sont les principaux déclencheurs de mutations génétiques dans les cellules de graines. Étant donné que la forme, la physiologie et l'évolution des plantes ont été influencées par la pesanteur terrestre depuis des millions

d'années, elles sont plus susceptibles de connaître des mutations génétiques impossible à obtenir sur Terre une fois qu'elles se trouvent en état d'apesanteur et soumises à d'autres facteurs propres à l'environnement spatial. Parmi les spécialistes, il n'y a pas encore de consensus sur les facteurs et les mécanismes exacts qui produisent ces effets. Mais c'est un fait constaté que des graines semées sur Terre au retour d'un séjour dans l'espace se développent en plants plus hauts et donnent des fruits plus gros, de meilleure qualité et avec un plus grand rendement (figure 12.2). Même si l'agriculture spatiale aboutit d'ores et déjà à de bons résultats, le manque de contrôle des mutations constitue un vide scientifique qui doit être comblé par des études plus approfondies. Des scientifiques de tous pays ont confirmé que l'environnement spatial influence les gènes des plantes, mais la compréhension du phénomène fait encore l'objet d'importants débats.

L'AGRICULTURE SPATIALE N'EST PAS TRANSGÉNIQUE

Un gène est une séquence d'ADN qui transmet un caractère héréditaire. C'est l'unité fondamentale de l'hérédité en biologie. L'agriculture transgénique consiste à isoler et modifier artificiellement une séquence de gènes d'un organisme et à l'insérer ensuite dans le génome d'un autre organisme. Tout cela dans le but d'obtenir une nouvelle variété avec des caractéristiques transmissibles intéressantes. De son côté, l'agriculture spatiale se borne à utiliser l'environnement spatial pour accélérer le processus de mutation des organismes. En cela, elle n'est pas fondamentalement différente de la mutation naturelle, puisque l'ADN des plantes est simplement remanié, sans aucune insertion de gènes appartenant à d'autres espèces. Les agricultures spatiale et transgénique sont donc fondamentalement distinctes. Dans l'ensemble, l'agriculture spatiale est beaucoup plus sûre que l'agriculture transgénique.



Figure 12.2 | Des citrouilles dont les graines ont subi la mutagenèse spatiale.

12.3. TÉLÉDÉTECTION ET OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Les satellites de télédétection sont des satellites artificiels équipés d'instruments destinés à observer la surface terrestre, les océans, l'atmosphère et autres phénomènes naturels. Principalement utilisés pour la gestion des ressources nationales, la surveillance et la protection de l'environnement, la planification urbaine, l'estimation des récoltes, la réduction des risques de catastrophe naturelle et les expériences scientifiques dans l'espace, ils sont étroitement liés à la vie quotidienne des populations.

Les satellites météorologiques, comme leur nom l'indique, sont des satellites de télédétection spécialisés dans le recueil des données

météorologiques. Ils observent et surveillent le temps qu'il fait et le climat de la Terre. Depuis leur position privilégiée dans l'espace, ils bénéficient d'une large vue sur l'atmosphère, ce qui permet, entre autres, de prédire plus facilement son évolution.

Les satellites météorologiques collectent des informations de divers types, tels que la pluie et la neige qui tombent, le gel, la lumière des villes, les incendies, les niveaux de pollution atmosphérique et aquatique, les aurores polaires, les tempêtes de sable, les zones couvertes par la neige et la glace, les courants marins, etc.

Les satellites météorologiques se classent en deux catégories, à savoir les satellites géostationnaires et les satellites polaires.

Les premiers sont positionnés en orbite au-dessus de l'équateur, à 35 786 km de la surface, et tournent à la même vitesse que la Terre. En conséquence, les satellites géostationnaires paraissent immobiles par rapport à une région donnée de la surface et peuvent donc transmettre en continu des données d'observation qui la concerne, dans le spectre visible ou infrarouge.

Les satellites météorologiques en orbite géostationnaire actuellement en activité comprennent la série chinoise Fengyun, la série américaine GOES ainsi que d'autres, déployés par la Russie, le Japon et l'Inde, pour ne citer que ces pays. De 1988 à 2023, la Chine a positionné 20 satellites météorologiques Fengyun en orbite stable, qui forment un système à échelle globale et fournissent des données météorologiques non seulement à la Chine mais à des utilisateurs répartis dans plus de cent pays ou région du monde. Ils font notamment partie du réseau mis en place par l'Organisation météorologique mondiale, une institution de l'ONU chargée de favoriser l'échange des données météorologiques à des fins de veille et de prévision, et s'inscrivent aussi dans la Charte internationale Espace et catastrophes majeures, une collaboration entre plusieurs pays qui se mobilise en cas d'inondations, d'ouragans, de tsunamis, d'éruptions volcaniques et autres catastrophes. La Chine prévoit à moyen terme de lancer encore 2 satellites Fengyun en orbite haute et 4 satellites en orbite

basse, ce qui lui permettra d'offrir à la communauté internationale des services encore plus complets.

Quant aux satellites polaires, ils sont généralement positionnés sur une orbite variant de 720 à 800 kilomètres d'altitude, passant par les pôles nord et sud de la Terre et héliosynchrone, c'est-à-dire synchronisée avec le mouvement du Soleil. Une telle orbite présente l'avantage de pouvoir survoler un même endroit de la surface terrestre chaque jour à la même heure.

Les images prises en lumière visible par les satellites météorologiques s'interprètent en outre très facilement. Les masses nuageuses, les fronts froids et chauds, les cyclones, les lacs, les forêts, les montagnes, les glaces, les incendies, la fumée, les nappes de pétrole, etc. se distinguent clairement. La juxtaposition d'une série de photos, en faisant apparaître les changements dans le développement des nuages, permet aussi de visualiser les vents.

L'analyse des images infrarouges fournies par les satellites indiquent aussi aux professionnels aguerris la hauteur et le type des nuages, la température de la surface terrestre, sur les continents comme sur l'eau, le niveau de pollution, ou l'intensité des marées et des courants marins. Ce dernier paramètre est très utile à l'industrie maritime pour établir des itinéraires économiques. La température de la mer ou du sol permet aux pêcheurs ou aux agriculteurs de faire de meilleures prises ou de protéger les cultures du gel. Celle du sol permet aussi de prédire la probabilité de survenue d'incendies. Les images infrarouges brutes sont généralement en noir et blanc, mais leur colorisation par un traitement informatique en améliore le contraste.

L'observation de la neige et de la glace sur les montagnes renseigne à l'avance sur l'approvisionnement en eau des rivières, ce qui permet d'anticiper les inondations ou les besoins en irrigation. Celle des icebergs en mer favorise la sécurité des navires. Celle des courants marins permet d'anticiper la propagation des nappes de pétrole en cas de marée noire. Celle des tempêtes de sable a grandement amélioré notre compréhension de ce phénomène : nous savons désormais que,

chaque été, de grandes quantités de poussière provenant du désert du Sahara en Afrique sont soufflées dans l'Atlantique jusqu'à parfois atteindre l'Amérique du Sud.

Le rôle des satellites météorologiques dans la guerre moderne apparaît aussi de plus en plus évident. Les satellites américains du programme DMSP, qui orbitent à une altitude comprise entre 835 et 850 km, par exemple, par la surveillance des nuages, de l'intensité des vents, des conditions maritimes, de la luminosité, des températures de la pression atmosphérique, apporte un soutien non négligeable aux opérations navales et aériennes.

SATELLITES MÉTÉOROLOGIQUES ET BROUILLARD

L'analyse de la manière dont la lumière est absorbée par l'atmosphère permet de détecter le brouillard et sa densité. Sur une image satellitaire, il est très facile de distinguer les nuages du brouillard : les premiers sont blancs, le second est gris ! L'observation par satellite du brouillard est principalement assurée par des lidars, des sortes de radars à laser. La Chine prévoit de lancer de nouveaux satellites météorologiques équipés d'instruments polarimétriques et multi-angles qui pourront préciser la taille et la composition chimique des différentes particules formant les brouillards.

12.4. SATELLITES DE TÉLÉCOMMUNICATION

Les satellites de télécommunication sont des satellites qui reçoivent, amplifient et transmettent des signaux électromagnétiques. Ils font donc office de relais entre des émetteurs et des récepteurs. Les canaux de communication qu'ils établissent peuvent être utilisés pour la radio, la télévision, le téléphone, internet et les transmissions militaires. Plus de 2 000 satellites de télécommunication sont en orbite autour de la Terre, tant pour des usages gouvernementaux qu'à destination des particuliers. L'intérêt de ces satellites pour les communications à longue distance vient du fait que la Terre est ronde et que les ondes électromagnétiques se propagent en ligne droite. S'ils

n'étaient pas relayés, les signaux se perdraient donc dans le sol ou dans l'espace.

Pour éviter l'interférence entre signaux différents, une agence des Nations unies, l'Union internationale des télécommunications (UIT), a été chargée de gérer l'attribution des bandes de fréquences que chaque organisation peut utiliser.

Si les satellites de télécommunication peuvent être placés sur différentes orbites et selon diverses inclinaisons, l'orbite géostationnaire est la plus couramment pratiquée. Trois ou quatre satellites positionnés sur cette orbite suffisent en effet à assurer une communication en temps réel sur l'ensemble du globe terrestre. Les satellites positionnés plus bas, en orbite moyenne ou basse, tournent plus rapidement que la Terre et n'apparaissent pas fixes dans le ciel, comme les satellites en orbite géostationnaire : ils traversent le ciel et semblent tomber à l'horizon.

Une orbite basse typique est une forme circulaire ou elliptique située à quelques centaines de kilomètres d'altitude et parcourue en 90 minutes environ. La position par rapport au sol des satellites en orbite basse varie donc rapidement, ce qui demande donc d'en utiliser un grand nombre pour garantir une communication ininterrompue. D'un autre côté, les lancements en orbite basse sont moins coûteux que les lancements en orbite géostationnaire. De plus, étant plus proches du sol, la puissance du signal nécessaire à la communication peut être réduite. Il faut donc trouver le juste équilibre entre nombre et coût des satellites.

Un groupe de satellites travaillant en collaboration se nomme une *constellation de satellites*. Le système Iridium, par exemple, est une constellation de satellites fournissant des services de télécommunication. Ces dernières années, les constellations de satellites de télécommunication déployés en orbite basse ont connu un développement important, à l'instar du projet Starlink de SpaceX et de la constellation Hongyan chinoise. Certaines constellations, comme celle du réseau américain Orbcomm, stockent les signaux reçus lors du passage au-dessus d'une zone, puis les renvoient lors du survol d'une autre zone.

L'HISTOIRE DES SATELLITES IRIDIUM

Iridium est un système de téléphonie par satellite à échelle mondiale à l'origine proposé par la société Iridium, une filiale de la société américaine Motorola. La conception du projet s'est échelonnée sur plus de 11 ans, de 1987 à la mise en opération officielle en 1998, pour un coût dépassant les 5 milliards de dollars. Les concepteurs pensaient à l'origine que le système nécessiterait 11 satellites uniformément répartis le long de 7 orbites, ce qui faisait penser aux 77 électrons tournant autour du noyau de l'élément chimique Iridium, d'où le nom. Une étude plus poussée a toutefois montré que 6 orbites suffisaient pour répondre au cahier des charges de performance technique. En conséquence, le nombre total de satellites a été réduit à 66 mais le nom a été conservé. La constellation forme un vaste réseau à 780 km d'altitude, qui permet de tenir des conversations téléphoniques entre n'importe quels points du globe. Du fait d'erreurs d'exploitation et du coût élevé des communications, la société Iridium a fait faillite en mars 2000. Rachetée par l'armée américaine, elle est depuis utilisée à des fins militaires ou pour certaines activités de plein air. Avec la vague du New Space, l'industrie spatiale privée, et l'émergence de SpaceX, les coûts de lancement ont considérablement diminué. Le 14 janvier 2017, la fusée Falcon 9 a lancé 10 nouveaux satellites Iridium de deuxième génération en orbite terrestre basse, marquant ainsi une nouvelle phase de développement des systèmes de télécommunication par satellite.

12.5. POSITIONNEMENT ET NAVIGATION

Avec les télécommunications, le positionnement et la navigation comptent parmi les applications les plus importantes des constellations de satellites. Les principaux systèmes de navigation internationaux sont aujourd'hui le GPS américain, le GLONASS russe, le Beidou chinois et le Galileo européen.

Le GPS, acronyme de Global Positioning System (« Système mondial de positionnement »), a été mis en place par le département de la

Défense des États-Unis. Ce système de navigation par satellite couvre la planète entière à tout moment et en toutes circonstances. Pour un coût très faible, il fournit des indications très précises de lieu, de temps et de vitesse à des utilisateurs situés n'importe où dans le monde, leur permettant ainsi de se localiser et de naviguer en temps réel.

Le système est composé d'une constellation de 24 satellites (21 opérationnels et 3 de secours) bouclant une orbite toutes les 12 heures à une altitude de 20 200 km. Ils sont uniformément répartis sur 6 plans orbitaux inclinés à 55 degrés. Dans des conditions idéales, plus de 4 satellites GPS peuvent être observés à tout moment et en tout lieu dans le monde. Rappelons que la position d'un point est déterminée par trois coordonnées X, Y et Z dans un système de référence. En conséquence, pour déterminer la position inconnue d'un point P, il suffit de connaître sa distance à trois points A, B, et C de coordonnées connues et de résoudre un système d'équations à trois variables. Le GPS est basé sur ce principe. Grâce à la répartition bien pensée des orbites des satellites, un utilisateur situé à n'importe quel point P de la Terre peut à tout instant observer au moins trois satellites A, B et C. Comme les positions des satellites sont connues à tout moment, il suffit de mesurer leur distance à l'utilisateur pour déterminer sa position.

Le système Beidou est un système de navigation par satellite développé par la Chine. C'est le troisième système opérationnel à avoir été déployé après le GPS américain et le GLONASS russe. Il en est actuellement à sa troisième génération, générations qui, toutes à leur manière et en leur temps, ont réalisé des percées historiques. Beidou 1 a révolutionné les systèmes de distribution, en particulier de l'alimentation ; Beidou 2 a intégré de main de maître diverses technologies clefs comme celle des horloges atomiques embarquées de haute précision ; quant à Beidou 3, encore plus avancé, il fournit des services de positionnement, de navigation et de synchronisation à des utilisateurs situés n'importe où dans le monde. Sa précision est de 10 mètres pour le positionnement, de 0,2 mètres par seconde pour la vitesse et 50 nanosecondes pour la synchronisation. Il fonctionne

avec une constellation de 30 satellites : 3 en orbite géostationnaire, 24 en orbite moyenne et 3 en orbite géosynchrone inclinée. Les satellites en orbite moyenne sont répartis uniformément sur trois plans orbitaux, séparés de 120 degrés les uns des autres. Le troisième satellite géostationnaire et dernier satellite de la constellation a été lancé le 23 juin 2020.

12.6. TOURISME SPATIAL

Que ce soit dans le cadre d'une mission à bord de la Station spatiale internationale ou dans les films de science-fiction, les astronautes sont presque toujours des professionnels. Ne peut-on pas envisager d'aller dans l'espace en simple touriste ? Bien sûr que si, et cela se fait déjà ! Au début du *xxi*^e siècle, des passagers ont commencé à embarquer sur des vols spatiaux à leur propre frais. De 2001 à 2009, neuf touristes ont ainsi séjourné dans la Station spatiale internationale (figure 12.3). L'initiative du tourisme spatial revient à l'américain Dennis Tito qui a proposé de financer l'agence spatiale russe en échange d'un vol à destination de la Station spatiale internationale. En raison de l'effondrement de l'Union soviétique, des coûts élevés des vols spatiaux, et notamment de la location du cosmodrome de Baïkonour au Kazakhstan, la Russie a ensuite développé le concept. Après Dennis Tito en 2001, la Station spatiale internationale a accueilli, le sud-africain Mark Shuttleworth (2002), l'américain Gregory Olsen (2005), la femme d'affaires américano-iranienne Anousheh Ansari (2006), ainsi donc devenue *la* première touriste spatiale, l'entrepreneur américain d'origine hongroise Charles Simonyi (2007), le développeur américain de jeux vidéo Richard Garriott (2008) et le fondateur et PDG du Cirque du Soleil Guy Laliberté (2009) Chaque candidat au voyage doit passer un examen médical rigoureux et suivre une formation poussée pour avoir la chance d'embarquer pour l'espace. Le séjour dure une dizaine de jours pour un prix qui a varié entre 20 et 35 millions de dollars.

En raison des capacités limitées de la Station spatiale internationale, l'accueil des touristes a connu une longue pause à partir de

2009. À la suite de son agrandissement, les vols ont repris en 2021, à commencer par celui de l'entrepreneur japonais Yūsaku Maezawa et Yozo Hirano. L'année 2021 a aussi marqué l'irruption de l'incontournable SpaceX dans le tourisme spatial. Sa capsule Dragon Crew a d'abord emporté en septembre quatre passagers payants qui ont tourné durant deux jours autour de la Terre, puis, en avril 2022 et mai 2023, quatre autres passagers à chaque fois pour un séjour de dix jours à bord de la Station spatiale internationale. D'autres sociétés privées s'engagent quant à elles sur des vols touristiques suborbitaux, c'est-à-dire de petits sauts de puce dans l'espace, à l'instar de Blue Origin du fondateur d'Amazon Jeff Bezos qui assurent de tels vols depuis 2021. Virgin Galactic, de l'entrepreneur Richard Branson, a suivi à partir de juin 2023.



Figure 12.3 | Des touristes spatiaux en visite à la Station spatiale internationale.

13

Limites techniques

Selon la théorie dite « Out of Africa », nos très lointains ancêtres sont apparus en Afrique et ont parcouru tout ce continent avant de se lancer résolument à l'assaut de terres et de mers inconnues, ce qui a abouti au peuplement coloré et diversifié du monde que nous connaissons aujourd'hui. La conquête spatiale par l'homme moderne suivra sans doute le même schéma. Le milieu qu'il doit affronter est toutefois plus hostile et plus difficile d'accès que l'océan. Rien que le fait de s'arracher à l'attraction gravitationnelle de la Terre demande un savoir considérable et des investissements colossaux. Mais l'humanité, comme on dit, ne peut pas mettre tous ses œufs dans le même panier, ne peut pas tout miser sur la seule planète Terre. La collision d'un seul astéroïde suffirait en effet à nous faire subir le même sort que les dinosaures. Avec le temps, l'homme trouvera sans doute un moyen de quitter durablement la Terre, d'établir une base sur la Lune, de créer une ville sur Mars, de coloniser des planètes plus éloignées. Il n'en reste pas moins que le développement de nos technologies spatiales actuelles se heurte à un certain nombre de problèmes et de limites.

13.1. PROBLÈME DU COÛT

Pour gagner l'espace, un objet doit s'arracher à l'attraction gravitationnelle terrestre et atteindre une vitesse d'au moins 7,9 kilomètres par seconde, la vitesse dite de *satellisation minimale*. En pratique, cela signifie dépenser des sommes colossales pour chaque lancement. Pour donner une idée, le rover Curiosity déposé sur Mars en 2012 a coûté 200 millions de dollars, soit le dixième à peine du budget total de la mission. De ce point de vue, réduire au maximum le poids à lancer est une étape cruciale dans la conception d'un projet. Mais il reste toujours un noyau incompressible, surtout dans le cas des vaisseaux habités, qui doivent contenir le lourd matériel nécessaire au maintien en vie des astronautes. L'utilisation de carburants hybrides plus efficaces et plus puissants pour les lanceurs est aussi essentielle pour assurer des décollages à meilleur coût.

Même si la situation évolue, les lanceurs sont encore à usage unique dans la grande majorité des cas. Un lancement est donc un acte de sacrifice qui coûte très cher. La réutilisation au moins partielle des fusées, en amortissant les coûts sur plusieurs décollages, est une voie d'économie aujourd'hui très explorée. La récupération d'une partie du matériel peut se faire à l'aide de parachutes, par vol plané et atterrissage horizontal, assisté ou non d'un système de motorisation, ou par un système de propulsion assurant un atterrissage vertical.

La technique du parachute a le double mérite de la simplicité et de l'économie des coûts. Il suffit en effet d'installer des parachutes éjectables sur le lanceur ou certains de ses éléments clefs comme les moteurs. En raison des vents, il est toutefois difficile de contrôler avec précision l'endroit où les éléments vont atterrir. De plus, l'atterrissage ne se fait pas toujours en douceur, avec tous les risques d'endommagement du matériel que cela représente. Pour y pallier, on peut ajouter un système de rétropropulsion, des airbags ou encore récupérer le matériel en vol près du sol à l'aide d'un hélicoptère. De nouveaux matériaux et de nouvelles technologies devraient également permettre à l'avenir de mieux contrôler la descente des parachutes.

La technique du vol plané consiste à se servir d'ailes pour faire revenir le lanceur sur terre de manière horizontale comme un avion. Elle offre l'avantage d'une plus grande flexibilité sur les lieux possibles d'atterrissage, d'un meilleur contrôle de la manœuvre et d'un retour sur la terre ferme en douceur. Elle présente toutefois l'inconvénient de devoir ajouter des ailes, ce qui nuit à la structure et à l'aérodynamisme du lanceur lors de la phase d'ascension, et éventuellement un système de propulsion auxiliaire, une opération technique complexe.

La récupération par un atterrissage vertical utilisant le même système de propulsion qu'au décollage nécessite que le ou les moteurs de la fusée aient la capacité de redémarrer plusieurs fois et de fonctionner à faible puissance. Il faut également prévoir de bons amortisseurs et un système de guidage capable de surmonter les interférences inhérentes à l'atterrissage pour ajuster au mieux la puissance des moteurs et l'attitude du lanceur. Cette technique de récupération présente l'avantage d'un atterrissage précis, sans causer de dommages importants à la fusée, ce qui facilite sa réutilisation ultérieure. De plus, les changements à apporter à la structure sont techniquement moins délicats que l'ajout d'ailes demandé par la récupération en vol horizontal, ce qui la rend plus réalisable à court terme. Le concept de lanceur réutilisable est aujourd'hui en voie de développement rapide, porté notamment par les succès en la matière des sociétés SpaceX et Blue Origin qui, toutes deux, réutilisent déjà les premiers étages de leurs fusées. Il n'est pas exagéré de dire que SpaceX, avec ses lanceurs Falcon 9 partiellement réutilisables opérant de manière routinière, a ouvert la voie à une nouvelle ère spatiale. Si les fusées peuvent être utilisées à plusieurs reprises comme les avions, le coût du voyage spatial pourrait à terme chuter à quelques centaines de dollars !

13.2. AUGMENTATION DES DÉBRIS SPATIAUX

Au cours de ces cinquante dernières années, des débris de lanceurs, de satellites et de diverses pièces de haute technologie ont transformé notre environnement spatial en une vaste décharge. On recensait en

2023 près de 35 000 débris d'un diamètre supérieur à 10 centimètres, soit en gros la taille d'une balle de baseball, et plus de 150 millions d'un diamètre inférieur. En raison de leur vitesse extrêmement élevée, des objets tels que des bouchons, des couvercles de lentilles ou même des simples écailles de peinture de la taille d'une tête d'épingle peuvent endommager des points sensibles des engins spatiaux. Une vis des plus banales suffit à détruire un vaisseau spatial. Si des structures de protection spéciales, fabriquées à partir de matériaux particuliers, peuvent agir comme bouclier contre les collisions de petits débris, il n'y a rien à faire pour éviter celle d'un satellite entier. Les scientifiques peuvent au mieux limiter les risques de chocs en choisissant les orbites les plus sûres grâce au suivi et à la détermination des trajectoires des débris. Cela dit, la technologie actuelle étant ce qu'elle est, certains débris passent entre les mailles du filet.

Le nombre sans cesse croissant de débris spatiaux entraîne un risque toujours plus grand de collisions, rendant ainsi l'espace de plus en plus dangereux. Tout en construisant un vaste réseau de radars terrestres pour surveiller ces déchets, les scientifiques ont imaginé plusieurs solutions de nettoyage spatial. Certains d'entre eux ont par exemple proposé de construire un « filet spatial » pour récupérer les débris en orbite comme on pêche les poissons, mais il est très difficile de désorbiter un objet en exerçant une force externe. Il faut encore laisser à la recherche sur la meilleure façon de nettoyer l'espace un peu de temps pour progresser.

13.3. LIMITES DU CONTRÔLE DANS L'ESPACE LOINTAIN

Le Deep Space Network (DSN – « réseau de communications avec l'espace lointain ») est un réseau d'antennes paraboliques situées en Californie aux États-Unis, en Australie et en Espagne. Il a été mis en place pour suivre et contrôler les engins spatiaux planétaires et interplanétaires. Sa portée atteint des milliards de kilomètres. Des petits satellites expérimentaux étudiants à la sonde New Horizons patrouillant dans la ceinture de Kuiper, tous dépendent de lui.

Avec l'augmentation sans cesse croissante des missions spatiales, le Deep Space Network commence toutefois à atteindre ses limites. Et comme les signaux renvoyés par les engins spatiaux sont d'autant plus faibles qu'ils s'éloignent de la Terre, plus l'exploration progresse, plus les besoins en contrôle et en navigation dans l'espace lointain sont élevés.

De fait, plus les engins s'enfoncent dans l'espace, moins ils sont contrôlables depuis la Terre. Il est donc nécessaire de les équiper d'un système de navigation autonome. Trois méthodes courantes coexistent à cette fin.

La première, de nature astronomique, se fonde sur le Soleil et diverses planètes aux positions bien connues. C'est la plus simple et la plus mûre. Divers angles avec ces corps célestes mesurés depuis l'engin spatial permettent d'en déduire sa position, sa vitesse et autres paramètres. Ce principe de navigation autonome est en usage depuis le programme Apollo développé dans les années 1960 aux États-Unis. Si elle est très facile à mettre œuvre, elle présente toutefois l'inconvénient d'une précision qui diminue à mesure que l'engin s'éloigne des corps célestes visés. L'impact d'une petite erreur sur la mesure d'un angle s'amplifie en effet avec la distance.

La deuxième méthode repose sur le même principe mais tâche de remédier au défaut précédent en faisant appel aux astéroïdes ou aux satellites planétaires rencontrés en chemin à proximité. Si la précision est meilleure, la difficulté provient cette fois de la brièveté de la période d'observation des astéroïdes, qui sont en outre plus difficiles à viser. Cette méthode a été très utilisée sur les sondes de première génération telles que Pioneer, Voyager, Galileo, Deep Space 1 et Deep Impact. Elle est également très mature.

La troisième méthode de navigation est basée sur les pulsars X. Les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation rapide situées très au-delà du système solaire. La donnée de plusieurs d'entre eux, une fois leur position bien déterminée par la constitution de tables d'éphémérides, forment un système de référence très précis. Comme les signaux

pulsés qu'ils émettent sont en outre plus réguliers que les battements des meilleures horloges atomiques terrestres, ils forment d'excellents repères spatiaux et temporels, autant dire des balises de navigation naturelles idéales pour les engins spatiaux. Les pulsars émettent leur rayonnement électromagnétique dans des bandes de fréquences qui vont des ondes radio aux rayons gamma en passant par les infrarouges, la lumière visible, les ultraviolets et le rayonnement X. Ce dernier, par son énergie relativement élevée, est plus facile à détecter et à traiter que des signaux plus faibles. Des petits équipements, inférieurs au mètre carré, bien adaptés aux contraintes des engins spatiaux sont suffisants. La Chine a réalisé une grande première mondiale, le 10 novembre 2016, en lançant XPNV 1, le premier satellite expérimental destiné à valider la navigation par pulsars X.

13.4. IMPACT DU RAYONNEMENT SPATIAL

Au-delà du bouclier de protection que forment l'atmosphère et le champ magnétique terrestre, le rayonnement cosmique, constitué de nombreuses particules subatomiques se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière, représente un danger potentiellement mortel. Un niveau trop élevé de rayonnement affecte la santé des astronautes, en provoquant notamment la cataracte, la maladie d'Alzheimer ou divers types de cancers.

Lors du voyage vers Mars du rover Curiosity, la NASA, par une série de mesures, a constaté que le niveau de rayonnement était de plusieurs centaines de fois supérieur à celui reçu à la surface de la Terre. L'unité qui mesure l'impact de la radioactivité sur le corps humain se nomme le sievert. L'exposition à un rayonnement de 1 sievert augmente le risque de développer un cancer de 5 %. Pour donner une idée, la surface terrestre reçoit un rayonnement extra-atmosphérique d'un millisievert par an et les astronautes de la Station spatiale internationale 100 millisieverts tous les six mois. Les niveaux de rayonnement mesurés lors du voyage de Curiosity vers Mars ont atteint 330 millisieverts, soit un niveau très élevé.

Les engins spatiaux sont généralement protégés par de l'aluminium, un métal peu efficace pour contrer les particules à haute énergie du rayonnement cosmique. À l'avenir, certains plastiques pourraient être privilégiés car, outre leur meilleure solidité et leur plus grande légèreté, ils sont riches en atomes d'hydrogène, dont les petits noyaux ne provoquent pas de rayonnements secondaires. Selon des scientifiques du Southwest Research Institute (SwRI) aux États-Unis, ces plastiques réduiraient considérablement la quantité de rayonnement reçue par les astronautes dans l'espace et pourraient donc bientôt revêtir les vaisseaux habités ou étoffer les combinaisons spatiales.

L'usage des champs magnétiques constitue une autre piste de recherche. En 2008, des scientifiques du Rutherford Appleton Laboratory (RAL), au Royaume-Uni, ont imaginé un dispositif électromagnétique capable de dévier de nombreuses particules de haute énergie en provenance du Soleil, qui protégerait ainsi les astronautes contre les dommages causés par les rayonnements et réduirait leur risque de développer un cancer. Il pourrait en outre remplacer les équipements de protection traditionnels et donc alléger la charge des vaisseaux spatiaux. Avec le temps et quelques améliorations, le dispositif pourrait même être efficace lors des éruptions solaires, voire se montrer capable de dévier jusqu'à des rayonnements lasers.

Qu'il s'agisse d'engins spatiaux ou d'astronautes, rien dans l'espace ne peut échapper au rayonnement cosmique. D'une manière ou d'une autre, les futures missions interplanétaires habitées devront trouver un moyen de limiter leur impact.

14

Les risques de collision

L'immensité spatiale qu'il nous reste à explorer attise notre désir et notre curiosité tout en provoquant un léger mouvement de recul. Quels périls nous attendent dans ce vaste monde inconnu ? C'est en comprenant bien les dangers qu'il nous réserve que nous saurons prendre les mesures appropriées pour les maîtriser, et ainsi l'explorer plus sereinement. Les risques de collision avec les débris spatiaux, qu'ils soient naturels ou artificiels, menacent particulièrement les engins spatiaux et les astronautes.

14.1. LES DÉBRIS

Depuis les débuts de l'ère spatiale, l'homme a toujours laissé derrière lui des débris en orbite. Ces dernières années, leur nombre a beaucoup augmenté, ce qui pose un problème de sécurité de plus en plus manifeste. Quels dangers représentent exactement les débris spatiaux et comment y faire face ?

Vous souvenez-vous du film *Gravity* ? On y voit la Station spatiale internationale et la station chinoise Tiangong 1 tour à tour détruites

par une volée de débris. Bien que l'histoire racontée soit fictive et que certains détails soient particulièrement irréalistes, la dangerosité des déchets spatiaux n'y est pas exagérée.

Par *débris spatial*, on entend des objets ou des morceaux d'objets qui ont perdu toute fonction et qui gravitent sur une orbite terrestre fréquentées par des satellites, disons entre 100 et 40 000 km d'altitude. On les qualifie parfois de débris *artificiels* pour les distinguer des débris *naturels* que forme la poussière cosmique.

Cette poussière cosmique est constituée de micrométéorites, des grains de matière qui proviennent de l'espace interstellaire et interplanétaire. Généralement d'une taille inférieure au millimètre, ces grains forment un flux dont la vitesse peut dépasser les 11 kilomètres par seconde. C'est en quelque sorte un bruit de fond naturel de débris spatiaux. Dans les zones typiquement traversées par les satellites, le flux de poussière cosmique est aujourd'hui de deux ordres de grandeur inférieur à celui des débris spatiaux artificiels.

Les débris spatiaux artificiels sont des fragments de matière produits et abandonnés par l'homme au cours de son activité spatiale. On les appelle aussi *déchets spatiaux*. Il s'agit plus spécifiquement d'équipements en fin de vie, de charges utiles tombées en panne, de restes de lanceurs, de matériaux d'isolation thermique, de dispositifs de séparation ainsi que de sous-débris résultant de collisions ou de l'érosion. Du point de vue d'un engin spatial, tout corps pouvant entrer en collision avec lui ou causer des dommages doit être considéré comme un débris spatial.

Les débris de taille et de poids importants peuvent affecter drastiquement les performances d'un engin spatial, si ce n'est le rendre tout à fait inutilisable. En conséquence, le recensement et la surveillance systématiques des débris spatiaux dans les zones orbitales critiques, ainsi que la prise de mesures appropriées pour réduire leur nombre et en atténuer les dangers, sont désormais au premier rang des préoccupations de la communauté scientifique et de l'industrie spatiale.

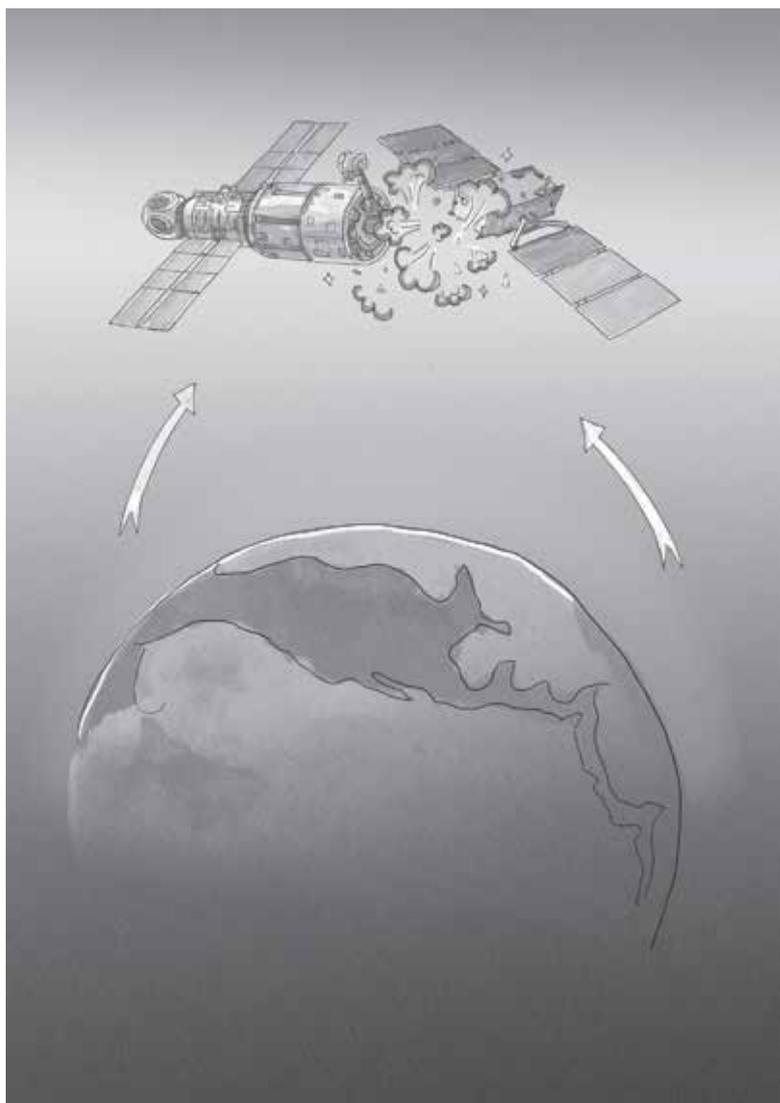


Figure 14.1 | Une collision entre deux satellites.

La quantité de débris spatiaux artificiels varie beaucoup avec le temps. Elle dépend des capacités techniques des pays, de la fréquence des lancements, du niveau de destruction du matériel. De l'envoi du premier satellite artificiel en 1957 au 1^{er} juillet 2019, l'homme a lancé au total 8 461 engins dans l'espace, dont 3 432 sont retombés et 5 029 gravitent toujours. Parmi ces derniers, toutefois, seuls un peu plus de 1 000 fonctionnent normalement, les autres ayant de fait acquis le statut de débris spatial. Durant cette période, des centaines d'incidents ou d'accidents tels que des désintégrations plus ou moins partielles, plus ou moins désirées, des explosions ou des collisions ont aussi produit de nombreux débris spatiaux. Le 10 février 2009, par exemple, le satellite américain Iridium 33 et le satellite militaire russe hors service Cosmos 2251 se sont heurtés en orbite au-dessus de la Sibérie (figure 14.1), faisant de cette collision le premier cas de destruction mutuelle de satellites. Aujourd'hui, on l'a vu plus haut, on compte environ 35 000 débris d'un diamètre supérieur à 10 centimètres et plus de 150 millions d'un diamètre inférieur.

La plupart des débris circulent sur une orbite approximativement circulaire. Ceux d'une masse inférieure au gramme situés à 500 km d'altitude se désintègrent dans l'atmosphère en quelques années, voire quelques mois durant les périodes de forte activité solaire, en raison de l'augmentation de la densité et donc de la traînée qui en résulte. Sur une orbite géostationnaire, en revanche, sans traînée atmosphérique pour les faire décliner, les débris flottent dans l'espace indéfiniment. Et comme ils peuvent entrer en collision les uns avec les autres pour créer de nouveaux débris, dits de *deuxième génération*, leur nombre continuera à augmenter. Par leur profusion, ils ont déjà eu un impact considérable sur les activités spatiales (figure 14.2).

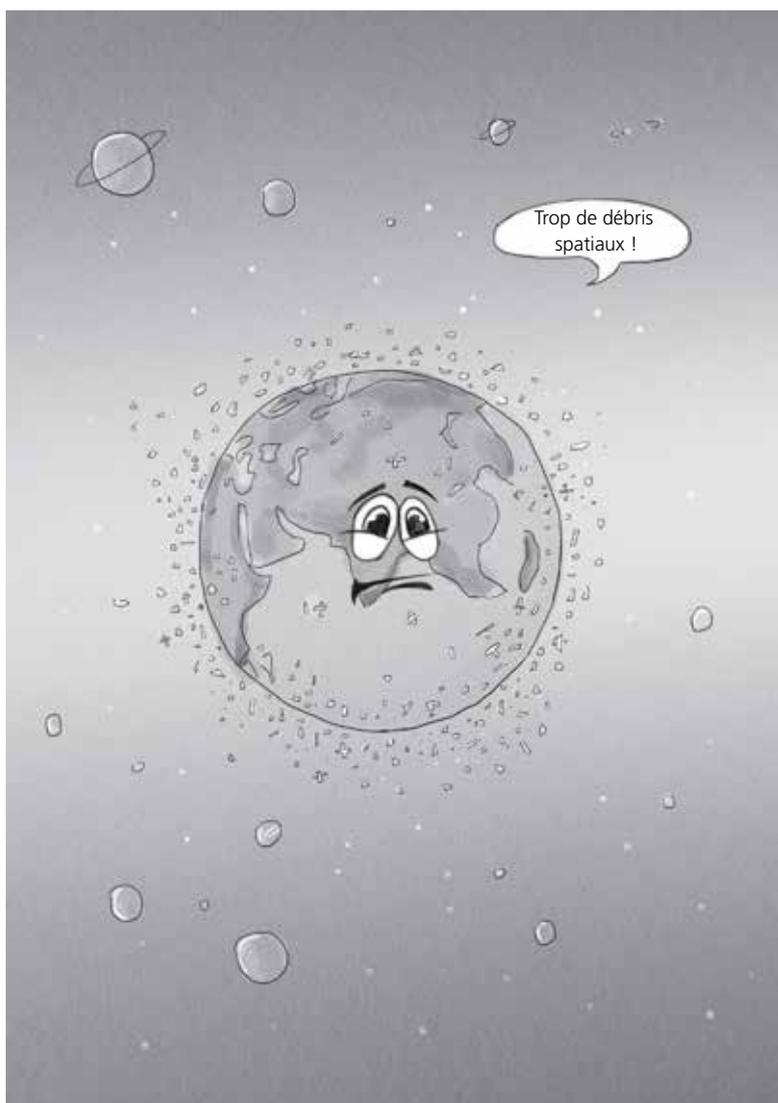


Figure 14.2 | La Terre environnée de débris spatiaux.

14.2. LES EFFETS D'UNE COLLISION

Quand ils heurtent un engin spatial, les débris se déplacent à des vitesses allant de plusieurs kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres par seconde, ce qui libère une énergie destructrice considérable ! L'impact de débris spatiaux mesurant quelques micromètres de diamètre crée des dommages locaux importants, voire fatals quand ils touchent des composants clefs. Même un impact à faible énergie sur une surface, par l'érosion et les modifications des caractéristiques d'absorption des rayonnements qu'elle entraîne, peut empêcher un engin spatial de fonctionner normalement. Des débris de quelques millimètres ont la capacité de fissurer ou de perforer les surfaces des engins spatiaux, tandis que ceux de quelques centimètres entraînent des conséquences potentiellement catastrophiques.

Les études de risques ont montré qu'un simple choc contre la coque d'un équipement électronique peut produire une fragmentation interne causant de graves dysfonctionnements. La collision entre des débris spatiaux et des conteneurs pressurisés peut provoquer une fuite ou une rupture, avec cette double conséquence de mettre prématurément fin à la mission et de générer encore davantage de débris.

Même les engins spécifiquement conçus pour résister aux chocs des débris ne peuvent être intégralement protégés. Certains éléments, tels que les panneaux solaires, les antennes de communication ou autres dispositifs sensibles restent vulnérables.

Les risques de collision par un débris de petite taille sont relativement élevés. En orbite basse, la diminution du diamètre des débris d'un ordre de grandeur augmente d'un facteur 100 la probabilité d'impact sur chaque centimètre carré d'un engin spatial. Selon les données actuelles, un engin spatial typique, de 10 mètres carrés de section transversale, en orbite durant dix ans dans la zone la plus dense en débris, présente une probabilité de 0,1 % d'entrer en collision avec un gros débris, de 1 % avec des débris de 1 à 10 centimètres, de presque 100 % avec des débris de 1 millimètre à 1 centimètre, et plus encore pour des débris de moins de 1 millimètre.

Les effets des collisions sont nombreux et variés. Les petits débris, de l'ordre de quelques micromètres de diamètre et d'une masse de quelques microgrammes, surtout quand ils sont répétés, peuvent endommager la surface d'un engin, en particulier ses optiques, ce qui le fait voir flou. Les impacts sur les matériaux de contrôle thermique peuvent également altérer la température de surface, avec des conséquences potentiellement néfastes pour les équipements situés au-dessous.

Les débris spatiaux de taille légèrement supérieure peuvent perforer la surface de l'engin spatial, entraînant ainsi, par exemple, un dysfonctionnement des circuits électriques des panneaux solaires. Les impacts répétés et plus profonds peuvent endommager les systèmes de contrôle ou les charges utiles placés à l'intérieur de l'engin.

Les impacts de débris spatiaux peuvent également créer des nuages de plasma. Dans l'environnement spatial, en effet, il arrive que les débris spatiaux entrant en collision à grande vitesse avec les matériaux de surface d'un engin se vaporisent. En conditions de micropesanteur, ce nuage stagne autour de l'engin, y pénètre éventuellement, ce qui perturbe l'alimentation électrique et cause des pannes.

Quand un débris spatial relativement important entre en collision à grande vitesse avec un engin spatial, il lui transfère une énorme quantité d'énergie cinétique, ce qui modifie aussi sa position et peut même affecter son orbite.

Les impacts des débris réduisent aussi la résistance ou provoquent des fissures sur des parois de conteneurs, qui laissent dès lors échapper les gaz ou les liquides dont ils sont remplis. Dans les cas où ces conteneurs sont hautement pressurisés, une explosion est même à redouter.

Enfin, un gros débris spatial qui heurte la structure profonde d'un engin peut aller jusqu'à le désintégrer.

Avec le développement continu de l'activité spatiale humaine, surtout en orbite basse, la densité des débris menace de plus en plus la sécurité des engins spatiaux. Les collisions sont loin d'être

exceptionnelles. Les agences spatiales américaine ou européenne ont toutes deux expérimenté des collisions avec des débris ayant entraîné l'endommagement ou la perte définitive de satellites.

Le satellite de reconnaissance militaire français Cerise, par exemple, a soudainement commencé à tourner sur lui-même le 24 juillet 1996. Le système de surveillance russe a établi un peu plus tard que cette perte de contrôle était due à la collision du mât télescopique de 6 mètres de long stabilisant le satellite avec un fragment de l'étage supérieur d'une fusée Ariane lancée dix ans auparavant.

Lors de son deuxième vol, en juillet 1983, la navette spatiale américaine Challenger a été touchée par une écaille de peinture blanche de 0,2 millimètre d'épaisseur détachée d'une fusée Delta, ce qui a créé une petite éraflure à la surface.

Le satellite d'observation européen ERS-1 (European Remote Sensing 1) et le satellite d'observation français SPOT-2 (Système Probatoire d'Observation de la Terre 2) ont dû manœuvrer pour éviter les collisions avec des débris spatiaux en juin et juillet 1997. Une étude montre qu'il est nécessaire d'agir en orbite une à deux fois par an pour assurer la sécurité des satellites en orbite basse autour de la Terre.

De 1986 à 1997, les navettes spatiales ont effectué quatre manœuvres d'évitement. Les stations spatiales, à l'instar de Mir en premier lieu, ont dû et doivent encore souvent modifier leur trajectoire pour éviter les débris spatiaux.

L'analyse de pièces récupérées montre également que les collisions sont assez fréquentes. Lors du retour sur Terre du satellite Eureka, l'Agence spatiale européenne a ainsi relevé de nombreuses traces d'impact sur le bouclier thermique. La plupart des cratères mesuraient de 250 à 500 micromètres de diamètre, le plus grand atteignant les 6,4 millimètres. Les panneaux solaires du télescope spatial Hubble portent encore plus de traces d'impact, des centaines de fois plus dans la gamme des cratères de 200 à 300 micromètres de diamètre.

LE CRASH DE TIANGONG 1

Un peu avant la rentrée atmosphérique de la station spatiale Tiangong 1, des médias occidentaux ont déclaré que son contrôle avait été perdu et que sa chute au sol représentait un danger. Plusieurs experts en astronautique chinois ont contesté cette affirmation en ajoutant que les débris non désintégrés tomberaient dans une zone maritime bien balisée, et sans danger pour les continents. Ce qui a été confirmé par les faits.

Le 2 avril 2018, en effet, les rares pièces de la station spatiale Tiangong 1 ayant survécu à la rentrée atmosphérique sont tombées au milieu du Pacifique Sud. Selon le site officiel du Programme spatial habité de la Chine « Le 2 avril 2018, vers 8 h 15, après avoir passé plus de six ans en orbite, Tiangong 1, sous la surveillance étroite et en temps réel des spécialistes en astronautique chinois, est entrée dans l'atmosphère et s'y est presque entièrement désintégrée, comme prévu et dans la zone désignée, à 163,1 degrés de longitude ouest et 14,6 degrés de latitude sud, au milieu du Pacifique Sud. »

Dans le cadre d'une étude sur les débris spatiaux en orbite autour de la Terre entre 300 à 500 kilomètres d'altitude, la NASA a lancé en 1984 puis récupéré en 1990 un satellite de la taille d'un bus nommé Long-Duration Exposure Facility (LDEF). L'inspection de sa surface a révélé plus de 30 000 traces de collisions avec des débris spatiaux, dont plus de 5 000 d'un diamètre supérieur à 0,5 millimètre, le plus grand cratère atteignant les 5 millimètres. De grandes structures, telles que la station chinoise Tiangong 1, la station américaine Skylab et la station russe Mir, une fois leurs missions achevées, sont également restées un temps à l'état de débris spatiaux, avant de chuter définitivement. Étant donné leur taille, il arrive souvent que ce type de structure ne soit pas entièrement désintégré lors de la rentrée dans l'atmosphère, de sorte que la partie principale, par l'énorme énergie d'impact qu'elle dégage en s'écrasant au sol, puisse menacer des vies et des biens sur Terre. Avec le développement des engins spatiaux utilisant l'énergie

nucléaire, des éléments radioactifs pourraient être également libérés en grande quantité, avec des conséquences très graves pour l'environnement. Lorsqu'elles tombent ou passent à proximité de la Terre, les trajectoires de ces grandes structures sont donc étroitement surveillées partout dans le monde.

Les débris représentent un danger majeur non seulement pour les stations spatiales mais aussi pour les astronautes qui travaillent en dehors. Les impacts des débris sont l'une des principales causes de dommage mécanique et de destruction des engins, ainsi que l'un des principaux facteurs affectant leur durée de vie. Les conséquences des collisions peuvent être extrêmement graves. Conscientes de l'importance de cette question, la plupart des puissances spatiales prennent des mesures pour réduire la quantité de débris existants, limiter la production de nouveaux débris, et intensifier la recherche sur les technologies de protection.

14.3. PARER AU RISQUE

L'augmentation très rapide ces dernières années du nombre de débris spatiaux représente un danger dont il faut tenir compte. À ce rythme, si des mesures efficaces ne sont pas prises pour lutter contre la dégradation du proche environnement terrestre, nous resterons pour toujours prisonniers de notre berceau et tous nos rêves d'émancipation seront brisés à jamais.

14.3.1. Surveillance des gros et moyens débris

En raison de leur grande variété de taille, de masse et de densité, il est très difficile de détecter de manière exhaustive les débris spatiaux. Les grands débris sont rares et représentent donc un faible risque de collision. Ils sont généralement surveillés à l'aide de télescopes et de radars depuis la Terre, à l'instar du radar imageur à longue portée de l'Observatoire Haystack, situé aux États-Unis. Capable de détecter des objets de 6 mm à une distance de 1 000 km, il constitue depuis 1990 la principale source de données de la NASA sur les débris spatiaux

d'une taille comprise entre 1 et 30 cm. La méthode la plus efficace sur le plan technologique consiste toutefois à surveiller les débris depuis des satellites équipés de détecteurs, qu'ils fonctionnent dans la gamme des ondes radio, de l'infrarouge ou de la lumière visible, mais elle est plus coûteuse et militairement plus sensible.

Un système de détection de débris spatiaux efficaces doit pouvoir acquérir les données suivantes :

- les éléments orbitaux, qui caractérisent le mouvement des débris autour de la Terre ;
- l'attitude, qui décrit le mouvement des débris autour de leur centre de masse ;
- la taille, la forme, la masse et les propriétés matérielles des débris ;
- le coefficient balistique des débris, qui correspond à la décroissance du demi-grand axe de l'orbite ;
- la durée de vie des débris en orbite.

L'acquisition de ces paramètres nourrit une base de données dynamique utilisée par les engins spatiaux pour éviter les collisions.

Les dégâts provoqués par la quantité de mouvement des débris de grande taille et de taille moyenne sont si dévastateurs que toute mesure de protection en cas de collision devient inutile. Le mieux que l'on puisse faire est de localiser avec précision ce type de débris afin que les engins puissent les éviter par une manœuvre adéquate. Une fois leur position connue, souvent par des observations au sol, leur distance aux engins est calculée puis anticipée, et une alerte se déclenche quand une cette distance atteint un seuil critique. En fonction de divers paramètres comme la vitesse relative et l'angle d'approche de l'engin et du débris, il est possible de calculer la direction et la poussée nécessaires pour modifier la trajectoire, d'envisager l'efficacité de divers scénarios d'évitement et de choisir l'option qui optimise le rapport entre sécurité et quantité de carburant consommé.

Les dégâts provoqués par les débris dépendent de leur taille mais aussi de l'endroit où ils frappent. En conséquence, la protection d'un engin n'est pas uniforme. Le flux de débris étant plus important

dans la direction du déplacement, les parties non critiques ou moins susceptibles d'être endommagées peuvent être disposées à l'avant. Les engins volent d'ailleurs souvent à reculons, l'arrière tourné vers l'avant.

14.3.2. Surveillance des petits débris

Les débris spatiaux d'un diamètre inférieur à 1 millimètre ne peuvent pas être détectés par les équipements terrestres. Leur recensement et leur évitement passent donc par l'observation directe depuis l'espace ou la récupération d'échantillons. La première méthode utilise des capteurs de collisions de débris, des radars spatiaux ou des télescopes optiques positionnés en orbite.

Ces dernières années ont vu l'émergence de deux types de capteurs de collisions : les capteurs MOS, pour l'acronyme Metal Oxyde Semiconductor, et des capteurs à plasma. Les premiers détectent les débris par la décharge électrique qu'ils provoquent en traversant un semiconducteur, les seconds par le plasma qu'ils génèrent en frappant la surface collectrice.

Les radars positionnés en orbite présentent l'avantage d'éviter les perturbations atmosphériques et, par leur plus grande proximité, de mieux distinguer les cibles. Leur mise en œuvre est en revanche beaucoup plus coûteuse que celles de radars terrestres. Dans le même esprit, un télescope optique spatial est un moyen très efficace de détection. Le télescope infrarouge IRAS (Infrared Astronomical Satellite), lancé en 1983 conjointement par les États-Unis, le Royaume-Uni et les Pays-Bas, positionné à 900 km d'altitude sur une orbite héliosynchrone, a pu recenser 10 000 débris spatiaux en dix mois. Divers satellites de surveillance américains ont également mené des missions expérimentales d'observation de débris depuis cette même orbite. La grande étendue de l'espace à observer et la portée somme toute réduite de ces types d'instruments limitent toutefois l'usage des radars ou des télescopes spatiaux, surtout au regard de leur coûts.

La récupération d'échantillons permet, par une analyse détaillée, de déterminer la composition, la densité, la forme, la taille et la

provenance des débris spatiaux. Jusqu'à maintenant, ces échantillons ont été ramenés sur Terre par des navettes spatiales après avoir été collectés par le satellite LDEF, le télescope spatial Hubble, la station spatiale Mir ou le satellite EURECA pour ne citer qu'eux. L'analyse des cratères qui émaillent les plaques de protection des navettes spatiales permet également d'obtenir le flux, la masse et la composition des débris spatiaux en dessous de 600 kilomètres et d'évaluer l'impact des débris. En raison des coûts, les échantillons récupérés proviennent de l'orbite terrestre basse, c'est-à-dire à moins de 500 km d'altitude, soit en dessous, malheureusement, de la zone de densité maximale des débris, à environ 1 000 km d'altitude et de l'orbite géosynchrone.

14.3.3. Modélisation mathématique des débris spatiaux

Tous les débris spatiaux peuvent faire l'objet d'une modélisation mathématique, y compris et surtout les plus petits d'entre eux, très nombreux et difficiles à détecter. La modélisation décrit et prévoit de façon souvent très efficace la distribution, le mouvement, le flux et les caractéristiques physiques des débris spatiaux. Ils permettent ainsi d'évaluer à l'avance des risques d'impact et des dommages potentiels causés aux engins spatiaux, de prévoir des manœuvres d'évitement et de tester l'efficacité des méthodes d'élimination des débris. Les modélisations se divisent en deux catégories selon les échelles de temps qu'elles considèrent : les modélisations à court terme, en-deçà de la dizaine d'années, et les modélisations à long terme, au-delà. Une modélisation part toujours d'un état des débris à un instant donné, puis, en tenant compte des divers facteurs qui influencent leur orbite, détermine de proche en proche leurs états ultérieurs. Les modélisations à court terme intéressent principalement l'ingénierie, quand les modèles à long terme, principalement axés sur la prédiction de la quantité, l'altitude, l'inclinaison orbitale et la taille des débris spatiaux en tant que fonction du temps, visent plutôt à évaluer l'efficacité des mesures d'élimination. Ces modélisations, qui dépendent de l'activité spatiale entre autres paramètres, doivent être constamment mis à jour et validés.

Dans un même ordre d'idée, des modélisations peuvent simuler les effets des collisions à haute vitesse entre débris et engins spatiaux, ce qui permet de repérer et répéter des manœuvres d'évitements à moindre coût. Ces simulations numériques peuvent être à tout instant comparées aux mesures réelles acquises par d'autres sources, et même alimentées par elles pour les étalonner.

Pour évaluer la probabilité d'un risque de collision entre débris et engins spatiaux, les modélisations prennent en compte principalement des facteurs de densité spatiale, de vitesse relative moyenne, de section transversale des engins spatiaux et bien entendu le temps. Les effets d'un choc éventuel sont principalement prédits sur des facteurs de masse relative, de composition des objets en présence, d'informations détaillées sur la structure de l'engin, la géométrie de ses sous-systèmes clés et ses capacités de protection contre les dommages.

14.3.4. Protection contre les petits débris spatiaux

Les paramètres orbitaux de chaque élément d'une nuée de petits débris spatiaux sont impossibles à obtenir. Leur densité spatiale élevée empêche en outre de les éviter comme de plus gros débris. Dans ce cas de figure, il faut donc combiner modélisation mathématique des débris et tests de collision à haute vitesse pour concevoir une protection passive des engins aussi performante que possible.

Cette protection intervient dès la conception de la structure. Les recherches en la matière remontent aux premiers temps de la conquête spatiale. Dès 1947, en effet, l'astronome américain Fred Whipple mit au point un bouclier de protection contre les collisions ultra-rapides de micrométéorites. L'idée a ensuite évolué pour inclure des débris spatiaux plus généraux. Ce type de bouclier, qui porte aujourd'hui son nom, est toutefois insuffisant, surtout pour les débris un peu plus gros et à vitesse d'impact plus faible. Depuis les années 90, en raison de l'augmentation massive des satellites lancés en orbite basse, les dommages causés par les micrométéorites sont passés au second plan devant ceux causés par les débris artificiels. En conséquence, il a fallu concevoir de nouvelles structures de protection.

Les progrès passent par le développement de matériaux spatiaux plus performants. Au fil du temps, de nombreux matériaux innovants ont été développés, offrant de bonnes qualités de résistance, de flexibilité, de légèreté et sans effet contaminants pour les équipements optiques et autres. Par exemple, le tissu en céramique Nextel, produit par la société américaine 3M, encaisse une collision à grande vitesse en formant une poudre inoffensive pour la structure située derrière lui.

Pour augmenter les chances de survie d'un engin spatial évoluant au milieu de débris spatiaux, il est également nécessaire d'intégrer la notion de protection dans la conception globale. L'impact des débris doit être considéré comme un facteur important dans l'analyse des modes de défaillance et des études de risques. Une disposition bien pensée des composants contribue ainsi à améliorer la capacité de protection du vaisseau spatial contre les petits débris spatiaux. Lors du développement des satellites canadiens RADARSAT, une évaluation du risque opérationnel en orbite a été confiée au Johnson Space Center (JSC) de la NASA. Les analyses préliminaires ont montré que la survie des satellites environnés de débris spatiaux ne serait que de 50 % sur une durée de 5 ans. Afin d'augmenter ce taux, les composants clés du satellite ont été redessinés et de nouveaux matériaux de protection ont été utilisés, ce qui a permis de faire passer le taux de survie à 5 ans de 50 à 87 %, soit un effet très significatif.

14.3.5. Réduction du nombre de débris

Les débris spatiaux en orbite basse finissent souvent par retomber du fait de la résistance de l'atmosphère, de la pression de la lumière solaire ou autres effets perturbateurs, si bien qu'ils se scindent en morceaux de plus en plus petits et finissent par disparaître. Il en va tout autrement en orbite haute, où la durée de vie des débris spatiaux est très longue, la chute naturelle ne réduisant pas leur nombre de façon significative. Pour nettoyer au moins partie cet environnement terrestre, trois méthodes peuvent être envisagées.

La première consiste tout simplement à intégrer la minimisation des débris dès la conception des engins spatiaux. La NASA et l'ESA, qui ont réfléchi à cette option, demandent désormais à tous les opérateurs de suivre les consignes suivantes :

1. lors du lancement, réduire autant que possible le nombre d'objets atteignant l'orbite. Environ 12 % des débris spatiaux répertoriés sont d'anciennes fixations, de vieux bouchons ou capuchons. Réduire ces systèmes de fixation ou de protection, c'est réduire les débris !
2. éviter les explosions, à l'origine d'une augmentation importante des débris spatiaux. Environ 36 % d'entre eux sont en effet produits lors d'explosions dues aux résidus de carburant présents dans les engins. Il faut donc que le carburant restant soit consommé après la fin des missions. Les défaillances des systèmes de propulsion, les batteries trop chargées et autres explosifs sont aussi des sources d'explosions accidentelles et sont donc à limiter au maximum. Les explosions intentionnelles, comme celles provoquées par satellites militaires anti-satellites, doivent être proscrites ;
3. leur mission accomplie, les satellites en orbite basse doivent être ramenés dans l'atmosphère. La méthode habituelle consiste à réserver du carburant pour une manœuvre destinée à leur faire perdre rapidement de l'altitude. Outre un surplus de carburant, cette mesure demande d'équiper le satellite d'un système destiné à modifier sa trajectoire, ce qui peut augmenter notablement son coût de développement. Récemment, une méthode plus économique a été proposée, qui consiste à larguer une corde métallique de plusieurs kilomètres en fin de la mission du satellite. La résistance créée par le champ magnétique de la Terre lors de son mouvement le ferait alors retomber dans l'atmosphère. Les calculs montrent qu'une corde ne représentant que 2 % de la masse du satellite pourrait le désorbiter en quelques semaines ;
4. réduire la chute de matériaux de surface du satellite, comme la peinture.

Une deuxième méthode de nettoyage des débris consiste à les placer tous sur une même orbite, ce qui libère de la place ailleurs. Les débris spatiaux en orbite haute ont une durée de vie très longue et sont difficiles à éliminer naturellement. Il est difficile de les faire descendre en dessous de 300 kilomètres d'altitude car l'opération nécessite une grande capacité de manœuvre et beaucoup de carburant. En conséquence, l'Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC – « Comité inter-agence de coordination des débris spatiaux »), a proposé de réserver des espaces orbitaux de faible valeur à des altitudes diverses pour y stocker les engins spatiaux désaffectés. Ces zones sont appelées des « orbites de rebut », « orbites poubelles » ou encore « orbites cimetières ». La méthode demande toutefois que les engins effectuent des manœuvres pour gagner l'orbite de rebut la plus proche une fois leur mission terminée.

La troisième méthode de nettoyage consiste tout simplement à éliminer les débris. Elle est toutefois difficile à mettre en œuvre tant sur le plan technique que sur le plan économique. Actuellement, la méthode la plus efficace consisterait à utiliser des canons laser positionnés au sol pour frapper les gros débris et les faire exploser. L'intensité du laser doit être très élevée et son action doit être coordonnée par un radar de haute précision. Délicate et coûteuse, la méthode est aujourd'hui inopérante.

15

Le danger guette à chaque pas

Depuis le fauteuil aux 47 fusées de Wan Hu jusqu'aux projets de colonisation martienne en passant par l'atterrissage lunaire de la mission Apollo, la conquête spatiale a rarement connu de trêve et à globalement plutôt eu tendance à s'accélérer. Nous sommes désormais capables de nous affranchir de la pesanteur terrestre, de réaliser le rêve jadis impensable de dépasser les limites de l'atmosphère et nous avons même laissé notre empreinte sur la Lune. L'espace reste toutefois un milieu hostile, potentiellement mortel pour l'homme. En plus des risques de collisions, le vide, les températures extrêmes, la micropesanteur et surtout les rayonnements sont autant de périls dont il faut prémunir les astronautes. Dans l'espace, le danger guette à chaque pas !

15.1. LA MICROPESANTEUR

La pesanteur dans l'espace est très faible, bien plus faible que l'habituel champ à 1 g dans lequel nous baignons sur Terre. Les astronautes, qui pour cette raison paraissent flotter, doivent en tenir

compte pour les activités les plus banales : manger, dormir, ou tout simplement bouger...

15.1.1. Ses effets

Une personne non entraînée qui découvre la micropesanteur peut ressentir divers effets indésirables comme des étourdissements, des vertiges, des nausées et de la somnolence. Ces troubles résultent de la perturbation de certains signaux dans les systèmes nerveux central et vestibulaire qui, mal interprétés, entraînent une réponse inappropriée du cerveau. Après une période d'adaptation de 30 à 48 heures, cependant, ces effets disparaissent généralement en grande partie.

En l'absence de pesanteur, les fluides ne sont plus attirés vers le bas comme sur Terre. Une quantité plus importante de sang se déplace donc vers la partie supérieure du corps et notamment la tête, ce qui provoque un gonflement des veines du cou, des gonflements autour des yeux, un visage plus rond, un nez congestionné et des pertes de goût et d'odorat similaires à celles causées par un rhume. Dans le même temps, et à l'inverse, le volume de la partie inférieure du corps a tendance à diminuer. Le temps passant, les astronautes se voient affectés du syndrome dit des « jambes de poulet ».

La micropesanteur peut également causer un dysfonctionnement du système cardiovasculaire. Pendant les séjours spatiaux de moyenne et longue durée, l'absence de pesanteur jointe à la réduction de l'activité physique et des besoins métaboliques fait fonctionner le corps en dessous de sa puissance habituelle. En s'adaptant à la situation, le cœur peut subir divers dommages qui influent sur ses capacités de pompage. En 1987, par exemple, le cosmonaute soviétique Aleksandr Laveïkine a été contraint d'écourter son séjour dans la station Mir en raison de l'apparition de nombreux troubles cardiaques mineurs. Revenu sur Terre, il a toutefois pu retrouver un état de santé normal.

La micropesanteur peut aussi atrophier les muscles, ce qui se traduit par des défauts de coordination et des difficultés de mouvement, avec

des conséquences importantes pour les astronautes. De retour sur Terre, par exemple, ils peinent souvent à se lever et à rester debout très longtemps.

La micropesanteur entraîne aussi une perte de calcium dans les os, ce qui finit par causer une ostéoporose. Durant un séjour dans l'espace, les os perdent entre 1 % et 2 % de leur masse osseuse par mois. Certains astronautes ont ainsi perdu jusqu'à 20 % de leur masse osseuse dans les membres inférieurs en six mois de mission. Plus le séjour est long, plus le problème s'aggrave et persiste au retour sur Terre : le risque de fracture a été augmenté chez certains astronautes durant de longs mois.

15.1.2. Les remèdes

Pour lutter contre les effets indésirables de la micropesanteur et maintenir les astronautes en bonne santé tout en assurant le déroulement prévu de la mission, un certain nombre de mesures sont prises, tant avant le vol, par une sélection et une formation rigoureuses des astronautes, que pendant le vol, par des mesures de protection, et après le vol, par un suivi médical.

Les astronautes doivent accomplir sans faillir diverses tâches durant leur mission, ce qui exige une bonne condition physique, de l'endurance, une solide capacité de travail et une résistance psychologique à toute épreuve. En conséquence, une sélection et une formation très strictes ont été mises en place. L'aspect biomédical compte beaucoup dans leur formation au sol, qui comprend son lot d'entraînement sportifs, souvent lourdement chargés par des poids ou en apesanteur, visant à ce que leur corps tolère ou s'adapte au mieux à l'environnement spatial. Les entraînements en apesanteur sont principalement réalisés lors de vols paraboliques en avion, en piscine ou par des séances de repos prolongé en position couchée, la tête inclinée vers le bas.

La plupart des spécialistes en médecine spatiale et en biologie estiment aujourd'hui qu'il est possible de lutter efficacement contre les

effets négatifs de la micropesanteur sur le corps humain. Durant les vols, des exercices physiques sont préconisés pour limiter autant que possible l'afflux sanguin vers la partie supérieure du corps et veiller au maintien correct des fonctions motrices. Divers appareils de musculation, vélos d'appartement ou tapis de course trouvent donc leur place lors des missions d'une certaine durée. À bord de la Station spatiale internationale, les exercices physiques ciblent le squelette, les muscles, le système cardiovasculaire, tout en prenant en compte les perturbations des rythmes biologiques et des systèmes immunitaire et endocrinien. Des vêtements spéciaux, comme des pantalons qui compriment les jambes, permettent aussi de lutter contre les effets de la micropesanteur.

15.2. LES RAYONNEMENTS

Avec le temps, nous avons aussi commencé à comprendre que l'espace était traversé par des rayonnements de particules de haute énergie invisibles à l'œil nu. À l'instar des rayonnements émis par les composés radioactifs sur Terre, ils représentent une menace majeure pour la sécurité et la santé des astronautes.

15.2.1. Leurs effets

Les particules dont sont composés les rayonnements de haute énergie sont capables de pénétrer les parois des vaisseaux spatiaux, les combinaisons et les organes du corps humain. Elles causent au passage des dommages physiques souvent irrémédiables, et cela par deux mécanismes : l'un direct, en cassant de grandes molécules biologiquement actives et importantes, l'autre indirect, en se combinant avec l'eau, présente en grande quantité dans le corps humain, pour former des radicaux libres, qui réagissent ensuite avec les molécules biologiques.

Sur Terre, nous sommes également exposés à des rayonnements en provenance du Soleil. Alors pourquoi ne ressentons-nous pas les mêmes effets nocifs que dans l'espace ? Il apparaît que les effets des

rayonnements sur le corps humain sont très complexes et que leur gravité dépend beaucoup de l'énergie des particules et de la dose de radiation reçue. Si le corps ne subit qu'une exposition légère, telle que le rayonnement de fond naturel présent sur Terre, les cellules peuvent rapidement réparer les dommages. En cas d'exposition à des doses élevées, cependant, cette capacité de réparation rapide se perd, ce qui entraîne des dommages permanents quand ce n'est pas la mort de la cellule. Le rayonnement engendre alors des blessures aiguës à divers organes comme la peau, la moelle osseuse ou les yeux et, dans les cas graves, menace la vie de la personne touchée. Même à des doses de radiation assez réduites, les particules de haute énergie peuvent provoquer des mutations dans les cellules, avec des effets chez l'individu, mais aussi chez ses descendants, si des cellules reproductrices sont atteintes. Lors des missions spatiales habitées, il est donc important de strictement contrôler la dose de rayonnement reçue par les astronautes.

15.2.2. Leur provenance

Le milieu spatial proche de la Terre est traversé par des rayonnements de particules de haute énergie qui proviennent de trois sources principales : la ceinture de Van Allen, le Soleil lors d'éruptions et des supernovas de notre galaxie. Durant leurs missions dans l'espace, hors de la protection offerte par l'atmosphère terrestre, les astronautes sont directement exposés à ces rayonnements. Dans la zone d'influence du champ magnétique terrestre, les plus importants proviennent de la ceinture de Van Allen, elle-même constituée d'une ceinture intérieure et d'une ceinture extérieure, qui émet principalement des protons et des électrons de haute énergie. La plupart des missions spatiales actuelles se déroulent en orbite basse, à moins de 500 km, c'est-à-dire un peu en-deçà de la ceinture intérieure. À cette altitude, l'effet de la ceinture de Van Allen est particulièrement sensible sur la zone dite *d'anomalie magnétique de l'Atlantique sud* et au-dessus des pôles. En raison de l'énergie relativement faible des particules émises, toutefois,

les parois des véhicules spatiaux peuvent servir de protection efficace. Les sorties extravéhiculaires des astronautes doivent cependant éviter autant que possible la zone d'anomalie magnétique de l'Atlantique sud et les régions polaires pour minimiser la dose de rayonnement reçue.

Le rayonnement dit *galactique*, en provenance des supernovas de la Voie lactée, se caractérise par une énergie certes élevée mais un flux faible. S'il ne cause en général pas d'effets significatifs à court terme, une exposition plus longue augmente les risques de stérilité et de cancers. Sur les orbites des missions habitées à proximité de la Terre, le champ magnétique terrestre fait office de bouclier efficace, de sorte que leur impact est surtout concentré près des pôles. L'effet du rayonnement galactique augmente en fait avec l'altitude et l'inclinaison de l'orbite. En raison de l'énergie élevée de ce type de rayonnement, les matériaux de blindage n'offrent qu'une protection limitée.

Le rayonnement émis par les éruptions solaires, quant à lui, dure de quelques dizaines de minutes à plusieurs jours. Les éruptions fortes peuvent conduire à des rayonnements menaçant gravement les missions spatiales habitées. Comme dans le cas du rayonnement galactique, les orbites basses sont bien protégées par le champ magnétique terrestre. Les doses de rayonnement reçues sont généralement faibles, avec une contribution plus forte près des pôles. Et l'effet du rayonnement est d'autant plus important que l'orbite du vaisseau est haute et inclinée.

15.2.3. Mesure de protection

Les missions habitées actuelles, que ce soit sur la Station spatiale internationale, la station spatiale chinoise ou le vaisseau Shenzhou, par exemple, se déroulent à une altitude comprise entre 300 et 500 km, c'est-à-dire bien abritées par le champ magnétique terrestre. Le matériel de protection qui recouvre les parois des engins ou les combinaisons spatiales, ainsi que la relative brièveté des séjours,

limitent également les doses reçues par les astronautes. Lors d'une violente éruption solaire, toutefois, l'impact de la grande quantité de particules de haute énergie libérée, peut-être plus important. Et les effets du rayonnement galactique seront plus graves encore lors de missions habitées interplanétaires à venir, à destination de la Lune ou de Mars, en l'absence de la protection du champ magnétique terrestre.

De nombreuses mesures ont été mises en place pour soustraire les astronautes des effets néfastes des rayonnements lors des missions habitées : les éruptions solaires sont surveillées et une alerte émise le cas échéant, divers plans de vol sont prévus selon divers scénarios, des refuges particulièrement résistants aux rayonnements sont construits dans les habitacles...

Le vaisseau spatial habité chinois Shenzhou reçoit une dose de rayonnement moins importante que la Station spatiale internationale ou jadis à la navette spatiale américaine du fait de son orbite plus basse et moins inclinée. En cas d'éruption solaire particulièrement forte, cependant, en particulier lorsqu'elle est accompagnée d'un violent orage magnétique, les protons de haute énergie peuvent parvenir à des altitudes et des latitudes plus basses, menaçant ainsi la santé des astronautes. Comme le degré de protection des combinaisons spatiales est moins élevé que celle des parois du vaisseau spatial, ce type d'évènement est particulièrement surveillé lors des sorties extravéhiculaires des astronautes. Lorsque les astronautes doivent sortir de la capsule, il leur faut enfiler une combinaison spatiale (figure 15.1). Cette tenue spéciale s'apparente à un petit vaisseau spatial porté sur le corps. Hermétique, elle laisse aux astronautes une certaine liberté de mouvement tout en les préservant des dangers inhérents à l'environnement spatial comme le vide, les températures très élevées et très basses, les rayonnements et les micrométéorites.

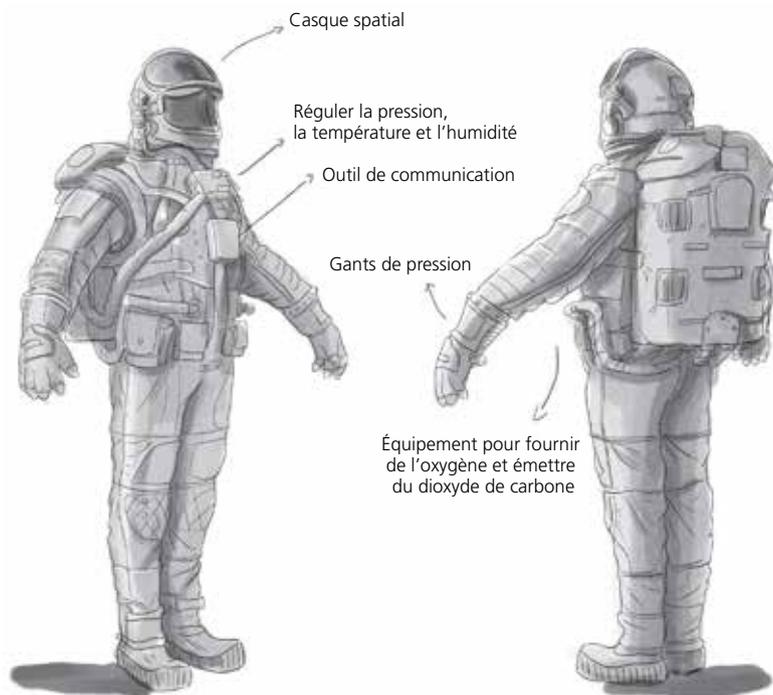


Figure 15.1 | Combinaison spatiale extravéhiculaire.

15.3. LES COMBINAISONS SPATIALES

15.3.1. La première combinaison

La première combinaison spatiale à avoir atteint l'espace est le modèle soviétique SK-1, porté par Youri Gagarine lors de son vol historique du 12 avril 1961. Conçue pour résister à toutes sortes de pressions, elle disposait également d'un système de survie auxiliaire.

Après avoir réintégré l'atmosphère terrestre, Gagarine s'est éjecté de son vaisseau et a poursuivi sa descente en parachute. Il a atterri sur un champ cultivé, sous le regard apeuré d'un fermier et de sa fille. Plus tard, Gagarine a raconté :

« J'étais vêtu de mon scaphandre orange vif et je portais encore mon casque avec la visière relevée. Cet accoutrement les

effrayait quelque peu. Ils n'avaient jamais vu quelque chose de semblable. Je leur criais, en faisant des moulinets avec les bras : "Je suis des vôtres ! Un Soviétique ! Ne craignez rien, venez vers moi !" J'ai retiré mon casque. Ils se sont décidés à me rejoindre pour me demander : "Vous venez vraiment du Cosmos ?" Je leur ai répondu par l'affirmative. J'ai demandé où je pouvais trouver un téléphone pour appeler Moscou ! »

15.3.2. La combinaison lunaire

La combinaison spatiale la plus célèbre de l'histoire est probablement celle que portait l'astronaute américain Neil Armstrong lorsqu'il a posé le pied sur la Lune. Elle avait pour spécificité de nécessiter une séparation totale entre l'astronaute et le vaisseau, si bien qu'il a fallu placer le système de survie dans un sac à dos. Celui-ci pouvait délivrer de l'oxygène pendant plus de 7 heures d'affilée tout en filtrant le dioxyde de carbone. Il assurait en outre la régulation de la pressurisation et de la température.

15.3.3. La combinaison chinoise

La combinaison spatiale chinoise *Feitian* a été inaugurée en 2008 lors de la sortie extravéhiculaire effectuée durant la mission du vaisseau Shenzhou 7. Elle est structurée en six couches qui se déclinent ainsi :

- la première est tout simplement formée des sous-vêtements portés par les astronautes. Fabriqués en coton de qualité supérieure, ils sont conçus pour être doux, absorbant et respirant, car ils accumulent sueur et sébum du fait que les astronautes ne peuvent se changer durant leur long périple dans l'espace ;
- une couche d'isolation thermique, destinée à maintenir une température agréable au corps humain. Elle est constituée de matériaux isolants, tels que de la fibre synthétique ultra fine ou de la laine ;
- une couche de ventilation et de refroidissement à eau, chargée de dissiper par plusieurs voies la chaleur produite par les astronautes quand leur température s'élève trop ;

- une couche d'étanchéité, destinée à maintenir une certaine pression autour du corps de l'astronaute lorsque celui-ci sort du vaisseau et se trouve dans le vide. Elle est fabriquée à partir de tissus à haute résistance et à faible taux d'allongement, tels que des fibres de polyester ;
- une autre couche d'isolation thermique, destinée cette fois à protéger l'astronaute contre les températures trop froides ou trop chaudes lorsqu'il sort du vaisseau. Elle est fabriquée à partir d'un film de polyimide multicouche ou de polyester métallisé, avec une doublure non tissée.
- une sixième et dernière couche qui assure la protection externe. Elle est formée d'un tissu aluminisé blanc argenté qui protège l'astronaute du feu, des rayonnements et de divers autres dangers spatiaux.

La combinaison proprement dite est complétée par un casque, des gants, des bottes et autres accessoires. Par rapport à celles développées dans d'autres pays, elle se distingue par sa légèreté et sa flexibilité, malgré son poids assez important. Grâce à des roulements étanches placés au niveau des articulations des épaules, des coudes, des poignets, des genoux et des chevilles, les astronautes jouissent en toute sécurité d'une grande liberté de mouvement. Les gants, très épais, ressemblent à des gants de boxe car les quatre doigts autres que le pouce ne sont pas séparés. Leur dos est blanc tandis que la partie correspondant à la paume et aux doigts est grise, avec de petites bosses en caoutchouc antidérapantes et isolantes plus foncées.

La combinaison extravéhiculaire « Feitian » est constituée d'une structure en alliage d'aluminium de seulement 1,5 mm d'épaisseur. En dépit de sa finesse, elle peut résister à une pression de plus de 120 kilopascals, aux vibrations dues au transfert terrestre vers le site de lancement et au décollage de la fusée. Elle pèse au total 120 kilogrammes et peut supporter des variations de températures de plus ou moins 100 degrés Celsius. L'air et la température sont automatiquement réglés. La pression des bouteilles d'oxygène intégrées à la

combinaison est étudiée pour contenir en toute sécurité une quantité d'oxygène aussi grande que possible. C'est un petit véhicule spatial habité autonome !

15.3.4. La combinaison spatiale SpaceX

En février 2018, le lanceur Falcon Heavy développé par la société SpaceX a expédié dans l'espace une Tesla Roadster, un modèle de voiture construite par Tesla, ainsi qu'un mannequin nommé Starman assis à la place du conducteur. L'une des missions de Starman consistait à tester la combinaison spatiale qui allait équiper les astronautes voyageant à bord de la capsule Crew Dragon, l'une et l'autre étant également développées par SpaceX.

Cette combinaison se distingue par la simplicité de son apparence, la fluidité de ses lignes, sa forme compacte et son ajustement serré au corps. Sa couleur blanche teintée ici et là d'accents gris et noirs lui confère une allure techno-futuriste. Elle est à la fois élégante et pratique. Elon Musk, le patron de SpaceX, également surnommé l'Iron Man de la Silicon Valley, ne cache en rien son rêve de « faire de l'humanité une espèce multi-planétaire ». Il s'efforce de réduire le coût des voyages spatiaux et rendre le voyage spatial possible pour tout un chacun.

Peut-être donc que, dans un avenir pas si lointain, les voyages spatiaux devenus aussi banals que les voyages à l'étranger, nous aurons tous l'occasion d'enfiler une combinaison spatiale !

16

Armageddon

En 1998 sortait sur les écrans *Armageddon*, un film catastrophe américain racontant le sauvetage de la Terre sur le point de se faire frapper par un astéroïde. La plus célèbre des collisions entre notre planète et un objet céleste réel, qu'il s'agisse d'un astéroïde, d'un météore ou d'une comète, s'est produite il y a environ 65 millions d'années. Un astéroïde de près de 10 km de diamètre a heurté la Terre, ce qui a provoqué la disparition des dinosaures (figure 16.1). Bien qu'elles soient très rares à ce niveau de gravité, de telles collisions surviennent et sont même considérées comme l'une des pires menaces pour l'humanité. Les spécialistes estiment qu'un petit corps céleste de 5 km de diamètre suffirait à détruire la civilisation telle que nous la connaissons. Le choc, qui dégagerait une énergie équivalente au largage de 10 millions de bombes atomiques de type Hiroshima, provoquerait une onde de choc qui détruirait tout sur son passage dans un rayon de 300 km. Il s'ensuivrait un *hiver d'impact*, c'est-à-dire un nuage de cendres et de poussière qui, en bloquant le passage des rayons solaires sur une longue période, provoquerait une obscurité et un froid durable, entraînant l'extinction de la plupart des espèces vivantes.



Figure 16.1 | La disparition des dinosaures provoquée par la collision d'un astéroïde avec la Terre.

16.1. LA MENACE DES PETITS CORPS CÉLESTES

De nombreux petits corps célestes ont frappé la Terre au cours de son histoire. Bien que la plupart des traces laissées par ces collisions aient été effacées par des processus géologiques prolongés, maints cratères d'impact recensés partout dans le monde témoignent de la fréquence de ces événements. Parmi les grands cratères d'impact, le plus célèbre est sans conteste *Meteor Crater*, aussi appelé *cratère de Barringer*, en Arizona, aux États-Unis. D'un diamètre d'environ 1 240 mètres et d'une profondeur de plus de 170 mètres, son bord dépasse d'environ 40 mètres le terrain environnant. Diverses études montrent que ce cratère résulte de la collision il y a 50 000 ans d'un corps céleste d'environ 300 000 tonnes et de 50 mètres de diamètre arrivant à une vitesse de près de 20 kilomètres par seconde. Le plus ancien et le plus grand cratère d'impact de météorite sur Terre est le *dôme de Vredefort*, en Afrique du Sud, dont le diamètre mesure de 250 à 300 km.

La NASA a publié une étude statistique sur la répartition des petits corps célestes tombés entre 1988 et février 2018. Il apparaît que les sites d'impact sont relativement dispersés et ne présentent aucune règle de distribution évidente. Nous allons maintenant évoquer quelques collisions célèbres survenues ces dernières années.

16.1.1. La météorite de Tcheliabinsk

Une météorite est tombée le 15 février 2013 près de la ville de Tcheliabinsk, dans la région de l'Oural en Russie. Sur place, des caméras de surveillance et des caméras embarquées à bord de voitures ont enregistré par hasard le passage spectaculaire de la météorite à travers le ciel. Elle est arrivée à grande vitesse, suivie d'une grande traînée de lumière blanche et bruyante. L'impact a provoqué des ondes de choc violentes qui ont endommagé les vitres de centaines de bâtiments. Selon les rapports officiels, l'événement a blessé plus de 1 200 personnes et causé environ 1 milliard de roubles de dégâts, soit environ 25 millions d'euros.

La NASA a établi que la météorite pesait environ 10 000 tonnes et mesurait près de 17 mètres de diamètre. Elle se déplaçait à 18 kilomètres par seconde au moment de sa chute, soit bien au-delà de la vitesse de vol des satellites artificiels. Ce visiteur venu de l'espace a pénétré l'atmosphère terrestre selon un angle d'incidence très élevé, supérieur à 70 degrés, a brillé dans le ciel plus que le Soleil et a explosé à 15 ou 20 kilomètres au-dessus du sol. La boule de feu était visible jusqu'à 200 kilomètres de distance. Des enregistrements de l'onde infrasonore ont montré que son passage, de l'entrée dans l'atmosphère à sa fragmentation finale, n'a duré que 32,5 secondes. Les scientifiques russes dépêchés sur place ont rapidement recueilli quelques fragments d'un diamètre de 0,5 à 1 centimètre et ont pu déterminer qu'il s'agissait d'une météorite ordinaire de type chondrite. Environ 10 jours après l'événement, le plus gros fragment retrouvé pesait environ 1,8 kilogramme. C'est la plus grande météorite à avoir frappé la Terre depuis 1908.

16.1.2. La météorite de Shangri-La

Une petite météorite a frappé la Terre le 4 octobre 2017 à 40 km au nord-ouest de la ville de Shangri-La, dans la province du Yunnan en Chine. Par chance, elle n'a causé aucun dégât humain ou matériel, même si la mystérieuse lumière qui a illuminé le ciel, durant 5 secondes selon les témoins, a effrayé de nombreux habitants.

Les observations satellitaires de la NASA montrent que la collision a dégagé une énergie comparable à l'explosion de 540 tonnes de TNT¹. La météorite se déplaçait à une vitesse de 14,6 km/s et a explosé à seulement 37 km d'altitude. Il est donc possible que des fragments soient tombés sur le sol. Lors d'un événement comparable survenu en 2003 près du village de Park Forest, en Illinois, aux États-Unis, qui avait dégagé une énergie d'environ 500 tonnes d'équivalent TNT, près de 18 kg de débris avait été récupérés. Comme la météorite

1. Le trinitrotoluène ou TNT est un explosif couramment utilisé comme unité de mesure pour évaluer l'énergie libérée par les explosions, les tremblements de terre, les collisions d'objets célestes, etc. Un kilogramme de TNT correspond à 4,2 mégajoules.

de Shangri-La est arrivée plus lentement, les restes pourraient être plus importants. Cela dit, la composition entre aussi en jeu, de sorte que rien n'est assuré. La nature accidentée du terrain rend en outre la recherche des débris difficile et aucun n'a été officiellement retrouvé.

LE MYSTÈRE DE LA DISPARITION DES DINOSAURES

Si les raisons de la disparition des dinosaures ont toujours été sujettes à débat, la théorie la plus convaincante reste toutefois celle d'un petit astéroïde d'une dizaine de kilomètres de diamètre qui, en heurtant violemment la Terre, aurait provoqué l'extinction de 90 % de la biomasse à la fin du Crétacé. Après une période de fort refroidissement qui a suivi l'impact, l'excès de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a hautement réchauffé l'environnement par effet de serre, ce qui a radicalement modifié la biologie et le climat terrestres. De nombreux animaux et plantes, dont les dinosaures, s'ils avaient survécu au froid, ont péri en raison de la chaleur qui a suivi.

16.1.3. La pluie de météorites de Jilin

Une météorite d'environ 4 tonnes est tombée le 8 mars 1976 à une vitesse comprise entre 15 et 18 km/s en Chine, près de la ville de Jilin, dans la province du même nom. Sous l'effet conjugué de la pression et de la chaleur élevées, elle s'est fragmentée à environ 19 kilomètres du sol, ce qui a donné lieu à une pluie de météorites plus petites sur une zone d'environ 500 kilomètres carrés (figure 16.2). Le nombre de fragments, leur poids et l'étendue de leur zone de dispersion font de cette chute un événement très rare. Le bruit s'est entendu à des centaines de kilomètres à la ronde et les ondes de choc ont brisé les fenêtres de nombreuses maisons environnantes, heureusement sans faire de blessés, ce qui tient presque du miracle.

De telles collisions provoquent une réaction de peur instinctive bien compréhensible. Mais peut-on les prévoir de manière fiable ? Et pourrait-on prendre des mesures pour éviter les plus importantes d'entre elles ? Il faut commencer par le commencement, à savoir la composition du système solaire !



Figure 16.2 | Une pluie de météorites.

16.2. L'ORIGINE DU COUPABLE

Selon les scientifiques, le système solaire s'est formé il y a environ 4,6 milliards d'années. Il est composé d'une grande variété d'objets, comme le Soleil, les planètes, naines ou non, leurs satellites, ainsi que de nombreux corps plus petits tels que les comètes, les astéroïdes et autres météoroïdes. Les planètes orbitent autour du Soleil sur des trajectoires presque circulaires, tandis que les satellites orbitent autour de leur planète mère sans se heurter entre eux. Les petits corps présentent un comportement différent : leur orbite peut être circulaire, elliptique, parabolique ou même hyperbolique, et elle peut non seulement croiser celle de la Terre, mais s'en approcher, la frôler, voire entrer en collision avec elle.

Les comètes sont composées d'un noyau, d'une chevelure et d'une queue. Lorsqu'elles s'éloignent du Soleil, leur queue disparaît et elles se comportent essentiellement comme des astéroïdes.

Les astéroïdes circulent également autour du Soleil, la plupart d'entre eux sur une orbite comprise entre celles de Mars et Jupiter, formant ainsi la ceinture d'astéroïdes dite *principale*. Une autre zone de regroupement d'astéroïdes appelée le nuage de Kuiper se situe au-delà de l'orbite de Neptune. Les astéroïdes dont les trajectoires croisent l'orbite de la Terre, voire de Vénus ou de Mercure, sont dits *géocroiseurs*. Ceux qui passent à proximité de la Terre sont en outre qualifiés de *potentiellement dangereux* et, bien entendu, constituent une importante menace.

Les météoroïdes sont de « mini » astéroïdes, essentiellement constitués de particules de poussière et de petits blocs solides qui tournent autour du Soleil. Ils sont très nombreux et se trouvent partout dans le système solaire, y compris dans l'environnement terrestre. Ces corps très petits se déplacent à une vitesse relativement faible, généralement de dix à plusieurs dizaines de kilomètres par seconde, moins souvent à plus de 70 kilomètres par seconde. En pénétrant dans notre atmosphère, leur friction avec les molécules d'air produit une traînée lumineuse très brillante la nuit dans le ciel et parfois du son. C'est ce qu'on

appelle alors un météore, une étoile filante ou un bolide (figure 16.2). Les termes *météore* et *météorite* désignent deux concepts différents : le premier est un phénomène atmosphérique que l'on observe, et qui est éventuellement causé par le second, l'objet physique que l'on retrouve sur le sol.

Les météoroïdes sont généralement très petits, avec un diamètre visible à l'œil nu de 0,1 à 1 cm. La plupart d'entre eux se volatilisent complètement en entrant dans l'atmosphère, même si quelques-uns, plus volumineux et solides, laissent retomber quelques fragments sur le sol, fragments qui prennent donc le nom de météorites. Quant aux dépressions formées sur le sol par ces chutes, elles sont appelées cratères d'impact ou cratères de météorites. Selon leur composition chimique et minéralogique, les météorites peuvent être classées en trois types : les météorites pierreuses (chondrites), les météorites ferreuses (sidérites) et les météorites mixtes.

De nombreuses preuves directes et indirectes montrent que les corps du système solaire, y compris la Terre, ont de tous temps été frappés par des comètes, des astéroïdes et des météoroïdes. On sait depuis des siècles que la Lune est parsemée de cratères de tailles variées, dont plus de 33 000 présentent un diamètre supérieur au kilomètre. La plupart sont des cratères d'impact causés par la collision de petits corps. Avec le progrès des moyens d'observation astronomique, on a découvert que les surfaces des planètes telluriques telles que Mercure, Vénus et Mars étaient elles aussi couvertes de cratères de différentes tailles créés par des collisions de petits corps, ainsi que nombreux satellites planétaires et même certains astéroïdes.

La chute de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter survenue en juillet 1994 montre que des collisions à grande échelle se produisent encore dans le système solaire. Bien que le son ne puisse traverser l'espace, la simple évocation d'un tel événement suffit à nous effrayer et nous renvoie à cette question lancinante : la Terre sera-t-elle victime de ce type de choc ? Car notre planète vit sous cette menace. Bien que la présence massive de Jupiter puisse dévier et bloquer de nombreux

corps célestes venant des profondeurs de l'espace, ce bouclier n'est pas infaillible.

LA COLLISION DE LA COMÈTE SHOEMAKER-LEVY 9

En mars 1993, le couple d'astronomes américains Carolyn et Eugene Shoemaker, accompagnés de l'astronome amateur David Levy, découvrirent une nouvelle comète, la neuvième de leur tableau de chasse. Selon les règles internationales en usage, elle fut baptisée comète Shoemaker-Levy 9. Déjà en partie fragmentée, elle se composait de 21 morceaux répartis comme une escadrille en vol sur une distance de deux millions de kilomètres. Les calculs montrèrent que cette malheureuse comète, lors de son précédent passage au plus près de Jupiter le 7 juillet 1992, avait franchi la fatidique limite de Roche², ce qui l'avait fragmentée même si elle avait alors pu éviter la collision. En mai 1994, l'astronome Brian Marsden, directeur du Centre des planètes mineures, détermina que la comète Shoemaker-Levy 9 entrerait en collision avec Jupiter au mois de juillet suivant. Le monde entier a suivi ce phénomène céleste très rare, qui se produit une fois par millénaire. Des instruments tels que le télescope spatial Hubble et la sonde Galileo furent mis à contribution pour observer les 21 fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 se précipitant comme un train fou sur Jupiter. Le 16 juillet 1994 à 20 h 13 UTC, déboulant à la vitesse de 60 km/s, le premier d'entre eux a percuté Jupiter, bientôt suivi par les autres, offrant un spectacle rare à l'échelle du système solaire, le premier à être prévu et observé avec tant de précision. La collision a libéré une quantité d'énergie colossale, estimée à environ 6 millions de mégatonnes d'équivalent TNT, soit 600 fois l'arsenal nucléaire mondial. Si cet événement s'était produit sur Terre, quand bien même la comète aurait chuté au beau milieu d'un désert ou d'un océan, les conséquences auraient été inimaginables.

2. La limite de Roche est la distance à partir de laquelle un satellite commence à se disloquer sous l'effet des forces de marée causées par le corps autour duquel il orbite. Elle doit son nom à l'astronome français Édouard Roche, le premier à l'avoir théorisée.

À peu près à l'époque de la collision entre Shoemaker-Levy et Jupiter, dans les années 1990, les scientifiques ont fait une découverte majeure : le cratère d'impact de Chicxulub, situé dans la péninsule du Yucatan, au Mexique. Leurs recherches ont montré que ce cratère d'environ 180 kilomètres de diamètre s'était formé il y a environ 65 millions d'années, soit une période correspondant à la disparition des dinosaures, à la fin du Crétacé et au début du Tertiaire. Ils estiment généralement qu'il a été formé par la chute d'un astéroïde d'environ 10 km de diamètre, responsable donc *in fine*, de l'extinction complète des dinosaures, qui régnaient alors en maître sur la Terre.

Se pourrait-il à l'avenir qu'un autre astéroïde heurte la Terre ? Et que la collision conduise à l'extinction de l'humanité ? Si la comète Shoemaker-Levy 9 avait heurté la Terre plutôt que Jupiter, serions-nous encore en vie aujourd'hui ?

Il est certain que les collisions de petits corps célestes avec la Terre ou d'autres objets ont été et sont encore courants dans le système solaire. Aussi la Terre court-elle et courra-t-elle toujours le risque de subir ce type d'impact. Il est donc important de ne pas baisser la garde !

16.3. LA PROTECTION DE LA TERRE

Une caricature française du XIX^e siècle décrivait les effets terrifiants de la collision d'un objet céleste en montrant la Terre, foyer de l'humanité, déchirée par une super-étoile hideuse. Le dessin forçait le trait, bien sûr, ce qui n'empêche pas que les conséquences d'un tel choc puissent être absolument dévastatrices.

Si un corps céleste comparable à la comète Shoemaker-Levy 9 heurtait la Terre, une explosion formant une gigantesque boule de feu se produirait d'abord à l'endroit de l'impact, qui détruirait toute forme de vie dans un rayon de plusieurs kilomètres. De grandes quantités de poussière et de débris seraient projetées très haut dans les airs, donnant lieu à d'innombrables météores enflammés qui, en

retombant sur le sol, provoqueraient des dégâts supplémentaires sur une zone environnante très large. En raison des composés sulfurés et nitrés projetés dans l'atmosphère, provenant pour partie du corps céleste et pour partie des profondeurs du sol, des nuages toxiques et des pluies acides tueraient massivement la plupart des végétaux. La couche d'ozone serait également sérieusement atteinte, ce qui exposerait ainsi le vivant à des niveaux très élevés de rayonnement ultraviolet. La poussière restant en suspension formerait un épais nuage épais qui obscurcirait le ciel durant des mois si ce n'est des années. La baisse globale des températures résultant de l'absence de lumière solaire empêcherait la photosynthèse des plantes, ce qui réduirait le niveau d'oxygène partout dans le monde. Les plantes et les animaux mourraient les uns après les autres. L'humanité ferait face à une situation tragique.

Si le corps céleste heurtant la terre était un plus grand, les conséquences seraient pires encore. Selon Gerrit L. Verschuur, un astrophysicien et radioastronome américain, un diamètre supérieur à 5 km aboutirait à l'anéantissement de l'espèce humaine. Diverses simulations informatiques suggèrent même qu'un corps céleste d'un kilomètre de diamètre suffirait à porter un coup fatal à l'humanité.

Bref, aucun d'entre nous souhaiterait assister au spectacle d'un corps céleste d'une certaine dimension heurtant la Terre. Que la comète Shoemaker-Levy 9 ait heureusement frappé Jupiter plutôt que la Terre nous a déjà assez fait transpirer ! Le risque très réel doit cependant nous pousser à anticiper une telle situation. Quelle attitude adopter si un corps céleste de plusieurs kilomètres de diamètre frappe un jour la Terre ? Quelles mesures préventives pouvons-nous prendre ?

Des scientifiques planchent sur le sujet depuis le début des années 90. Une conférence sur la détection des astéroïdes proches de la Terre a ainsi été organisée aux États-Unis en juillet 1991. Le rapport qui en a résulté indique de manière très claire que la Terre risque de subir un jour ou l'autre des conséquences catastrophiques

à large échelle dues à l'impact d'un corps céleste. Il souligne en particulier que la plus grande menace vient des corps célestes mesurant entre 0,5 et 5 km de diamètre, dont les impacts pourraient causer des dommages à l'échelle d'un continent, voire du monde entier, entraînant la mort de millions ou de milliards de personnes.

Plus les corps célestes sont volumineux, moins ils sont nombreux. Leur risque de collision avec la Terre est donc plus faible mais les conséquences sont plus graves. On estime que plus de 10 000 corps célestes au diamètre compris entre 0,5 et 5 km circulent à proximité de la Terre. Bien que leur orbite soit en général assez stable, leur petite taille les rend très sensibles aux perturbations qui pourraient dévier leur trajectoire et les faire heurter la Terre. Les corps d'une trentaine de mètres de diamètre seraient au nombre de 1,3 million et provoqueraient une collision avec la Terre tous les 200 ans en moyenne. Ceux d'une dizaine de mètres sont estimés à environ dix millions et produiraient une collision avec la Terre tous les 10 ans.

En dépit de la rareté des grandes collisions, les spécialistes ont pris conscience de l'importance d'évaluer les dommages potentiels qu'elles peuvent générer selon la manière dont elles se produisent. La météorite de Tcheliabinsk, bien qu'elle ne mesurât que 17 mètres de diamètre et qu'elle ait explosé en haute altitude, a causé d'importants dégâts matériels et blessé plus de 1 200 personnes en 2013 du fait de sa proximité avec une ville.

Pour éviter ou du moins réduire autant que possible les conséquences catastrophiques des collisions, il faut d'abord recenser les corps célestes susceptibles de frapper la Terre, c'est-à-dire observer le ciel pour les détecter, les identifier, les mesurer et calculer leur trajectoire pour déterminer le moment où une collision pourrait se produire, puis prendre des mesures appropriées. Il est clair que l'exploration de l'ensemble du ciel nécessite une coopération internationale étendue. Des télescopes astronomiques spéciaux doivent être installés en différents endroits du monde pour repérer les corps célestes potentiellement dangereux aussi vite que possible.

Une fois qu'un corps céleste à même de heurter la Terre est découvert, en l'état actuel de technologies il serait parfaitement envisageable de lancer un vaisseau spatial sans pilote pour intercepter cet invité surprise avant qu'il n'atteigne notre planète. Divers plans très concrets ont été conçus pour modifier la trajectoire de l'envahisseur. En faisant exploser une bombe à hydrogène à côté de lui, par exemple, la poussée générée pourrait légèrement infléchir sa trajectoire, de manière à éliminer toute menace potentielle pour la Terre. Cette méthode est plus facile à mettre en œuvre qu'une fragmentation du corps céleste. Une autre méthode consiste à utiliser un vaisseau spatial pour bâtir à proximité du corps un gigantesque four solaire, et utiliser l'énergie du Soleil pour le vaporiser, au moins en partie. La réduction de sa masse modifierait sa trajectoire, permettant ainsi à la Terre d'échapper à la catastrophe. Certains ont même imaginé équiper le corps de grandes voiles qui, en le propulsant par la pression du vent et de la lumière solaires, le « soufflerait » hors de sa trajectoire initiale, éliminant cette fois encore la menace.

La prévision précise des collisions des comètes ou des astéroïdes avec la Terre ne doit pas nous donner un faux sentiment de sécurité. D'abord parce que cette prévision repose sur l'observation préalable des corps en question, et que les plus petits d'entre eux ne sont détectables que lorsqu'ils sont déjà très proches de la Terre, c'est-à-dire peut-être trop près pour nous laisser le temps d'agir. Il faudrait alors se résigner à les regarder se précipiter à une vitesse folle vers notre planète.

Cela dit, l'histoire de la technologie montre que ce qui est impossible aujourd'hui le devient demain. Le progrès constant des techniques d'observation astronomique permettra sans doute de prédire très à l'avance et avec précision toutes sortes de collisions potentielles, et de prendre en conséquence les mesures appropriées les plus efficaces.

Si l'espace extérieur regorge de dangers, l'intérieur de notre propre maison n'en est hélas pas non plus exempt. Après des milliers

d'années de développement, notre civilisation a provoqué une hausse de la concentration de dioxyde de carbone qui atteint aujourd'hui un pic historique et entraîne une augmentation constante de la température mondiale. La Terre sera-t-elle encore habitable dans un avenir proche ? Peut-on trouver des solutions ? Ces questions, qui touchent au cœur de notre destinée, font aujourd'hui l'objet d'intenses réflexions chez les scientifiques.

17

Un casse-tête scientifique

Pour fêter son 125^e anniversaire, le célèbre magazine *Science* a sélectionné et présenté dans son numéro du 1^{er} juillet 2005 une liste des 125 questions scientifiques qui lui paraissaient les plus importantes dans tous les domaines : biologie, physique, mathématiques, etc. Un certain nombre d'entre elles portaient sur l'Univers, comme le fait de savoir s'il est unique ou simple partie d'un plus grand *multivers*, ou encore connaître sa constitution, ce qui a alimenté l'inflation cosmique des premiers instants, la nature des trous noirs ou comment la vie est apparue sur Terre. Les astrophysiciens qualifient en fait les problèmes centraux de leur discipline par la formule « un noir, deux sombres et trois d'origines », entendant par-là les trous noirs, la matière et l'énergie sombres, les origines de l'Univers, des corps célestes et de la vie. Les réponses à ces questions nous aideront non seulement à mieux comprendre l'Univers mais aussi à mieux envisager notre avenir.

17.1. LES TROUS NOIRS

Contrairement à ce que pourrait laisser penser leur dénomination, les trous noirs ne sont pas des trous mais des corps célestes très massifs dont l'existence a été prédite par la théorie de la relativité générale (figure 17.1). Ils se forment par l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive qui a épuisé son carburant nucléaire. Le champ gravitationnel dû à leur énorme masse est si important qu'il empêche toute forme de matière ou de lumière visible de s'en échapper. On ne peut donc les voir. Ils ont été nommés par analogie avec les corps noirs qui, en thermodynamique, désignent un objet idéal absorbant la lumière dans toutes ses longueurs d'onde. La zone frontière de non-retour, à partir de laquelle plus rien ne peut s'échapper du trou noir, se nomme l'*horizon des événements*. Une singularité se niche au cœur de cette zone, dont la densité tend vers l'infini à mesure que l'on s'en approche.

La masse du plus petit trou noir aujourd'hui répertorié est environ 3,3 fois supérieure à celle du Soleil. Si les trous noirs ne sont pas directement observables, leur existence peut se détecter de manière indirecte par leur influence sur d'autres objets célestes. En étudiant les trajectoires d'étoiles ou de nuages stellaires anormales, par exemple, ce qui permet aussi de déduire leur position et leur masse. Ou en observant les rayonnements X ou gamma émis par corps en phase d'aspiration...

Comme ce sont des objets parmi les plus fascinants de la physique, ils apparaissent souvent dans les romans ou les films de science-fiction. Si leur existence a longtemps été hypothétique, elle est aujourd'hui largement acceptée par la communauté scientifique.

17.1.1. La formation des trous noirs

La vie d'une étoile dure tant que les réactions de fusion nucléaire qui se produisent en son sein parviennent à contrer les effets de sa propre attraction gravitationnelle. Ces réactions s'amorcent par la fusion des atomes d'hydrogène et aboutissent à la création et à la

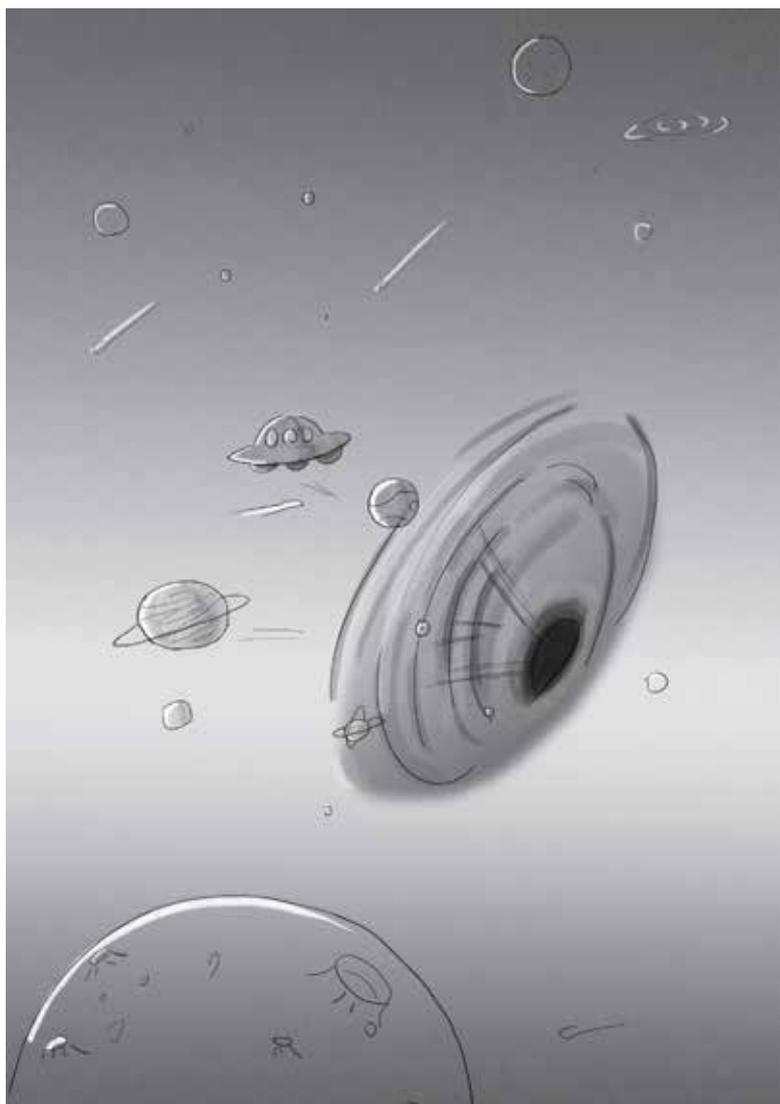


Figure 17.1 | Un trou noir.

fusion d'éléments de plus en plus lourds. Plus une étoile est massive, plus elle dispose des ressources énergétiques pour déclencher des réactions de fusion produisant des éléments lourds. Les plus massives d'entre elles peuvent aller jusqu'au fer, mais jamais au-delà, du fait de la stabilité exceptionnelle du noyau de cet élément, et notamment de l'isotope 56, composé de 26 protons et 30 neutrons, le plus stable d'entre tous. Comme les noyaux atomiques évoluent toujours vers une forme plus stable, le temps faisant, l'isotope 56 du fer pourrait constituer l'avenir ultime de toute la matière de l'Univers !

L'étoile commence à mourir quand les réactions de fusion ne parviennent plus à contrebalancer les effets de sa propre gravité. Cela survient d'autant plus rapidement que l'étoile est massive. La mort d'une étoile débute par une phase de contraction qui aboutit à diverses formes selon les étoiles. Une naine blanche, pour les étoiles comme le Soleil, ou un trou noir pour celles qui dépassent la limite dite d'Oppenheimer¹, qui vaut environ trois masses solaires.

17.1.2. Horizon des événements

L'horizon des événements, ou plus simplement l'horizon, délimite donc la zone à partir de laquelle même la lumière ne peut plus échapper à l'attraction d'un trou noir. Ainsi un observateur placé au-delà de cet horizon ne peut plus physiquement obtenir la moindre information sur ce qui se passe en-deçà. L'existence de cet horizon est la raison fondamentale qui nous empêche d'observer un trou noir de manière directe.

17.1.3. Sphère de photons

La *sphère de photons*, ou *sphère photonique*, est une sphère frontière sans épaisseur sur laquelle les photons suivent des orbites circulaires autour du trou noir. Pour un trou noir qui n'est pas animé d'un

1. Julius Robert Oppenheimer est un physicien américain célèbre pour avoir dirigé le Projet Manhattan. Il est à ce titre considéré comme le « père de la bombe atomique ».

mouvement de rotation, le rayon de la sphère de photons vaut environ 1,5 fois le rayon de Schwarzschild². Cette sphère n'est pas fixe et varie avec la taille du trou noir.

Si un photon est émis tangentiellement à cette sphère, il est capturé par le champ gravitationnel du trou noir et tourne autour de lui éternellement, comme un satellite autour de la Terre, sans jamais tomber dedans. Des sphères photoniques peuvent également envelopper d'autres objets célestes très compacts, comme les étoiles à neutrons ou les étoiles à quarks.

17.1.4. Les trous noirs primordiaux

Un trou noir primordial est un trou noir formé très peu de temps après le Big Bang, non par l'effondrement d'une étoile en fin de vie, mais par effondrement direct de matière dans certaines régions très denses de l'Univers. Faute de preuves directes, l'existence de tels trous noirs n'est encore que théorique.

Leur masse pourrait être beaucoup plus faible que celles des trous noirs classiques. Comme une théorie développée par l'astrophysicien Stephen Hawking affirme qu'un trou noir s'évapore d'autant plus vite que sa masse est petite, les trous noirs primordiaux les plus petits pourraient avoir déjà disparu ou seraient sur le point de le faire. Pour donner une idée, un trou noir dont la masse est équivalente à celle du Soleil s'évapore en 10^{67} ans, celui situé au centre de notre galaxie en 10^{87} ans et le plus grand trou noir aujourd'hui recensé de l'Univers en peut-être 10^{100} ans. Les astronomes espèrent repérer des noirs primordiaux en détectant des rayons gamma émis lors de leur évaporation.

2. Le rayon de Schwarzschild est une mesure de la taille et de la force gravitationnelle de tout objet massif qui a été proposée en 1916 par le physicien et astronome allemand Karl Schwarzschild. Les objets qui ont un rayon de Schwarzschild supérieur à leur rayon classique sont les trous noirs. Le rayon de Schwarzschild du Soleil est d'environ 3 kilomètres, tandis que celui de la Terre fait environ 9 millimètres.

LE THÉORÈME DE CALVITIE

Le théorème de calvitie affirme en substance que les trous noirs se décrivent de manière très simple. Pour être plus précis, tout objet qui s'effondre pour former un trou noir ne conserve que trois propriétés fondamentales : une masse, un moment cinétique et une charge électrique. De la masse dépend son horizon des événements, du moment angulaire sa rotation et de la charge électrique les lignes de force électriques qui l'environnent. Ces trois paramètres caractérisent un trou noir. Une fois formé, le trou noir a oublié tout le reste, toutes les informations dont il doit l'origine. Selon ce théorème de calvitie, aussi résumé par la formule « les trous noirs n'ont pas de cheveux » (ou « pas de poils » dans une version plus grivoise), due au physicien américain John Archibald Wheeler, si vous tombez dans un trou noir, vous perdez toute caractéristique humaine.

17.2. MATIÈRE ET ÉNERGIE SOMBRES

En cosmologie, la matière sombre, souvent aussi appelée matière noire, désigne une forme de matière qui ne peut se détecter par l'utilisation des ondes électromagnétiques, c'est-à-dire de la matière qui n'interagit pas avec la force électromagnétique. Les scientifiques ne peuvent aujourd'hui la détecter qu'à travers les effets qu'elle produit sur le champ gravitationnel et ont constaté par ce moyen que l'Univers en recelait d'importantes quantités.

Ils se servent plus précisément de méthodes et de théories liées à l'effet de lentille gravitationnelle³, à la formation de structures à grande échelle ou au fond diffus cosmologique, pour ne citer qu'elles. Selon les modèles théoriques existants et les données recueillies par le satellite Planck, l'Univers se composerait dans l'ensemble de 4,9 % de matière ordinaire, dite aussi matière baryonique, de 26,8 % de matière noire et

3. L'effet de lentille gravitationnelle se situe dans le cadre de la relativité générale. Il est produit par le champ gravitationnel d'un corps céleste massif qui, en courbant les rayons émis par une source lumineuse lointaine, déforme l'image perçue par un observateur.

de 68,3 % d'énergie sombre. L'existence de la matière noire présente l'avantage d'éliminer certaines incohérences de la théorie du Big Bang et de mieux comprendre la formation des grandes structures de l'Univers. Cette matière est très probablement constituée de particules inconnues, non encore répertoriée par le modèle dit *standard* de la physique. La recherche sur la matière noire et l'énergie sombre est un sujet important en cosmologie et en physique des particules contemporaines.

17.2.1. Existence de la matière noire

Le premier à avoir soupçonné l'existence de la matière noire est l'astronome néerlandais Jan Hendrik Oort, celui-là même qui suggéra en 1950 la présence de ce qui se nomme aujourd'hui le *nuage de Oort*. Un peu auparavant, en 1932, en étudiant le mouvement des étoiles dans la Voie lactée, il conjectura que la galaxie contenait plus de masse qu'il y paraissait. En 1933, l'astronome suisse Fritz Zwicky, qui menait alors carrière à l'Institut de technologie de Californie, suggéra de même qu'il existait de la matière invisible au sein d'un l'amas de galaxies, en l'occurrence l'amas de la Chevelure de Bérénice.

Plus tard, en remarquant que la vitesse de rotation des étoiles situées en périphérie des galaxies spirales était plus importante que prévue par la théorie de Newton, l'astronome américaine Vera Rubin conclut qu'une grande quantité de masse invisible devait empêcher que ces étoiles soient éjectées par force centrifuge comme elles auraient dû le faire. En 2006, une preuve plus directe fut apportée par la séparation de la matière classique et de la matière noire lors d'une collision entre amas de galaxies observée sous rayonnement X par le télescope spatial Chandra. Bien qu'il soit largement admis que la matière noire abonde dans l'Univers, certaines régions pourraient en être dépourvues, comme le montre le mouvement de rotation de la galaxie spirale NGC 4736, entièrement explicable par la matière visible.

17.2.2. Détecter la manière noire

Un télescope spatial conçu pour détecter la matière noire, le DAMPE (Dark Matter Particle Explorer – « Explorateur de particules

de matière noire »), développé par l'Académie chinoise des sciences, a été lancé depuis la base de Jiuquan le 17 décembre 2015 par une fusée Longue Marche 2D. Il est équipé de détecteurs de photons et de neutrons à scintillation plastique, d'un trajectographe en silicium et d'un calorimètre BGO. C'est aujourd'hui l'observatoire de particules de matière noire qui opère dans la plus large gamme d'énergie et avec la meilleure résolution spectrale et angulaire. Conçu pour durer trois ans, il est toujours opérationnel près de huit ans après son lancement. Il a déjà recueilli nombre de résultats scientifiques encourageants sur le spectre des rayons cosmiques de haute énergie. Peut-être qu'à terme ce télescope spatial dévoilera le véritable visage de la matière noire !

17.2.3. L'énergie sombre

Plusieurs découvertes majeures ont bouleversé au xx^e siècle notre représentation de l'Univers. À la fin des années 1920, l'astronome Edwin Hubble découvrit que notre Univers n'est pas statique mais en expansion, ce qui a marqué la naissance de la cosmologie moderne. À la fin des années 1990, les astrophysiciens américains Saul Perlmutter, Brian Paul Schmidt et Adam Riess ont découvert par l'observation de supernovas que cette expansion s'accélère, une découverte qui leur a valu le prix Nobel de physique en 2011.

Ce résultat était assez inattendu car la loi universelle de la gravitation stipule que les corps s'attirent entre eux, ce qui milite *a priori* pour un ralentissement de l'expansion de l'Univers. Cette accélération sous-entend donc qu'il existerait dans l'Univers une composante énergétique invisible agissant comme une force répulsive. Elle a été baptisée *énergie sombre*. Diverses observations indirectes viennent soutenir son existence, comme celles du fond diffus cosmologique, des oscillations acoustiques des baryons⁴ dans la structure à grande

4. Les oscillations acoustiques des baryons (baryon acoustic oscillations ou BAO) sont des fluctuations périodiques régulières de densité de la matière visible dans l'Univers. Elles peuvent servir d'échelle cosmique.

échelle de l'Univers ou divers effets de lentille gravitationnelle. Ces observations montrent que l'énergie sombre représenterait environ 70 % du total énergétique de l'Univers.

17.3. L'ORIGINE DE L'UNIVERS ET DES CORPS CÉLESTES

Parmi les nombreuses théories élaborées sur l'origine de l'Univers, celle du Big Bang est aujourd'hui la plus acceptée par les scientifiques. Cette théorie postule que notre Univers naquit de l'explosion d'une singularité, il y a plus de 13 milliards d'années. Elle n'est pas seulement issue de l'imagination fertile des astrophysiciens mais soutenue par de nombreuses observations rigoureuses.

Au début, donc, un point infiniment petit et chaud a explosé. L'Univers a commencé à se dilater et la température à baisser. Dans la première seconde du Big Bang, la température de l'Univers a chuté jusqu'à 10 milliards de degrés Celsius, soit 1 000 fois la température du centre du Soleil. L'Univers était alors principalement composé de photons, d'électrons et de neutrinos, de leurs antiparticules, ainsi que de quelques protons et neutrons. Les plupart des éléments chimiques du tableau périodique n'étaient pas encore été formés.

Environ 100 secondes après le Big Bang, la température de l'Univers est tombée à 1 milliard de degrés Celsius. Les protons et les neutrons ont commencé à se combiner pour former des noyaux atomiques tels que le deutérium (hydrogène lourd, contenant 1 proton et 1 neutron), puis de l'hélium (2 protons et 2 neutrons) ainsi que de petites quantités de lithium et de béryllium.

La production d'hydrogène et de ces quelques éléments s'est arrêtée au bout de quelques minutes. Au cours du millions d'années qui ont suivi, l'Univers a continué à se dilater sans produire de nouveaux éléments. Lorsque la température de l'Univers est tombée à quelques milliers de degrés Celsius, les électrons et les nucléons ont commencé à se combiner pour former des atomes.

Au fil du temps, les atomes d'hydrogène et d'hélium se sont concentrés en nébuleuses plus petites, qui se sont effondrées sous

l'effet de leur propre gravité. Lors de ce processus, les atomes se heurtant les uns aux autres, la température du gaz a augmenté jusqu'à ce qu'elle soit suffisamment élevée pour déclencher des réactions de fusion nucléaire, ce qui a créé la première génération d'étoiles. Ces étoiles de grande taille n'étaient formées que d'éléments simples et brûlaient leur carburant nucléaire très rapidement, et avaient donc une courte durée de vie. Elles mouraient sous la forme de supernovas, qui se transformaient en trous noirs, en étoiles à neutrons, en naines blanches et autres corps célestes, tandis qu'une partie des débris servaient de matière première à une deuxième génération d'étoiles. De nouvelles étoiles ont ainsi continué à naître et à mourir, amorçant ainsi dans l'Univers un long processus d'évolution continue.

18

L'avenir de la Terre

Qu'advient-il de l'humanité dans 100 ans ? Et dans 1 000 ans ? Dans 10 000 ans ? Quel sera l'état de notre société ? Ces questions relèvent tout à la fois de la sociologie, de la cosmologie et de la philosophie.

Nous sommes aujourd'hui confrontés à une quantité de mystères non résolus sur la taille de l'Univers, l'origine de l'humanité, la nature de la Terre, l'existence ou non de l'âme pour n'en citer que quelques-uns. En tant qu'espèce, que savons-nous en effet des limites de notre Univers ou de l'origine de la vie ? Notre histoire et notre civilisation dureront-elles éternellement ? Que ferons-nous quand nos ressources seront épuisées ? Les générations futures migreront-elles vers d'autres planètes ?

18.1. L'HUMANITÉ VA-T-ELLE SURVIVRE ?

Le développement effréné de nos activités affecte lourdement l'environnement. La technologie est une épée à double tranchant qui d'un côté ouvre la porte à de multiples possibilités nouvelles tout en nous offrant les moyens de nous détruire.

Les nombreux facteurs menant à notre éventuel anéantissement peuvent se regrouper en deux grandes catégories : les catastrophes naturelles et les activités humaines. Les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, les tsunamis et les événements météorologiques extrêmes provoquent une détérioration plus ou moins locale de notre cadre de vie. Les collisions d'astéroïdes ou de comètes pourraient également sérieusement affecter la Terre. Les activités humaines, comme celles qui produisent des gaz à effet de serre, entraînent un réchauffement climatique, la fonte des glaciers et l'élévation du niveau des mers. Une guerre nucléaire pourrait mettre à mal de nombreuses formes de vie. Sans parler des armes biologiques et autres virus artificiels capables, par les pandémies qu'ils provoqueraient, de décimer des populations...

En dépit de leur qualification, les catastrophes naturelles sont souvent liées aux activités humaines. Si la nature récompense avec générosité quand elle est respectée, elle se montre impitoyable dans le cas contraire !

La culture chinoise est aussi à sa manière un vaste monde qui recèle bien des mystères. Le mot « catastrophe » se représentait dans le système traditionnel chinois par le caractère 災, soit la combinaison du feu (« 火 ») et de l'eau (« 水 »), signifiant par-là que ces deux éléments pouvaient causer de lourds dégâts. Les riches et utiles enseignements du passé sont souvent sous nos yeux, mais ils nous indiffèrent et nous les ignorons. Nous autres, humains, pillons sans vergogne les ressources naturelles, perturbons l'équilibre écologique, chassons et tuons sans discernement les animaux, causant ainsi l'extinction de nombreuses espèces. La pollution de l'air, l'effet de serre, la fonte des glaciers aux pôles et la montée du niveau des mers mettent en péril de nombreuses villes côtières et pays insulaires (figure 18.1). Il faut s'y adapter ou émigrer. L'environnement se dégrade, la désertification progresse, le sable gagne du terrain et l'humanité recule. En continuant ainsi, quel espace nous restera-t-il ? Et cela alors même que la population augmente ?

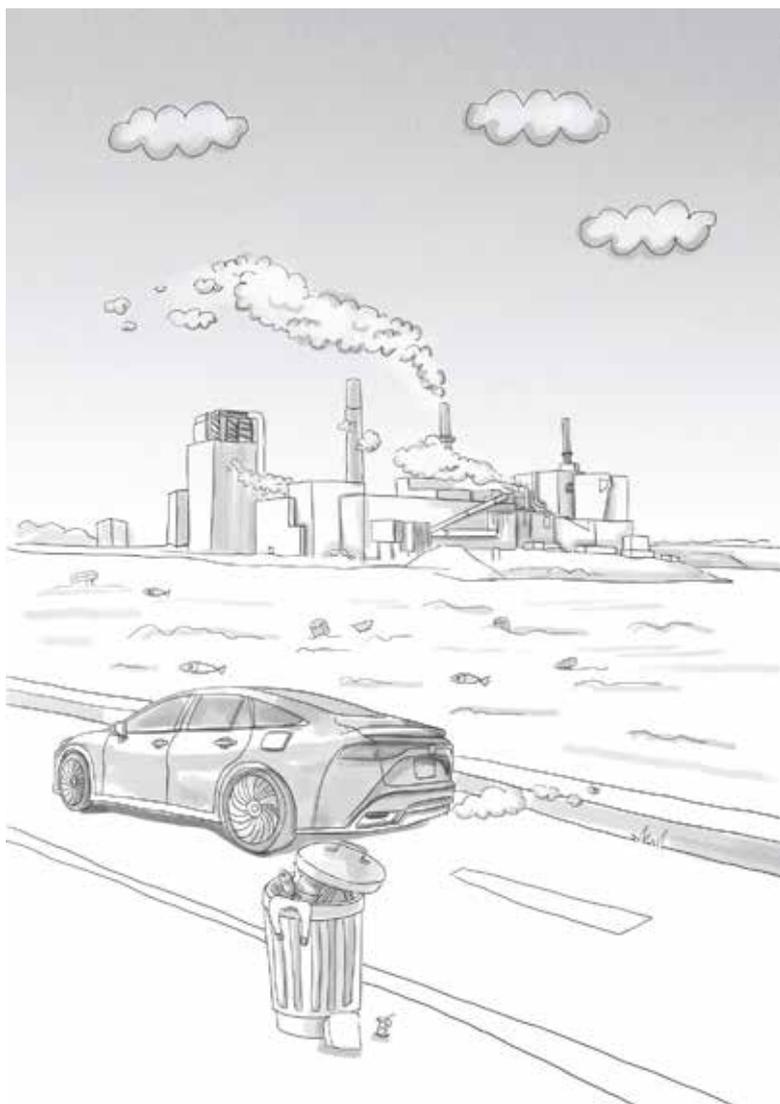


Figure 18.1 | L'impact négatif des activités humaines sur l'environnement.

Certains analystes estiment qu'au rythme actuel nous aurons épuisé les ressources naturelles de pétrole et de gaz dans 50 à 60 ans et celles de charbon dans environ 200 ans. Que ferons-nous alors ? D'aucuns ironisent avec amertume en prétendant qu'une telle situation ne se produira jamais car nous nous serons auto-détruits avant. La menace n'est pas à prendre à la légère ! Il nous faut indéniablement développer une vision claire de l'avenir...

La collision d'un corps céleste avec la Terre est une autre forme de catastrophe naturelle qui menace de détruire notre civilisation. D'innombrables collisions se sont déjà produites au cours des 4,6 milliards d'années d'existence de notre planète, et certaines d'entre elles ont bien failli la détruire entièrement. Dans les débuts du système solaire, en particulier, alors que les planètes se formaient, que les orbites des corps célestes étaient instables, de nombreuses collisions se sont produites. La Terre n'a pu échapper à la période de bombardement la plus intense et la plus dévastatrice, qui a eu lieu entre il y a 3,8 et 4,1 milliards d'années. La Lune doit très probablement son existence à un tel impact. Selon les spécialistes, en effet, peu de temps après sa formation, la Terre serait entrée en collision avec une planète de la taille de Mars ce qui, à part provoquer une catastrophe majeure, aurait projeté une grande quantité de matière dans l'espace, qui se serait finalement agrégée pour former la Lune. La collision d'un corps céleste relativement important avec la Terre pourrait mettre un terme à notre civilisation. Les scientifiques estiment que la comète Shoemaker-Levy 9 mesurait de 1,5 à 2 kilomètres de diamètre. Bien qu'elle ne soit pas aussi imposante que l'astéroïde qui a causé l'extinction des dinosaures, sa taille est déjà impressionnante. Si elle était venue à heurter la Terre, elle n'aurait sans doute pas provoqué une extinction biologique globale mais aurait tout de même infligé un coup fatal à la vie sur une grande échelle. Le menace d'une telle collision est bien réelle. Il ne faut pas la prendre à la légère ! Les volcans, les tremblements de terre, les ouragans et les tsunamis sont autant d'événements catastrophiques que l'homme ne peut que subir en



Figure 18.2 | Les conséquences désastreuses d'une guerre nucléaire.

silence, en s'abritant du mieux qu'il peut. Il ne peut ni les arrêter ni les combattre. L'humanité est bien faible au regard de la nature.

La guerre est la plus grande des catastrophes causées par l'homme. Si elle a traumatisé l'humanité, il est aussi vrai qu'elle a dopé les progrès technologiques et sociaux, car la survie pousse à leur développement rapide. Les deux guerres mondiales de l'histoire ont laissé des paysages dévastés et des familles endeuillées, mais n'ont pas suffi à détruire la

planète. Aujourd'hui que nous sommes entrés dans l'ère de l'armement nucléaire, cependant, une nouvelle guerre mondiale pourrait être fatale (figure 18.2). Peut-être avez-vous entendu parler de divers phénomènes inexplicables par le seul progrès humain, tels que les « réacteurs nucléaires préhistoriques », « l'explosion de Tunguska » ou encore la découverte de « civilisations antiques avancées » ? Tout cela pourrait s'expliquer si par le passé la civilisation humaine avait été presque totalement anéantie, en raison d'une guerre nucléaire ou de tout autre évènement soudain. Pour aussi absurde qu'elle puisse paraître, l'idée cache peut-être un fond de vérité.

Vient ensuite au deuxième rang des grandes calamités humaines les maladies. Si notre niveau médical est aujourd'hui globalement assez avancé, il subsiste encore de nombreuses maladies difficiles ou impossibles à traiter, comme le SIDA, différents types de cancers et de maladies sanguines. Toutes sortes de virus menacent en outre notre santé. L'épidémie de syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS) qui a éclaté en 2003 et la pandémie de COVID-19 qui s'est répandue en 2020 ont choqué et paniqué le monde entier. Si certaines maladies infectieuses chroniques affectent imperceptiblement l'humanité avec le temps, d'autres, très aiguës, frappent comme des bombes atomiques, et déciment des populations partout dans le monde en peu de temps.

Qu'il s'agisse de catastrophes naturelles ou de désastres causés par l'homme, l'humanité doit rester en permanence sur ses gardes. Notre survie dépendra de la capacité des pays et des peuples du monde entier à se rassembler autour de cette cause commune.

18.2. LA MIGRATION PLANÉTAIRE

Deux options s'ouvrent à nous. Soit l'homme aura développé de nouvelles sources d'énergie pour remplacer celles qui sont en cours d'épuisement et de nouvelles technologies permettant une migration planétaire massive, soit nous resterons piégés sur une planète de plus en plus appauvrie et nous disparaîtrons progressivement. La surexploitation de la Terre la rend de plus en plus inadaptée à la vie

humaine. Tout au plus pourrions-nous mettre en place un plan de préservation qui transformera notre planète mère en musée, tandis que nous nous déploierons en masse dans l'Univers à la recherche de nouvelles planètes où habiter. Les humains s'y reproduiront en grand nombre, y vivrons en paix ou se feront la guerre, coexisteront avec les formes de vie indigènes. Les anciens régimes seront brisés, renversés et reconstruits, et ne seront plus appelés des « pays », mais des « mondes » (figure 18.3).

S'il fallait choisir entre les deux possibilités, nous opterions certainement pour la seconde. La migration vers d'autres planètes sera toutefois moins facile que la conquête des nouveaux mondes entamée aux XIV^e et XV^e siècles. Selon le physicien britannique Stephen Hawking, le contact avec des formes de vie extraterrestres avancées pourrait virer au cauchemar. Dans le documentaire *L'Univers de Stephen Hawking*, il estimait que, après avoir épuisé les ressources de leur propre planète, ces extraterrestres avancés se déplaceraient à bord de grands vaisseaux spatiaux pour piller les ressources d'autres planètes et les assujettir en colonies. Si un jour des extraterrestres débarquaient sur Terre, il est fort possible que cela cause une catastrophe semblable à celle provoquée par le débarquement de Christophe Colomb aux Amériques.

CHRISTOPHE COLOMB

Christophe Colomb (Cristoforo Colombo en italien) est un célèbre navigateur né dans la république de Gêne, aujourd'hui en Italie. Entre 1492 et 1504, sous la protection de la couronne espagnole, il a effectué quatre fois la traversée de l'océan Atlantique. Il est entré dans la légende pour avoir découvert l'Amérique, selon l'expression consacrée, ce qui a marqué le début de l'exploration et de la colonisation de ce continent. Colomb était certes un grand navigateur, mais ses voyages avaient un but lucratif. Les populations autochtones ont durement ressenti les effets du pillage et de la conquête du nouveau monde par des colons européens.



Figure 18.3 | Migration planétaire.

Stephen Hawking pense que l'existence d'une vie extraterrestre est très probable, et cela dans de nombreux endroits de l'Univers. Il se fonde sur un raisonnement simple mais faisant appel à des chiffres qui dépassent l'entendement. Comme l'Univers se compose de plus de 100 milliards de galaxies, chacune contenant des milliards d'étoiles, il paraît impossible que la Terre soit la seule planète où la vie s'est développée.

Alors, où sont-ils, ces extraterrestres ?

19

Où sont-ils tous ?

Le ciel étoilé nous semble infini... Et pourtant ! Au regard de l'Univers entier, tout ce que nous voyons se situe à proximité, presque à portée de main. Par une belle nuit claire, l'œil nu est capable de distinguer au mieux 6 000 étoiles, soit moins d'un millionième de toutes celles de notre galaxie. En outre, la plupart de ces étoiles se situent à moins de 1 000 années-lumière de la Terre, soit à peine 1 % du diamètre de la Voie lactée. Et notre galaxie elle-même n'est qu'un grain de poussière dans l'ensemble de l'Univers. Une telle immensité dépasse l'imaginable !

Mais dès lors se pose une question : comment se pourrait-il que la Terre soit le seul lieu de l'Univers à héberger la vie ? Dans un espace aussi vaste, il existe certainement de nombreuses autres planètes similaires à la nôtre, sur lesquelles des formes de vie auraient pu apparaître. Et dans ce cas, pourquoi n'avons-nous toujours pas trouvé trace de créatures extraterrestres ?

La question laisse effectivement perplexe. Elle a pris le nom de *paradoxe de Fermi* depuis que le célèbre physicien italo-américain Enrico Fermi l'ai ainsi formulée : Où sont-ils tous ?

LE PARADOXE DE FERMI

Le paradoxe de Fermi a été formulé en 1950 par le physicien Enrico Fermi lors d'une discussion sur l'existence de civilisations extraterrestres. Si l'on considère que la vaste immensité de l'Univers contient de nombreux mondes habitables, pourquoi ne décèle-t-on aucun signe d'autres formes de vie avancées ? Depuis lors, les scientifiques ont tenté de lever ce paradoxe par toutes sortes d'hypothèses : rareté des planètes habitables, autodestruction des civilisations parvenues à un certain niveau technologique ou encore absence de contact intentionnel avec la Terre, pour n'en mentionner que quelques-unes. Le paradoxe de Fermi continue à passionner aussi bien les scientifiques que le grand public.

19.1. ORIGINE DU PARADOXE DE FERMI

Qui dit paradoxe dit contradiction quelque part. Elle apparaît ici par le décalage entre le grand nombre de civilisations extraterrestres théoriquement attendu et leur absence réellement constatée. D'un côté les probabilités nous indiquent que de telles civilisations existent à coup presque sûr, qu'elles ont sans doute évolué sur des planètes plus anciennes que la Terre où elles ont donc atteint un stade plus avancé que le nôtre. Comme nous pouvons nous-même nous rendre en théorie sur toutes les planètes de la galaxie en moins d'un million d'années, des extraterrestres ayant évolué depuis ce laps de temps auraient déjà dû s'établir sur Terre. D'un autre côté, nous n'avons à ce jour découvert aucune preuve solide de la présence d'extraterrestres, ce qui paraît prouver qu'ils n'existent tout simplement pas. Certes, chaque année, de nombreux ovnis, c'est-à-dire des objets volants non identifiés, sont observés ou soi-disant observés, qui peuvent prêter à confusion. Les enquêtes montrent toutefois qu'il s'agit en réalité à chaque fois de phénomènes naturels mal interprétés ou de farces de plaisantins.

En 1975, dans un article intitulé « An Explanation for the Absence of Extraterrestrials on Earth », (« L'absence des extraterrestres sur

Terre expliquée »), le chercheur américain Michael H. Hart s'est penché en profondeur sur le paradoxe de Fermi. En conséquence, le paradoxe a aussi parfois été appelé le paradoxe de Hart. Selon lui, on peut envisager quatre explications à l'absence constatée de civilisations extraterrestres :

1. elles sont encore trop jeunes pour avoir pu entrer en contact avec les Terriens ;
2. le voyage interstellaire leur est impossible pour une raison ou pour une autre ;
3. elles ne souhaitent pas entrer contact avec nous ;
4. elles sont déjà venues nous visiter mais nous ne le savons pas.

Après avoir discuté de chacune de ces hypothèses, Hart parvint à la conclusion qu'aucune ne tient la route et que les civilisations extraterrestres n'existent donc tout simplement pas.

À la suite de Hart, dont l'article a suscité un large écho, de nombreux scientifiques se sont intéressés au paradoxe de Fermi et ont développé des théories sur les civilisations extraterrestres. Outre Fermi et Hart, les noms de Ziolkowski, Vieyra, Viewing ou Tipler sont souvent associés au paradoxe, car ces personnes ont contribué de manière significative au débat.

Dans un livre publié en 2002 et intitulé *If the Universe Is Teeming With Aliens... Where Is Everybody?* (« Si l'Univers grouille d'extraterrestres... où sont-ils tous ? »), le physicien Stephen Webb a énuméré et détaillé 50 explications possibles au paradoxe de Fermi – et même 75 dans l'édition publiée en 2015. Toutes relèvent de l'une de ces trois catégories principales :

1. il n'y a tout simplement pas d'autres civilisations dans l'Univers ;
2. les extraterrestres existent (ou ont existé) mais ne sont pas encore en mesure ou ne souhaitent pas entrer en contact avec nous ;
3. les extraterrestres sont déjà venus sur Terre mais nous l'ignorons encore.

Si le paradoxe de Fermi a retenu l'attention de la communauté astronomique depuis sa formulation, c'est en partie parce qu'il

repose sur des faits scientifiques bien établis : notre galaxie est vieille de plus de 10 milliards d'années et son diamètre ne dépasse guère les 100 000 années-lumière. En ne se déplaçant qu'à seulement 1/1 000 de la vitesse de la lumière, les extraterrestres n'auraient donc besoin que d'environ 100 millions d'années pour la traverser, soit un temps très court au regard de l'âge de la galaxie. De plus, statistiquement parlant, de nombreux corps célestes similaires à la Terre et propices à la vie doivent exister dans l'immensité de l'Univers, et, pour nombre d'entre eux, depuis bien plus longtemps que notre planète. Avec une histoire plus ancienne, la vie devrait donc y être plus évoluée.

Cependant, des faits têtus vont à l'encontre de ces probabilités théoriques. Le premier d'entre eux, c'est que nous n'avons toujours pas décelé de traces de vie extraterrestre ! De plus, si la vie extraterrestre était la règle plutôt que l'exception, et quand bien même le voyage interstellaire serait impossible, pourquoi ne détectons-nous pas les signaux électromagnétiques émis par d'autres civilisations ? L'exploration spatiale par les Terriens a beaucoup progressé depuis la formulation du paradoxe de Fermi. Ces dernières décennies, des sondes artificielles ont visité les huit grandes planètes du système solaire et leurs principaux satellites. Des astronomes ont analysé des signaux électromagnétiques émis par des milliers de planètes. Cependant, ces recherches n'ont jamais apporté le moindre signe d'existence de vie extraterrestre. Le paradoxe de Fermi se lirait ainsi à rebours : puisqu'il n'y a aucune trace de civilisations extraterrestres, pourquoi devrait-on croire à leur existence ?

La science moderne nous enseigne toutefois que l'homme est apparu sur Terre à la suite d'un processus d'évolution naturel. Comme les lois de la nature sont identiques partout dans l'Univers, les mêmes causes produisant les mêmes effets, la vie devrait aussi apparaître ailleurs que sur notre planète. C'est pourquoi de nombreux scientifiques sont convaincus qu'il existe des créatures extraterrestres quelque part dans le vaste espace stellaire.

L'astronome américain Francis Drake a même tenté en 1960 d'estimer le nombre de civilisations extraterrestres présentes dans notre galaxie. Il a pour cela formulé l'équation suivante :

$$N = N_g \times F_p \times N_e \times F_l \times F_i \times F_c \times L.$$

Ici N désigne le nombre probable de civilisations extraterrestres de notre galaxie capables de communiquer avec nous ; N_g désigne le taux moyen de formation d'étoiles dans notre galaxie ; F_p désigne la proportion de ces étoiles dotées de planètes ; N_e désigne la proportion de ces planètes pouvant potentiellement abriter la vie ; F_l désigne la proportion de planètes où la vie apparaît effectivement ; F_i désigne la proportion de planètes où apparaît la vie intelligente, c'est-à-dire une civilisation ; F_c désigne la proportion de civilisations capable de communiquer avec d'autres ; et L représente la durée de vie moyenne d'une telle civilisation communicante.

Les paramètres sont bien entendu difficiles à chiffrer. Pour donner quelques exemples, Carl Sagan estimait que notre galaxie compte environ un million de planètes portant des formes de vie avancées, tandis que l'écrivain américain de science-fiction Isaac Asimov l'estimait à 670 000 et Drake lui-même, plus conservateur, à environ 100 000.

Dans une autre optique, Andrew Watson, un astrobiologiste britannique, a modélisé mathématiquement le processus d'évolution de la vie sur Terre pour en déduire la probabilité de trouver une vie intelligente sur d'autres planètes. Il a trouvé une probabilité très faible. Selon lui, la période pendant laquelle une planète comme la Terre peut servir de terrain d'évolution à la vie n'est pas infinie mais limitée. Cette durée est propre à chaque planète et dépend principalement de la luminosité de son étoile. En supposant que la vie demande 4 milliards d'années d'évolution pour apparaître, il trouve que la probabilité d'existence d'une forme de vie avancée sur une planète semblable à la Terre ne dépasse pas 0,01 %.

Pour donner une idée des chiffres, on estime que notre galaxie compte entre 100 milliards et 400 milliards d'étoiles. Et l'Univers

observable compte évidemment un grand nombre de galaxies similaires à la nôtre. En prenant la limite basse de 100 milliards d'étoiles par galaxie, on trouve en tout 10^{22} étoiles. Sachant que le nombre total de grains de sable sur Terre est estimé à environ 10^{20} , on compte donc 100 étoiles pour un grain de sable.

La proportion d'étoiles semblables au Soleil dans l'Univers, c'est-à-dire de taille, de température et de luminosité similaires, ne fait pas l'unanimité parmi les scientifiques. On estime toutefois généralement qu'elle est comprise entre 5 et 20 %. En prenant cette fois encore l'estimation la plus basse, c'est-à-dire 5 %, on trouve que l'Univers compterait au moins 5×10^{20} étoiles similaire au Soleil.

Il n'y a guère plus de consensus sur la proportion d'étoiles autour desquelles tourne une planète comparable à la Terre, c'est-à-dire où règnent entre autres des conditions de température assurant l'existence d'eau à l'état liquide. Si certains estiment que ce pourcentage atteint 50 %, d'autres, comme l'Académie nationale des sciences américaine, le chiffrent à 22 %. En le prenant à 20 %, il y aurait donc au moins 1 % d'étoiles autour desquelles existent des planètes similaires à la Terre, qui pourraient potentiellement abriter la vie. Soit environ 1×10^{20} , c'est-à-dire autant de grains de sable sur Terre. Un monde pour un grain de sable. La prochaine fois que vous marcherez sur une plage, souvenez-vous que chacune de nos empreintes de pas pourrait contenir une galaxie (figure 19.1) !

William Blake, un grand poète britannique romantique du XVIII^e siècle, avait exprimé cette idée, également chère au bouddhisme, dans l'un de ses poèmes, *Augures d'innocence* :

« Voir un monde dans un grain de sable
Et le paradis dans chaque fleur des champs,
Faire tenir l'infini dans la paume de la main
et l'Éternité dans une heure. »

Tout élément de réalité, aussi infime soit-il, contient l'infini et l'éternité !



Figure 19.1 | Un monde dans un grain de sable.

Pour en revenir à notre calcul, supposons qu'un milliard d'années après la formation de l'Univers, 1 % des planètes similaires à la Terre aient développé la vie. Supposons ensuite que sur ces planètes où la vie s'est développée, 1 % d'entre elles abritent une vie intelligente comme sur Terre. Il existerait donc 10^{16} civilisations avancées dans l'Univers.

En ne considérant que notre galaxie, avec la limite basse de 100 milliards d'étoiles, il y aurait donc un milliard de planètes similaires à la Terre, 10 millions sur laquelle la vie est apparue et 100 000 portant des civilisations avancées.

Le SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence – « Recherche d'intelligence extraterrestre ») est un programme de recherche qui vise à détecter les signaux émis par d'autres formes de vie avancées. S'il existe vraiment plus de 100 000 formes de civilisations dans la galaxie, et quand bien même seulement une petite partie d'entre elles émette des ondes radio, des lasers ou d'autres signaux pouvant potentiellement établir le contact avec l'extérieur, comment se fait-il que le réseau de satellites du SETI n'ait pas encore capté de tels signaux ? Ces extraterrestres, ou sont-ils tous passés !

19.2. UNE HYPOTHÈSE ÉTONNANTE

Le Soleil est plutôt jeune. L'Univers abrite de nombreuses étoiles beaucoup plus anciennes que la nôtre, elles aussi entourées de planètes similaires à la Terre, sur lesquelles des civilisations ont pu atteindre en théorie un stade beaucoup plus élevé que le nôtre.

Une échelle dite de *Kardashev* classe le degré d'avancement de ces civilisations en fonction de leur consommation d'énergie.

Une civilisation de type I est capable d'accéder à l'intégralité des ressources énergétiques de sa planète. Nous n'en sommes pas encore à ce stade mais nous nous en approchons. Selon une classification plus fine proposée par Carl Sagan, nous serions une civilisation de type 0,7.

Une civilisation de type II peut consommer directement toute l'énergie de son étoile. Comme notre civilisation n'a pas encore atteint

le type I, il est difficile d'imaginer qu'une autre soit déjà parvenue au type II. Mais diverses structures théoriques, comme une sphère dite de *Dyson*, bâtie autour de l'étoile, laissent entrevoir qu'il soit possible d'accéder au type II. Une civilisation de type III aurait accès quant à elle à la totalité de l'énergie de sa galaxie.

Laissons libre cours à notre imagination et comparons la Terre, âgée de 4,6 milliards d'années, à une hypothétique planète X âgée de 6 milliards d'années (figure 19.2).

Un écart de mille ans suffit déjà à beaucoup modifier une civilisation. Imaginez un peu la tête d'un homme de l'an mil débarquant à notre époque... Et un écart d'un million d'années ? Nous ne pouvons le concevoir, tout comme les grands singes n'auraient jamais pu concevoir notre civilisation d'aujourd'hui. Alors que dire de notre planète X qui nous devance de 1,4 milliard d'années !

Que notre espèce, *Homo sapiens*, soit apparue il y a moins de 500 000 ans nous donne une idée du fossé culturel que peut creuser une durée de 1,4 milliards d'années. Si la civilisation de la planète X a atteint le type III, elle maîtrise sans doute le voyage interstellaire et a colonisé sa galaxie. Sur la base de diverses hypothèses hardies concernant la construction ou la répllication d'engins spatiaux à partir de matériaux locaux, on estime que la colonisation de toute notre galaxie prendrait 3,75 millions d'années, autant dire un bref instant au regard d'une échelle de temps qui se compte en milliards d'années.

Continuons à spéculer ! Si 1 % des civilisations survivent assez longtemps pour parvenir au type III, alors, selon un calcul exposé plus haut, 1 000 d'entre elles auraient acquis la capacité de coloniser la galaxie. Nous devrions pouvoir les remarquer. Pourtant, à ce jour, aucune d'entre elles n'est venue nous rendre visite, pas plus que nous n'avons pu détecter de signaux témoignant de leur présence.

Alors où sont-ils tous passés ?

Dans *Le problème à trois corps*, une célèbre trilogie de science-fiction, l'écrivain chinois Liu Cixin explique le paradoxe de Fermi par

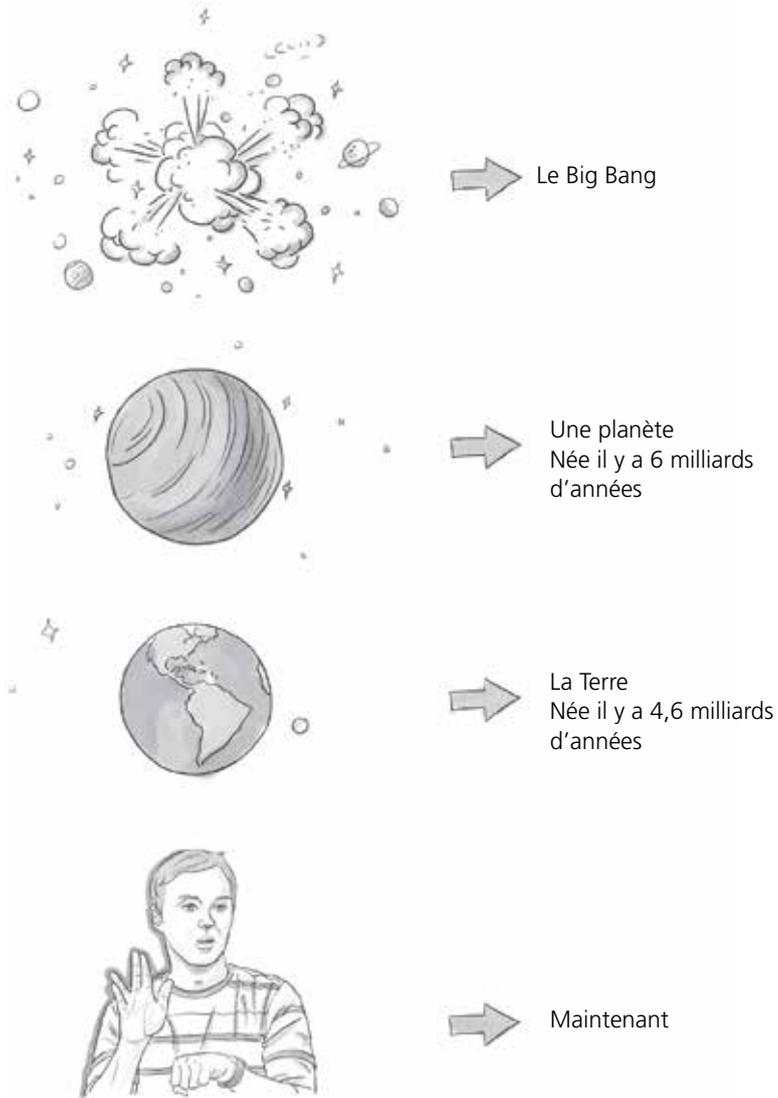


Figure 19.2 | La Terre et une hypothétique planète X.

la loi ou la théorie dite de la *forêt sombre*, qui relève de la sociologie cosmique. Elle se fonde sur l'idée que les civilisations apparaissant dans l'Univers sont très éloignées les unes des autres, ce qui rend les communications très difficiles. Ces différentes civilisations ont en outre des façons de penser, des valeurs et des modes de vie radicalement différents les unes des autres. La distance, la peur de l'étranger et l'inégalité technologique sont autant de facteurs faisant percevoir une civilisation autre comme une menace. Par conséquent, toute civilisation sage et technologiquement avancée prend conscience de l'intérêt de rester discrète. Cette théorie tire son nom du fait que l'Univers serait semblable à une forêt sombre, dans laquelle évoluent des chasseurs solitaires – les civilisations – pouvant chacun potentiellement tirer sur tout ce qui bouge. Dans ce contexte, révéler sa présence, c'est accroître le risque d'être anéanti. Il vaut donc mieux faire le moins de bruit possible.

LA LOI DE LA FORÊT SOMBRE

La loi de la forêt sombre est ainsi exposée dans le deuxième volume de la trilogie *Le problème à trois corps* de Liu Cixin (*La forêt sombre*, Actes Sud, 2017, p. 495) :

« L'Univers est une forêt sombre dans laquelle chaque civilisation est un chasseur armé d'un fusil. Il glisse entre les arbres comme un spectre, relève légèrement les branches qui lui barrent la route, il s'efforce de ne pas faire de bruit avec ses pas. Il retient même sa respiration. Il doit être prudent, car la forêt est pleine d'autres chasseurs comme lui. S'il remarque une autre créature vivante – un autre chasseur, un ange ou un démon, un bébé sans défense ou un vieillard boiteux, une magnifique jeune fille ou un splendide jeune homme, il n'a qu'un seul choix : ouvrir le feu et l'éliminer. Dans cette forêt, l'enfer c'est les autres. Une éternelle menace. Chaque créature qui dévoile son existence est très vite anéantie. Voici la cartographie de la société cosmique. C'est la réponse au paradoxe de Fermi. »

Nous ne connaissons pas la réponse réelle au paradoxe de Fermi. Tout au plus pouvons-nous conjecturer. En la matière dix scientifiques différents donneront dix réponses différentes. L'homme a déjà débattu sur la question de savoir si la Terre est ronde, si le Soleil tourne autour de la Terre, si les éclairs émanent de la colère des dieux. Tout cela semble très ancien, n'est-ce pas ? Nous en sommes pourtant encore à ce stade avec le paradoxe de Fermi...

19.3. LES EXPLICATIONS DU PARADOXE

Les manières d'expliquer le paradoxe de Fermi se divisent en deux grandes classes, celles pour qui les civilisations de type II ou III n'existent tout simplement pas, ou pas encore, raison pour laquelle nous n'en avons jamais détecté les traces, et les autres.

19.3.1. L'absence de civilisations de type II et III

Les partisans de la première classe d'explications rejettent l'idée que des civilisations plus avancées ne nous aient pas contactés pour telle ou telle raison. Ils se fondent sur ce qui se nomme en mathématique le raisonnement par contraposée. Comme les calculs montrent que des milliers, si ce n'est de millions, de civilisations plus avancées que la nôtre peuplent l'Univers, l'une d'entre elles au moins, par exception, aurait dû nous contacter. Quand bien même une loi comme celle de la forêt sombre s'appliquait à 99,99 % de ces civilisations, il en resterait toujours 0,01 % que nous devrions pouvoir détecter. Or ce n'est pas le cas. Cette contradiction aboutit donc sur le plan logique à ce que les civilisations n'existent pas. Et puisque les calculs montrent que ces civilisations existent au moins par milliers, c'est sans doute qu'il y a un facteur qui n'a pas été pris en compte. Ce facteur est aujourd'hui appelé le *Grand filtre*.

La théorie du Grand Filtre a été proposée par le chercheur Robin Hanson, en poste à l'Université George Mason aux États-Unis, en vue de résoudre le paradoxe de Fermi. Elle part du principe que la vie doit franchir un certain nombre d'étapes particulières pour évoluer vers

des formes toujours plus avancées. Et que ces obstacles ne sont pas du tout faciles à surmonter !

En supposant cette théorie correcte, une question vient immédiatement à l'esprit : où en serait la civilisation humaine par rapport à ce Grand filtre ? Trois destinées nous attendent selon les trois configurations possibles.

Nous pourrions d'abord avoir franchi le Grand filtre, et c'est bien ce que nous espérons ! Nous serions l'une des très rares formes de vie à l'avoir dépassé, ce qui expliquerait qu'il n'y ait pas de civilisation de type II ou III. Cette situation rappelle celle dans laquelle nous nous trouvons il y a 500 ans environ, quand nous pensions que la Terre occupait une position exceptionnelle, au centre de l'Univers. Un effet lié au principe dit *anthropique* laisse penser que les formes de vie avancées ont tendance à se considérer comme singulières, qu'elles le soient ou non réellement. Admettons que ce soit le cas. Alors à quel moment alors l'humanité serait-elle devenue aussi unique ? Ou pour le dire autrement, quelle étape décisive avons-nous été les seuls ou presque à franchir ?

Il est possible que le Grand filtre se situe très près du début de la vie, de sorte que l'apparition de la vie serait elle-même un phénomène très rare. Les indices penchant en faveur de cette hypothèse sont doubles : d'une part, il a fallu presque un milliard d'années après la formation de la Terre pour que la vie émerge ; d'autre part, les scientifiques ont tenté de reproduire le processus d'apparition de la vie en laboratoire, sans jamais y parvenir. Si le Grand filtre est la naissance de la vie, alors non seulement il n'existe aucune forme de vie avancée ailleurs dans l'Univers, mais peut-être aucune forme de vie du tout.

Le Grand filtre pourrait également se situer au moment de l'évolution des cellules procaryotes, au fonctionnement relativement simple, vers les cellules eucaryotes, au fonctionnement plus complexe. Après tout, cette transition a demandé près de deux milliards d'années d'évolution... Dans ce cas de figure, l'Univers foisonnerait de cellules

procaryotes, et très exceptionnellement de créatures aux cellules plus évoluées.

Viennent ensuite de nombreuses autres possibilités, et notamment celle que la dernière étape de l'évolution humaine, l'apparition de l'*Homo sapiens*, soit le Grand filtre. À l'inverse, certaines étapes de l'évolution en tout aussi grand nombre ne sont sûrement pas des Grands filtres. Pour accéder à ce statut, un processus ne doit pas se compter en une chance sur mille ou même une chance sur un million mais plutôt se regarder comme une suite de plusieurs événements encore bien plus improbables. Des recherches ont montré par exemple que les animaux, les plantes, les champignons, les algues et d'autres formes de vie sur Terre ont pu passer de la vie unicellulaire à la vie multicellulaire de 46 manières différentes. Le passage de de la vie unicellulaire à la vie multicellulaire ne peut donc pas être considéré comme un Grand filtre.

Si nous trouvons un jour des fossiles de cellules eucaryotes sur Mars ou sur Io, cela prouverait également que le passage des cellules procaryotes aux cellules eucaryotes mentionné plus haut ne constitue pas non plus un Grand filtre – pas plus que toutes les étapes qui l'ont précédé. Puisqu'elle serait commune à plusieurs planètes, en effet, cette évolution ne serait pas très hautement improbable.

Si nous constituons réellement une exception, cela pourrait certes provenir d'une succession d'évènements biologiques fortuits, mais cela pourrait aussi résulter du caractère exceptionnel de notre planète elle-même. Selon cette optique, bien que de nombreux mondes similaires au nôtre existent partout dans l'Univers, très peu d'entre eux auraient les caractéristiques particulières favorisant l'émergence de la vie.

Pourquoi ne serions-nous pas l'espèce parvenue au stade le plus avancé depuis le Big Bang ? Nous, comme de nombreuses autres espèces partout dans l'Univers, évoluons vers des formes de vie toujours plus avancées. Il faut bien que l'une ou l'autre soit la première dans la course. Alors pourquoi pas nous ?

Plusieurs éléments plaident pour cette possibilité. L'un d'entre eux passe par la présence de sursauts gamma qui s'observent un partout dans les galaxies lointaines. Sur Terre, en raison du bombardement des météorites et du volcanisme, il a fallu attendre des millions d'années avant que l'environnement soit propice à l'émergence de la vie. De la même façon, à l'échelle de l'Univers, des phénomènes très destructeurs comme les sursauts gamma pourraient empêcher la vie d'évoluer très longtemps à proximité et ainsi de franchir certaines étapes cruciales. Nous serions donc les premiers dans la course grâce à la longue période de calme dont nous aurions eu la chance de bénéficier.

Si nous ne sommes pas exceptionnels et que nous ne sommes pas en tête de la course, alors le Grand filtre est certainement devant nous. En d'autres termes, la plupart des formes de vie évoluerait plus ou moins facilement jusqu'à notre stade, mais quelque chose les empêcherait d'atteindre un niveau d'intelligence supérieur – et l'humanité n'y échapperait pas !

Il est possible que le Grand filtre soit constitué d'événements naturels majeurs qui se produisent épisodiquement, des catastrophes extrêmes telles que les sursauts gamma mentionnés précédemment. Nous aurions eu la chance d'y échapper jusqu'à présent, mais que le temps nous soit tout de même compté !

Une autre possibilité serait que toute civilisation s'autodétruisse une fois parvenu à un certain niveau de développement technologique.

Pour reprendre la formule de Nick Bostrom, philosophe à l'Université d'Oxford, « pas de nouvelles, bonnes nouvelles ». Si l'on découvrirait sur Mars des formes de vie les plus simples qui soient, ce serait une bonne nouvelle, car elle signifierait que nous aurions déjà passé le Grand filtre. En revanche, la découverte d'organismes multicellulaires ou de formes de vie avancées fossilisées serait une mauvaise nouvelle. Dans ce cas, en effet, le Grand filtre serait encore devant nous, comme à l'affût pour nous détruire. Voilà pourquoi, selon Bostrom, en matière de paradoxe de Fermi, le silence de la nuit est d'or.

19.3.2. La deuxième classe d'explications

Les partisans de la deuxième classe d'explications ne considèrent pas que la civilisation humaine soit un cas exceptionnellement rare ou qu'elle ait évolué plus rapidement qu'une autre. Ils estiment plutôt que notre galaxie, notre système solaire, notre planète ou notre niveau d'intelligence ne présentent rien de particulier, du moins jusqu'à preuve du contraire. Pour eux, le fait que nous n'ayons pas encore détecté d'autres formes de vie avancées ne signifie pas qu'elles n'existent pas. Après tout, nous ne recherchons que des signaux extraterrestres dans un rayon de 100 années-lumière autour de la Terre, ce qui ne représente que 0,1 % de la totalité de la galaxie...

Pour eux, les raisons de l'absence de traces évidentes de civilisations extraterrestres sont nombreuses. Une première possibilité serait que de telles civilisations aient déjà visité la Terre, mais à une époque antérieure à l'apparition de l'homme moderne. Notre espèce, *Homo sapiens*, n'existe que depuis environ 300 000 ans. Notre histoire, c'est-à-dire notre capacité à enregistrer les événements grâce à l'invention de l'écriture, ne remonte qu'à 5 500 ans seulement. Certaines tribus préhistoriques vivant de la chasse et de la cueillette ont peut-être rencontré des extraterrestres, sans toutefois disposer des moyens de le faire savoir aux générations suivantes.

Une deuxième possibilité serait que notre galaxie ait déjà été colonisée par des civilisations extraterrestres, mais que la Terre, se situant dans une région relativement isolée, soit restée épargnée. Nous serions un peu dans la situation des petites populations inuites vivant au nord du Canada qui n'avaient jadis aucune connaissance de la colonisation de l'Amérique par les Européens.

Une troisième possibilité serait que les espèces avancées ne souhaitent pas entrer en contact avec d'autres civilisations, dont la nôtre. Le déplacement physique est peut-être pour elles une notion dépassée. Une civilisation de type II, capable de disposer de toute l'énergie de son étoile, pourrait sans doute se créer un environnement parfait, répondant à tous ses besoins. Ne dépendant d'aucune

ressource extérieure, échangeraient-elles la douce chaleur du foyer pour un voyage sans réel but dans le froid vide des profondeurs de l'espace ? Il n'est même pas certain que l'existence physique ait encore un sens pour elles. On peut facilement imaginer que les extraterrestres aient choisi de transférer leur intelligence, leurs sensations, toute leur existence dans un paradis éternel de réalité virtuelle. Vivre dans le monde réel avec ses douleurs et ses peines pourrait s'apparenter à une forme de survie primitive, similaire pour nous à celle du plancton dans l'océan.

Une quatrième possibilité serait que notre environnement soit traversé de nombreux signaux extraterrestres, mais que notre niveau technologique trop faible nous empêche de les détecter. Nous serions alors comme les habitants d'un immeuble qui, ayant beau tendre l'oreille dans toutes les directions, n'entendent rien des communications radio qui le traverse. Il est également possible, comme l'a souligné Carl Sagan, que notre échelle de temps diffère totalement de celle d'autres formes de vie avancées. Qu'il leur faille des années pour lancer un simple « bonjour », de sorte que ce salut passe pour nous comme un signal sans signification.

Une cinquième possibilité serait que des civilisations extraterrestres plus avancées nous aient déjà découverts, qu'elles nous observent sans interférer, mais que nous ne soyons pas capables de percevoir ce contact. Peut-être que, de leur point de vue, notre planète Terre ferait partie d'une vaste réserve zoologique, composée de nombreuses planètes similaires à la nôtre, aux règles interdisant toute forme d'interventionnisme. Elles suivraient peut-être un principe de quarantaine galactique similaire à la Directive Première de la série *Star Trek*, qui proscriit l'interférence avec d'autres espèces, tant que celles-ci n'ont pas acquis un certain niveau d'intelligence. Nous pourrions être cernés par les extraterrestres tout en étant trop peu évolués pour ressentir leur présence.

Le physicien américano-japonais Michio Kaku a illustré ce propos par une analogie : supposons qu'une fourmière borde une autoroute

traversant une forêt. Les fourmis peuvent-elles comprendre ce qu'est l'autoroute ? La raison de sa présence et la technologie mise en œuvre dans sa construction ? Ainsi, ce ne serait pas tant la faiblesse de notre technologie qui nous empêcherait de détecter les signaux de la fameuse planète X que notre incapacité à comprendre ce que sont les habitants de cette planète et ce qu'ils veulent. Leur mode de vie dépasserait largement notre entendement, le dépasserait tellement qu'il ne leur viendrait même pas à l'esprit de nous éclairer. Nous imagine-t-on nous-mêmes enseigner aux vers de terre l'art de bâtir des gratte-ciels ?

Cette analogie nous permet de mieux comprendre pourquoi tant de civilisations de type III n'entrent pas en contact avec nous. Lorsque l'explorateur chinois Zheng He a abordé le continent africain, s'est-il arrêté devant une fourmilière pour communiquer avec ses habitants ? A-t-il proposé son aide ? Ou a-t-il plutôt donné un grand coup de pied dedans ? L'a-t-il seulement remarquée ? Nous sommes aujourd'hui comme cette fourmilière aux yeux des civilisations de type III.

Une sixième possibilité serait l'existence d'une redoutable « civilisation tueuse », une super-prédatrice qui repèrerait et éliminerait sans pitié toute autre civilisation ayant atteint un certain niveau d'avancement, afin de conserver sa suprématie. L'homme n'a pas agi autrement sur Terre ! Ainsi, les nouvelles civilisations, si elles ne s'étaient pas autodétruites pour diverses raisons, seraient dévorées par une super-prédatrice passé un certain seuil d'évolution. Raisons pour laquelle nous ne les détectons pas. Dans ce cas de figure, une civilisation super-prédatrice nous attend, tapie dans l'ombre...

Cette dernière idée rejoint la théorie de la forêt sombre évoquée plus haut. L'émission de signaux est une entreprise stupide et risquée, car elle signale notre présence. De nombreuses personnes estiment pour cette raison que nous ne devrions pas chercher à contacter d'autres civilisations. Comme Stephen Hawking l'a formulé avec son humour habituel, une visite d'extraterrestres pourrait se révéler

aussi bénéfique pour nous que l'arrivée de Christophe Colomb en Amérique pour les peuples autochtones. Même Carl Sagan, qui croyait pourtant fermement que les civilisations ayant acquis la maîtrise du voyage interstellaire étaient plus altruistes que belliqueuses, jugeait imprudent et puéril l'émission de signaux très au-delà de la Terre. Selon lui, l'humanité, semblable à un très jeune enfant évoluant dans un monde étrange et rempli d'incertitude, devrait prendre le temps d'observer, de chercher à comprendre en silence, plutôt que de foncer bruyamment dans la sombre forêt inconnue.

Une septième possibilité, de nature complotiste, serait que nous ayons déjà reçu des signaux de contact d'autres formes de vie avancées mais qu'ils aient été dissimulés par des organismes gouvernementaux. Bien que cette théorie soit ridicule, de nombreuses personnes continuent à la soutenir.

Une huitième possibilité voudrait que notre compréhension de la réalité soit complètement erronée. L'hypothèse a le mérite de repousser les limites de notre imagination. L'Univers serait totalement différent de ce que nous imaginons. Un peu comme une image holographique. Il serait même possible que nous venions d'ailleurs et que nous ayons été placés sur Terre pour les besoins d'une expérience ou pour servir d'engrais ou de nourriture. Ou que nous faisons partie d'un programme de simulation informatique exécuté par des chercheurs d'un autre monde... La science-fiction regorge d'hypothèses plus folles et imaginatives les unes que les autres.

Que l'homme soit la seule forme de vie avancée de l'Univers ou qu'il en existe d'autres peut paraître tout aussi effrayant. La réalité est de toute façon saisissante. Le paradoxe de Fermi porte avec lui son lot de frustration. Nous avons beau y réfléchir, utiliser les raisonnements les plus subtils, chaque idée finit par en contredire une autre. En définitive, nous comprenons que nous sommes insignifiants, que nous ne savons rien. Nos descendants nous considèreront comme nous considérons nos ancêtres qui pensaient que la Terre était plate. Ils diront de nous : « Quelle ignorance crasse ! ».

Discuter des civilisations de type II et III, c'est anéantir notre estime de soi. Sur Terre, les êtres humains sont maîtres en leur royaume, fiers de surpasser les multitudes de créatures vivant sur la planète. Aucune espèce ne peut rivaliser avec la nôtre, aucune ne peut nous imposer sa loi, et nous n'imaginons pas, ou du moins rarement, que l'une d'entre elles nous considère comme inférieure à elle. Il suffit pourtant de songer à l'existence des civilisations de type II ou III pour comprendre que cette fierté est illusoire.

Ou, à supposer que nous soyons les seuls à voguer sur un petit caillou dans l'immensité de l'Univers, peut-être pouvons-nous nous jouir de la satisfaction d'être les plus intelligents ? Et si nous n'étions pas aussi intelligents que nous le pensons ? Car il est bien possible que nombre de nos croyances, nombre de nos convictions les plus affirmées, se révèlent finalement fausses. Cette idée peut sembler absurde mais elle libère l'imagination.

Peut-être, après tout, peut-être, seulement peut-être, que le monde est encore plus fascinant que ce que nous en connaissons !

19.4. LE MYSTÈRE DE LA SPHÈRE DE DYSON

Une sphère de Dyson (figure 19.3) est un concept proposé par Freeman Dyson en 1960 pour collecter la totalité ou presque de l'énergie émise par une étoile. Il s'agirait de capter le rayonnement émis par l'étoile en question en l'enveloppant d'une gigantesque structure composée d'un nombre faramineux de satellites artificiels.

Selon Dyson, toute civilisation qui survit à long terme avec des besoins énergétiques en constante augmentation finira par aboutir à la conception d'une structure de ce type. En conséquence, la trace de civilisations extraterrestres très avancées pourrait se détecter en cherchant de telles mégastructures artificielles.

Qu'un jour nous apportions la preuve de l'existence d'une civilisation extraterrestre pourrait provoquer diverses réactions, allant jusqu'à la panique générale si une rumeur de type « fin du monde » se propageait. Vous souvenez-vous de la prédiction fondée sur une

particularité du calendrier maya qui annonçait la fin du monde pour 2012 ? Quoi que dénuée de tout fondement scientifique, elle s'était largement et rapidement répandue dans la population, poussant même une notable partie d'entre elle à courir s'approvisionner en bougies.

À partir de 2011, une étoile située à environ 1480 années-lumière de la Terre, dans la constellation du Cygne, a commencé à faire parler d'elle. Officiellement baptisée KIC 8462852, mais plus souvent nommée *étoile de Tabby*, en hommage à Tabettha Boyajian, l'astronome américaine qui l'a découverte, elle surprend par ses variations inhabituelles de luminosité. Celle-ci présente en effet des baisses de plus de 20 % alors que celles des autres étoiles atteignent rarement 1 %. À l'occasion s'observent également de vifs pics d'intensité, ce qui est singulier pour ce type d'étoile. Et ses variations sont très abruptes, contrairement là encore aux autres étoiles, dont les hausses ou baisses de luminosité sont très progressives. Enfin, autre caractéristique troublante pour ce type d'étoiles, elle ne semble pas émettre de rayonnement infrarouge.

Les scientifiques attribuent souvent les variations de luminosité à l'occultation de l'étoile par un corps voisin. Exactement sur le même principe que lorsque la Lune ou une planète nous cache en totalité ou en partie la vue du Soleil lors d'une éclipse solaire ou d'un transit planétaire – à l'instar des célèbres *transits de Vénus*. L'étude des variations de luminosité a ainsi permis aux astronomes de découvrir des milliers de planètes situées en dehors de notre système solaire. La courbe de variation de luminosité de l'étoile montre alors une série de creux régulièrement espacés, correspondant à une période de quelques jours, quelques semaines ou quelques mois, selon la taille et l'orbite de la planète.

La courbe de variations lumineuses de l'étoile de Tabby, enregistrée par le télescope spatial Kepler, présente bien des creux, et même des creux inhabituels déjà évoqués de plus de 20 %, mais ils ne sont pas périodiquement espacés. Les spécialistes excluent donc

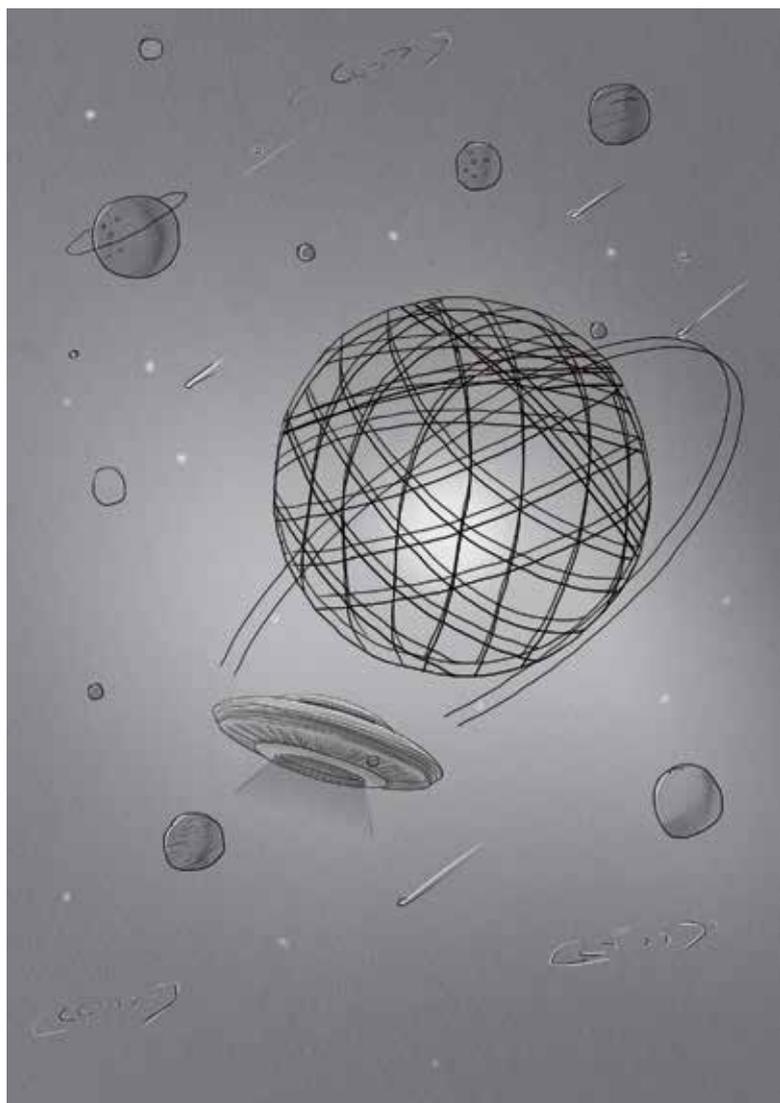


Figure 19.3 | Une sphère de Dyson.

la possibilité d'un transit planétaire classique. Un calcul fondé sur la masse de l'étoile de Tabby, légèrement supérieure à celle du Soleil, montre qu'une planète des dimensions de Jupiter ne pourrait occulter qu'environ 1 % de sa lumière. Et Jupiter est déjà proche de la plus grande taille qu'une planète puisse atteindre. Ces anomalies de variations ne paraissent pas non plus être causées par l'occultation d'une autre étoile, que nous devrions pouvoir détecter sinon. Il n'y a rien à faire, l'irrégularité de l'espacement des creux ne correspond pas à un mouvement planétaire ou stellaire !

Alors, qu'est-ce qui occulte l'étoile de Tabby ? Comme sa taille est supérieure à celle du Soleil, l'objet en question doit être extrêmement massif, d'un diamètre pouvant atteindre la moitié du diamètre de l'étoile de Tabby. Pour répondre à tout ce mystère, l'hypothèse d'une sphère de Dyson a été avancée. De nombreux amateurs d'astronomie ont alors commencé à spéculer : une civilisation avancée aurait-elle construit un immense dispositif de collecte d'énergie, qui entraînerait ces baisses de luminosité ?

S'il était prouvé qu'une sphère de Dyson est à l'origine du phénomène, l'étoile de Tabby servirait par contrecoup de nouveau point de repère à l'humanité. Du jour au lendemain, elle nous unirait sans doute, remettant la théorie de la forêt sombre en question, et nous inspirerait surtout de nouveaux et grands objectifs, car nous saurions qu'il est possible de s'échapper de la Terre et de coloniser l'espace, de fuir un confinement éternel sur une planète de plus en plus épuisée.

En 2016, cependant, une équipe de l'Université de l'Illinois aux États-Unis a publié un article qui a quelque peu refroidi l'ambiance. Ces chercheurs ont appliqué aux variations de luminosité un modèle très général d'avalanche, aussi bien utilisé pour les éruptions solaires, les sursauts gamma ou même l'activité neuronale dans le système nerveux central. En dépit de son apparence mathématiquement très complexe, il exprime l'idée assez simple que de petits changements quantitatifs produisent de grands changements qualitatifs. Par ce

modèle, les chercheurs ont découvert que la décroissance de l'intensité lumineuse de l'étoile Tabby s'initie par de très légères baisses, puis chute brutalement, produisant *in fine* l'étrange courbe observée. Ces variations pourraient être provoquées par divers phénomènes internes conduisant à des éruptions intenses à sa surface, même si nous ne comprenons pas encore bien les mécanismes impliqués. D'autres observations sont nécessaires pour progresser !

Les résultats fournis par l'application du modèle d'avalanche à l'étoile de Tabby correspondent étroitement aux observations faites par le télescope spatial Kepler. De ce fait, les variations de luminosité peuvent s'expliquer par des phénomènes naturels, sans recourir à l'hypothèse d'une sphère de Dyson et donc d'une civilisation de type II. À vrai dire, cette étude n'a pas abouti à une conclusion aussi claire, ce qui a encore laissé, pendant quelque temps, un soupçon d'espoir à ceux qui pensaient avoir affaire à une civilisation extraterrestre.

Le 19 mai 2017, le télescope spatial Kepler a de nouveau observé une baisse de 20 % de la luminosité de l'étoile de Tabby, baisse qui a duré plusieurs jours. Devant le caractère étrange de certains paramètres, la NASA a conduit de nouvelles observations pendant plusieurs mois. Il est apparu que l'étoile de Tabby émet certes peu de rayonnement infrarouge mais beaucoup de rayonnement ultraviolet. En toute logique, la sphère de Dyson devrait pourtant aussi bloquer cette forme de rayonnement. Sur ces constatations, son existence a été écartée.

Alors, quelle est la raison exacte des chutes soudaines et brutales de la luminosité de l'étoile de Tabby ? Les recherches de la NASA montrent que l'étoile est en phase d'assombrissement progressif, et que les chutes brutales pourraient être causées par une activité cométaire intense. Les comètes produisent en effet beaucoup de poussière qui, par la combinaison de divers facteurs, pourrait aboutir à des nuages expliquant les chutes de luminosité. D'autres imaginent aussi que cette poussière provienne de la collision de deux planètes proches de l'étoile plus que de comètes.

Nous sommes toujours là dans le domaine de la conjecture, et le mystère entourant cette étoile reste encore à résoudre.

Comme nous l'avons vu plus haut, on estime à plus de 100 000 le nombre de planètes de la Voie lactée abritant une forme de vie avancée. Ce chiffre gigantesque obtenu par les seules mathématiques suffit à rendre l'idée de l'existence d'extraterrestres parfaitement plausible. Le véritable défi est de les trouver !

Le 23 juillet 2015, la NASA a annoncé la découverte d'une planète dans la constellation du Cygne, nommée Kepler-452b, caractérisée par un indice de similarité avec la Terre atteignant 0,83. Située à environ 1 400 années-lumière de la Terre, cette « exoplanète habitable », d'une composition et d'une taille comparable à la Terre, tournant autour d'une étoile comparable au Soleil, à distance et à vitesse comparables, pourrait posséder une atmosphère et de l'eau liquide. On la surnomme la *Terre 2.0*. Reste à savoir si la vie existe sur cette planète ! Nous attendons avec impatience de le découvrir...

20

Vers l'infini et au-delà !

Selon Stephen Hawking, la science et l'art s'enrichissent mutuellement. Il a même déclaré un jour que l'Univers est un poème, preuve s'il en est que lyrisme et astrophysique ne sont jamais très éloignés. À propos de « physique poétique », ce grand savant britannique s'est attiré en 2016 un grand succès populaire sur la plateforme chinoise de microblogging Weibo, à propos de Zhuangzi et de son rêve du papillon. Dans la Chine d'autrefois, un philosophe nommé Zhuangzi rêva un jour qu'il était un papillon. Se réveillant soudain, il s'interrogea : « Suis-je Zhuangzi qui a rêvé qu'il était un papillon ou suis-je un papillon qui rêve qu'il est Zhuangzi ? » À un internaute qui lui demandait s'il est possible de faire la différence, Hawking a répondu : « Zhuangzi a rêvé qu'il était un papillon – peut-être parce que cet homme aimait la liberté. Pour ma part, je pourrais rêver de l'Univers et me demander si l'Univers rêve également de moi. Nous devons nous efforcer de répondre aux questions fondamentales de l'existence. Et peut-être alors saurons-nous un jour si le papillon – ou l'Univers – est bien réel ou s'il n'existe que dans nos rêves. »

Dans le bureau de Stephen Hawking, une citation était accrochée paraît-il au mur :

« N'oubliez pas de regarder les étoiles et non vos pieds. Essayez de donner un sens à ce que vous voyez et demandez-vous ce qui fait que l'Univers existe. Soyez curieux. »

L'édition 2017 de la Global Space Exploration Conference (GLEX 2017 – « Conférence mondiale sur l'exploration spatiale »), un grand rassemblement international de tous les acteurs de l'exploration spatiale qui s'est tenu à Pékin du 6 au 8 juin 2017, a été marquée par la présence de Buzz Aldrin, 87 ans, l'homme qui était aussi dans le module lunaire d'Apollo 11, en ce fameux jour du 21 juillet 1969, qui a vu pour la première fois un homme poser le pied sur la Lune. En l'occurrence Neil Armstrong, qui a alors prononcé ces mots pour toujours entrés dans l'histoire : « Un petit pas pour l'homme mais un bond de géant pour l'humanité. » Aldrin, descendu peu après, s'est quant à lui exclamé « Magnifique désolation ! », ce qui reste probablement comme la plus célèbre description de la Lune. Toute sa vie durant, le pauvre Aldrin s'est vu qualifié de « deuxième homme sur la Lune ». Lors d'une conférence de presse en marge de la GLEX 2017, un journaliste lui a demandé si cette étiquette n'avait pas été trop lourde à porter. Dans un grand sourire, Aldrin a répondu avec un sourire : « Armstrong a peut-être été le premier à marcher sur la Lune, mais moi j'ai été le premier à aller vers l'infini et au-delà ! »

Il faisait allusion à la devise de l'un des personnages principaux de la série de films *Toy Story*, Buzz l'Éclair, qui est effectivement inspiré de l'astronaute de Buzz Aldrin. En l'an 2000, cette devise, « Vers l'infini et au-delà ! », est arrivée en tête d'un classement des meilleures répliques de films organisé par le magazine britannique *Radio Times*. Buzz l'Éclair croit fermement qu'une détermination sans faille vient à bout de tous les objectifs, aussi éloignés soient-ils (figure 20.1). En l'honneur du 50^e anniversaire de la NASA, fêté en 2008, une figurine à l'effigie de Buzz l'Éclair a rejoint la Station spatiale internationale, où elle a séjourné plus de 400 jours.



Figure 20.1 | Vers l'infini et au-delà !

Le début du ^{xxii}e siècle verra peut-être des astronautes sur Mars et sur certains corps de la ceinture d'astéroïdes. L'exploration de Jupiter et de ses satellites devrait être alors achevée, tandis que des sondes commenceront à voguer au-delà du système solaire, vers d'autres étoiles. Qu'advient-il de l'humanité ? Devrons-nous quitter la Terre et trouver un nouveau foyer ? Aurons-nous déjà commencé à établir des colonies spatiales afin d'alléger la pression démographique sur Terre ? Dans 100 ans, des astronautes auront sans doute assemblé quelques bases avancées sur d'autres corps célestes, mais, pour des raisons de coûts, elles resteront encore inaccessibles au commun des mortels.

Sur l'échelle de Kardashev, notre civilisation n'a pas encore atteint le type I. Nous sommes toujours dans une phase où nous utilisons des énergies telles que le charbon et le pétrole. Une estimation fondée sur notre croissance annuelle moyenne suggère qu'il nous faudra encore un siècle pour atteindre le type I. Puis encore 2 500 ans pour le type II.

L'homme paraît paradoxalement aussi insignifiant que sublime quand il accède à l'espace. Et Stephen Hawking l'a dit un jour :

« Nous manquons de place, ce qui nous oblige à en trouver sur d'autres mondes. Il est temps d'explorer d'autres systèmes solaires. Je crois fermement que l'humanité doit quitter la Terre. »

L'Univers est si vaste, les particules si petites. À l'échelle cosmique, l'espace et le temps se mesurent en années-lumière et en milliards d'années. Tout ce que l'humanité accomplit, nos actions individuelles, semblent insignifiantes au regard de cette immensité. Pourtant, en y réfléchissant, cette immensité même, en nous rendant uniques, donne une valeur très précieuse à notre existence. Que devons-nous faire pour ne pas ruiner le chemin singulier et merveilleux de la vie ?

L'avenir est semblable à un train qui fonce sur nous à grande vitesse. Nous y faisons face grâce au travail acharné des scientifiques et de toutes les personnes impliquées dans le développement

technologique. Espérons que les hommes se servent judicieusement de l'arme qu'est la science pour percer les mystères de la nature, triompher des obstacles et envisager l'avenir.

Il faut y croire, croire que l'humanité quittera son berceau terrestre, croire qu'elle continuera sans relâche d'explorer l'Univers, croire qu'elle visera des horizons toujours plus lointains.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALISTE EN FRANÇAIS

- Beck Nicolas, Breton Sylvain, Flahout Jessica, *En avant Mars : histoire et avenir de l'exploration martienne*, EDP Sciences, 2022.
- Collin-Zahn Suzy, *Grandes controverses en astrophysique*, EDP Sciences, 2021.
- Galfard Christian, *L'Univers à portée de main*, Flammarion, 2017.
- Galiana-Mingot Michel, *Les clés secrètes de l'Univers : émergence de l'Univers, de la vie et de l'Homme*, EDP Sciences, 2021.
- deGrasse Tyson, Neil, Strauss, Michael A., Gott J. Richard, *Passeport pour l'Univers : le guide de poche*, EDP Sciences, 2023.
- Hawking Stephen, *Une brève histoire du temps*, Flammarion, 2020.
- Ismael Jenann, *Le temps*, EDP Sciences, 2022.
- Lachièze-Rey Marc, *Gravitation : Dépasser Einstein, du Big Bang aux trous noirs*, Flammarion, 2023.
- Lesch Harald, Gaßner Josef M., *Le Big Bang, le cosmos et la vie : Du néant jusqu'à ce matin*, EDP Sciences, 2023.
- Liu Cixin, *Le problème à trois corps*, Actes Sud, 2015.
- Liu Cixin, *La forêt sombre*, Actes Sud, 2017.
- Liu Cixin, *La mort immortelle*, Actes Sud, 2021.
- Luminet Jean-Pierre, *Les trous noirs en 100 questions*, Tallandier, 2022.

- Luminet Jean-Pierre, *Astéroïdes : la Terre en danger*, Cherche Midi, 2012.
- Luminet Jean-Pierre, *L'Invention du Big Bang*, Le Seuil, 2016.
- Maeder André, *La plus grande énigme de l'astronomie : de Newton et Einstein à l'énergie et matière noires*, EDP Sciences, 2022.
- Sagan Carl, *Les Dragons de l'Eden*, Seuil, 1980.
- Sagan Carl, *Cosmos*, Mazarine, 1981.
- Weinberg Steven, *Les trois premières minutes de l'Univers*, Flammarion, 1988.
- Wu Ji, *L'hôtel de la Mer des pluies*, EDP Sciences, 2021.

BIBLIOGRAPHIE SPÉCIALISÉE EN ANGLAIS

- Abbott B. P. 2016. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 116(6): 061102-8.
- Bagenal F., Adriani A., Allegrini F., *et al.* 2017. Magnetospheric Science Objectives of the Juno Mission. *Space Science Reviews*, 213: 219-287.
- Brigham N. 2001. *Notable Scientists from 1900 to the Present*. Farmington Hills: Gale Group.
- ESA. 2019. *Rosetta Mission*. <http://rosetta.esa.int/>.
- JAXA. 2019. *Asteroid Explorer HAYABUSA*. https://global.jaxa.jp/projects/sas/muses_c/.
- Katz U. F., Spiering C. 2012. High-energy neutrino astrophysics: Status and perspectives. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 67(3): 651-704.
- Lesgourgues J., Pastor S. 2006. Massive neutrinos and cosmology. *Physics Reports*, 429: 307-379.
- NASA. 2019. *Apollo program history*. <https://spaceflight.nasa.gov/history/apollo/index.html>.
- NASA. 2019. *MESSENGER-Mission description*. <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/missions/solarsystem/MESSENGER.html>.
- NASA. 2019. *Space Shuttle Era*. https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/flyout/index.html.

- NASA. 2019. *Voyager-Mission description*. https://www.nasa.gov/mission_pages/voyager.
- Tomiotto G. 2017. Using antimatter as fuel for rockets. *Journal of Defense Studies and Resource Management*, 5:1.
- Vozoff M., Couluris J. 2008. *SpaceX Products-Advancing the Use of Space*. AIAA SPACE 2008 Conference and Exposition, 2008-7836.
- Woodward J. F. 2013. *Advanced Propulsion in the Era of Wormhole Physics*. New York: Springer.

BIBLIOGRAPHIE SPÉCIALISÉE EN CHINOIS

- 晨风, 2012. 人类的登天奇迹. 北京: 新世界出版社.
- 陈士槽, 1998. 航天器姿态动力学与控制. 北京: 宇航出版社.
- 侯建文, 阳光, 曹涛, 等. 2016. 深空探测——小天体探测. 北京: 国防工业出版社.
- 侯建文, 阳光, 满超, 等. 2016. 深空探测——月球探测. 北京: 国防工业出版社.
- 侯建文, 阳光, 周杰, 等. 2016. 深空探测——火星探测. 北京: 国防工业出版社.
- 侯建文, 张晓岚, 王燕, 等. 2013. 火星探测征程. 北京: 中国宇航出版社.
- 胡中为. 2014. 新编太阳系演化学. 上海: 上海科学技术出版社.
- 焦维新. 2002. 空间探测. 北京: 北京大学出版社.
- 焦维新, 傅绥燕. 2003. 太空探索. 北京: 北京大学出版社.
- 焦维新, 邹鸿. 2009. 行星科学. 北京: 北京大学出版社.
- 李春来, 欧阳自远, 都亨. 2002. 空间碎片与空间环境. 第四纪研究, 22 (6) : 540-551.
- 李东. 2006. 长征火箭的现状 & 展望. 科技导报, 24 (3) : 57-63.
- 李志杰, 果琳丽, 黄江川, 等. 2016. 光帆航天器发展现状及“突破摄星”计划关键技术. 航天器工程, 25 (5) : 111-118.
- 刘长庭, 王常勇, 汪德生, 等. 2008. 空间生命科学研究与探索. 北京: 人民军医出版社.

- 刘振兴等. 2005. 太空物理学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社.
- 刘佳. 2018. 撼动宇宙的小粒子——中微子. https://m.sohu.com/a/225438007_100099484 [2019-03-13].
- 罗丹. 2003. 最大的火箭“土星五号”. 国外科技动态, 8: 35.
- 《世界航天运载器大全》编委会. 1996. 世界航天运载器大全. 北京: 宇航出版社.
- 吴沅. 2017. 探月工程——人类探月为得月. 上海: 上海科学技术文献出版社.
- 肖龙. 2013. 行星地质学. 北京: 地质出版社.
- 徐道一, 郑文振, 安振声, 等. 1980. 天体运行与地震预报. 北京: 地震出版社.
- 薛亮. 1989. 苏联能源号火箭的详细情况. 中国航天, 3: 25.
- 喻菲, 全晓书, 屈婷. 2017. 活捉黑洞: 中国慧眼探索极端宇宙. 北京: 科学出版社.
- 中国科学院月球与深空探测总体部. 2014. 月球与深空探测. 广州: 广东科技出版社.
- 周光召. 2009. 中国大百科全书: 物理学. 2 版. 北京: 中国大百科全书出版社.
- 朱毅麟. 2000. 离子推进及其关键技术. 上海航天, 17 (1): 12-18.
- 总装备部电子信息基础部. 2012. 太阳风暴对航天器的影响与防护. 北京: 国防工业出版社.