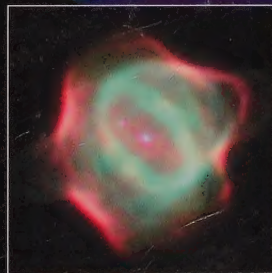
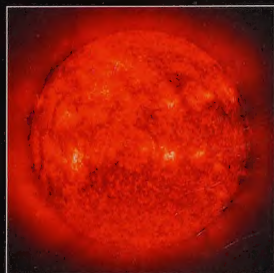
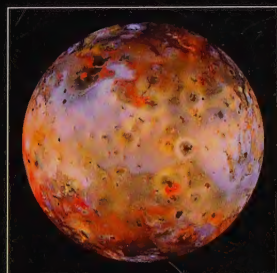
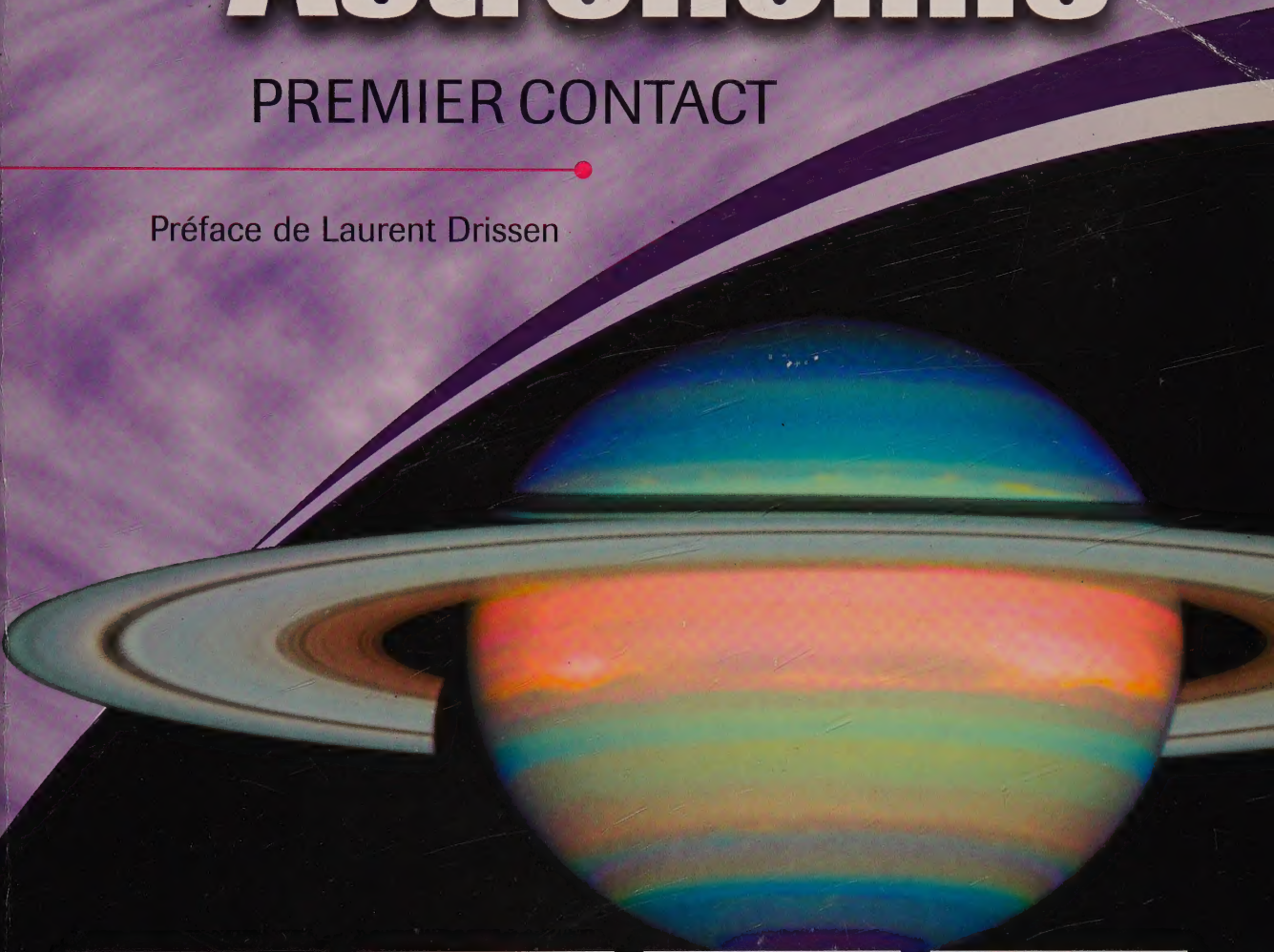


Gaétan Morissette

Astronomie

PREMIER CONTACT

Préface de Laurent Drissen



3^e édition



les éditions
Le Griffon d'argile

Gaétan Morissette

François
Bergeron

Astronomie

PREMIER CONTACT

3^e édition

Préface de Laurent Drissen

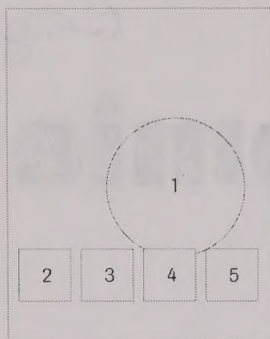
Avec le concours de Sophie Descoteaux

Ce manuel
est imprimé sur du papier
contenant 100 % de fibres
postconsommation, certifié choix
environnemental, procédé
sans chlore et fabriqué à partir
d'énergie biogaz.



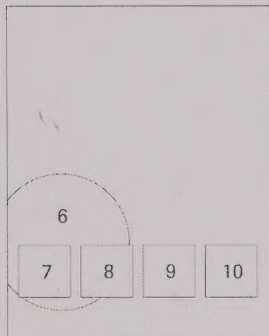
les éditions
Le Griffon d'argile

Photographies de couverture



Première de couverture :

- 1 - La planète Saturne, en fausses couleurs
- 2 - Io, satellite de Jupiter
- 3 - Le Soleil, photographié par le satellite SOHO
- 4 - La nébuleuse planétaire Hen 1357
- 5 - La galaxie spirale M51



Quatrième de couverture :

- 6 - La planète Mars
- 7 - La nébuleuse planétaire M57
- 8 - La nébuleuse planétaire NGC 2392
- 9 - L'astéroïde Ida et sa lune Dactyl
- 10 - La nébuleuse lumineuse NGC 3372

Coordination de l'édition : Sophie Descoteaux **Révision linguistique :** Dominique Johnson

Graphisme : Charles Lessard **Illustrations :** Bertrand Lachance

Mise en pages : Infoscan Collette **Pictogrammes désignant les chapitres :** Paule Thibault

Il est interdit de reproduire le présent ouvrage, en tout ou en partie, sous quelque forme que ce soit, sans la permission écrite des éditions Le Griffon d'argile ou d'une société de gestion dûment mandatée.

© 2003, Les éditions Le Griffon d'argile

Tous droits réservés



les éditions
Le Griffon d'argile

© Les éditions Le Griffon d'argile

Membre du Groupe Modulo

514 738-9818 • 1 888 738-9818

Télécopieur : 514 738-5838

www.groupemodulo.com

Astronomie. Premier contact, 3^e édition

ISBN 978-2-89443-194-8

Nous reconnaissons l'aide financière du gouvernement du Canada par l'entremise du Programme d'aide au développement de l'industrie de l'édition (PADIE) pour nos activités d'édition.

Gouvernement du Québec – Programme de crédit d'impôt pour l'édition de livres – Gestion SODEC

Dépôt légal 2003

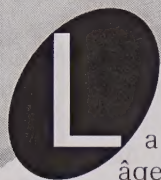
Bibliothèque nationale du Canada

Bibliothèque nationale du Québec

Imprimé au Québec, Canada

4 5 6 7 8 M 17 16 15 14 13

PRÉFACE



La passion pour l'astronomie peut survenir à tout âge et nous surprendre dans des circonstances parfois étonnantes. La vue de la Voie lactée les soirs d'été, loin de la pollution lumineuse des villes, m'a toujours fasciné. Mais observer la Lune en plein jour, moi qui, enfant, ne l'avais jusque-là associée qu'à la nuit, a piqué ma curiosité pour de bon. Comment expliquer le mouvement de la Lune ? Pourquoi la voit-on tantôt pleine, la nuit, tantôt en quartier, la nuit comme le jour ? Comment s'est-elle formée ? Une fois la main dans l'engrenage des questions astronomiques en apparence anodines, il m'a été impossible d'en sortir !

Le livre de Gaétan Morissette répond merveilleusement à un besoin de connaissance du cosmos de plus en plus perceptible chez nous. Le Québec célèbre en effet en 2003 le vingt-cinquième anniversaire de la création de l'Observatoire du mont Mégantic. Ce centre de recherche a non seulement contribué à la formation de toute une génération d'astronomes professionnels, mais a aussi favorisé, en collaboration avec les groupes d'astronomes amateurs, l'implantation de ce champ de connaissances dans la culture populaire du Québec. Tout en étant extrêmement complexe dans ses détails, l'astronomie est une des rares sciences qui soit accessible à tous, et où chacun y prend ce qui l'intéresse, que ce soit le simple émerveillement face à la beauté du ciel ou la recherche méthodique de réponses à des questions très précises.

Les dernières années ont été très fertiles en « actualité astronomique » : que l'on pense à la découverte des premières planètes à l'extérieur du Système solaire, à la confirmation de l'existence d'un trou noir supermassif au cœur de la Voie lactée, à la mesure de l'accélération de l'expansion de l'Univers ou à la détection, au fond d'une mine enfouie à 2 kilomètres sous terre, près de Sudbury (Ontario), des neutrinos « manquants » en provenance du cœur du Soleil. Certaines découvertes confirment les



théories élaborées depuis longtemps, alors que d'autres bouleversent complètement notre vision du cosmos. De nombreuses questions fondamentales demeurent sans réponse, malgré l'acharnement des astronomes : nous ne savons pas encore de quoi est composé plus de 90 % de la masse de l'Univers et nous sommes encore loin de comprendre le phénomène qui a causé le Big Bang il y a environ 15 milliards d'années.

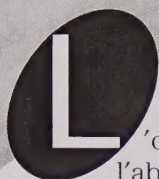
Au-delà de ces questions fondamentales, ce sont souvent les « petits détails » de la vie quotidienne de l'Univers qui fascinent aussi bien les amateurs d'astronomie que les astronomes professionnels : pourquoi le Soleil brille-t-il ? Comment naissent les étoiles ? Les astéroïdes sont-ils composés de roches semblables à celles que l'on trouve sur Terre ? Pourquoi certaines galaxies montrent-elles de grands bras spiraux riches en étoiles jeunes alors que d'autres sont amorphes ?

Astronomie. Premier contact est un ouvrage très complet qui ouvre grandes les portes du cosmos à ses lecteurs en les invitant, dans un langage simple mais toujours rigoureux, à explorer et à comprendre les concepts fondamentaux de l'astronomie contemporaine. De notre bonne vieille Terre jusqu'aux confins de l'Univers, en passant par les nébuleuses voisines et les amas de galaxies, Gaétan Morissette nous entraîne dans un voyage enrichissant qui saura plaire aux étudiants, servir de référence aux amateurs d'astronomie, et engendrer, qui sait, des vocations parmi ses lecteurs. Je lui souhaite bonne route !

Laurent Drissen

Astronome, Université Laval, Québec

REMERCIEMENTS



L'ouvrage que vous tenez dans vos mains est l'aboutissement de plusieurs années de recherche – et d'observation du ciel! – dont la parution a été rendue possible grâce à la collaboration de plusieurs personnes que je tiens ici à remercier tout particulièrement.

Laurent Drissen, qui a aimablement accepté de rédiger la préface, a de plus relu tous les textes et formulé plusieurs commentaires rectificatifs. C'est un réel privilège d'avoir pu bénéficier de son apport, pour le moins inestimable.

Sophie Descoteaux, directrice de l'édition aux Éditions Le Griffon d'argile a montré patience, enthousiasme et disponibilité; je la remercie pour ses nombreux et bons conseils, ses directives claires, ainsi que pour sa contribution importante à la rédaction de certaines parties du livre.

Pierre Lussier, du Cégep André-Laurendeau, et Bruno Martel, du Cégep de Saint-Félicien, ont relu la première version du manuscrit mis à jour; leurs suggestions ont contribué à enrichir l'ouvrage. Monsieur Lussier a de plus participé à l'écriture de certaines activités de fin de chapitre. Guy Toutant, du Cégep de Sept-Îles, astronome amateur passionné, m'a permis de reproduire certaines de ses photos.

Enfin, Pierrette, mon épouse, m'a soutenu tout au long du projet et a participé à la correction des textes. Je lui en serai éternellement reconnaissant.

G. M.

AVANT-PROPOS

B

ien que cela puisse paraître paradoxal, l'être humain d'aujourd'hui en sait moins sur les étoiles que ses ancêtres lointains. L'habitant d'une grande ville n'a malheureusement que très rarement la chance de s'émerveiller en regardant le ciel, puisqu'il n'y voit que quelques étoiles faibles perdues dans une brume de lumière causée par la pollution urbaine. Bien sûr, il lui arrive parfois, au cours d'une balade à la campagne la nuit tombée, de se voir offrir le spectacle d'un ciel débordant de milliers d'étoiles qui brillent comme autant de diamants. Qu'il se trouve empli d'une grande admiration ou que cela le laisse plutôt indifférent, l'observateur qui n'a pas l'expérience de la voûte étoilée se rend vite compte qu'il n'en connaît que fort peu de chose, et qu'il n'arrive à reconnaître aucune constellation, ni même une seule étoile ou planète.

*Le silence éternel de ces
espaces infinis m'effraie.*

PASCAL

*Je ne sais pas quelle image
je donne de moi au monde ;
en ce qui me concerne
j'ai l'impression d'être
un petit garçon qui joue
sur le rivage de la mer,
qui se divertit en
trouvant un nouveau
caillou tout lisse ou
un coquillage plus joli
que d'ordinaire, alors
que le grand océan
de vérité s'étend devant
moi, inaccessible.*

ISAAC NEWTON

Le présent ouvrage est destiné à toutes les personnes curieuses qui veulent obtenir des réponses claires à des questions portant sur des phénomènes célestes. Entièrement réécrit, enrichi et mis à jour, il constitue une véritable synthèse des connaissances actuelles en astronomie, présentée dans un langage accessible. Le propos est toujours à la fois simple et rigoureux. Si l'on désire aller plus loin, il sera toujours possible d'étendre son « univers » de connaissances en consultant l'un des nombreux ouvrages spécialisés vendus en librairie.

Le contenu de l'ouvrage correspond à celui qui est habituellement présenté dans la majorité des cours d'introduction à l'astronomie au collège et à l'université. Ces cours étant la plupart du temps ouverts à tous, aucun préalable n'est exigé – sauf bien entendu le goût d'apprendre ! – et toutes les notions peuvent être comprises aisément.

Notre exploration de l'Univers s'effectue en 10 chapitres. Le chapitre 1 traite de l'histoire (surtout occidentale) de l'astronomie en faisant un survol des grandes étapes de l'évolution des connaissances en astronomie,



de l'Antiquité jusqu'à nos jours. Le chapitre 2 porte sur les divers instruments dont se sont servis ou dont se servent aujourd'hui les astronomes pour sonder l'Univers et en extraire les mystères. Les chapitres 3 à 9 nous convient à un voyage dans l'espace, de la Terre aux confins de l'Univers, en passant par le Système solaire, les étoiles et les galaxies. Enfin, le chapitre 10 aborde la question de l'existence de la vie extraterrestre, qu'elle soit intelligente ou non.

Le livre est abondamment illustré et propose plusieurs éléments pédagogiques qui rendront sa lecture dynamique et captivante. Ainsi, en plus des questions de révision, qui permettent au lecteur de vérifier ses connaissances, la plupart des chapitres comportent des encadrés portant sur des sujets connexes, des capsules proposant des sujets de réflexion et de discussion, et des activités permettant d'approfondir certaines notions. Le symbole  indique un renvoi à la photographie apparaissant dans l'encart couleur.

Je souhaite vivement que le voyage que cet ouvrage vous fera accomplir dans le cosmos le rende tout aussi passionnant pour vous qu'il l'est pour moi. Espérons que cette introduction à l'astronomie vous révèle quelques-unes des splendeurs de notre Univers et vous amène à aller encore plus loin!

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1

Les premiers pas de l'astronomie



1.1	Les mégalithes préhistoriques	3
1.2	Les Mésopotamiens	3
1.3	Les Égyptiens	4
1.4	Les Chinois	5
1.5	Les Grecs	6
	Thalès de Milet	6
	Pythagore	6
	Aristarque de Samos	7
	Ératosthène	8
	Hipparque	9
	Claude Ptolémée	9
1.6	L'intermédiaire arabe	10
1.7	La révolution astronomique	11
	Nicolas Copernic	11
	Tycho Brahé	13
	Johannes Kepler	14
	Galileo Galilei, dit Galilée	16
	Isaac Newton	16
	Questions de révision	18
	Activité	
	Saurez-vous faire mieux qu'Ératosthène?	19

CHAPITRE 2

Les instruments de l'astronomie



2.1	La méthode scientifique	23
2.2	Ondes électromagnétiques	25
2.3	Spectres	28
	Spectre continu	31
	Spectre d'émission	32
	Spectre d'absorption	33
2.4	Lunette ou télescope réfracteur	34
	Résolution d'un télescope	35
2.5	Télescope réflecteur	37
	Télescope de type Newton	38



	Télescope de type Cassegrain	38
	Télescope de type Schmidt-Cassegrain	39
	Les grands télescopes optiques	39
	Télescope spatial Hubble	42
	Télescope à miroir liquide	43
	Le plus gros télescope québécois	43
2.6	Radiotélescope	44
2.7	Autres techniques d'observation	47
	Observation des autres longueurs d'onde	47
	Caméra à couplage de charge (CCD)	48
2.8	Observation par les sondes spatiales	48
	Questions de révision	54

CHAPITRE 3

La Terre



3.1	Généralités	59
3.2	Origine de la Terre	59
3.3	Intérieur de la Terre	62
3.4	Surface de la Terre	64
3.5	Atmosphère terrestre	66
	Propriétés optiques de l'atmosphère	70
3.6	Champ magnétique terrestre	72
	D'où vient le champ magnétique terrestre?	73
	Magnétosphère	74
3.7	Rotation de la Terre	77
3.8	Révolution de la Terre autour du Soleil	79
	Les saisons	80
3.9	Autres mouvements de la Terre	83
3.10	Définitions du temps	85
	Temps sidéral	85
	Temps solaire ou temps vrai	86
	Temps solaire moyen	86
	Temps légal	87
	Temps universel	87
	Jour julien	87
3.11	Distance entre deux points sur la Terre	88
3.12	Coordonnées célestes	88
	Coordonnées équatoriales	89
	Coordonnées horizontales	90
	Questions de révision	91
	Activité	
	Coordonnées célestes et initiation au cherche-étoiles	94



CHAPITRE 4

Le Système solaire, le Soleil et la Lune



4.1	Le Système solaire	99
4.2	Les planètes : mouvements, classification et observation	102
	Mouvements des planètes	102
	Classification des planètes	103
	Observation des planètes	104
	Planètes extérieures	106
	Planètes intérieures	107
4.3	Le Soleil	108
	Couches du Soleil	111
	Activité solaire et taches solaires	113
	L'énergie solaire	116
4.4	La Lune	120
	Révolution et rotation de la Lune	120
	Phases de la Lune	123
	Marées	124
	Éclipses	129
	Intérieur de la Lune	135
	Surface de la Lune	137
	Exploration de la Lune	140
	Origine de la Lune	141
	Questions de révision	143
	Activité	
	Diamètre de la Lune et distance Terre-Lune	145
	Observation de la Lune	147

CHAPITRE 5

Les planètes



5.1	Mercure	153
5.2	Vénus	158
5.3	Mars	164
	De la vie sur Mars?	170
	Satellites de Mars	171
5.4	Jupiter	173
	Anneaux de Jupiter	177
	Exploration de Jupiter	178
	Satellites de Jupiter	179
	Satellites galiléens	180
5.5	Saturne	185
	Exploration de Saturne	187
	Anneaux de Saturne	188
	Satellites de Saturne	191



5.6	Uranus	193
	Anneaux d'Uranus	196
	Satellites d'Uranus	199
5.7	Neptune	199
	Anneaux de Neptune	202
	Satellites de Neptune	203
5.8	Pluton	205
	Le satellite de Pluton	208
	Questions de révision	209
	Activité	
	Le mouvement rétrograde de Mars	211

CHAPITRE 6

Astéroïdes, comètes et météorites



6.1	Astéroïdes	217
	Quelques astéroïdes intéressants	224
6.2	Comètes	227
	Quelques comètes intéressantes	231
6.3	Météores et météorites	235
	Questions de révision	241

CHAPITRE 7

Les étoiles



7.1	Constellations	245
7.2	Distance des étoiles	249
	Unités de distance	249
7.3	Brillance des étoiles	252
	Magnitude	252
7.4	Température et couleur des étoiles	256
7.5	Classification des étoiles et diagramme H-R	258
	Classes spectrales	258
	Diagramme H-R	260
7.6	Étoiles binaires (ou doubles)	262
	Binaires visuelles	264
	Binaires à éclipses	265
	Binaires spectroscopiques	266
	Binaires serrées	267
7.7	Étoiles variables	268
	Variables par rotation	269
	Variables à éclipses	269
	Variables pulsantes	270
	Variables éruptives	271
	Variables cataclysmiques	272



7.8	Naissance, vie et mort d'une étoile	274
	Naissance d'une étoile	274
	Vie d'une étoile	275
	Mort d'une étoile	277
	Questions de révision	284
	Activité	
	Diagramme H-R	286

CHAPITRE 8

Nébuleuses, amas et galaxies



8.1	La Galaxie ou Voie lactée	295
8.2	Amas d'étoiles	298
8.3	Nébuleuses	300
8.4	Classification des galaxies	303
	Galaxies elliptiques	305
	Galaxies lenticulaires	305
	Galaxies spirales	306
	Galaxies irrégulières	307
8.5	Amas de galaxies	308
8.6	Collisions et interactions entre galaxies	310
8.7	Galaxies actives	312
	Questions de révision	314

CHAPITRE 9

La cosmologie



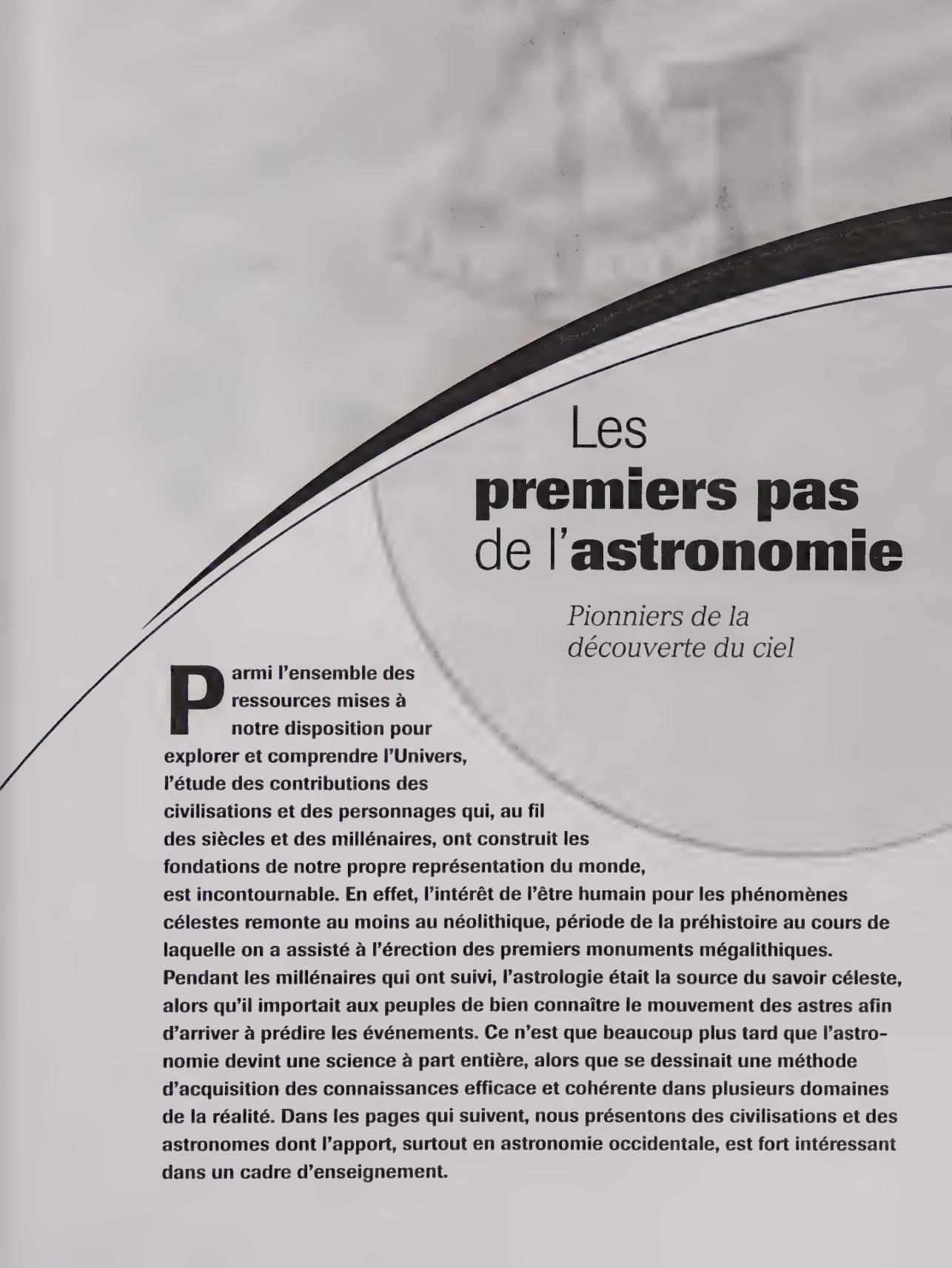
9.1	Pourquoi fait-il noir la nuit ?	319
9.2	Mouvement des galaxies	320
	Décalage vers le rouge des raies spectrales	320
	Loi de Hubble	322
9.3	Théorie du Big Bang	323
	Évolution de l'Univers jusqu'à aujourd'hui	324
9.4	Des appuis majeurs à la théorie du Big Bang	325
	Rayonnement fossile	325
	Abondance des éléments légers	327
9.5	Expansion de l'Univers	327
9.6	Quel avenir pour l'Univers ?	328
	Univers fermé ou Univers cyclique	329
	Univers ouvert	329
	Univers marginalement ouvert	329
	Questions de révision	330
	Activité	
	Loi de Hubble et âge de l'Univers	330



CHAPITRE 10

La vie dans l'Univers

10.1	Exoplanètes et systèmes planétaires	337
	Formation du Système solaire	338
10.2	Origine de la vie sur Terre	340
10.3	Discussion sur les possibilités de la vie extraterrestre	342
	Équation de Drake	343
	Paradoxe de Fermi	344
10.4	Tentatives de communication avec les extraterrestres	345
	Questions de révision	349
	Annexes	351
	Source des photographies	362
	Bibliographie	363
	Index	365



Les premiers pas de l'**astronomie**

*Pionniers de la
découverte du ciel*

Parmi l'ensemble des ressources mises à notre disposition pour explorer et comprendre l'Univers, l'étude des contributions des civilisations et des personnages qui, au fil des siècles et des millénaires, ont construit les fondations de notre propre représentation du monde, est incontournable. En effet, l'intérêt de l'être humain pour les phénomènes célestes remonte au moins au néolithique, période de la préhistoire au cours de laquelle on a assisté à l'érection des premiers monuments mégalithiques. Pendant les millénaires qui ont suivi, l'astrologie était la source du savoir céleste, alors qu'il importait aux peuples de bien connaître le mouvement des astres afin d'arriver à prédire les événements. Ce n'est que beaucoup plus tard que l'astronomie devint une science à part entière, alors que se dessinait une méthode d'acquisition des connaissances efficace et cohérente dans plusieurs domaines de la réalité. Dans les pages qui suivent, nous présentons des civilisations et des astronomes dont l'apport, surtout en astronomie occidentale, est fort intéressant dans un cadre d'enseignement.

**DANS LES PAGES
QUI SUIVENT,
VOUS APPRENDREZ À :**

- Décrire la contribution de certains peuples du passé à l'histoire de l'astronomie.
- Décrire l'apport des grands philosophes et astronomes grecs de l'Antiquité dans l'évolution de nos connaissances en astronomie.
- Décrire les grandes découvertes effectuées par les astronomes de la Renaissance.
- Expliquer ce que sont la gravité et l'apesanteur.



1.1 Les mégalithes préhistoriques

Avez-vous déjà entendu parler de Stonehenge, ce grand ensemble mégalithique formé de plusieurs rangs concentriques de gros menhirs (figure 1.1) ? Comme tous les peuples de la préhistoire, celui qui a construit ce site a probablement été intrigué par le ciel nocturne changeant. On croit aujourd'hui en effet que les pierres pesant plusieurs tonnes chacune ont été disposées de telle sorte qu'elles indiquaient les endroits où se levait (ou se couchait) le Soleil aux équinoxes et aux solstices. Plusieurs autres ensembles de ce genre ont été trouvés notamment en France, où le plus célèbre est sans doute Carnac, en Bretagne, qui comporte plus de 3 000 menhirs, et dans les îles Britanniques où pas moins de 900 sites ont été signalés. Ces vestiges datent de 4 000 à 2 000 ans av. J.-C. et servaient de calendrier en donnant des renseignements très utiles pour l'élevage et l'agriculture.

On a également découvert, au Canada et aux États-Unis, des vestiges similaires chez certains peuples amérindiens, ce qui peut laisser croire que ceux-ci s'intéressaient également aux astres et à leurs mouvements. Par exemple, au Wyoming, on a retrouvé des roues de 20 mètres de diamètre qui ont été dessinées avec de petites pierres dont certaines semblent soigneusement alignées sur des étoiles brillantes. L'hypothèse selon laquelle ces alignements auraient eu un véritable sens astronomique est toutefois contestée.



FIGURE 1.1

L'ensemble mégalithique de Stonehenge, en Angleterre

1.2 Les Mésopotamiens

Région correspondant aujourd'hui à l'Irak et à une partie de la Turquie et de la Syrie, la Mésopotamie a été le lieu des premières observations systématiques des phénomènes célestes. Les plus anciennes observations connues datent de quatre millénaires, mais il faut attendre à 700 ans av. J.-C. avant qu'elles soient organisées et continues. Ce que nous savons des peuples ayant habité en Mésopotamie vient en grande partie de tablettes d'argile sur lesquelles on trouve des inscriptions en cunéiforme, le système d'écriture alors en usage dans cette partie du monde. Les observations des Mésopotamiens étaient étroitement liées aux croyances religieuses et à la gestion des pratiques agricoles. De façon plus précise, elles servaient à prédire la position de la Lune, des planètes et du Soleil, et



La Terre est ronde, dites-vous ?

Alors qu'il s'est écoulé environ 2 500 ans depuis qu'il a été suggéré pour la première fois que la Terre est ronde, et que, par la suite, de nombreuses mesures et observations sont venues appuyer ce fait, qui oserait prétendre qu'elle est plate ? Bien que cette idée puisse paraître farfelue, il ne faut pas oublier qu'au premier coup d'œil la Terre semble effectivement plate puisqu'elle est trop grosse pour qu'on en perçoive la courbure, du moins du point de vue que nous offre le sol. Toutefois, il est une association, la International Flat Earth Society, qui compte à peine quelques milliers de membres croyant que la Terre est plate. Ce groupe prétend que les photos de la NASA prises à partir de l'espace ou de la Lune constituent

des truquages, que le Soleil et la Lune sont à 5 000 kilomètres de nous et qu'ils ont chacun un diamètre de 50 kilomètres. Il croit également que les planètes sont toutes petites et se déplacent, tout comme le Soleil et la Lune, alors que la Terre est de toute évidence immobile. Son fondateur militait en faveur de sa théorie en avançant qu'étant donné que les habitants de l'Australie ne tombent pas dans le vide, c'est que la Terre doit nécessairement être plate... Un tel raisonnement est le signe d'une importante incompréhension du phénomène de la gravité. Peut-être suffirait-il de donner à ces gens l'occasion d'aller faire un tour dans la navette spatiale afin qu'ils constatent par eux-mêmes la sphéricité de la Terre ?

permettaient de dresser des horoscopes, de déterminer l'heure, l'arrivée du jour ou de la nuit, et d'établir un calendrier. Celui-ci comptait 12 mois lunaires de 29 ou 30 jours, ce qui nécessitait l'ajout périodique d'un mois pour pallier le décalage entraîné par le retard d'environ 11 jours dans leur année.

Les Babyloniens, l'une des civilisations les plus importantes à avoir occupé la Mésopotamie à cette époque, pensaient que la Terre était plate et entourée d'un océan circulaire, et que les phénomènes célestes étaient régis par les dieux. Ils croyaient également

que tous les jours un char, dont le Soleil était une des roues, parcourait la voûte céleste.

Bien qu'ils ne disposaient pas de modèle scientifique de l'Univers – les astres étaient vénérés et l'observation de ceux-ci était considérée comme un culte rendu aux divinités astrales –, les Mésopotamiens ont posé les bases de l'astrologie-astronomie que les Grecs ont adoptée par la suite.

1.3 Les Égyptiens

La connaissance que nous avons du savoir des habitants de l'Égypte ancienne en astronomie nous vient surtout, à l'instar des Mésopotamiens, de documents écrits, mais dans ce cas-ci en hiéroglyphes, signes d'une écriture née au III^e millénaire avant Jésus-Christ. Les Égyptiens ne pratiquaient pas l'astrologie comme le faisaient les Mésopotamiens, mais ils accordaient tout de même une grande importance au ciel à la fois comme maison des dieux et comme lieu de manifestation des signes divins. Par exemple, l'apparition d'une nouvelle étoile dans le ciel annonçait l'arrivée de la saison des crues du Nil. Les Égyptiens observèrent un grand nombre d'éclipses de Soleil et de Lune, et arrivèrent à les comprendre suffisamment pour les prédire. Ils savaient distinguer les étoiles fixes des planètes. Leur calendrier



comptait 365 jours et des journées de 24 heures (séparées en 12 heures le jour et 12 heures la nuit, ce qui implique que la durée des heures était variable en fonction des saisons).

Les Égyptiens se servaient de plusieurs instruments pour effectuer des mesures, dont le gnomon (l'ancêtre du cadran solaire), composé d'une tige verticale dont l'ombre projetée sur le sol permet de mesurer le temps et la position du Soleil, et d'établir la date des solstices et des équinoxes (figure 1.2). Les autres

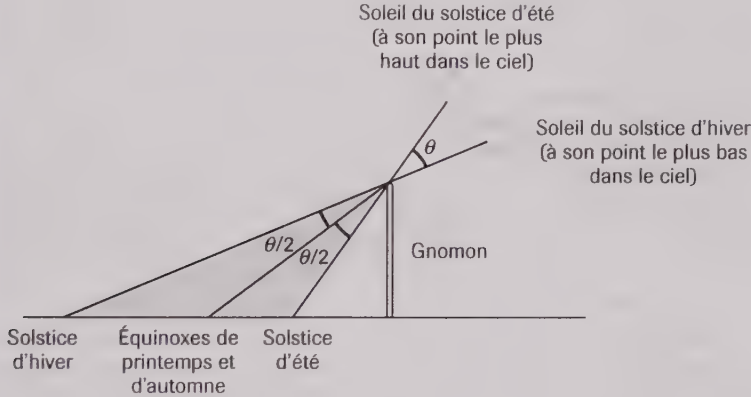


FIGURE 1.2

L'ombre projetée sur le sol par le gnomon permet de déterminer les moments des solstices et des équinoxes. L'angle parcouru dans le ciel par le Soleil entre le solstice d'été et le solstice d'hiver est désigné par θ . La moitié de cet angle indique les équinoxes.

instruments utiles aux Égyptiens sont le cadran solaire, le globe céleste et la clepsydre, horloge qui mesurait le temps par écoulement régulier de l'eau dans un récipient gradué. Les Égyptiens ont également érigé des obélisques, sortes de gnomons géants dont un exemplaire a été déplacé place de la Concorde, à Paris (figure 1.3).

1.4 Les Chinois

L'évolution du savoir astronomique s'est déroulée en Chine ancienne de la même façon qu'en Mésopotamie ou en Égypte. Selon certains historiens, les Chinois auraient même découvert avant les Mésopotamiens la périodicité des éclipses, décrite par ce qui est appelé aujourd'hui le **cycle saros** (voir la section 4.4).

Les Chinois ont su consigner les événements célestes, en particulier les apparitions inhabituelles d'étoiles éphémères. Par exemple, les premières mentions de ce que nous connaissons aujourd'hui comme la comète de Halley ont été trouvées dans des documents chinois. C'est ainsi qu'on peut dire que la



FIGURE 1.3

Gnomon géant égyptien, place de la Concorde, à Paris



découverte de la célèbre comète se situe autour de 240 av. J.-C., et peut-être même aussi loin que 1059 avant notre ère. L'un des phénomènes célestes les plus importants à avoir été mentionnés par les Chinois est sans doute cette étoile qui a brillé, même de jour, durant un mois pendant l'été 1054. Il y a de fortes chances que ce soit la supernova à l'origine d'une nébuleuse très connue, la nébuleuse du Crabe (voir la figure 7.16 de l'encart couleur), dans la constellation du Taureau.

1.5 Les Grecs

Les Grecs sont considérés comme les véritables précurseurs de l'astronomie et de la science. Ce sont eux qui, les premiers, ont appliqué de façon rationnelle leur connaissance des mathématiques et de la géométrie à des modèles de l'Univers, à partir desquels ils pouvaient faire des prédictions et vérifier celles-ci par l'observation. Bien entendu, la science des Grecs de l'Antiquité est fort différente de celle que nous pratiquons aujourd'hui. Il convient tout de même de dire que leurs travaux se sont avérés par la suite essentiels au développement de l'astronomie en Occident. Voici quelques-uns des personnages les plus importants de l'astronomie grecque.

Thalès de Milet (v. 625–v. 548 av. J.-C.)

Mathématicien, physicien et philosophe, Thalès de Milet est également l'un des premiers astronomes grecs. Bien qu'il crût que la Terre était plate, il tentait de trouver des explications mécaniques aux phénomènes célestes plutôt que de faire appel aux dieux pour les expliquer. Selon lui, il n'existait qu'une seule substance primordiale, l'eau, qui donne naissance aux autres éléments. Thalès de Milet supposait que les astres étaient des godets remplis de feu. Ainsi, dans le cas de la Lune, si l'on voyait le feu au complet, c'est qu'elle devait être pleine. Lorsqu'on voyait le godet à moitié penché, c'était un quartier de Lune et lorsqu'on le regardait de dos, la nouvelle Lune. Parmi les contributions importantes de Thalès de Milet, mentionnons le fait qu'il aurait rapporté d'Égypte et de Babylone les fondements de la géométrie. De plus, il aurait été le premier à proposer que la Lune est illuminée par le Soleil.

Pythagore (v. 580–v. 500 av. J.-C.)

Surtout connu pour son théorème mathématique, le philosophe et mathématicien grec se voit également attribuer plusieurs



autres découvertes. Sa vie et son œuvre sont mal connues pour la raison bien simple qu'il ne subsiste aucun de ses écrits. Pythagore a fondé une école de philosophie naturelle qui a attiré beaucoup de disciples et à laquelle on renvoie aujourd'hui par l'expression **école pythagoricienne**. En fait, certaines découvertes qu'on lui attribue sont probablement issues de l'ensemble de cette école. Pythagore proclamait que la Terre était sphérique, conformément à ses croyances selon lesquelles l'Univers entier devait respecter la forme géométrique la plus parfaite, la sphère. Il appuyait sa conviction sur l'observation de l'ombre circulaire projetée sur la Lune par la Terre pendant une éclipse lunaire. Les autres observations menant les contemporains de Pythagore à adhérer à l'hypothèse d'une Terre sphérique sont la disparition graduelle des navires au-dessous de l'horizon lorsqu'ils s'éloignent du port (ce qui était plutôt facile à observer à cette époque) et le fait que la position des constellations dans le ciel était différente selon l'endroit où l'on se trouvait sur la Terre.

Aristarque de Samos (v. 310–v. 230 av. J.-C.)

Précurseur de Copernic (voir plus loin), l'astronome grec déplaça la Terre de sa position privilégiée au centre du monde, pour y placer le Soleil. Ainsi, dans son modèle, la Terre, de même que les autres planètes, tournent autour du Soleil. Pour rendre compte de ses observations, Aristarque fit deux suppositions. D'abord, la sphère des étoiles fixes devait être très lointaine, sinon la position des étoiles serait modifiée par le mouvement annuel de la Terre. Puis, il supposa que la Terre tournait sur elle-même. Ses idées furent rejetées (on l'accusa d'impiété), car on croyait, entre autres choses, que la rotation de la Terre arracherait hommes et bêtes de la surface en raison de la force centrifuge ! Rappelons que la notion de gravité était inconnue à l'époque d'Aristarque. De plus, les mesures de ses successeurs relativement au mouvement de la planète Mars indiquaient que celle-ci ne se déplace pas sur une orbite circulaire dont le centre est le Soleil. Il faudra attendre plus de 1 700 ans avant que le modèle d'Aristarque soit reconsidéré, par les travaux de Copernic, et encore un peu plus longtemps avant que Kepler (voir plus loin) découvre que les orbites des planètes autour du Soleil sont non pas circulaires, mais bien elliptiques.

Grâce à ses observations du passage de la Lune dans l'ombre de la Terre pendant les éclipses lunaires, Aristarque arriva à évaluer que le diamètre de la Terre est d'environ 4 fois celui de la Lune. C'est un résultat étonnant compte tenu du fait que la valeur connue aujourd'hui est 3,7.



L'une des prouesses d'Aristarque est d'avoir été le premier à se servir de la géométrie pour mesurer le rapport entre la distance Terre-Soleil et la distance Terre-Lune. Pour ce faire, il employa la méthode du triangle rectangle (figure 1.4), qui

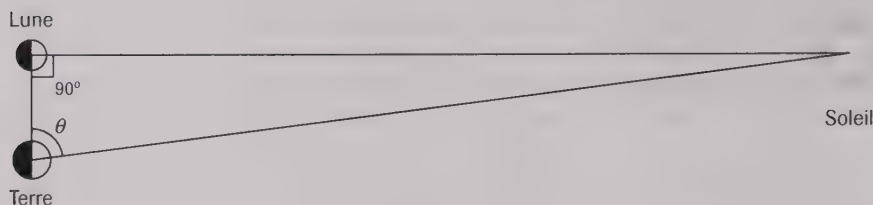


FIGURE 1.4

Aristarque se servit de la méthode du triangle rectangle pour mesurer certains paramètres du système Soleil-Terre-Lune.

consiste à mesurer l'angle formé par le Soleil, la Terre et la Lune au moment du premier quartier de Lune. À ce moment, les trois astres forment un triangle rectangle avec l'angle droit (90°) sur la Lune. Aristarque mesura l'angle cherché et calcula que la distance Terre-Soleil devait être au moins 20 fois supérieure à la distance Terre-Lune. Bien que la valeur connue aujourd'hui est de 390, cela n'enlève rien à la qualité de ses travaux. L'astronome obtint également une distance Terre-Lune de 121 000 kilomètres (au lieu de 384 000 kilomètres) et, comme il sous-évaluait la distance Terre-Soleil, il obtint pour le diamètre du Soleil une valeur d'environ 7 fois celle de la Terre (au lieu de 109 fois). Si l'on tient compte des moyens dont il disposait, l'ensemble de ces résultats est admirable.

Ératosthène (v. 276–v. 197 av. J.-C.)

L'astronome, mathématicien et géographe grec Ératosthène est surtout connu pour avoir fait la première mesure relativement exacte de la circonférence de la Terre. Il se servit du fait qu'à Syène, en Égypte, à midi le jour du solstice d'été, les rayons du Soleil tombaient verticalement dans un puits profond (figure 1.5). Au même moment, à Alexandrie (au nord de Syène), croyant que les deux villes étaient situées sur le même méridien, il mesura l'angle que faisait le Soleil avec un gnomon. Il obtint une valeur d'environ $7,2^\circ$. Connaissant la distance entre les deux villes¹, il put déduire la longueur entière du méridien terrestre, ce qui correspond à une mesure de circonférence. Le résultat obtenu par Ératosthène est très surprenant

1. Cette distance était évaluée à 5 000 stades, ce qui correspond à 785 kilomètres.

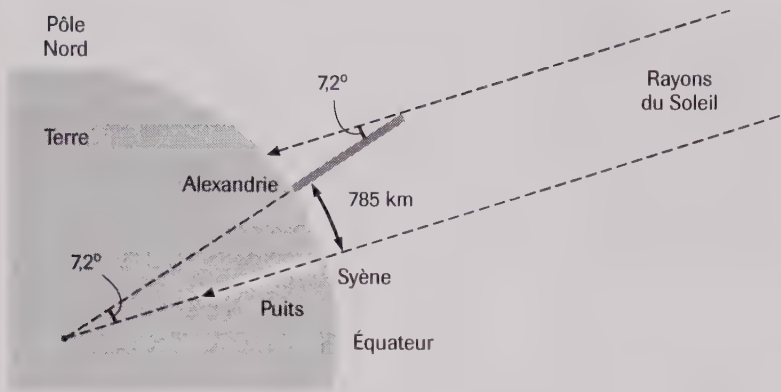


FIGURE 1.5

Calcul de la circonférence de la Terre par Ératosthène

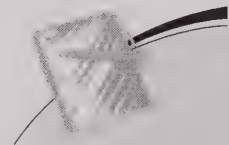
puisque'il obtint 39 250 kilomètres, alors que la valeur réelle est de 40 074 kilomètres.

Hipparque (v. 190–v. 120 av. J.-C.)

Observateur plus précis et plus méthodique que tous ses prédécesseurs, Hipparque est souvent considéré comme le précurseur de l'astronomie moderne. Astronome et mathématicien grec, fondateur de la trigonométrie, il est à l'origine de plusieurs découvertes importantes. En outre, il détermina l'inclinaison de la Terre et découvrit la précession des équinoxes (déplacement de l'axe de rotation de la Terre par rapport aux étoiles fixes; voir la section 3.9) en comparant ses observations à des observations plus anciennes. Il expliqua les éclipses et le mécanisme des saisons, et fit une mesure de la révolution de la Lune autour de la Terre. Il fut le premier à dresser un catalogue d'étoiles dans lequel il donnait la position et l'éclat de 800 étoiles visibles à l'œil nu.

Claude Ptolémée (v. 90–v. 168)

Ptolémée est principalement connu pour le perfectionnement qu'il apporta au modèle géocentrique pour expliquer le mouvement complexe des planètes dans le ciel, plus particulièrement leur mouvement rétrograde (voir la section 4.2). Dans ce système, toutes les planètes sauf la Terre, immobile au centre de l'Univers, sont animées d'un double mouvement (figure 1.6). Une planète se déplace ainsi de façon circulaire sur un épicycle dont le centre décrit lui-même un autre cercle autour de la Terre, le déférent. Ce système géocentrique du monde fit autorité durant environ 1 500 ans. Comme il ne rendait compte que de façon imparfaite du mouvement réel des planètes, les astronomes l'ont modifié au cours des siècles, en superposant



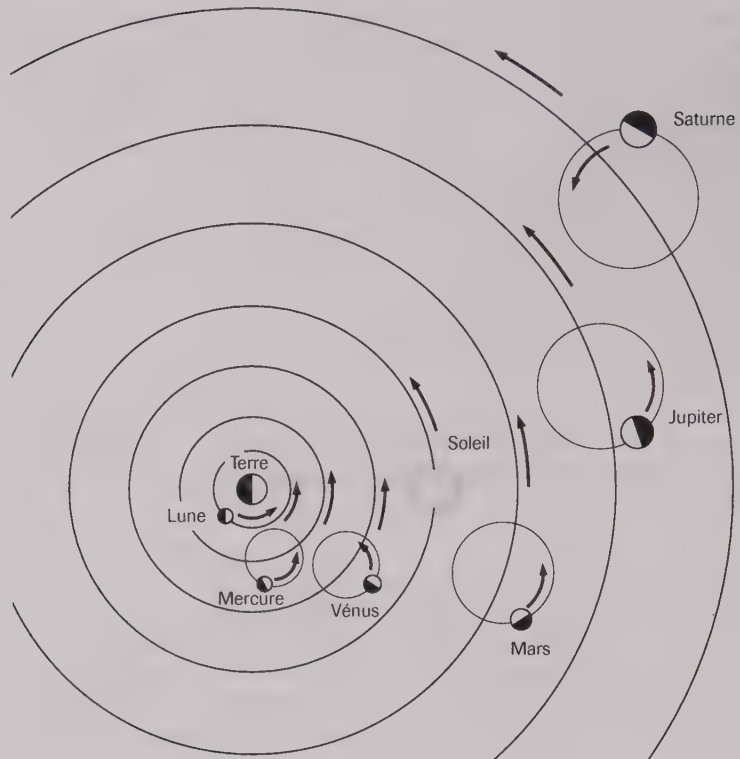
**Saurez-vous
faire mieux
qu'Ératosthène?**

(voir page 19)



FIGURE 1.6

Version simplifiée du système géocentrique de Ptolémée



jusqu'à une quarantaine d'épicycles. Ptolémée laissa en héritage l'*Almageste*, ouvrage monumental rassemblant la synthèse des travaux des penseurs et des astronomes grecs. C'est grâce au savoir arabe que cette œuvre est parvenue jusqu'à nous.

1.6 L'intermédiaire arabe

À la suite des progrès considérables réalisés par les astronomes grecs de l'Antiquité, il fallut attendre les travaux d'Européens désormais célèbres tels Copernic, Kepler et Galilée pour mettre en place ce que nous pourrions qualifier de **révolution astronomique**. Cependant, la science occidentale, qui s'est appuyée sur la science grecque, n'aurait pu le faire si cette dernière n'avait été maintenue et raffinée par les Arabes pendant les siècles qui ont séparé la chute de l'Empire grec de la Renaissance. Leur contribution à ce chapitre est considérable.

Ptolémée, qui a passé une grande partie de sa vie dans la ville d'Alexandrie, dans l'actuelle Égypte, y avait laissé son *Almageste*



qui fut traduit en arabe au IX^e siècle. Le mot **almageste** est d'ailleurs une déformation de l'expression arabe signifiant « la très grande ». Même si l'astronomie arabe existait déjà à ce moment (elle s'était développée notamment à partir de sources indiennes, perses et mésopotamiennes), le modèle de l'Univers proposé par Ptolémée s'est imposé et les Arabes ont construit leurs interprétations sur cette base. L'ensemble de leurs outils mathématiques sont plus puissants que ceux dont disposaient les Grecs : ils utilisaient un système de numérotation décimale et avaient développé la trigonométrie.

L'astronomie arabe doit une partie de sa réussite aux exigences de la pratique de l'Islam. La précision des mesures était importante pour bien connaître les heures du lever et du coucher du Soleil, le début et la fin du ramadan², etc. Certains auteurs spécialistes d'histoire des sciences jugent si importante la contribution des Arabes dans plusieurs champs scientifiques qu'ils se demandent où serait rendue la science sans leur apport.

1.7 La révolution astronomique

Au début du XV^e siècle, après des siècles de famine, d'épidémies, de guerres et de rigidité religieuse, un vent de changement souffle sur l'Europe occidentale. Ce changement se produit tant sur le plan des valeurs humaines que sur les plans scientifique et culturel, alors que plusieurs tentent de faire « renaître » les valeurs de l'Antiquité dans la civilisation européenne. Cette période, qui prend fin avec le XVI^e siècle, est aujourd'hui appelée **Renaissance**. L'astronomie n'échappe pas à ce renouveau qui a ouvert le chemin à des scientifiques qui furent des figures de transition incomparables.

Nicolas Copernic (1473–1543)

Les travaux du Polonais Nicolas Copernic ont eu une telle importance sur l'évolution de la science occidentale dans les siècles qui suivirent qu'on parle aujourd'hui de **révolution copernicienne**. Sentant bien que ses idées pouvaient faire des mécontents, surtout chez les théologiens, l'astronome ne publia que sur son lit de mort son œuvre maîtresse, *De revolutionibus orbium cælestium*, dans laquelle il affirmait que la Terre n'était pas le centre de l'Univers. Afin de s'éviter les foudres de l'Église, il avait adressé une note au pape dans laquelle il précisait que

2. Mois pendant lequel les musulmans doivent s'astreindre à l'abstinence (nourriture, boisson, tabac, relations sexuelles) entre le lever et le coucher du Soleil.

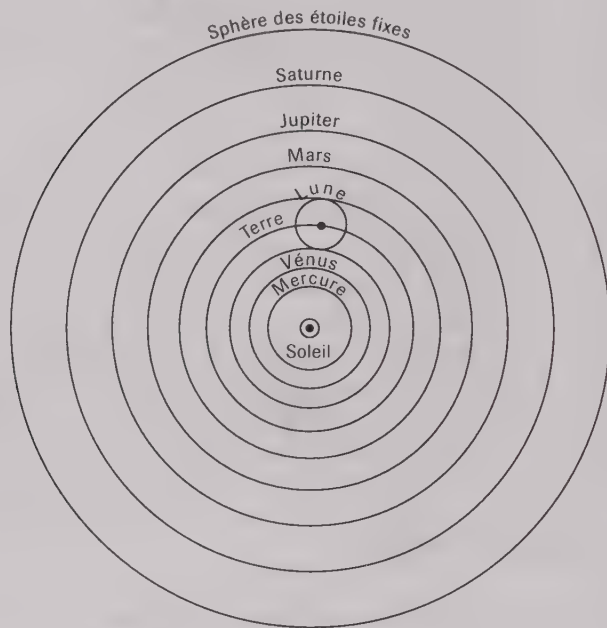


toute la théorie exposée dans son traité n'était qu'une hypothèse.

À l'époque de Copernic, le système géocentrique de Ptolémée n'arrivait plus à expliquer les positions des planètes. Ces insuffisances le menèrent à élaborer un modèle planétaire héliocentrique, reprenant ainsi l'idée d'Aristarque, plaçant le Soleil au centre de l'Univers et faisant se déplacer les planètes sur des cercles parfaits autour de lui (figure 1.7). Même si ce système n'était pas tout à fait exact, il comportait l'avantage d'expliquer beaucoup plus simplement le mouvement apparent des astres dans le ciel, comparativement au modèle de son prédécesseur. Dans le modèle héliocentrique, le mouvement rétrograde de certaines planètes (voir le chapitre 4) peut être compris sans faire appel à un ensemble complexe d'épicycles.

FIGURE 1.7

Système héliocentrique de Copernic



Grâce à son système, Copernic put calculer correctement le temps que prend une planète pour faire le tour du Soleil et conclut que, plus une planète est éloignée du Soleil, plus elle prend de temps pour effectuer une révolution complète. Les preuves qui faisaient défaut au système de Copernic ne furent apportées que quelques décennies après sa mort, par Kepler et Galilée (voir plus loin).



Tycho Brahé (1546–1601)

La principale contribution de Tycho Brahé à l'astronomie consiste dans ses nombreuses observations, certainement les plus précises à jamais avoir été réalisées avant l'invention de la lunette astronomique. Premier grand observateur du monde moderne, l'astronome danois scruta le ciel durant 20 ans, nuit après nuit, de façon systématique, surtout à l'aide d'immenses rapporteurs d'angle (figure 1.8) qui lui permettaient d'augmenter la précision des mesures de l'époque d'un facteur 10. Il légua à Kepler l'ensemble de ses observations, qui devinrent ainsi la base sur laquelle celui-ci établit les lois qui portent son nom.

Tycho Brahé était un farouche opposant à la théorie héliocentrique de Copernic et il travailla à préserver l'immobilité de la Terre. Cependant, ses mesures n'étant pas tout à fait en accord avec le modèle de Ptolémée, il conçut son propre modèle de Système solaire dans lequel le Soleil est en orbite autour de la Terre, et toutes les autres planètes en orbite autour du Soleil (figure 1.9). Parmi les prouesses de Brahé, notons la découverte, en 1572, d'une nouvelle étoile (en réalité une supernova) dans la constellation de Cassiopée. Mesurant la distance de cette étoile, l'astronome constata qu'elle était beaucoup plus

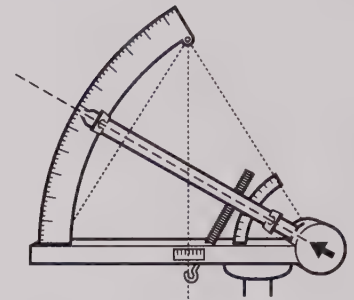


FIGURE 1.8

Instrument apparenté au rapporteur d'angle dont se servait Tycho Brahé pour établir les positions des étoiles dans le ciel

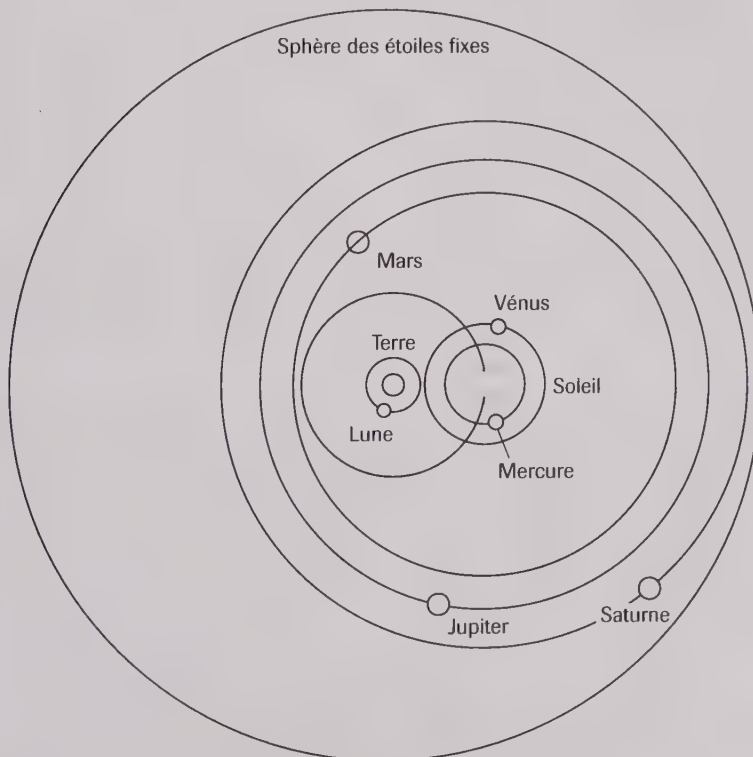


FIGURE 1.9

Système mi-héliocentrique mi-géocentrique de Tycho Brahé



loin que la Lune et qu'il ne pouvait donc s'agir d'un phénomène local, mais plutôt d'un phénomène appartenant au firmament. Il légua également à la postérité un important catalogue de 777 étoiles.

Johannes Kepler (1571–1630)

L'astronome allemand Johannes Kepler est aujourd'hui considéré comme le père de l'astronomie moderne, en ce sens qu'il a été le premier à traiter cette science du point de vue de la physique. Il décrivit de façon exacte et cohérente le mouvement des corps célestes, ce qui ouvrit la voie à Newton (voir plus loin) qui, plus tard, en donna l'explication. Sur le plan philosophique, l'une des principales contributions de Kepler fut de combattre un préjugé millénaire selon lequel les astres, créés par un Dieu parfait, devaient nécessairement se mouvoir selon une figure parfaite, le cercle. À l'aide des observations de Brahé, le scientifique conclut en effet que le mouvement circulaire n'était pas compatible avec les faits que seules des orbites elliptiques peuvent expliquer. Curieusement, les résultats de Kepler ne furent pas reconnus par ses contemporains.

Les principales découvertes de Kepler se résument en trois lois, appelées **lois de Kepler** :

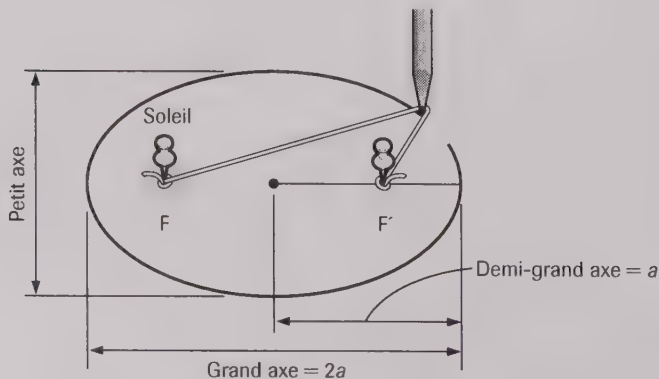
Première loi de Kepler

Chaque planète décrit autour du Soleil une ellipse dont un des foyers est occupé par le Soleil.

Une ellipse peut être dessinée à l'aide d'une feuille de papier, d'un crayon, de deux punaises et d'une ficelle (figure 1.10). La trace laissée par le crayon lorsque la ficelle est tendue représente une ellipse. Plus les punaises sont rapprochées l'une de

FIGURE 1.10

Première loi de Kepler. Les planètes se déplacent sur des orbites en forme d'ellipse dont l'un des foyers est occupé par le Soleil.





l'autre, plus la forme de l'ellipse est circulaire. Plus elles sont éloignées, plus l'ellipse est aplatie et longue.

En mathématiques, la position qu'occupe chaque punaise est appelée un **foyer**. Ici, les deux foyers sont désignés par F et F' . Une ellipse possède également un grand axe (la distance entre les deux points les plus éloignés de la courbe) et un petit axe (la distance entre les deux points les plus rapprochés de la courbe). Un paramètre permet de mesurer le degré d'aplatissement d'une ellipse : l'excentricité, égale à la distance entre F et F' divisée par le grand axe. La valeur de l'excentricité est comprise entre 0 et 1. Par exemple, pour un cercle, elle est égale à 0 (aucun aplatissement). Plus une ellipse est allongée (c'est-à-dire plus elle est excentrique), plus son excentricité se rapproche de 1.

Deuxième loi de Kepler

La ligne qui joint une planète au Soleil balaie des aires égales en des temps égaux.

Sur la figure 1.11, le temps mis par la planète 1 pour parcourir le trajet indiqué est le même que celui de la planète 2 pour son propre trajet. De plus, l'aire balayée (zone ombrée) par la ligne qui relie la planète au foyer est la même dans les deux cas. Cela signifie qu'une planète se déplace plus rapidement sur son orbite lorsqu'elle se trouve plus près du Soleil. Cette variation de vitesse avait déjà été observée. Kepler en fit une loi. Ce fut toutefois Newton qui en donna l'explication.

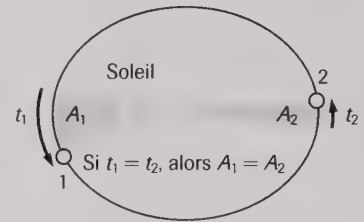


FIGURE 1.11

Deuxième loi de Kepler. La ligne reliant le Soleil à une planète balaie des aires égales en des temps égaux. Cela signifie que si le temps t_1 est égal au temps t_2 , alors l'aire A_1 sera égale à l'aire A_2 .

Troisième loi de Kepler

Le carré du temps de révolution T d'une planète autour du Soleil (exprimé en années) est égal au cube du demi-grand axe a de l'orbite (exprimé en unités astronomiques³):

$$T^2 = a^3$$

Par exemple, si le temps de révolution de Jupiter autour du Soleil est de 11,86 années, quelle est sa distance par rapport au Soleil? La distance recherchée sera égale à la valeur a du demi-grand axe de l'orbite de Jupiter. Dans l'équation ci-dessus, en isolant a et en remplaçant T par 11,86, on trouve que $a^3 = 11,86^2$, d'où $a = (11,86^2)^{1/3} = 5,20$ unités astronomiques.

3. L'unité astronomique est une unité de distance égale à la distance moyenne entre la Terre et le Soleil. Sa valeur est d'environ 150 000 000 kilomètres.



Galileo Galilei, dit Galilée (1564–1642)

Physicien et astronome italien, Galilée est considéré comme le créateur de la méthode expérimentale. Ses idées, trop proches de celles de Copernic, lui valurent d'être soupçonné d'hérésie et d'être condamné à vivre en résidence gardée jusqu'à la fin de ses jours.

Galilée est surtout connu pour avoir réalisé les premières observations astronomiques à la lunette (voir la section 2.4). En réalité, de tels instruments existaient déjà à son époque; il n'eut que le génie de les pointer vers le ciel et d'en faire un instrument scientifique. Ainsi, en 1609, lorsqu'il apprit que les Hollandais disposaient d'un appareil faisant paraître proches les objets éloignés, il se lança dans une nouvelle forme d'astronomie. Il devint rapidement très habile dans la fabrication de ces lunettes qui lui permirent d'éblouir le monde savant.

La première découverte de Galilée fut celle de cratères et de montagnes à la surface de la Lune, dont il mesura géométriquement la hauteur. Il constata ensuite que la Voie lactée est formée d'une quantité innombrable d'étoiles qui étaient longtemps restées invisibles à l'œil nu. Il remarqua également que le Soleil présente des taches, ce qui lui permit de déterminer la période de rotation de l'astre sur lui-même. En 1610, il découvrit quatre satellites autour de Jupiter, aujourd'hui appelés **satellites galiléens**. Enfin, il fut le premier à observer les phases de Vénus, qui ne pouvaient d'ailleurs être expliquées que si l'on admet que Vénus tourne autour du Soleil entre la Terre et le Soleil. Cette observation donna un sérieux coup de pouce au modèle héliocentrique de Copernic.

Isaac Newton (1642–1727)

Isaac Newton, mathématicien, physicien et astronome anglais, est souvent dépeint comme un grand névrosé par les historiens, mais son génie est sans conteste l'un des plus impressionnants de tous les temps. Publiée en 1687, son œuvre maîtresse, les *Principes mathématiques de philosophie naturelle*, également appelée *Principia*, constitue le document le plus important de la révolution scientifique des XVI^e et XVII^e siècles. Newton y apporte une explication complète du mouvement de tous les corps célestes et y définit les notions fondamentales de masse et de force. On y trouve également la très célèbre loi de la gravitation universelle à partir de laquelle il a pu déduire les trois lois de Kepler. Cette loi s'énonce ainsi :

Deux objets s'attirent mutuellement avec une force F inversement proportionnelle au carré de la distance d qui les sépare et



directement proportionnelle au produit de leur masse :

$$F = \frac{GMm}{d^2}$$

où G est la constante de gravitation universelle dont la valeur est $6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$, et M et m sont les masses respectives des deux objets.

Cette loi est valide non seulement pour les objets célestes, mais pour toutes les choses matérielles qui ont une masse. Cela comprend les particules entrant dans la composition des atomes, les étoiles, les galaxies et les amas de galaxies de l'Univers. D'autres physiciens de l'époque avaient eu l'intuition que l'attraction entre les corps célestes pouvait dépendre de l'inverse de la distance au carré, mais personne n'avait réussi à le formuler clairement. Grâce à cette loi, Newton a contribué à faire comprendre que la force qui nous retient au sol est la même que celle qui maintient en orbite la Lune autour de la Terre et les planètes autour du Soleil. Les lois de Newton ont

Accélération gravitationnelle et apesanteur

L'étude des accomplissements de grands scientifiques tels Kepler, Galilée et Newton constitue une bonne occasion de rendre plus claires les notions de gravité, d'accélération gravitationnelle, de pesanteur et d'apesanteur.

Lorsqu'un objet accélère, c'est que sa vitesse varie avec le temps. En physique, la vitesse étant souvent exprimée en mètres par seconde (m/s), l'accélération d'un objet sera donnée en mètres par seconde carrée (m/s²). Lorsqu'un objet tombe du haut d'un balcon, par exemple, il amorce son mouvement avec une vitesse nulle et gagne de la vitesse au cours de sa chute. Seuls le vent et la résistance de l'air pourront freiner son accélération. Galilée avait montré que des objets en chute libre subissent la même accélération, peu importe leur masse. C'est-à-dire que, s'ils tombent de la même hauteur, ils arrivent au sol au même moment et avec la même vitesse. Cela est vrai dans le vide, là où les molécules de l'air ne ralentissent pas la chute, mais peut également être vérifié facilement dans notre environnement avec des objets assez massifs et de petit volume. On appelle **accélération gravitationnelle terrestre** cette accélération subie par un objet en chute libre, et elle est désignée par la lettre minuscule g . Au sol, g égale $9,8 \text{ m/s}^2$. Au sommet de l'Everest, à plus de $8\,800$ mètres d'altitude, elle atteint $9,74 \text{ m/s}^2$. On peut calculer ces valeurs à partir de la loi de gravitation universelle de Newton. Ainsi, g dépend de la masse de l'astre sur lequel on se trouve et de la distance qui nous sépare de son centre. L'accélération gravitationnelle est donc plus faible sur la Lune (environ 6 fois

plus faible), en raison de sa plus petite masse. C'est la raison pour laquelle les astronautes qui ont marché sur la Lune arrivaient à faire de plus grandes enjambées ; ils semblaient se déplacer comme s'ils étaient plus légers. En réalité, bien que leur masse mesurée en kilogrammes n'ait jamais changé, la force avec laquelle ils étaient retenus à la surface était plus faible. Leur pesanteur (ou poids) était moindre.

Et les astronautes dans la navette ou dans la station spatiale, comment réussissent-ils à flotter ? Serait-ce parce qu'ils sont si loin de la Terre qu'ils ne subissent plus les effets de la gravité terrestre ? Non, pas du tout ! Au contraire, si l'on calcule g à une altitude de 400 km (altitude approximative à laquelle se déplace une navette spatiale en orbite autour de la Terre), on obtient $8,7 \text{ m/s}^2$, ce qui est encore assez proche de la valeur sur Terre. Ainsi, même à cette altitude, les objets subissent donc une attraction (ou accélération) gravitationnelle importante. Comment expliquer alors l'apesanteur des astronautes ? Ce phénomène de l'apesanteur apparaît dès qu'un objet est en chute libre, c'est-à-dire dès qu'un objet tombe vers le sol sans résistance de l'air et sans rencontrer d'obstacles. Dans la cas de la navette spatiale, il faut se rappeler que celle-ci est en orbite autour de la Terre, c'est-à-dire qu'elle tombe continuellement vers le centre de la Terre, sans jamais réussir à l'atteindre, étant donné sa grande vitesse. Les passagers de la navette « tombent » avec elle et le plancher se dérobe sous leurs pieds. La navette et ses passagers « flottent » donc l'un par rapport à l'autre.



permis d'expliquer de façon simple et élégante une foule de phénomènes plus ou moins bien compris à cette époque, dont les trois lois de Kepler, la variation de l'accélération gravitationnelle avec l'altitude (voir l'encadré p. 17), la forme non sphérique de la Terre, la précession de l'axe de rotation de la Terre, le phénomène des marées, le mouvement des comètes, le mouvement des étoiles binaires, etc. Elles permirent également de déterminer la masse de la Terre et de prédire la présence d'une nouvelle planète, Neptune.

Questions de révision

1. Vrai ou faux ?
 - a) Les Babyloniens croyaient que la Terre était ronde.
 - b) Les Égyptiens pensaient que les astres étaient des dieux.
 - c) Une clepsydre est une horloge à eau.
 - d) Galilée inventa la lunette astronomique.
2. Un obélisque est :
 - a) L'ami d'Astérix et d'Idéfix
 - b) Un gnomon minuscule
 - c) Un gnomon géant
 - d) Un globe céleste
3. Qui fut le premier à proclamer la nature sphérique de la Terre ?
 - a) Pythagore
 - b) Ératosthène
 - c) Aristarque
 - d) Héraclide
 - e) Ptolémée
4. Qui fut le premier à mesurer la circonférence de la Terre ?
 - a) Pythagore
 - b) Ératosthène
 - c) Aristarque
 - d) Héraclide
 - e) Ptolémée
5. Qui fut le premier à proposer un système où la Terre tourne autour du Soleil ?
 - a) Copernic
 - b) Aristarque
 - c) Kepler
 - d) Ptolémée
 - e) Héraclide
6. Lequel de ces astronomes inventa le système dans lequel les planètes font des épicycles sur leur orbite ?
 - a) Pythagore
 - b) Ératosthène
 - c) Aristarque
 - d) Héraclide
 - e) Ptolémée
7. Qui fut le premier à mesurer le rapport entre la distance Terre-Soleil et la distance Terre-Lune ?
 - a) Copernic
 - b) Aristarque
 - c) Kepler
 - d) Ptolémée
 - e) Héraclide
8. Indiquez l'auteur de chacune des lois suivantes :
 - a) Le rayon vecteur qui joint une planète au Soleil balaie des aires égales dans des temps égaux.
 - b) La loi de la gravitation universelle.
 - c) L'orbite que décrit chaque planète est une ellipse dont le Soleil occupe un des foyers.
9. Dans la formule $T^2 = a^3$, que représente chacun des termes ?
10. Dans la formule $F = \frac{GMm}{d^2}$, que représente chacun des termes suivants :
 - a) F
 - b) G
 - c) M et m
 - d) d



11. Donnez deux observations anciennes prouvant que la Terre est ronde.
12. À quoi correspond l'unité astronomique (UA)?
13. Comment Ptolémée expliquait-il le mouvement rétrograde des planètes?
14. Quelle découverte de Galilée prouve que Vénus tourne autour du Soleil à l'intérieur de l'orbite de la Terre?
15. Quelle est la différence entre g et G ?
16. Quelle est l'utilité du gnomon? De la clepsydre?
17. Quelle est la principale découverte de Hipparque?
18. Nommez trois découvertes faites par Galilée grâce à sa lunette astronomique.
19. De quelle manière Ératosthène a-t-il mesuré le rayon de la Terre?
20. À l'aide de la troisième loi de Kepler, calculez les distances des astres suivants par rapport au Soleil :
 - a) Vénus (période: 225 jours)
 - b) Mars (période: 687 jours)
 - c) Éros (période: 1,76 année)
21. Indiquez la forme de l'orbite d'une planète dont l'excentricité serait égale à :
 - a) 0,9
 - b) 0
 - c) 3
22. Quelle a été la contribution des Arabes dans l'histoire de l'astronomie?
23. Sur le plan astronomique, qu'est-ce que la Renaissance a apporté?
24. Expliquez le phénomène de l'apesanteur.

Saurez-vous faire mieux qu'Ératosthène?

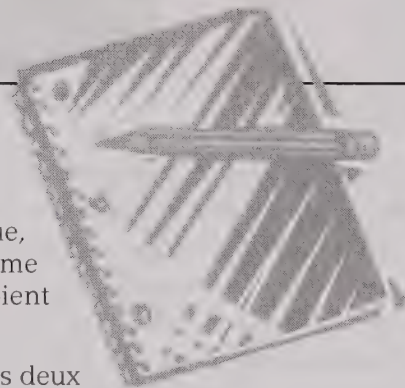
La présente activité propose une version moderne du travail effectué par Ératosthène lorsqu'il a mesuré la circonférence de la Terre.

Sur un globe terrestre ou une carte géographique, repérez deux villes qui sont situées le long du même méridien. Choisissez-les de sorte qu'elles ne soient pas trop éloignées l'une de l'autre.

À l'aide d'une règle, mesurez la distance entre ces deux villes. Convertissez la valeur obtenue en distance « réelle » en vous servant de l'échelle indiquée sur le globe ou sur la carte.

Estimez la latitude de chacune des deux villes sélectionnées. Calculez la différence entre les deux.

ACTIVITÉ





Tout comme l'a fait Ératosthène, déduisez la circonférence de la Terre, sachant qu'elle correspond à la longueur totale du méridien (360°).

Comparez la valeur obtenue avec la valeur de la circonférence polaire, soit 39 942 kilomètres.

Avez-vous réussi ?

Amusez-vous à refaire l'exercice en reprenant les calculs à partir d'autres endroits (villes ou autres) qui sont présents sur votre globe ou votre carte.



Les instruments de l'astronomie

*Des yeux braqués
sur le ciel...*

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, l'apparition d'instruments optiques a donné à l'homme une nouvelle vision du ciel et de l'Univers. Pendant les siècles qui ont suivi ce début de révolution, les astronomes et les autres membres de la communauté scientifique ont mis en commun ou confronté leurs observations, y ont intégré les mathématiques et ont conçu des instruments d'observation encore plus puissants. C'est ainsi qu'ils sont arrivés à bâtir une connaissance de l'Univers, qui s'est peu à peu transformée en science de l'astronomie. Mais tout n'a pas encore été découvert, imaginé ou calculé. Les astronomes devront encore passer beaucoup de temps à leurs ordinateurs, télescopes, radiotélescopes, satellites et sondes spatiales pour arriver à toujours mieux connaître et comprendre l'Univers. Le présent chapitre est consacré à l'étude d'instruments nécessaires au travail de l'astronome, parmi lesquels figure, de façon plus abstraite, la démarche raisonnée dont se servent tous les scientifiques pour concevoir le monde qui nous entoure, soit la méthode scientifique.

**DANS LES PAGES
QUI SUIVENT,
VOUS APPRENDREZ À :**

- Énoncer les éléments qui caractérisent toute démarche scientifique.
- Caractériser les différents types d'ondes électromagnétiques et reconnaître leur utilité.
- Distinguer les différents types de télescopes.
- Indiquer les caractéristiques des télescopes telles que le grossissement et la limite de résolution.
- Décrire quelques autres types d'instruments utilisés par les astronomes.
- Décrire ce qui limite toute observation terrestre.



2.1 La méthode scientifique

Le premier moyen employé par les astronomes pour sonder l'Univers a été l'observation attentive des phénomènes naturels. Aujourd'hui encore, l'observation est essentielle dans les attitudes qu'adoptent les scientifiques pour mieux comprendre leur environnement, et elle constitue bien souvent la première étape de leur démarche de recherche. Ainsi, l'observation, faite de façon systématique et raisonnée, est à la base de l'approche scientifique de la nature. C'est sur cette base que seront formulées des hypothèses qui seront par la suite mises à l'épreuve par un ensemble d'expériences le plus possible contrôlées. Les résultats de ces expériences, une fois classés et analysés, feront en sorte que certaines hypothèses seront rejetées, alors que d'autres seront retenues et confirmées. Cela mènera à l'élaboration de lois qu'on généralisera par la suite sous la forme de théories et de modèles.

L'aboutissement à une loi généralisée ou à un modèle se fait très rarement en ligne droite. Peu importe le sujet à l'étude, les conditions dans lesquelles travaillent les scientifiques ou les ressources mises à leur disposition, les travaux seront toujours le lieu de beaucoup de va-et-vient entre les observations, les hypothèses, la théorie et les expériences. Ainsi, dans la recherche scientifique, les retours en arrière et les remises en question sont essentielles. C'est ce qui favorise l'avancement des sciences. D'ailleurs, la vitesse à laquelle progressent l'ensemble des disciplines scientifiques témoigne de cet avancement. Bien sûr, le développement et le perfectionnement rapides des techniques d'observation et de mesure, ainsi que des technologies de la communication, n'y sont pas étrangers.

Il existe plusieurs façons de présenter l'approche scientifique, également appelée **méthode scientifique** ou **démarche scientifique**. Depuis quelques années, les diverses descriptions des étapes de la méthode scientifique insistent plus souvent sur les retours en arrière, la nécessité de travailler en équipe et le rôle de la chance et du hasard dans le développement de la connaissance scientifique. Cela exprime une vision plus réaliste du métier de chercheur qui doit composer avec des budgets restreints, s'associer avec d'autres équipes de recherche, faire la démonstration de la pertinence de ses travaux et soumettre ses résultats à la critique de la communauté scientifique.



On peut néanmoins proposer une méthode scientifique simplifiée en trois courtes étapes qui comportent surtout les aspects théoriques de la recherche :

❶ Concepts et mesures

Une fois le projet de recherche établi, les scientifiques définissent des concepts mesurables et procèdent à la prise de mesures. C'est de l'observation systématique, l'opération de base de la science. À partir de ces mesures, des hypothèses sont émises ; celles-ci seront vérifiées expérimentalement. De ces expériences, d'autres éléments d'information (ou données) sont obtenus.

Il est donc possible de prendre des mesures en observant ce qui existe déjà ou en procédant à des expériences qu'on aura conçues (c'est la méthode expérimentale). Ces dernières sont réalisées dans un laboratoire dans des conditions contrôlées, de façon que les observations puissent être reproduites au besoin. Cela permet aux scientifiques d'isoler plus facilement les concepts qu'ils souhaitent étudier et mesurer.

❷ Lois

Après avoir recueilli des données, il faut les analyser, c'est-à-dire tenter de les mettre en relation, soit par des tableaux ou des graphiques, soit en les soumettant à des modèles existants. Lorsque les données sont nombreuses – ce qui est souvent le cas –, l'informatique joue un rôle essentiel. Les chercheurs arrivent ainsi parfois à grouper les données sous forme de lois (relations mathématiques) ou selon certains principes simples (le principe de la conservation de l'énergie, par exemple). Les mathématiques, bien souvent, aident les scientifiques à établir des relations simples entre les mesures.

❸ Théories et modèles

La dernière étape consiste en une généralisation, où l'on groupe un certain nombre de lois dans des systèmes théoriques (ou modèles) à partir desquels on peut déduire ces lois. Pour ce faire, les chercheurs ont souvent recours à des principes fondamentaux, également appelés **postulats de base**.

Les théories issues de la méthode scientifique évoluent constamment au gré des découvertes. Dès qu'un nouveau fait ou une nouvelle observation est en contradiction avec une théorie, il faut généralement la modifier ou la changer pour en rendre



compte. C'est une des principales sources du constant aller-retour entre les mesures de l'expérimentation ou de l'observation et les prédictions des théories ou des modèles.

Bien qu'elles puissent toujours être remises en question, les théories sont en général des « outils » nécessaires au progrès de la science et à une meilleure compréhension de l'Univers. Elles nous permettent d'organiser et de simplifier nos connaissances sur la nature. Elles font en sorte également que nous pouvons découvrir de nouvelles lois et prévoir certains phénomènes. De nombreuses applications techniques et industrielles en découlent et, sans ces théories, notre quotidien ne ressemblerait en rien à ce qu'il est aujourd'hui.

Une science, l'astrologie ?

Et l'astrologie dans tout cela ? Peut-elle être considérée comme une science ? À la lumière de ce qui précède sur ce que sont la science et la démarche scientifique, il est clair que l'astrologie ne peut être vue comme une science puisqu'elle en occulte plusieurs aspects essentiels. Mentionnons l'absence de remise en question au sein de la communauté astrologique (toutes les sciences, humaines et naturelles, ont revu plusieurs de leurs théories au fil des siècles, mais pas l'astrologie), son refus de se confronter de façon systématique à la réalité, la non-existence d'un système de soumission de ses résultats à la critique, une grande quantité de prédictions qui ne sont jamais vérifiées, etc.

Sur le plan scientifique, l'astrologie, une « pseudo-science » vieille de plusieurs millénaires, ne tient pas compte de certains aspects qui la font paraître insensée aux yeux de plusieurs astronomes et autres scientifiques. Par exemple, si vous faites établir votre carte du ciel, la

position de Pluton au moment de votre naissance revêt, selon les astrologues, une certaine importance sur votre personnalité et votre destin. Toutefois, Saturne, Jupiter et Neptune possèdent des lunes plus massives et beaucoup plus proches que Pluton. Alors, pourquoi ne pas étudier leur influence à elles aussi ?

L'argument le plus souvent entendu en défaveur de l'astrologie vient d'un phénomène qui sera étudié au chapitre 3 et qui s'appelle la **précession de l'axe de rotation de la Terre**. Ce mouvement fait changer la position du ciel étoilé, sur une période de 26 000 ans. L'astrologie ayant vu le jour il y a plus de 3 000 ans, une étoile ou une constellation quelconque n'est plus aujourd'hui exactement au même endroit qu'auparavant. Cela a pour conséquence que, si quelqu'un naît alors que le Soleil est situé vis-à-vis de la constellation du Scorpion dans le ciel, les astrologues lui donneront néanmoins le signe de Sagittaire !

2.2 Ondes électromagnétiques

Qu'ont en commun les rayons X, les rayons ultraviolets, les micro-ondes et la lumière visible du Soleil ? Ce sont tous des ondes électromagnétiques. À la liste, on peut ajouter les rayons gamma, les ondes radio et l'infrarouge. Bien que l'homme soit en mesure de produire aujourd'hui lui-même tous ces rayonnements, ils sont aussi présents naturellement dans l'Univers. D'ailleurs, à peu près tout ce que nous savons de l'Univers provient de l'analyse des ondes électromagnétiques parvenant jusqu'à l'environnement terrestre. Toutes ces ondes voyagent à la même vitesse, soit à la vitesse de la lumière :



c = vitesse de la lumière (dans le vide)
 = 300 000 km/s
 = 1,08 milliard km/h

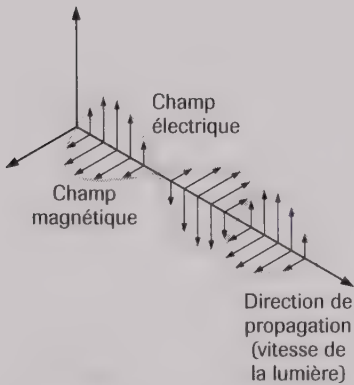


FIGURE 2.1

Une onde électromagnétique est une combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Elle se propage à la vitesse de la lumière.

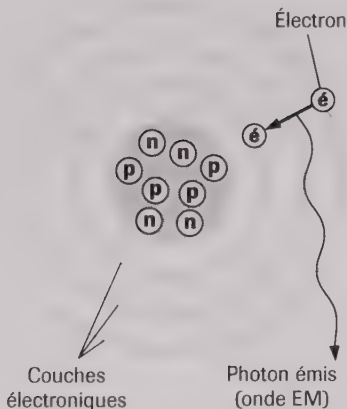


FIGURE 2.2

Émission d'un photon au passage d'un électron d'une couche électronique supérieure à une couche électronique inférieure, selon le modèle de Bohr.

À cette vitesse, il faut un peu plus d'une seconde pour parcourir la distance Terre-Lune et huit minutes pour se rendre du Soleil à la Terre. Si le Soleil disparaissait d'un coup, il s'écoulerait donc huit minutes avant que nous puissions nous en rendre compte.

Notons que les ondes électromagnétiques, ou ondes EM, n'ont aucune relation avec le son, qui est aussi une onde. Ce dernier a besoin d'un milieu pour se propager. On dit que c'est une onde mécanique. Le son doit prendre appui sur des atomes et des molécules, comme ceux qui constituent l'air ou l'eau. Ainsi, le son ne peut se propager dans le vide. Les ondes EM, quant à elles, peuvent voyager dans le vide. Elles n'ont pas besoin d'un support physique pour voyager.

Une onde EM peut être décrite comme une combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique (d'où son nom) qui se propage dans l'espace (figure 2.1). Pour mieux comprendre l'origine de ces ondes, il faut étudier l'intérieur de l'atome. Selon le modèle atomique simple proposé par Niels Bohr (1885–1962) en 1913, l'atome comporte un noyau central (formé d'un assemblage très serré de protons et de neutrons) autour duquel tournent des électrons sur des orbites très précises, appelées **couches électroniques** ou **orbitales**. Lorsqu'un atome est excité (on lui a fourni de l'énergie), certains de ses électrons passent à des orbitales supérieures momentanément. Quand un électron revient à une couche inférieure (figure 2.2), il émet une onde EM, aussi appelée **photon**. Le type d'onde EM émis dépendra à la fois de l'atome concerné et des couches de départ et d'arrivée de l'électron.

On détermine le type d'onde EM en jeu à l'aide d'un ou de l'autre des deux paramètres suivants : la fréquence (f) et la longueur d'onde (λ). La fréquence est le nombre d'oscillations de l'onde par seconde. On la mesure en hertz (Hz). Ainsi, les fréquences syntonisées par un appareil radio sont des ondes de plusieurs milliers ou millions de hertz. La longueur d'onde (figure 2.3) est la distance entre deux éléments répétés d'une onde. Elle est exprimée en mètres (m). La fréquence d'une onde est liée à la longueur d'onde par la relation suivante :

$$f = c/\lambda$$

où c est la vitesse de la lumière (en m/s).



Outre la fréquence (ou la longueur d'onde), un autre paramètre permet de déterminer quel type d'onde EM ou de photon est émis : c'est l'énergie transportée par l'onde ou le photon. Les rayons X, qui sont des ondes EM au même titre que la lumière, sont très dangereux pour l'humain, alors que la lumière visible est inoffensive. Qu'est-ce qui les distingue ? Leur fréquence, bien entendu, et, par conséquent, leur énergie. L'énergie transportée par les rayons X est 10 000 fois plus élevée. En fait, l'énergie d'un photon ne dépend que de sa fréquence f ; plus celle-ci est élevée, plus l'énergie E du photon est grande. La relation mathématique entre ces deux paramètres est :

$$E = hf$$

où E est l'énergie mesurée en joules (J),

h est une constante, la constante de Planck,
égale à $6,626 \times 10^{-34}$ J·s

f est la fréquence, en hertz (Hz)

L'ensemble des ondes électromagnétiques s'appelle le **spectre électromagnétique**. La figure 2.4 donne toute l'information sur les types d'ondes, leur fréquence et leur longueur d'onde.

Lorsque les ondes EM pénètrent dans l'atmosphère, elles ne sont pas toutes également absorbées. La figure 2.4 illustre dans quelle mesure l'atmosphère absorbe les ondes EM de différentes longueurs d'onde. Notons la présence de deux « fenêtres » par lesquelles le rayonnement atteint la Terre. La **fenêtre optique** laisse passer les ondes EM de 300 nm à 1 000 nm environ, ce qui correspond à la lumière visible, un peu d'ultraviolet et un peu d'infrarouge. La **fenêtre radio**, quant à elle, laisse passer les ondes EM de 1 cm à 20 m.

Cela explique pourquoi les premiers instruments d'observation astronomique ont d'abord été des instruments optiques, puis, plus récemment, des instruments d'observation d'ondes radio. En fait, en absorbant la plupart des longueurs d'onde provenant de l'Univers, l'atmosphère joue un rôle de protection important, car l'exposition à certaines ondes EM est nuisible à l'être humain et à la vie terrestre en général.

Le tableau 2.1 rassemble plusieurs données pertinentes sur chaque type d'ondes EM, dont les dangers qui leur sont associés.

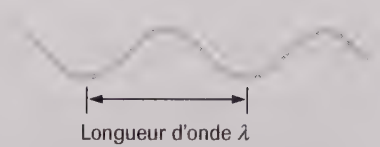


FIGURE 2.3

La longueur d'onde λ correspond à la distance entre deux éléments répétés d'une onde.

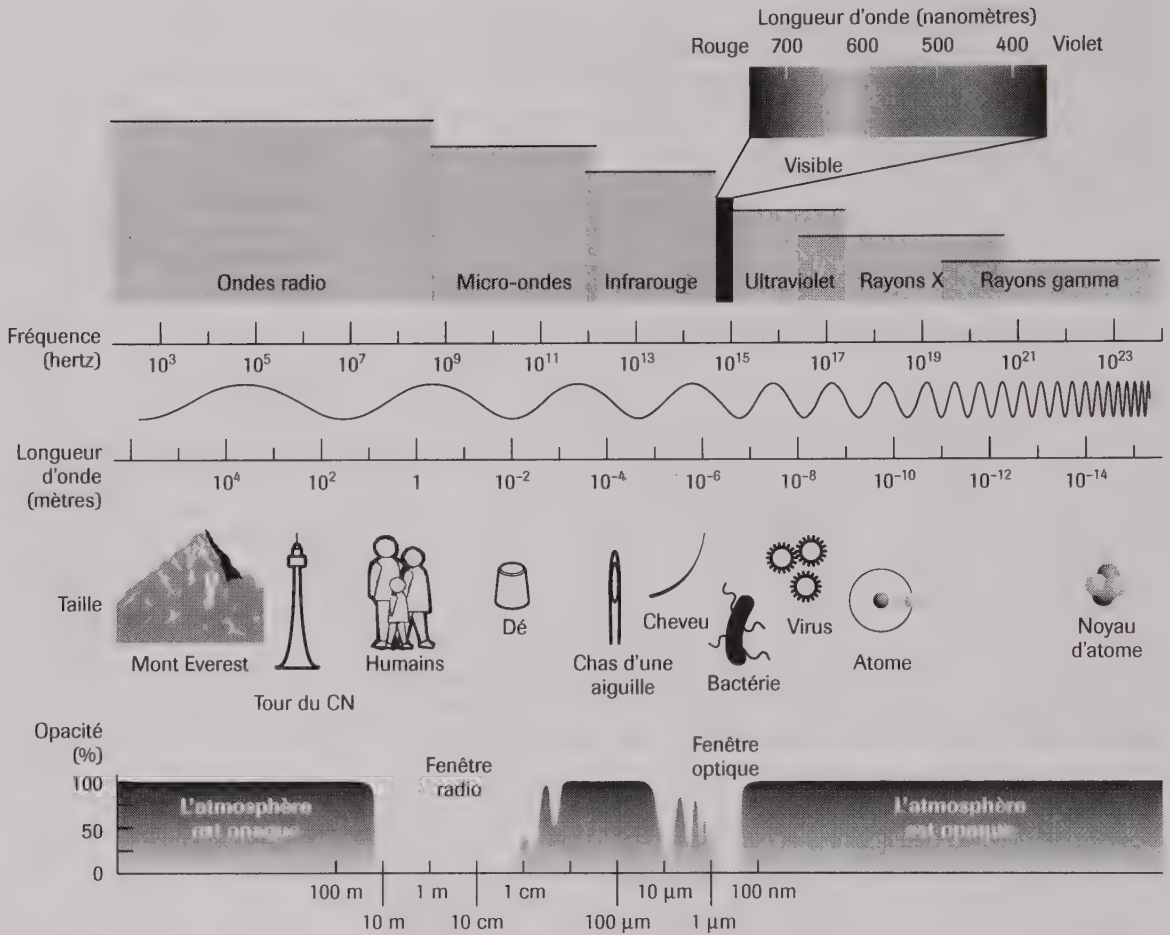


FIGURE 2.4

Spectre électromagnétique et absorption des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère

2.3 Spectres

L'un des moyens les plus puissants dont disposent les astronomes pour investiguer et mieux comprendre l'Univers consiste dans l'étude des spectres de lumière. En effet, ceux-ci permettent en quelque sorte de déterminer la composition chimique des étoiles, des planètes et d'autres objets célestes. L'appareil grâce auquel nous pouvons voir les spectres s'appelle un **spectrographe**. On peut observer des raies spectrales dans toute l'étendue du spectre électromagnétique. Cependant, pour les observer, il faut se servir d'instruments spécifiques à chaque domaine de longueur d'onde.



TABLEAU 2.1

Types d'ondes électromagnétiques

Types d'ondes électromagnétiques	Production et utilisation	Effets biologiques
Ondes radio λ : de 30 cm à 1 000 km f : de 300 Hz à 1 GHz*	Les ondes radio sont à la base de la radio, de la télévision et du radar. Elles sont produites par l'accélération de charges électriques. Notamment, elles peuvent être produites par des circuits oscillants LC. (Un circuit LC est un circuit électrique composé d'une inductance L et d'un condensateur C.)	Théoriquement, les ondes radio ne sont pas dangereuses pour l'être humain. On dit qu'elles n'ont pas d'effets ionisants. Cela veut dire que les ondes radio ne peuvent briser les liaisons dans les molécules, ni perturber l'ADN. Cependant, depuis quelques années, on soupçonne que l'exposition prolongée à des ondes radio de basse fréquence (lignes de haute tension, câblage électrique des bâtiments) puisse avoir des effets biologiques nuisibles. Il semble que rien n'ait été encore démontré à cet effet.
Micro-ondes λ : de 1 mm à 30 cm f : de 1 GHz à 300 GHz	Les micro-ondes sont en quelque sorte des ondes radio de courte longueur d'onde. Elles sont produites par des circuits électriques. Les fours à micro-ondes, connus pour la rapidité avec laquelle ils réchauffent et cuisent les aliments, font bien sûr appel à des micro-ondes.	Bien que les micro-ondes soient non ionisantes, elles peuvent causer des effets biologiques en raison de l'échauffement des tissus. Une élévation d'un seul degré Celsius de la température de certains tissus peut entraîner des effets tels que la diminution des aptitudes mentales ou une opacité de l'œil. Notons que les téléphones mobiles fonctionnent à des fréquences entre 800 MHz et 2 GHz, ce qui correspond à la frontière des ondes radio et des micro-ondes. Pour l'instant, les recherches se poursuivent quant à savoir si l'usage prolongé d'un téléphone mobile peut avoir des effets dommageables sur la santé.
Ondes infrarouges λ : de 700 nm à 1 mm f : de 300 GHz à $4,3 \times 10^{14}$ Hz	L'infrarouge est le rayonnement associé à la chaleur. Dans le spectre des ondes EM, l'infrarouge se confond avec l'extrémité rouge du visible, d'où le nom infrarouge. Les ondes infrarouges sont produites par des corps «chauds». La température la plus froide qui existe est -273°C (ou 0 kelvin): ainsi, tout corps dont la température est plus élevée que 10 K émet de la chaleur et donc des rayons infrarouges, à divers degrés, bien entendu. Certaines caméras à infrarouge permettent de percevoir les mouvements d'êtres vivants la nuit, simplement en détectant leur chaleur.	À faible intensité, le rayonnement infrarouge ne présente aucun danger pour l'être humain ou pour la vie en général. Bien entendu, comme l'infrarouge est une manifestation de la chaleur, si le rayonnement est trop puissant, il peut en résulter des brûlures.



TABLEAU 2.1 Types d'ondes électromagnétiques (suite)

Types d'ondes électromagnétiques	Production et utilisation	Effets biologiques
Lumière visible λ : de 400 nm à 700 nm f : de $4,3 \times 10^{14}$ Hz à $7,5 \times 10^{14}$ Hz	La lumière visible constitue la seule onde EM perceptible à l'œil humain. Elle est émise par des objets chauds tels le Soleil, le feu, l'élément d'un poêle lorsqu'il est très chaud et le filament d'une ampoule incandescente.	Il va sans dire que la lumière visible ne présente aucun danger pour la santé.
Rayons ultraviolets λ : de 60 nm à 400 nm f : de $4,3 \times 10^{14}$ Hz à 5×10^{15} Hz	Dans le spectre des ondes EM, le rayonnement ultraviolet (UV) se confond avec l'extrémité violette du visible, d'où son nom: ultraviolet. Par la couche d'ozone, l'atmosphère absorbe une grande partie des rayons UV venant du Soleil et de l'Univers. C'est la partie des UV qui réussit à passer qui est responsable du bronzage. Le rayonnement UV est émis à partir de gaz hautement excités à des températures de 10 000 à 100 000 degrés.	C'est bien connu, l'exposition abusive et prolongée de la peau aux rayons UV augmente considérablement les risques de développer un cancer de la peau. En 1987, le Protocole de Montréal a été ratifié par plusieurs pays qui se sont engagés à réduire leur production de substances nocives pour la couche d'ozone (les chlorofluorocarbones [CFC] et le halon). Les rayons UV sont des rayons ionisants.
Rayons X λ : de 10^{-12} m à 10^{-8} m f : de 10^{16} Hz à 10^{21} Hz	Les rayons X sont produits par la décélération brutale d'électrons très énergétiques. Cette décélération est produite en faisant entrer les électrons en collision avec des surfaces métalliques. Dans les objets stellaires, les rayons X sont produits par des gaz excités, dont la température va de 1 à 100 millions de degrés.	Les rayons X sont très ionisants et peuvent causer le cancer (et la mort) à des doses excessives. C'est la raison pour laquelle on doit se protéger à l'aide d'un tablier anti-X (en caoutchouc ou en matière synthétique contenant un absorbant [sels de plomb]) au moment de la prise de radiographies. Les techniciens en radiologie doivent suivre des règles de sécurité très strictes pour ne pas risquer d'être trop exposés.
Rayons gamma λ : de 10^{-15} m à 10^{-10} m f : de 10^{19} Hz à 10^{23} Hz	Les rayons gamma sont les radiations EM les plus énergétiques. La production de rayons gamma traduit l'existence de processus violents extrêmement énergétiques, tels que des réactions nucléaires. Ce type de rayons est aussi émis par les noyaux des atomes radioactifs.	Les rayons gamma sont encore plus dangereux et plus ionisants que les rayons X.

* Des GHz sont des gigahertz, soit des milliards de hertz. Le préfixe G signifie «milliard». De la même façon :

kHz = kilohertz = 1 000 hertz

MHz = mégahertz = 1 000 000 hertz

D'autres préfixes existent pour décrire des quantités encore plus grandes :

T pour téra ($\times 10^{12}$) P pour péta ($\times 10^{15}$) E pour exa ($\times 10^{18}$)

Pour les petites mesures, les préfixes les plus courants sont c, m, μ et n. En voici des exemples :

cm = centimètre = 1 centième de mètre (ou 0,01 m)

mm = millimètre = 1 millième de mètre (ou 0,001 m)

μ m = micromètre (ou micron) = 1 millionième de mètre (ou 0,000 001 m)

nm = nanomètre = 1 millième de millionième de mètre (ou 0,000 000 001 m)

Un tableau comportant tous les préfixes décrivant des quantités figure en annexe.



Spectre continu

Si l'on fait passer de la lumière solaire (également appelée **lumière blanche**) à travers un prisme, elle se décompose en différentes couleurs, comme un arc-en-ciel (figure 2.5). Cette séparation est attribuable au phénomène de réfraction de la lumière. La réfraction est le nom que porte le phénomène par lequel un rayon lumineux est dévié lorsqu'il passe d'un milieu transparent à un autre, par exemple de l'air à l'eau ou de l'eau à l'air. L'ensemble de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel constitue le **spectre continu**.

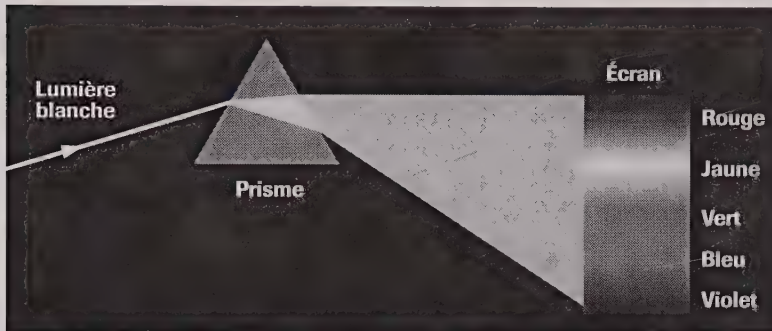


FIGURE 2.5

Dans le spectre continu de la lumière blanche, on trouve toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

Arc-en-ciel

L'observation d'un arc-en-ciel ne laisse jamais indifférent. Les arcs-en-ciel se produisent au moment d'une éclaircie, après une période de pluie. Ils présentent un arc de cercle de toutes les couleurs qui correspondent au spectre continu. Sous des conditions idéales, on peut apercevoir deux arcs-en-ciel : un arc-en-ciel primaire, celui qu'on voit le plus facilement, et un arc-en-ciel secondaire (figure 2.6).

Qu'il soit primaire ou secondaire, l'arc-en-ciel est formé par une réflexion partielle de la lumière à l'intérieur des gouttes d'eau (figure 2.7). Dans le cas de l'arc-en-ciel primaire, les rayons du Soleil forment un angle variant entre 40° et 42° avec l'observateur, selon la couleur (figure 2.8). L'arc-en-ciel secondaire, quant à lui, est formé par deux réflexions de la lumière à l'intérieur des gouttes d'eau. Dans ce cas, les rayons forment un angle variant entre 50° et 54° avec l'observateur, selon la couleur. L'arc-en-ciel secondaire est plus difficile à voir, parce qu'il est moins lumineux par suite de la perte d'intensité

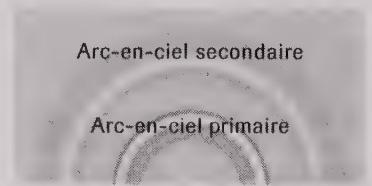


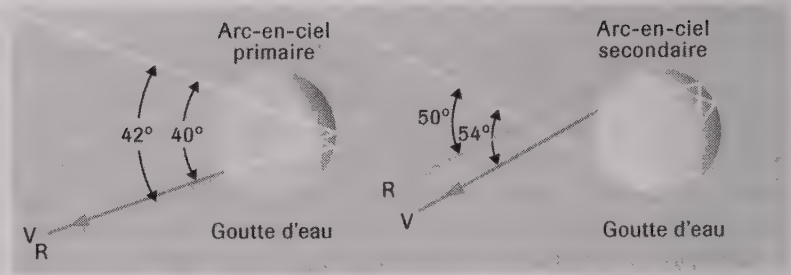
FIGURE 2.6

Dans des conditions idéales, on peut voir deux arcs-en-ciel : le primaire et le secondaire.



FIGURE 2.7

L'arc-en-ciel prend son origine dans la réfraction et la réflexion des rayons lumineux dans les gouttes d'eau.

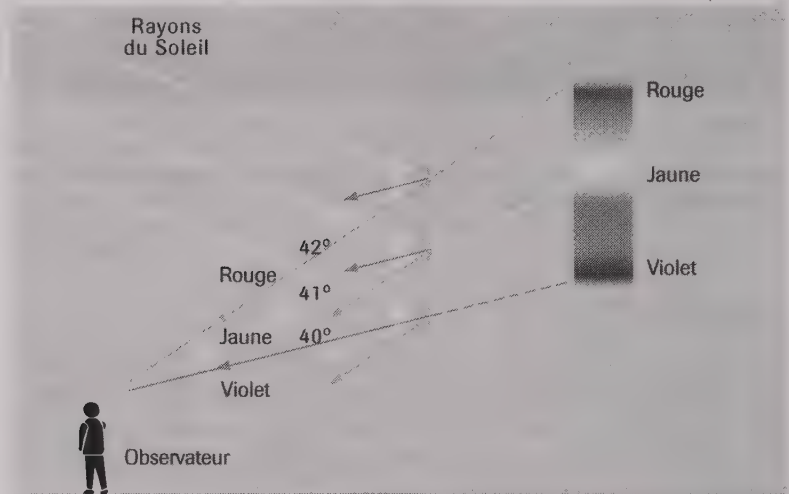


lumineuse attribuable aux deux réflexions. De plus, les couleurs de l'arc-en-ciel secondaire sont inversées.

Nous devons la première explication juste du phénomène de l'arc-en-ciel à Marco Antonio de Dominis (1564–1621) en 1611. Elle fut par la suite confirmée par René Descartes (1596–1650), mais c'est Isaac Newton qui expliqua le premier l'ordre des couleurs.

FIGURE 2.8

Un observateur voit les couleurs de l'arc-en-ciel à des angles précis par rapport au Soleil.



Spectre d'émission

Lorsqu'un gaz est mis sous tension électrique, les électrons de ses atomes s'excitent et émettent une lumière caractéristique en se désexcitant. À chaque transition électronique (figure 2.2) d'un élément chimique est associée une couleur (une longueur d'onde) précise. Pour analyser la composition (le spectre) de la lumière émise, on fait passer celle-ci à travers un prisme. La réfraction de la lumière par le prisme fait apparaître des raies lumineuses de diverses couleurs propres à cet élément (figure 2.9). C'est ce qu'on appelle le **spectre d'émission**. C'est

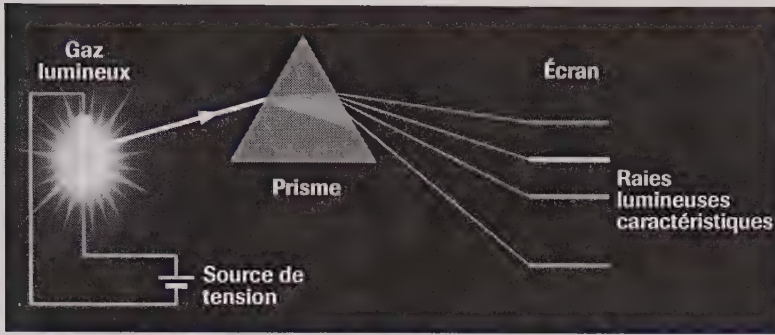


FIGURE 2.9

Dans le spectre d'émission, on observe les raies lumineuses caractéristiques de l'objet lumineux étudié.

la « somme » de ces raies qui donne la couleur caractéristique à chaque gaz.

On peut considérer que le spectre d'émission correspond aux empreintes digitales d'un élément chimique. Les nébuleuses, qui seront vues en détail au chapitre 8, ainsi que certains types d'étoiles très rares montrent un spectre d'émission.

Spectre d'absorption

Le **spectre d'absorption** est en quelque sorte l'inverse du spectre d'émission. Si l'on fait passer de la lumière blanche à travers un gaz froid (ou non lumineux), ce dernier absorbe les couleurs correspondant aux raies du spectre d'émission de ce gaz. Comme la lumière traverse le gaz puis le prisme, on observe le spectre continu, mais celui-ci présente des raies sombres aux mêmes endroits que les raies de couleur du spectre d'émission (figure 2.10). La presque totalité des étoiles et des galaxies présentent un spectre d'absorption.

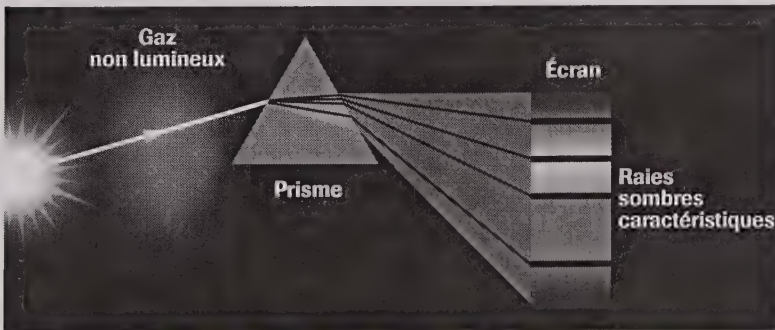


FIGURE 2.10

Dans le spectre d'absorption, on observe le spectre continu ponctué de raies sombres caractéristiques de l'objet étudié.

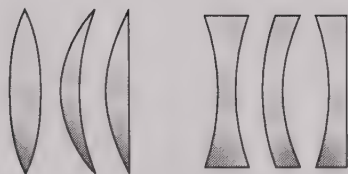


FIGURE 2.11

Les lentilles peuvent prendre différentes formes. Les trois premières sont convergentes (extrémités plus minces) et les trois autres, divergentes (extrémités plus épaisses).

2.4 Lunette ou télescope réfracteur

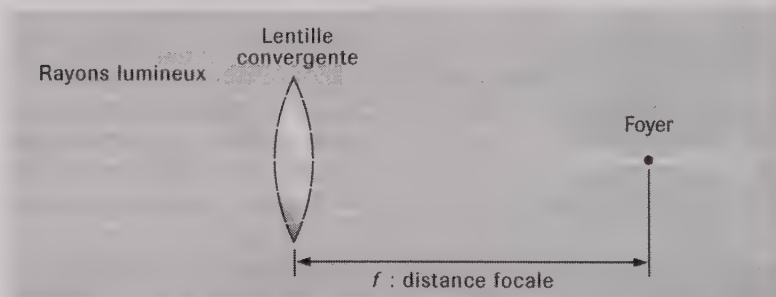
La lunette, ou télescope réfracteur, est sans doute l'instrument le plus populaire chez les astronomes en herbe. Sa conception est simple et peu coûteuse, du moins pour les petits modèles.

La lunette produit une image grossie des objets observés en utilisant la réfraction de la lumière par des lentilles. On trouve toutes sortes de lentilles dans divers articles de la vie courante, notamment les loupes, les lunettes ou les jumelles, ainsi que les judas optiques. Les lentilles peuvent être faites de plastique ou de verre.

On divise les lentilles en deux catégories : les lentilles convergentes et les lentilles divergentes (figure 2.11). Les premières font converger (ou focaliser) la lumière, et les secondes la font diverger. Dans les deux cas, le phénomène optique en jeu est la réfraction des rayons lumineux sur la surface des lentilles. Les deux types de lentilles ont un **foyer** et une **distance focale**. Dans le cas de la lentille convergente, le foyer est le point vers lequel focalisent les rayons lumineux qui frappent la lentille parallèlement à son axe optique (figure 2.12a).

FIGURE 2.12a

Foyer et distance focale d'une lentille convergente



La distance focale est la distance entre le foyer et la lentille. Si l'on utilise une loupe (lentille convergente) pour focaliser les rayons du Soleil sur une feuille de papier, le papier s'enflammera exactement au foyer de la lentille (figure 2.12b). La distance entre la feuille et la loupe égale alors la distance focale de la loupe.

Dans sa version la plus simple, la lunette est composée de deux lentilles judicieusement placées. La lentille qui est située du côté de l'objet observé s'appelle l'**objectif** et celle par laquelle l'observateur regarde à l'autre extrémité se nomme l'**oculaire**.

La désignation de **lunette astronomique** est habituellement réservée au système très simple dont les deux lentilles sont

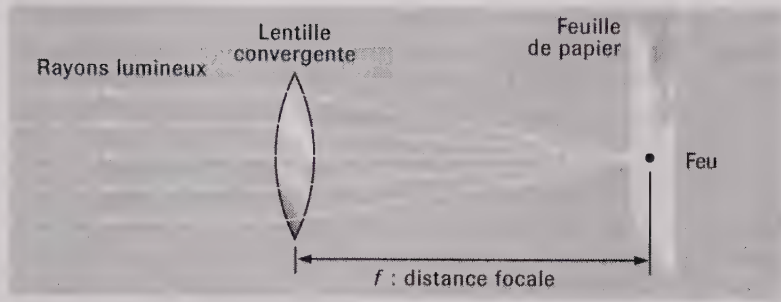


FIGURE 2.12b

Une feuille de papier peut prendre feu si elle est placée au foyer d'une lentille convergente.

convergentes (figure 2.13). On appelle parfois **lunette de Galilée** le télescope réfracteur dont l'objectif est une lentille convergente et l'oculaire une lentille divergente. De façon plus générale, le terme **lunette** est destiné aux instruments qui ne comportent que des lentilles, alors que **télescope** renvoie aux instruments composés de lentilles et de miroirs (voir la section 2.5).

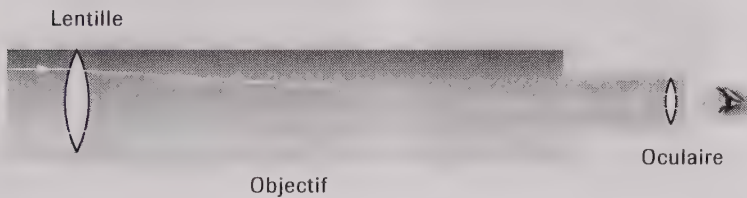


FIGURE 2.13

Une lunette astronomique simple est composée de deux lentilles convergentes.

Dans l'agencement des lentilles de la lunette astronomique, la distance L entre l'oculaire et l'objectif doit être égale à la somme des distances focales de l'oculaire et de l'objectif :

$$L = f_{\text{oc.}} + f_{\text{obj.}}$$

Le grossissement G de tout télescope est donné par le rapport de la distance focale de l'objectif ($f_{\text{obj.}}$) sur la distance focale de l'oculaire ($f_{\text{oc.}}$) :

$$G = \frac{f_{\text{obj.}}}{f_{\text{oc.}}}$$

Par exemple, si l'on construit une lunette avec un objectif de 120 cm de distance focale et un oculaire de 6 cm de distance focale, la distance entre l'oculaire et l'objectif est de 126 cm et le grossissement est de 120/6, soit 20 fois.

Résolution d'un télescope

Bien que le grossissement soit important lorsqu'il s'agit de mesurer la qualité d'un télescope, il existe une autre caractéristique



essentielle pour l'ensemble des télescopes et des instruments d'observation : la **limite de résolution**. Celle-ci correspond au plus petit angle θ_R sous lequel on peut tout juste séparer deux objets très rapprochés l'un de l'autre (figure 2.14).

Cet angle est traditionnellement exprimé en degrés ($^\circ$), en minutes ($'$) et en secondes ($''$). Une circonférence totale comprend 360° , et il y a 60 minutes dans un degré et 60 secondes dans une minute.

Souvent, plutôt que de parler d'**angle** pour définir la résolution, les astronomes emploieront le terme d'**arc**. Ainsi, la valeur de l'angle de résolution est souvent donnée en secondes d'arc. On obtient une valeur approximative de θ_R à l'aide de la formule suivante, où d est le diamètre du télescope (en mm) :

$$\theta_R \approx 125/d$$

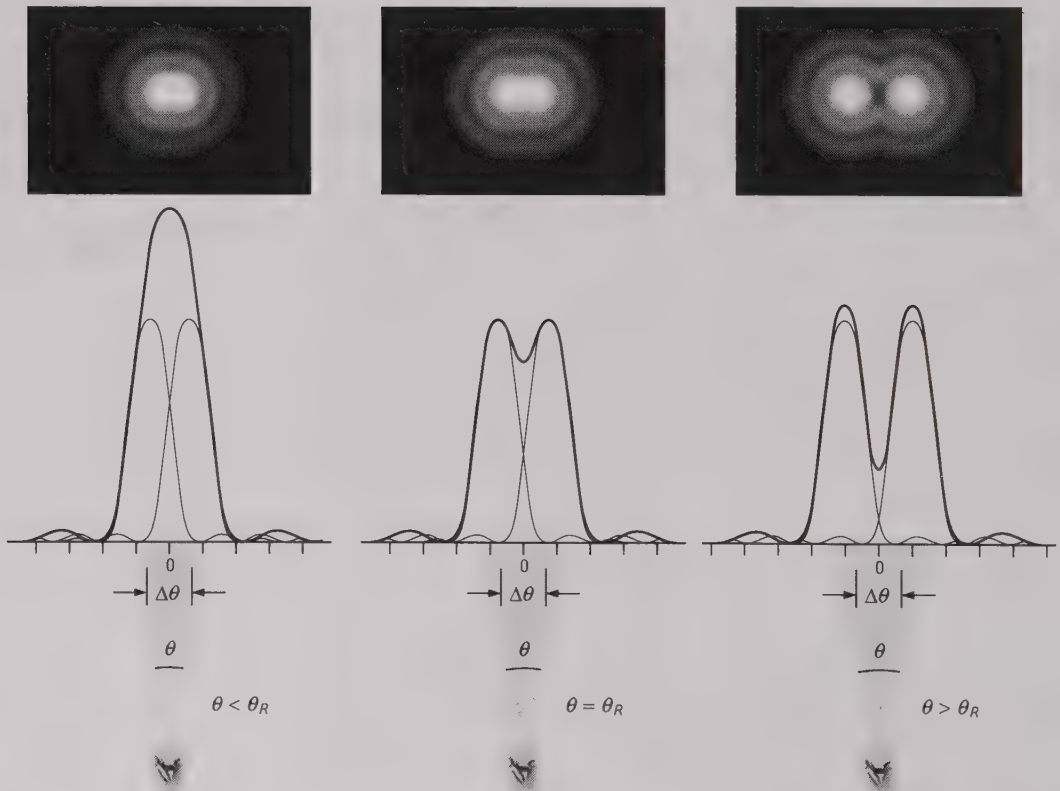


FIGURE 2.14

Le pouvoir de résolution d'un instrument optique est une mesure de sa capacité de distinguer deux objets lointains.



Par exemple, pour un diamètre de lunette de 60 mm, la limite de résolution serait égale à $125/60$, soit $2,08''$ d'arc (lire « secondes d'arc »). À titre comparatif, la limite de résolution de l'œil (diamètre de la pupille : 5 mm) est d'environ $25''$ d'arc ($125/5$).

Pour obtenir une meilleure limite de résolution, il faut construire des télescopes dont le diamètre est le plus grand possible. Malheureusement, les choses ne sont pas si simples, car la turbulence atmosphérique cantonne la limite de résolution pratique à environ $1''$ d'arc, exceptionnellement à $0,2''$. Nous verrons un peu plus loin que les astronomes ont trouvé des astuces pour contourner ce problème.

2.5 Télescope réflecteur

Tout comme la lunette, le télescope réflecteur sert à grossir les objets, mais surtout à capter le plus de lumière possible. Cependant, au lieu de n'être constitué que de lentilles, le télescope réflecteur comporte un miroir concave (creux) en lieu et place de l'objectif. Ce miroir produit, par réflexion de la lumière, des images grossies des objets observés. Les miroirs concaves sont utilisés pour les miroirs à maquillage, ou pour les miroirs dont se servent les dentistes pour examiner les dents. Le miroir d'un télescope possède les mêmes caractéristiques que ces miroirs, sauf qu'il est de loin de meilleure qualité. À titre d'exemple, la surface d'un miroir de grand télescope réflecteur ne doit pas avoir de défaut supérieur à un vingtième de la longueur d'onde de la lumière qu'il observe.

Dans la recherche d'une image toujours plus nette, plus claire et plus détaillée, les fabricants de lunettes et de télescopes ont mis au point des lentilles et des miroirs de diamètre toujours plus grand. La raison pour laquelle les plus grands télescopes du monde sont de type réflecteur est la suivante : il est plus difficile et plus coûteux de produire des images de qualité avec de grandes lentilles qu'avec de grands miroirs. En effet, une lentille devient vite très lourde et difficile à orienter. Jusqu'à une certaine taille, elle peut toujours être retenue en place par ses bords, ce qui permet à la lumière de la traverser. Toutefois, dès que cette taille est dépassée, il n'est possible de la supporter que par-dessous. La lentille devient alors impossible à utiliser.

Le miroir quant à lui peut être soutenu par-dessous et présente un poids nettement inférieur à la lentille pour le même pouvoir de grossissement. Les plus grands télescopes d'aujourd'hui (voir « Les grands télescopes optiques », p. 39) sont



constitués de miroirs multiples et orientables, agencés de façon à être équivalents à de très grands miroirs. La courbure du miroir primaire peut ainsi être corrigée autant qu'on le souhaite. Bientôt, on construira de nouveau des télescopes à miroir unique, très mince et très souple. La forme parfaite du miroir sera obtenue à l'aide d'un complexe système de supports régulé par ordinateur.

Il existe différents types de télescopes réflecteurs, dont les plus connus sont :

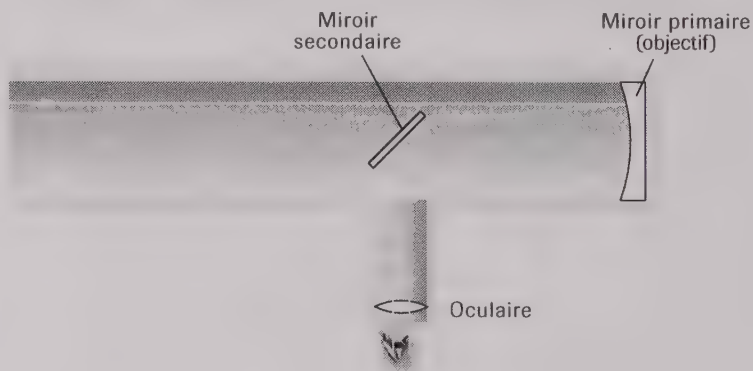
- le télescope de type Newton ;
- le télescope de type Cassegrain ;
- le télescope de type Schmidt-Cassegrain.

Télescope de type Newton

Le télescope de type Newton est composé d'un miroir creux de forme parabolique qui reçoit et réfléchit la lumière vers un miroir secondaire plan placé à 45° qui fait dévier la lumière vers l'oculaire (figure 2.15). Comme c'est presque toujours le cas, le système de miroirs est placé dans un tube protecteur. Ce qui fait la particularité du télescope de type Newton, c'est la position de l'oculaire (une simple loupe) qui est placé perpendiculairement au tube.

FIGURE 2.15

Le télescope de type Newton est composé d'un miroir primaire concave (parabolique), d'un miroir secondaire plan et d'un oculaire perpendiculaire au trajet de la lumière dans le télescope.



Télescope de type Cassegrain

Dans le télescope de type Cassegrain, l'oculaire est placé à l'extrémité du tube, comme dans le cas de la lunette. Le miroir secondaire est hyperbolique (sorte de miroir convexe) au lieu d'être plan (figure 2.16).

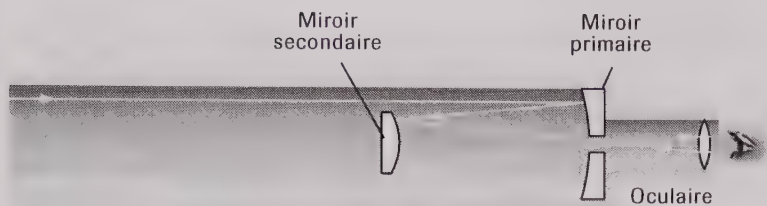


FIGURE 2.16

Le télescope de type Cassegrain est composé d'un miroir primaire concave (parabolique), d'un miroir secondaire convexe (hyperbolique) et d'un oculaire.

Télescope de type Schmidt-Cassegrain

Le télescope de type Schmidt-Cassegrain (figure 2.17) ressemble au télescope de type Cassegrain ; il s'en distingue par le fait qu'il possède en plus une lentille complexe qui corrige certains défauts optiques causés par le miroir primaire, protège le miroir de la poussière et empêche la turbulence interne. Ce modèle est très répandu chez les astronomes amateurs, quoiqu'il soit plus difficile à fabriquer que les deux autres types de télescopes, surtout en raison de la lentille correctrice. Il est relativement compact et portable, et donne de très bons résultats.

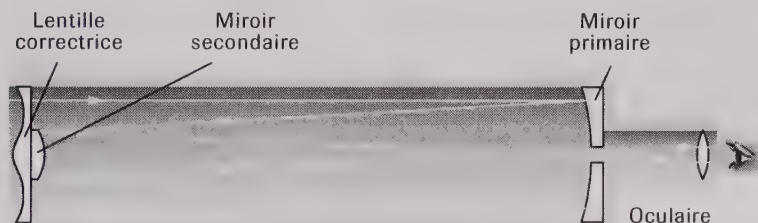


FIGURE 2.17

Le télescope de type Schmidt-Cassegrain est similaire au télescope de type Cassegrain, à la différence qu'il comporte une lentille correctrice et protectrice à son entrée, et que le miroir primaire est sphérique.

Les grands télescopes optiques

Depuis le début des années 1980, on assiste à une véritable course aux télescopes géants d'une qualité optique surprenante. Les besoins d'observation des astronomes d'aujourd'hui sont si particuliers qu'ils incitent les concepteurs de télescopes à faire preuve de plus en plus d'ingéniosité.

Il existe dans le monde de très grands télescopes, tous érigés à même des observatoires sur des sommets de montagne et loin des villes. Leur efficacité en dépend : la pollution lumineuse urbaine nuirait à leur rendement, de même que la turbulence atmosphérique, plus importante au niveau du sol.

L'optique dite **adaptative** compense aujourd'hui en bonne partie les défauts de l'atmosphère en modifiant, dans le télescope, le trajet de la lumière en direct plusieurs fois par seconde. Cette technique n'est pour l'instant applicable qu'aux régions du ciel entourant des étoiles brillantes. Des logiciels puissants ont également été conçus pour « nettoyer » les images



saisies par les télescopes. Ces stratagèmes ont permis de repousser les limites des ambitions des astronomes.

Au moment d'aller sous presse, les deux plus grands télescopes du monde sont le Keck 1 et le Keck 2 (figure 2.19), respectivement mis en service en 1993 et 1996, dont les miroirs primaires mesurent chacun 10 mètres de diamètre. Leur limite de résolution théorique est de 0,0125" d'arc.



FIGURE 2.18

Télescopes Keck 1 et 2, à Hawaii

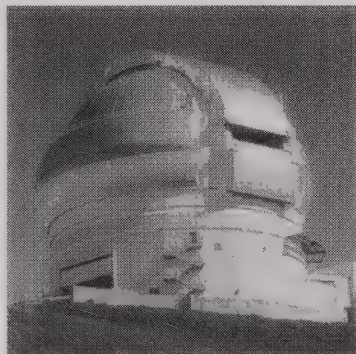


FIGURE 2.19

Télescope Gemini Nord, à Hawaii

De nouveaux télescopes sont mis en fonction chaque année, un peu partout dans le monde. Par exemple, l'année 2001 a vu la mise en service du télescope européen VLT (Very Large Telescope) constitué de quatre télescopes de 8,2 m chacun, situés au sommet d'une montagne (Cerro Paranal) au Chili. Ces quatre télescopes seront couplés dans certaines circonstances par une technique que l'on appelle l'**interférométrie**, qui permet aux télescopes de fonctionner en coordination, offrant ainsi la limite de résolution d'un télescope de 16 m de diamètre. Le Canada n'est pas en reste, puisqu'il participe à un projet (Gemini), réunissant plusieurs pays, qui met en œuvre deux télescopes de 8,1 m, un situé dans l'hémisphère Sud, au Chili, et l'autre dans l'hémisphère Nord, à Mauna Kea (île Hawaii) (figure 2.19). Un astrophysicien québécois, Jean-René Roy, a été nommé directeur associé de Gemini Nord en 2000.

Le tableau 2.2 donne la liste des plus grands télescopes en exploitation ou en construction dans le monde.



TABLEAU 2.2

Les plus grands télescopes du monde

Diamètre	Nom	Année de mise en service	Lieu	Altitude
11 m	South African Large Telescope (SALT)	2004	Sutherland, Afrique du Sud	1 800 m
10,4 m	Gran Telescopio Canarias (GTC)	2003	Las Palmas, îles Canaries	2 400 m
2 × 10 m	Keck 1 et 2	1993 et 1996	Mauna Kea, île Hawaïi	4 150 m
9,2 m	Hobby-Eberly Telescope (HET)	1997	Mont Fowlkes, Texas	2 000 m
2 × 8,4 m	Large Binocular Telescope (LBT)	2003	Mont Graham, Arizona	3 170 m
4 × 8,2 m	Very Large Telescope (VLT)	1998-2001	Cerro Paranal, Chili	2 640 m
8,2 m	Subaru	1999	Mauna Kea, île Hawaïi	4 140 m
8,1 m	Gemini Nord	1999	Mauna Kea, île Hawaïi	4 210 m
8,1 m	Gemini Sud	2001	Cerro Pachon, Chili	2 720 m
6,5 m	MMT (ex-Multi-Mirror Telescope)	2000	Mont Hopkins, Arizona	2 600 m
2 × 6,5 m	Magellan 1 et 2	2000 et 2002	Cerro Manqui, Chili	2 280 m
6 m	Bolshoi Teleskop Azimutalniy (BTA)	1975	Zelentchouk, Russie	2 070 m
5 m	George Ellery Hale Telescope	1948	Mont Palomar, Californie	1 900 m
4,2 m	William Herschel Telescope (WHT)	1987	Las Palmas, îles Canaries	2 340 m
4,2 m	Southern Observatory for Astrophysical Research (SOAR)	2002	Cerro Pachon, Chili	2 700 m
4 m	Victor Blanco Telescope (CTIO)	1976	Cerro Tololo, Chili	2 210 m
3,9 m	Anglo-Australian Telescope (AAT)	1974	Coonabarabran, Australie	1 130 m
3,8 m	Nicholas Mayall Reflector	1973	Kitt Peak, Arizona	2 120 m
3,8 m	United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT)	1978	Mauna Kea, île Hawaïi	4 200 m
3,7 m	Advanced Electro-Optical System Telescope (AEOS)	2000	Maui, île Hawaïi	3 060 m
3,6 m	ESO "360"	1977	La Silla, Chili	2 390 m
3,6 m	Télescope Canada-France-Hawaïi	1979	Mauna Kea, île Hawaïi	4 200 m
3,6 m	Telescopio Nazionale Galileo	1998	Las Palmas, îles Canaries	2 360 m



FIGURE 2.20

Télescope Canada-France-Hawaii

MATIÈRE À RÉFLEXION

Pollution lumineuse urbaine

Dans les zones fortement urbanisées et densément peuplées, le ciel étoilé est devenu à peu près inaccessible aux astronomes amateurs. À moins d'habiter loin des grands centres ou d'avoir à sa disposition une résidence en campagne, l'observation du ciel nocturne est de plus en plus difficile.

L'éclairage des rues, des autoroutes, des espaces publics et des édifices est en grande partie responsable de cette « pollution lumineuse ». La réflexion de cette lumière sur le sol et les bâtiments



éclaire le ciel et fait « disparaître » les étoiles. On invoque souvent des raisons de sécurité et de visibilité pour justifier tout l'éclairage utilisé.

Discutez en classe, en petits groupes ou dans un court texte, des divers aspects de ce problème. Les besoins des astronomes peuvent-ils être compatibles avec ceux de la société urbaine ? Comment pourrait-on éclairer les villes et les banlieues tout en évitant le plus possible d'éclairer le ciel en même temps ? Que pensez-vous de ce type de pollution ?

Télescope spatial Hubble

Malgré tous les efforts réalisés pour diminuer les effets néfastes de la turbulence atmosphérique, on n'arrive jamais à s'en débarrasser complètement. C'est pour cette raison que la National Aeronautics and Space Administration (NASA), organisme américain, a mis en orbite, le 24 avril 1990, à 590 kilomètres d'altitude, un télescope de 2,4 mètres de diamètre, qui porte le nom de Hubble ou TSH (figure 2.21). Les images transmises par ce télescope sont d'une très grande précision : la limite de résolution théorique est de 0,05" d'arc et elle n'est pas amoindrie par l'atmosphère terrestre. Son pouvoir de résolution est 20 fois supérieur à celui qui peut être obtenu sur Terre sans optique adaptative. Cela veut dire que ce télescope pourrait distinguer deux pièces de 10 cents placées l'une à côté de l'autre à une distance de 70 kilomètres ! De plus, Hubble étant placé au-dessus de l'atmosphère, il occupe une place de choix pour l'observation dans l'ultraviolet.

Depuis sa mise en fonction, Hubble a produit une quantité considérable d'images et de spectres de grande qualité. Il apporte une contribution majeure au développement de l'astronomie. Au début de l'année 2002, une mission d'entretien (la quatrième depuis le lancement du télescope) a été effectuée

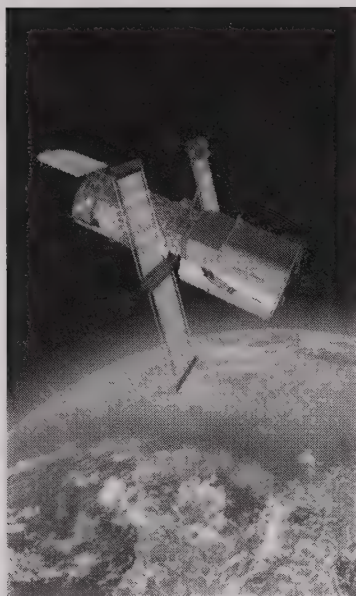


FIGURE 2.21

Télescope spatial Hubble



avec succès sur le télescope. Ainsi, il pourra continuer d'émerveiller les astronomes de la planète jusqu'en 2010, date prévue de la fin de sa vie utile. Hubble sera remplacé par un nouveau télescope : le Télescope spatial de prochaine génération.

Télescope à miroir liquide

Plusieurs équipes de recherche, dont une de l'Université Laval (Québec), travaillent à concevoir un type de miroir tout à fait différent des miroirs des grands télescopes : le miroir liquide. Celui-ci est fabriqué à partir d'un bain de mercure en rotation. En tournant, le mercure a tendance à s'accumuler sur les extrémités de son contenant et prend une forme parfaitement parabolique. C'est ainsi qu'il peut servir de miroir pour l'observation astronomique. À l'aide de cette technique, on pourra fabriquer de très grands miroirs à des coûts beaucoup plus faibles que ceux qui sont liés à la production des miroirs de verre. L'équipe de l'Université Laval a déjà mis au point un miroir liquide de 3,7 m tournant sur lui-même avec une période de 10 secondes. La distance focale d'un tel miroir est donnée par :

$f = g/2\omega^2$, où f est la distance focale

ω est la vitesse angulaire de rotation
(angle balayé par seconde)

g est l'accélération gravitationnelle

La conception d'un miroir liquide de 6 mètres de diamètre a été réalisée en 1999, près de Vancouver. Il semble que les problèmes liés à l'orientation d'un tel miroir seront résolus par des techniques poussées. Ainsi, un miroir liquide pourrait supporter une inclinaison de 20° à 40°. Si c'est le cas, ce sera alors un apport intéressant dans les moyens mis à la disposition des astronomes pour observer l'Univers.

Le plus gros télescope québécois

Au Québec, le plus grand télescope est celui au sommet du mont Mégantic, en Estrie. Bien qu'il soit le troisième en importance au Canada, il est le plus puissant en raison de la qualité exceptionnelle de son parc instrumental. Son miroir primaire mesure 1,6 m de diamètre et pèse une tonne. L'ensemble du télescope et de sa monture pèse quelque 24 tonnes. La gestion est assurée conjointement par l'Université Laval et l'Université de Montréal qui le rendent accessible à plusieurs chercheurs, professeurs et étudiants. L'Observatoire du mont Mégantic est aujourd'hui le lieu d'un important centre d'interprétation,



l'Astrolab, qui comprend le télescope principal, réservé à la recherche, un télescope de calibre professionnel de 61 cm, pour les soirées publiques d'observation, et des expositions sur divers aspects du cosmos.

2.6 Radiotélescope

Les instruments dont nous avons parlé jusqu'ici sont surtout conçus dans le but de faire des observations dans la section visible des ondes EM. Mais les astronomes n'observent pas que dans le visible; ils s'intéressent à toutes les longueurs d'onde dont, par exemple, les ondes radio qui traversent facilement l'atmosphère et qui peuvent être captées au sol. La captation d'ondes radio est fortement associée à la technologie du radar, développée de façon extensive pendant la Seconde Guerre mondiale. Le mot **radar** est d'ailleurs l'acronyme de Radio Detecting And Ranging (détection et télémétrie par radioélectricité).

C'est en 1931, par hasard, que les ondes radio provenant de l'espace ont été découvertes. À cette époque, Karl Jansky (1905–1950), ingénieur au service de Bell Telephone, au New Jersey, cherchait la source d'interférences indésirables dans les communications radio transatlantiques. Il observa, toutes les 23 h 56 min (c'est la durée du jour sidéral terrestre; voir le chapitre 3), un maximum d'interférences en provenance du centre de notre Galaxie. Jansky conclut qu'il y avait là une source très intense d'ondes radio. C'était le début de la radio-astronomie. Cette branche de l'astronomie, très importante aujourd'hui, a mis plusieurs années avant de vraiment prendre son envol. En effet, il a fallu attendre le développement de la technologie du radar pour que la radioastronomie soit considérée par l'ensemble de la communauté scientifique.

Les astronomes ont mis peu de temps par la suite à profiter de la nouvelle vision du ciel que leur procurait cette nouvelle technologie. Plus que le centre de la Galaxie, le ciel entier fourmille d'objets émettant des ondes radio: quasars, pulsars, autres galaxies, Soleil, etc. Par exemple, beaucoup de corps célestes émettent des ondes de 21,2 cm de longueur d'onde, associées à l'hydrogène qu'ils comportent. Pour observer de telles ondes, seuls les **radiotélescopes** sont efficaces. C'est le nom qu'ont donné les astronomes aux radars reconvertis pour l'usage astronomique. Un radiotélescope est en réalité un télescope qui capte les ondes radio.



Un radiotélescope (figure 2.22) est constitué d'une immense antenne parabolique (grillage grossier ou panneaux métalliques), servant de miroir aux ondes radio qui sont ainsi réfléchies vers un récepteur très sensible qui permet d'amplifier les signaux reçus. Étant donné que les ondes radio sont des ondes EM de grande longueur d'onde, la surface réfléchissante des radiotélescopes doit être la plus grande possible. Cette recherche de la grandeur s'ajoute aux autres raisons qui poussent les astronomes à construire des observatoires toujours plus grands : meilleure qualité et plus grande quantité d'information captée.

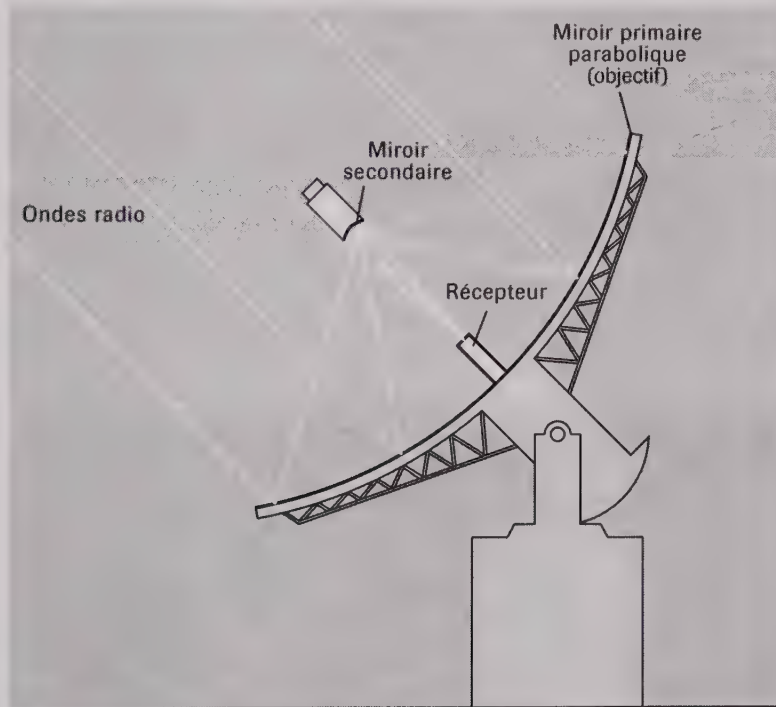


FIGURE 2.22

Le radiotélescope est composé d'un « miroir » primaire parabolique, d'un miroir secondaire et d'un récepteur.

Le radiotélescope d'Arecibo (figure 2.23), à Porto Rico, dans les Caraïbes, est le plus grand au monde ; il mesure 305 m de diamètre, soit près de trois fois la longueur d'un terrain de soccer. Malheureusement, ce radiotélescope n'est pas orientable, ce qui veut dire qu'il ne fait ses observations que dans la zone située directement au-dessus de lui. Les plus grands radiotélescopes orientables ont 100 m de diamètre. On en compte deux : un en Allemagne, à l'Université de Bonn, et un aux États-Unis, à Green Bank (Virginie-Occidentale).

L'avenir dans le domaine de l'observation radio semble irrémédiablement passer par la construction de plusieurs radiotélescopes reliés par des systèmes complexes de guidage et



FIGURE 2.23

Radiotélescope d'Arecibo, à Porto Rico



d'analyse de données. Ces réseaux de télescopes s'appellent des **interféromètres**. L'interférométrie permet, en combinant les signaux de plusieurs antennes pointées dans la même direction, d'obtenir un signal de meilleure définition, simulant ainsi ce que l'on obtiendrait par un radiotélescope unique qui aurait à peu près le diamètre de l'ensemble du réseau interférométrique, à un coût moindre.

Aujourd'hui, les interféromètres sont de plus en plus grands. Dans la catégorie des interféromètres de grande puissance, on trouve le Very Large Array (VLA) (figure 2.24), construit en 1980 dans le désert du Nouveau-Mexique. Il est composé de 27 radiotélescopes mobiles de 25 mètres de diamètre chacun, distribués sur un ensemble de rails en forme d'un immense Y de plus de 36 kilomètres. Les astronomes ont également relié électroniquement 10 grands radiotélescopes répartis sur une superficie allant des îles Vierges de l'Atlantique jusqu'à Hawaï, en passant par les États-Unis, pour former le Very Long Baseline Array (VLBA). Sa résolution est phénoménale (environ un millionième de seconde d'arc), de telle sorte qu'on pourrait distinguer au centre de la Galaxie des objets séparés par une distance équivalant à 10 unités astronomiques (10 fois la distance Terre-Soleil).

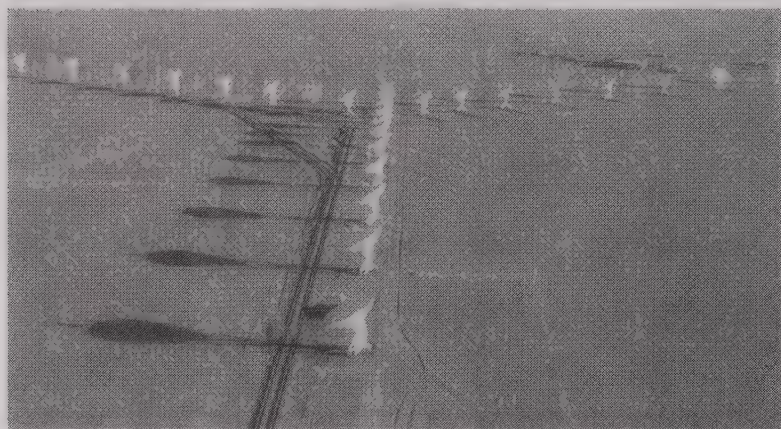


FIGURE 2.24

Interféromètre Very Large Array, au Nouveau-Mexique

L'Institut de radioastronomie millimétrique (IRAM), financé par la France, l'Allemagne et l'Espagne, possède un des meilleurs interféromètres dans le domaine des ondes radio millimétriques, constitué de 5 antennes de 15 mètres de diamètre chacune. Les Européens, les Américains et les Japonais ont aussi signé une entente avec le Chili pour réaliser un radiotélescope



géant, le Atacama Large Millimeter Array (ALMA). Il sera constitué de 64 antennes de 12 mètres chacune réparties sur une superficie de 14 kilomètres de diamètre. L'ALMA sera mis en activité en 2010 à 5 000 mètres d'altitude sur le plateau de l'Atacama, au Chili.

De façon idéale, le meilleur endroit pour ériger un radiotélescope géant serait dans un cratère, sur la face cachée de la Lune. À cet endroit, il n'y a pas de danger d'interférence avec des ondes radio indésirables. Il n'est pas impossible que ce projet voie le jour d'ici à quelques décennies.

Voici un tableau des radiotélescopes et interféromètres les plus importants construits à ce jour.

TABLEAU 2.3

Les radiotélescopes les plus importants au monde

Nom	Lieu	Taille
Arecibo	Porto Rico	305 m
Green Bank	États-Unis	100 m
Max Planck	Allemagne	100 m
*Jodrell Bank	Angleterre	76 m
NASA/JPL Goldstone	États-Unis	70 m
NASA/JPL	Espagne	70 m
NASA/JPL	Australie	70 m
VLA	États-Unis	27 x 25 m (36 km)
VLBA	États-Unis	10 x D (variable)
Calgoora	Australie	96 x 14 m (3 km)

2.7 Autres techniques d'observation

Observation des autres longueurs d'onde

Les astronomes d'aujourd'hui disposent, en plus des télescopes optiques et des radiotélescopes, d'une foule d'autres instruments utiles à l'observation dans toutes les longueurs d'onde. Comme un même objet céleste émet différents types de longueurs d'onde, les scientifiques ne peuvent limiter leurs observations qu'à la lumière visible et aux ondes radio. Il est fréquent qu'un objet qui semble de prime abord peu intéressant lorsqu'on l'observe à la lumière visible révèle, à son observation dans d'autres longueurs d'onde, des signes d'une activité intense.



Toutefois, comme la plupart des longueurs d'onde du spectre électromagnétique traversent difficilement l'atmosphère, les astronomes doivent recourir à des fusées, à des ballons en haute altitude ou, le plus souvent, à des satellites pour les observer. L'étude du rayonnement des objets célestes dans toutes les longueurs d'onde peut ainsi être réalisée au-delà de l'atmosphère terrestre à des coûts relativement raisonnables. Le tableau 2.4 présente les principaux satellites à vocation astronomique à avoir été lancés ou qui sont sur le point de l'être.

Caméra à couplage de charge (CCD)

En astronomie, la caméra à couplage de charge, ou Charge-Coupled Device (CCD), a supplanté la photographie traditionnelle et la numérisation des images photographiques. Bien que ce procédé soit encore très répandu dans plusieurs domaines de la science et dans la vie de tous les jours (télécopie, caméra numérique, effets spéciaux, etc.), la numérisation pour fins d'étude de clichés ne suffit pas à répondre aux besoins des astronomes d'aujourd'hui. Mis au point dans les années 70 par l'armée américaine, les CCD, une fois couplés à de puissants ordinateurs et intégrés aux instruments d'observation traditionnels, offrent aux astronomes des images de très haute résolution. L'image reçue par un CCD, après avoir été emmagasinée dans la mémoire d'un ordinateur, peut être traitée de plusieurs façons, en fonction des détails que l'on désire faire ressortir.

2.8 Observation par les sondes spatiales

Les sondes spatiales sont les instruments les plus complexes de l'astronomie. Depuis les années 60, elles ont été nombreuses à quitter la Terre pour explorer, de plus en plus en profondeur, notre Système solaire. Plusieurs programmes d'exploration spatiale ont connu de véritables succès techniques et scientifiques, quoique certaines missions aient échoué en raison d'un problème au lancement, de la perte du contact avec la sonde ou de l'écrasement de celle-ci sur un astre dont elle devait étudier la surface. Mais les progrès accomplis au fil des ans dans les moyens de propulsion et dans le champ de la robotique assurent que les sondes seront encore nombreuses à explorer (et peut-être même exploiter) le Système solaire.

Chaque sonde spatiale emporte avec elle de nombreux instruments destinés à retourner la plus grande quantité possible d'information à la Terre : caméras, spectromètres de masse,



TABLEAU 2.4

Satellites à vocation astronomique

Acronyme ou surnom	Nom	Domaine d'observation	Année de lancement	Année de fin de la mission	Information supplémentaire
IUE	International Ultraviolet Explorer	Ultraviolet	1978	1996	La durée de vie du IUE constitue un exploit: il avait été conçu pour fonctionner pendant 3 ans.
COBE	COsmic Background Explorer	Infrarouge	1989	1991	
ROSAT	ROentgen SATellite	X	1990	1999	
CGRO	Compton Gamma-Ray Observatory	Gamma	1991	2000	
EUVE	Extreme Ultraviolet Explorer	Ultraviolet	1992	2002	
ISO	Infrared Astronomical Satellite	Infrarouge	1995	1998	
RXTE	Rossi X-ray Timing Explorer	X	1995	2002 ?	Les observations pourraient s'étendre jusqu'en 2004.
FUSE	Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer	Ultraviolet	1999	Incertaine	Sa mission s'étendra peut-être jusqu'en 2006.
XMM-Newton	X-ray Multi-Mirror Mission	X	1999	Incertaine	Sa durée de vie probable est de 10 ans. Le satellite se déplace sur une orbite très elliptique l'emportant à plus de 100 000 km de la Terre.
HESSI	High Energy Solar Spectroscopic Imager	X et gamma	2002	2004 ou 2005	
SIRTF	Space Infrared Telescope Facility	Infrarouge	2003	2005 ou 2006	
IRIS	Infrared Imaging Surveyor	Infrarouge	2004	Incertaine	
Herschel	Herschel Space Observatory	Infrarouge	2007	Incertaine	Le satellite fera ses observations à 1,5 million de km de la Terre.



spectrographes en phase gazeuse, capteurs d'ions, instruments pour mesurer les températures, les champs électriques, magnétiques, etc. Ainsi équipées, les sondes offrent à l'humanité la chance d'explorer sur place et presque en direct les planètes, leurs satellites, les comètes, les astéroïdes et le Soleil. Pour le moment, la perspective de vols habités vers d'autres planètes ne figure pas sérieusement dans les projets des grandes agences spatiales. Un vol habité serait trop coûteux et les technologies actuelles ne pourraient assurer la sécurité des humains à bord. De toute façon, les missions non habitées précéderont toujours les vols habités, dans le but de rendre ces derniers le plus sécuritaires possible.

L'un des aspects intéressants de l'emploi de sondes pour explorer l'espace est leur grande souplesse. En effet, il est possible, depuis la Terre, jusqu'à un certain point, de les diriger, de les accélérer, de changer leur programme d'exploration au gré des découvertes, etc. Le moyen le plus souvent employé pour changer la direction d'une sonde ou pour lui donner une poussée qui la fera se rendre plus loin est nommé **effet catapulte**. Il consiste en l'utilisation de l'attraction gravitationnelle des planètes que rencontre une sonde pour se propulser vers une autre planète sans avoir à consommer du carburant, ou pour ralentir.

Les sondes les plus connues à avoir quitté la Terre sont certes les sondes Voyager 1 et Voyager 2 qui, à la fin de l'été 1977, étaient lancées vers les planètes extérieures du Système solaire. Elles avaient été précédées de plusieurs autres sondes dont les objectifs étaient moins spectaculaires sur le plan de la distance à parcourir, mais non moins importantes sur le plan scientifique. Parmi les autres missions les plus connues, mentionnons les sondes Mariner, Pioneer, Venera, Viking et, plus récemment, Galileo, Ulysse et Mars Pathfinder¹. Le tableau qui suit dresse la liste des missions spatiales les plus importantes qui ont été lancées de 1959 à 2001.

1. Dans les chapitres 4, 5 et 6, qui portent sur les objets du Système solaire, sont présentées plus en détail quelques missions spatiales.



TABLEAU 2.5

Principales missions spatiales*

Nom de la mission	Année du lancement	Pays ou agence	Objectif ou événement
Luna 2	1959	URSS	Première sonde à s'écraser sur la Lune
Luna 3	1959	URSS	Premières photos de la face cachée de la Lune
Mariner 2	1962	É.-U.	Premier survol de Vénus
Mariner 4	1964	É.-U.	Premier survol de Mars
Luna 9	1966	URSS	Premier atterrissage en douceur d'une sonde sur la Lune
Luna 10	1966	URSS	Première sonde en orbite autour de la Lune
Apollo 11, 12, 14 à 17	1969-1972	É.-U.	Premier homme sur la Lune Récupération d'échantillons de roches lunaires
Venera 7	1970	URSS	Premier atterrissage sur une autre planète (Vénus)
Luna 16	1970	URSS	Premier retour d'échantillons de roches lunaires par des robots
Mariner 9	1971	É.-U.	Orbite autour de Mars Premières photos détaillées de la surface Premières photos de Phobos et de Deimos
Pioneer 10	1972	É.-U.	Première sonde à survoler Jupiter (1973) et à quitter le Système solaire Porte un message de l'humanité destiné à une éventuelle civilisation extraterrestre
Pioneer 11	1973	É.-U.	Première sonde à survoler Saturne (1979)
Mariner 10	1974	É.-U.	Survol de Vénus et de Mercure Premières images de Mercure
Venera 9 et 10	1975	URSS	Atterrissage sur Vénus Premières images du sol par Venera 9
Viking 1	1975	É.-U.	Premier atterrissage sur Mars à Chryse Planitia
Viking 2	1975	É.-U.	Atterrissage sur Mars à Utopia Planitia
Voyager 2	1977	É.-U.	Rencontre avec Jupiter (1979) Rencontre avec Saturne (1981) Première rencontre d'une sonde avec Uranus (1986) Première rencontre d'une sonde avec Neptune (1989)
Voyager 1	1977	É.-U.	Rencontre avec Jupiter (1979) Rencontre avec Saturne (1980)
Venera 11 à 16	1978-1983	URSS	Orbites autour de Vénus Atterrissages sur Vénus
Vega 1 et 2	1984	URSS	Survol de la comète de Halley (1986) Mise en orbite d'une sonde autour de Vénus



TABLEAU 2.5 Principales missions spatiales (suite)

Nom de la mission	Année du lancement	Pays ou agence	Objectif ou événement
Giotto	1985	Agence spatiale européenne (ESA)	Premières images du noyau de la comète de Halley
Phobos 1 et 2	1988	URSS	Deux sondes martiennes dont on a perdu le contact
Magellan	1989	É.-U.	Cartographie de 98% de la surface de Vénus avec une résolution allant jusqu'à 100 m
Galileo	1989	É.-U.	Premier survol d'un astéroïde (Gaspra) en 1991 Survol de l'astéroïde Ida en 1993 Lancement d'une sonde dans l'atmosphère de Jupiter en 1995
Ulysses	1990	É.-U. et ESA	Survol des pôles Nord et Sud du Soleil en 1994 et 1995, et en 2000 et 2001
Mars Observer	1992	É.-U., France, URSS	Sonde perdue en 1993 peu avant sa mise en orbite autour de Mars
Clementine	1994	É.-U.	Cartographie détaillée de la Lune
Wind	1994	É.-U.	Étude du vent solaire
NEAR	1996	É.-U.	Orbite autour de l'astéroïde Éros, en 2000 Collision en douceur avec Éros en 2001
Mars Global Surveyor	1996	É.-U.	Cartographie détaillée de Mars
Mars 96 Orbiter	1996	Russie	Rentrée dans l'atmosphère terrestre quelques heures seulement après le lancement Les débris tombent dans une région qui touche l'océan Pacifique, le Chili et la Bolivie
Mars Pathfinder	1996	É.-U.	Atterrissage sur Mars (1997) Exploration de la surface à l'aide du petit robot mobile Sojourner
Cassini-Huygens	1997	É.-U. et ESA	Exploration approfondie de Saturne et de Titan, principal satellite Lancement de la sonde Huygens dans l'atmosphère de Titan prévu en 2004
Deep Space 1	1998	É.-U.	Étude de la comète Borrelly (2001)
Mars Odyssey	2001	É.-U.	Exploration de Mars

* Une liste complète est disponible sur le site Internet du National Space Science Data Center:
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/chrono.html>.



Anciens instruments d'observation

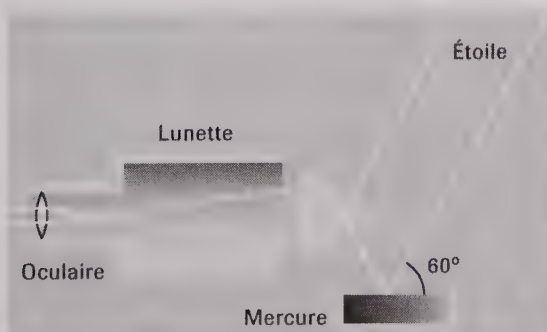
Notre étude des instruments de l'astronomie s'achève avec la présentation de deux appareils moins connus que ceux dont il a été question jusqu'à maintenant. Ce sont l'astrolabe et le sextant, instruments dont l'usage n'est plus répandu en astronomie. Ce sont cependant des instruments fort intéressants surtout en raison de la grande simplicité de leur fonctionnement.

Astrolabe à prisme

L'astrolabe à prisme, conçu au début du XX^e siècle par les Français A. Claude et L. Driencourt, est un instrument tout simple qui permet de mesurer avec précision l'heure du passage d'une étoile à une hauteur prédéterminée, la latitude d'un lieu et les positions stellaires. L'astrolabe à prisme est constitué d'une lunette horizontale, d'un prisme de verre (d'où son nom) et d'un bain de mercure qui sert de miroir (voir la figure ci-dessous). Selon la hauteur (dans le ciel) des étoiles qui serviront de point de repère, on fera l'usage de prismes d'angles différents. Dans le cas de l'astrolabe à prisme de Claude et Driencourt, le prisme est équilatéral, ce qui signifie que la hauteur des étoiles observées sera de 60°.

Dans son mouvement apparent attribuable à la rotation de la Terre, le champ des étoiles se déplace et reprend presque la même position nuit après nuit. Si l'on pouvait voir les étoiles à toute heure du jour ou de la nuit, on remarquerait qu'elles passent deux fois par jour à la même hauteur au-dessus de l'horizon. Un peu comme le Soleil, dans la même journée, peut être aveuglant aussi bien à 8 h qu'à 16 h (il a la même hauteur), même s'il n'est plus dans la même direction. Pour les étoiles, ces deux passages sont symétriques par rapport à l'heure de passage au méridien, le méridien étant la ligne imaginaire qu'on pourrait tracer sous nos pieds et qui relierait le pôle Nord au pôle Sud.

Les considérations précédentes sont à l'origine du développement de l'astrolabe à prisme qui permet de mesurer précisément l'heure du passage d'une étoile à la



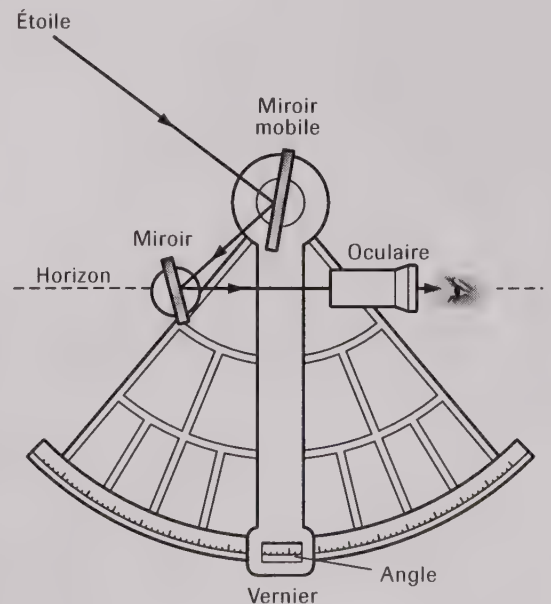
L'astrolabe à prisme est composé d'une lunette, d'un prisme et d'un bain de mercure.

hauteur de 60°, ainsi que la latitude du lieu et la position de l'étoile. L'utilisateur de l'astrolabe doit choisir une étoile dans le ciel et l'observer jusqu'à ce qu'elle approche la hauteur de 60°. Jusqu'à ce moment, l'image de l'étoile observée dans l'oculaire paraît double en raison du fait que la lumière de l'étoile suit deux trajectoires différentes des rayons lumineux : l'un des rayons pénètre dans l'objectif après une seule réflexion dans le prisme, et l'autre rayon entre dans l'objectif après deux réflexions, la première dans le bain de mercure et la seconde dans le prisme. L'observateur voit donc deux images différentes de l'étoile lorsqu'elle est près de la hauteur 60° et, s'il poursuit son observation, il verra l'une des deux images monter alors que l'autre descendra. Elles se superposeront juste au moment où l'étoile atteint 60° de hauteur. C'est à ce moment qu'on enregistre l'heure exacte.

L'observatoire de Dolbeau, au Lac-Saint-Jean, dispose d'un tel instrument. Aujourd'hui, les astrolabes à prisme sont couplés à des caméras CCD afin d'en augmenter les performances. De plus, le satellite Hipparcos de l'Agence spatiale européenne utilisa, entre 1989 et 1993, une version moderne de l'astrolabe à prisme (sans bain de mercure) dans l'élaboration d'un catalogue stellaire de très haute précision.

Sextant

Le sextant, instrument plus ancien que l'astrolabe à prisme, est utile pour la navigation hauturière (en haute mer) lorsqu'on ne dispose pas d'un système de radiorepérage



Le sextant est composé d'un miroir mobile, d'un miroir fixe, d'un vernier et d'un oculaire.



comme le GPS (Global Positioning System). Il sert à mesurer l'angle entre un astre et l'horizon ou entre deux astres. Le sextant a été inventé vers 1730, simultanément en Amérique et en Angleterre, par le mathématicien anglais John Hadley (1682–1744) et l'inventeur américain Thomas Godfrey (1704–1749).

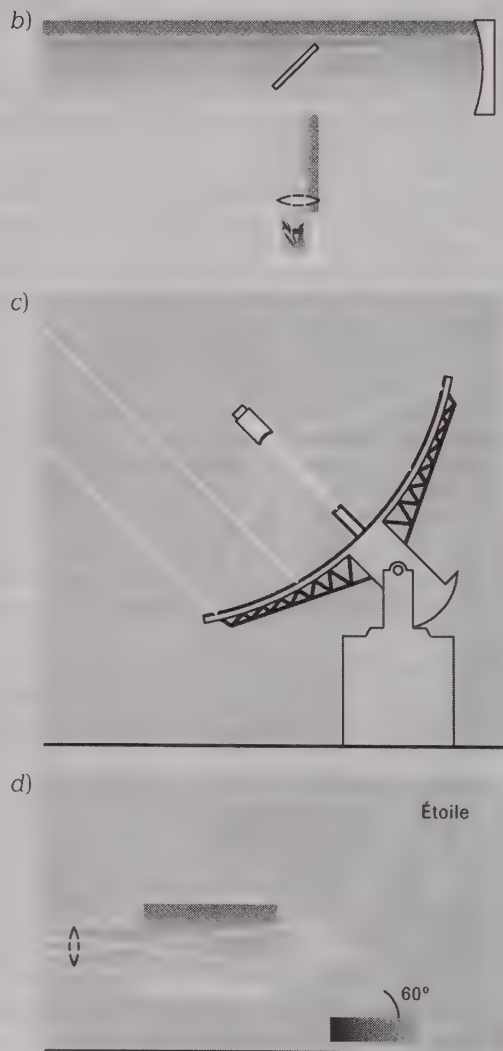
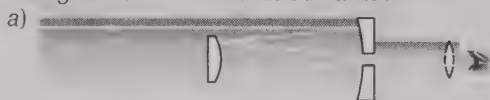
La mesure de la hauteur angulaire d'une étoile au-dessus de l'horizon est réalisée de la façon suivante : la lumière en provenance de l'étoile est réfléchiée sur le miroir mobile

puis sur le miroir fixe pour former une image dans l'oculaire. La lumière en provenance de l'horizon engendre une seconde image en passant à travers le miroir fixe semi-transparent. Lorsque les deux images sont l'une vis-à-vis de l'autre, l'angle sur le vernier de l'instrument nous donne la mesure de l'angle entre l'étoile et l'horizon. On procède de la même manière pour obtenir l'angle entre deux étoiles.

Questions de révision

1. Nommez et expliquez les trois grandes étapes de la méthode scientifique.
2. Vrai ou faux ?
 - a) Le son est une sorte d'onde EM.
 - b) Les ondes radio voyagent à la vitesse de la lumière.
 - c) Le son voyage à la vitesse de la lumière.
 - d) La vitesse de la lumière est infinie.
 - e) Le noyau de l'atome est composé de fer et d'aluminium.
3. Comment s'appelle l'ensemble des ondes EM de la nature ?
 - a) Le spectre continu
 - b) Le spectre d'émission
 - c) Le spectre électromagnétique
 - d) Le spectre d'absorption
4. Comment s'appelle le résultat de la décomposition de la lumière blanche ?
 - a) Le spectre continu
 - b) Le spectre d'émission
 - c) Le spectre électromagnétique
 - d) Le spectre d'absorption
5. Comment s'appelle le spectre qui ressemble à un « négatif » du spectre d'émission ?
 - a) Le spectre continu
 - b) Le spectre d'émission
 - c) Le spectre électromagnétique
 - d) Le spectre d'absorption

6. Désignez les instruments suivants :





7. Comment la lumière visible est-elle produite ?
8. À quoi sert l'étude du spectre d'un astre ?
9. Quelles sont les deux sortes d'ondes EM qui traversent le plus facilement l'atmosphère terrestre (les deux fenêtres) ?
10. Quelle propriété de la lumière permet à la lunette astronomique de grossir les images ?
11. Quel instrument a-t-on utilisé pour la navigation en haute mer ?
12. Quel est l'angle formé par le Soleil, la goutte d'eau et l'observateur dans un arc-en-ciel primaire pour la couleur rouge ?
13. Quel est l'angle formé par le Soleil, la goutte d'eau et l'observateur dans un arc-en-ciel secondaire pour la couleur violette ?
14. Où est situé le plus grand télescope du Québec ?
15. Qu'est-ce qui restreint la limite de résolution d'un télescope terrestre ?
16. Quelle est la différence entre un télescope réfracteur et un télescope réflecteur ?
17. Quelle caractéristique physique différencie la lumière jaune de la lumière verte ?
18. L'énergie d'une onde électromagnétique est proportionnelle à quelle variable physique ?
19. Fondamentalement, quelle est la différence entre l'astrologie et l'astronomie ?
20. Comment fonctionne le télescope à miroir liquide ?
21. Quel est le plus grand télescope au monde ?
22. Quelle est la fréquence d'une onde électromagnétique de 500 nm ?
23. Quelle est l'énergie transportée par cette onde ?
24. Soit une lunette astronomique dont la distance focale de l'objectif est de 140 mm et la distance focale de l'oculaire 5 mm.
 - a) Quel est le grossissement de cette lunette ?
 - b) Quelle est la distance entre l'oculaire et l'objectif ?
 - c) Si le diamètre de cette lunette est de 80 mm, quel est son pouvoir de résolution ?
 - d) Comment ferait-on pour doubler le grossissement de cette lunette ?



La Terre

*Vaisseau spatial
de l'humanité*

Depuis que nous savons que la Terre n'est pas immobile au centre de l'Univers, toute notre perspective de l'espace qui nous entoure s'est transformée. Notre Terre nous fait nous déplacer autour du Soleil, autour du centre de la Galaxie, et vers d'autres galaxies de telle sorte que nous ne sommes jamais au même endroit dans l'Univers. Elle est en quelque sorte une plate-forme errante qui nous donne un point de vue particulier sur tout ce qui nous entoure. Puisque nous effectuons la majorité de nos observations à partir de notre vaisseau spatial bien à nous, apprenons d'abord à bien le connaître avant de passer à l'étude de l'Univers. Voyons sa composition, ses dimensions, ses mouvements. Définissons des repères de temps et d'espace pour ensuite mieux comprendre ce qu'il y a plus loin.

**DANS LES PAGES
QUI SUIVENT,
VOUS APPRENDREZ À :**

- Décrire quand et comment la Terre s'est formée.
- Caractériser les couches internes de la Terre.
- Distinguer les principaux éléments de la surface terrestre.
- Distinguer les couches de l'atmosphère et leurs propriétés optiques.
- Décrire le champ magnétique terrestre et ses effets.
- Décrire les mouvements de la Terre et leurs conséquences.
- Donner les diverses définitions du temps.
- Reconnaître les caractéristiques de divers systèmes de coordonnées.



3.1 Généralités

La Terre est une grosse boule plus ou moins sphérique, légèrement aplatie aux pôles, ce qui lui donne une forme ellipsoïdale. Il y a une différence de 42 kilomètres entre le diamètre à l'équateur et le diamètre aux pôles (figure 3.1). Cette déformation est attribuable à la rotation de la planète sur elle-même et à l'effet de la force centrifuge qui résulte de la rotation. L'étude précise de l'orbite des satellites artificiels a permis d'établir la forme exacte de la Terre, qui diffère de l'ellipsoïde parfait de quelques centaines de mètres en plus ou en moins. L'irrégularité de la répartition des masses à l'intérieur du globe donne en réalité à la Terre une forme qui est légèrement comparable à celle d'une poire bosselée. En général, les mesures exprimées pour le rayon, le diamètre ou la circonférence sont des moyennes pour lesquelles on a tenu compte des irrégularités.

La masse de la Terre est évaluée à $5,97 \times 10^{24}$ kg, soit près de 6 millions de milliards de milliards de kilogrammes. Cela équivaut à plus de 81 fois la masse de la Lune et à seulement 3 millionièmes de la masse du Soleil. La densité moyenne est de $5,5 \text{ g/cm}^3$. La densité est le rapport entre la masse d'une substance et le volume qu'elle occupe. Ainsi, $5,5 \text{ g/cm}^3$ est égal à 5,5 fois la densité de l'eau, qui elle est de 1 g/cm^3 . La densité de la Terre augmente en allant vers le centre, où elle atteint $17,9 \text{ g/cm}^3$. La Terre est la troisième planète la plus proche du Soleil, entre Vénus (2^e) et Mars (4^e). Elle est située à environ 150 millions de kilomètres du Soleil. La Lune, son seul satellite naturel, est située à 384 000 kilomètres. Tout comme les autres objets de l'Univers, la Terre tourne sur elle-même autour d'un axe imaginaire qu'on appelle **axe de rotation**. Cet axe est incliné de $23,5^\circ$ par rapport à la perpendiculaire au plan de l'orbite terrestre. Nous verrons plus loin comment cette inclinaison est responsable de l'existence des saisons.

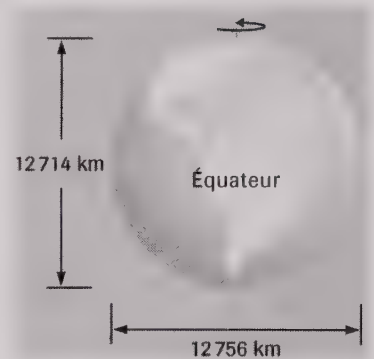


FIGURE 3.1

Par sa forme ellipsoïdale, la Terre a un diamètre légèrement plus grand à l'équateur qu'aux pôles.

3.2 Origine de la Terre

L'origine de la Terre est intimement liée à l'origine du Système solaire (voir le chapitre 10). La formation d'une planète ou de n'importe quel objet céleste est un processus qui s'étend sur des millions, voire des milliards d'années. Il est aujourd'hui généralement accepté que la Terre s'est formée à partir d'un nuage de gaz et de poussières engendrant la nébuleuse solaire



initiale. Lentement, par un processus d'agglomération nommé **accrétion**, le nuage s'est contracté jusqu'à la formation de la planète. L'énergie dégagée par la contraction en a réchauffé le cœur, ce qui explique aujourd'hui la température très élevée et la présence de métal en fusion au centre de la Terre (voir la section 3.3).

On évalue l'âge de la Terre à quelque 4,6 milliards d'années. C'est par des techniques de datation que les scientifiques sont parvenus à attribuer cet âge. La datation repose sur la mesure de la radioactivité de divers éléments présents dans la nature, tels l'uranium et plus particulièrement l'uranium 238 ou ^{238}U . Ce dernier se désintègre spontanément après un certain temps en émettant un rayonnement énergétique ; c'est la radioactivité. Le temps nécessaire pour que la moitié de l'uranium 238 se désintègre est appelé **demi-vie**. Ainsi, la demi-vie de ^{238}U est de 4,5 milliards d'années, c'est-à-dire que, si au départ on a 1 kg de ^{238}U , il faudra 4,5 milliards d'années avant que la moitié soit transformée. Dans le cas de ^{238}U , la désintégration donne du plomb (^{206}Pb) et de l'hélium (^4He) :



Dans un échantillon quelconque, c'est la proportion de plomb et d'uranium qui nous indiquera son âge. Si l'on trouve un échantillon contenant M_{Pb} grammes de plomb et M_{U} grammes d'uranium, on peut déterminer l'âge de cet échantillon, en milliards d'années, à l'aide de la formule suivante :

$$t \approx 7,5 \times (M_{\text{Pb}}/M_{\text{U}})$$

En raison de l'instabilité initiale de la croûte terrestre (voir la section 3.3), on est incapable de trouver des roches vieilles de 4,6 milliards d'années. Cependant, les plus anciennes, découvertes au Groenland, ont été formées il y a 4 milliards d'années. On a aussi établi que les roches lunaires datent de 4,4 milliards d'années et que les plus vieilles météorites sont âgées d'environ 4,6 milliards d'années. Donc, on déduit que la Terre aurait au moins le même âge que les météorites. Ces dernières sont parmi les plus vieux objets du Système solaire et ont probablement été constituées à la même période que la Terre.

C'est aussi à l'aide de la datation que l'on a pu évaluer l'âge des diverses couches géologiques qui recouvrent la planète ainsi que celui des fossiles qui s'y trouvent. Cette information a permis de vérifier et de confirmer la théorie de l'évolution de Charles Darwin (1809–1882). D'après les mesures obtenues à l'aide de la datation, la vie serait apparue sur Terre il y a 4 milliards d'années. Pour avoir une meilleure idée du temps écoulé depuis la création de l'Univers jusqu'à aujourd'hui et



pour mieux comprendre l'évolution et la place de l'homme dans celui-ci, un illustre astronome américain, Carl Sagan (1934–1996), a construit un calendrier cosmique. Ce calendrier (tableau 3.1) compresse l'âge de l'Univers en une seule année. Selon cette échelle, 1 seconde équivaut à 475 ans.

TABLEAU 3.1

Calendrier de Carl Sagan

Date	Événement	Nombre d'années
1 ^{er} janvier	Big Bang	15 000 000 000
1 ^{er} mai	Formation de notre Galaxie, la Voie lactée	10 000 000 000
9 septembre	Formation du Système solaire	4 800 000 000
14 septembre	Formation des planètes, dont la Terre	4 600 000 000
25 septembre	Origine de la vie	4 100 000 000
2 octobre	Formation des plus vieilles roches connues sur Terre	3 800 000 000
9 octobre	Fossilisation des plus vieux organismes vivants	3 500 000 000
1 ^{er} novembre	Invention du sexe par les microorganismes	2 600 000 000
12 novembre	Apparition des cellules avec noyau	2 100 000 000
1 ^{er} décembre	Formation d'une atmosphère avec oxygène	1 300 000 000
18 décembre	Apparition du plancton et des trilobites	600 000 000
20 décembre	L'ordovicien : apparition des poissons et des vertébrés	500 000 000
21 décembre	Le silurien : envahissement de la terre ferme par les plantes	440 000 000
22 décembre	Le dévonien : apparition des insectes ; des animaux prennent pied sur terre	390 000 000
23 décembre	Le carbonifère : apparition des arbres et des reptiles	350 000 000
25 décembre	Le permien : apparition des dinosaures	280 000 000
26 décembre	Le trias : apparition des mammifères	225 000 000
27 décembre	Le jurassique : apparition des oiseaux	180 000 000
28 décembre	Le crétacé : apparition des fleurs	130 000 000
30 décembre	Fin du crétacé ; grandes extinctions marines et terrestres, incluant les dinosaures ; au tertiaire : prolifération des mammifères	65 000 000
31 décembre		
12 h 00	Apparition des cétacés et des primates	20 000 000
18 h 00	Apparition des hominidés et des mammifères géants	10 000 000
22 h 30	Début du quaternaire : apparition de l'homme	2 000 000
23 h 50	Utilisation du feu par l'homme	280 000
23 h 56	Apparition de l'Homo Sapiens	100 000
23 h 58 m 42 s	Apparition de l'homme de Cro-Magnon ; peuplement des Amériques	35 000



TABLEAU 3.1 Calendrier de Carl Sagan (suite)

Date	Événement	Nombre d'années
23 h 59 m 20 s	Invention de l'agriculture; domestication des animaux	20 000
23 h 59 m 33 s	Réalisation des fresques de Lascaux	13 000
23 h 59 m 35 s	Établissement des premières cités; invention de la roue et de la navigation à voile	12 000
23 h 59 m 43 s	Colonisation de la vallée du Tigre et de l'Euphrate	6000
23 h 59 m 49 s	Établissement des premières dynasties en Égypte et au Sumer; érection des grandes pyramides	3375-2375
23 h 59 m 51 s	Invention de l'alphabet	2375-1900
23 h 59 m 53 s	Technologie du bronze; guerre de Troie	1425-950
23 h 59 m 54	Technologie du fer; Empire assyrien	950-475
23 h 59 m 55 s	Périclès à Athènes; Bouddha; invention de la monnaie	475-0
23 h 59 m 56 s	Euclide; Ptolémée; Alexandre le Grand; Rome; Jésus	0-475 apr. J.-C.
23 h 59 m 57 s	L'Islam; Charlemagne	475-950
23 h 59 m 58 s	Civilisation maya; croisades	950-1425
23 h 59 m 59 s	Renaissance en Europe	1425-1900
Aujourd'hui: 1 ^{re} seconde de la nouvelle année	Développement de la science et de la technologie; émergence d'une culture planétaire; acquisition des moyens d'autodestruction par une espèce animale; premiers essais d'exploration planétaire et spatiale; recherche de civilisations extraterrestres; disparition d'un grand nombre d'espèces animales.	1900-2375

3.3 Intérieur de la Terre

L'étude des variations de vitesse et des réflexions des ondes sismiques (ondes associées aux tremblements de terre) a permis aux géologues de sonder l'intérieur de la Terre. Les spécialistes ont ainsi établi la présence de trois couches principales: la croûte terrestre, le manteau et le noyau (figure 3.2). Ces couches se sont formées par un processus dit de **différenciation** qui repose sur le fait que, au moment de la contraction initiale de la Terre, les éléments les plus lourds, comme les métaux, ont « coulé » vers le centre et que les plus légers, comme ceux constituant la croûte, ont « flotté » à la surface.

La **croûte terrestre** ou **écorce terrestre** est la couche située directement sous nos pieds. Elle est constituée de ce qu'on appelle le **sial**, mélange de silice et d'alumine. En réalité, trois éléments chimiques y abondent: l'oxygène (46 %), le silicium (27 %) et l'aluminium (8 %). On y trouve aussi du fer, du calcium,

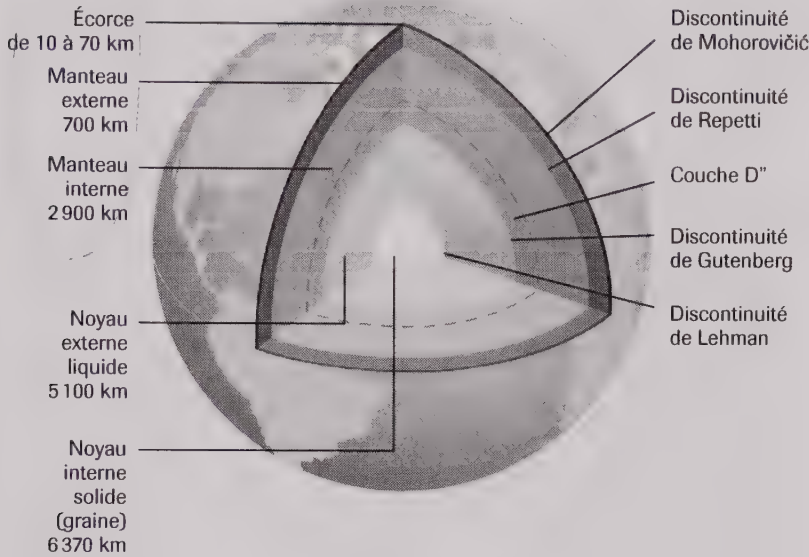


FIGURE 3.2

L'intérieur de la Terre est divisé en trois couches principales : la croûte terrestre, le manteau et le noyau. On appelle *discontinuité* le passage d'une couche à l'autre. Les valeurs, données en kilomètres, correspondent à la profondeur maximale de chaque couche.

du sodium, du potassium et du magnésium. Ces huit éléments forment 98 % de l'écorce terrestre.

L'épaisseur de l'écorce varie de 10 à 70 kilomètres selon les régions du globe. Pendant la formation de la Terre, l'écorce s'est différenciée en une croûte continentale (sous les continents) et une croûte océanique (sous les océans). Alors que la croûte continentale est épaisse de plusieurs dizaines de kilomètres, la croûte océanique ne mesure que quelques kilomètres d'épaisseur sous certains océans. La différence entre les deux croûtes tient à leur composition : la croûte continentale est principalement formée de roches granitiques, alors que la croûte océanique est surtout constituée de roches basaltiques. Le basalte provient de la lave produite aux dorsales océaniques, frontières des plaques tectoniques (voir la section 3.4). Dans les océans très profonds, tel le Pacifique, la roche basaltique forme le fond. Pour illustrer à quel point l'écorce terrestre est mince par rapport aux autres couches internes de la Terre, voici une analogie intéressante : la croûte terrestre est plus mince par rapport à la Terre que la coquille d'un œuf !

Dans la croûte terrestre, la température augmente d'environ 17 °C par kilomètre de profondeur jusqu'à environ 12 kilomètres, principalement en raison de la présence d'éléments radioactifs dans le sol. Dans le fond de certaines mines, la température peut atteindre 60 °C, rendant ainsi obligatoire l'usage de l'air climatisé. Les forages les plus profonds réalisés jusqu'à présent sont de 9,6 km en Oklahoma et de 12,2 km dans la presqu'île de Kola, en Russie. Cela ne représente qu'à peine



0,2 % du rayon de la Terre. On emploie souvent le terme **lithosphère** pour désigner la croûte terrestre. En fait, la lithosphère inclut la croûte terrestre ainsi que la partie supérieure du manteau.

Le **manteau** constitue la couche la plus importante de toutes les enveloppes de la Terre. Il contribue à 68 % de la masse de la planète et à 83 % de son volume. Il est séparé de la croûte terrestre par la discontinuité de Mohorovičić et s'étend jusqu'à 2 900 kilomètres de profondeur. Il est divisé en deux à environ 700 kilomètres de profondeur par la discontinuité de Repetti, là où la densité passe de 3,3 à 5,6 g/cm³. La partie externe (ou supérieure) du manteau est apparemment composée de roches ultrabasiques qui posséderaient les propriétés à la fois des solides et des liquides. Les éléments les plus présents sont le silicium, le magnésium et le fer. La température serait de l'ordre de 2 000 °C. La partie interne (ou inférieure) du manteau est formée d'oxydes de fer et de magnésium. Mais on y trouve aussi un silicate très compact, la pérovskite, qui constitue 50 % du volume de la Terre. Les 300 derniers kilomètres du manteau inférieur sont une zone très active appelée **couche D''** (lire «D seconde») où il y a une brusque montée de la température et une intense activité chimique entre les éléments du manteau et le fer liquide de la partie extérieure du noyau.

Le **noyau** est au cœur de la Terre. Il est séparé du manteau par la discontinuité de Gutenberg. À la profondeur de 5 100 kilomètres, il est scindé en deux par la discontinuité de Lehman. Le noyau externe est liquide et formé surtout de fer. On y trouve aussi du nickel et quelques autres éléments dans de faibles proportions. La densité y varie de 9 à 12 g/cm³. Le noyau interne, qui va jusqu'au centre, à 6 370 kilomètres de la surface, est solide et comprend surtout du fer. On appelle aussi **graine** le noyau interne. La densité y passe de 15 à 18 g/cm³. La pression y serait de l'ordre de 3,5 millions de bars (1 bar est égal à 10⁵ pascals ou approximativement égal à une atmosphère, soit la pression atmosphérique à la surface de la Terre), et la température d'environ 5 500 °C.

3.4 Surface de la Terre

La surface de la Terre est en constante évolution. Elle est lentement modifiée par l'érosion, les séismes, les mouvements de l'écorce terrestre, etc. La surface terrestre est actuellement recouverte de trois fois plus d'eau que de terre, mais il n'en a



pas toujours été ainsi. En effet, dans les premiers instants du Système solaire, la Terre ressemblait probablement à la Lune, c'est-à-dire qu'elle était déserte et sans eau. Puis, la chute de nombreuses météorites de toute taille et une importante activité volcanique ont fracturé l'écorce terrestre, libérant ainsi de l'eau et des gaz enfouis qui ont graduellement transformé l'atmosphère (voir la section 3.5). Les continents, plus légers que les couches internes de la Terre, flottent à la surface un peu comme des radeaux sur le manteau. C'est ce qu'on appelle la **dérive des continents**. Cette théorie a été proposée au début du XX^e siècle par un géologue amateur allemand, Alfred Wegener (1890–1930). Il avait remarqué la ressemblance frappante entre le contour de l'est de l'Amérique du Sud et celui de l'Afrique occidentale, ce qui l'amena à penser que ces deux continents avaient pu être reliés il y a très longtemps. Il y releva des similitudes tant sur le plan géologique que sur le plan de la climatologie ancienne. Il trouva des fossiles communs aux deux endroits et constata que la faune et la flore respectives présentaient beaucoup d'éléments similaires. Il donna le nom de Pangée au continent unique à l'origine des continents. Au fil de millions d'années, la Pangée s'est disloquée en plusieurs morceaux qui ont dérivé jusqu'à leur position actuelle.

La théorie de la dérive des continents est maintenant connue sous le nom de **tectonique des plaques**. Les géologues divisent les continents et le fond océanique en 14 plaques semi-rigides (figure 3.3) qui «flottent» sur le manteau extérieur. Au milieu des océans, on trouve des dorsales océaniques (chaînes sous-marines) desquelles jaillit de la lave basaltique en provenance du manteau, ce qui régénère continuellement le fond océanique. Le plancher océanique, quant à lui, avance lentement vers les continents et replonge dans le manteau sous les

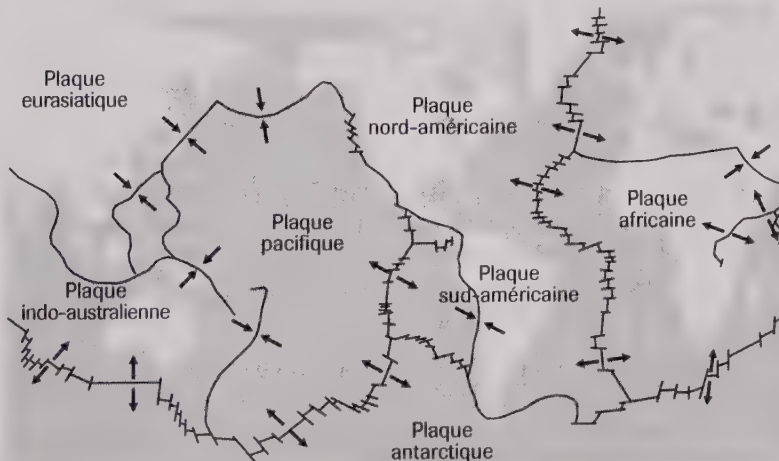


FIGURE 3.3

Les plaques de la lithosphère sont au nombre de 14 : on compte 7 plaques principales et 7 plaques secondaires.

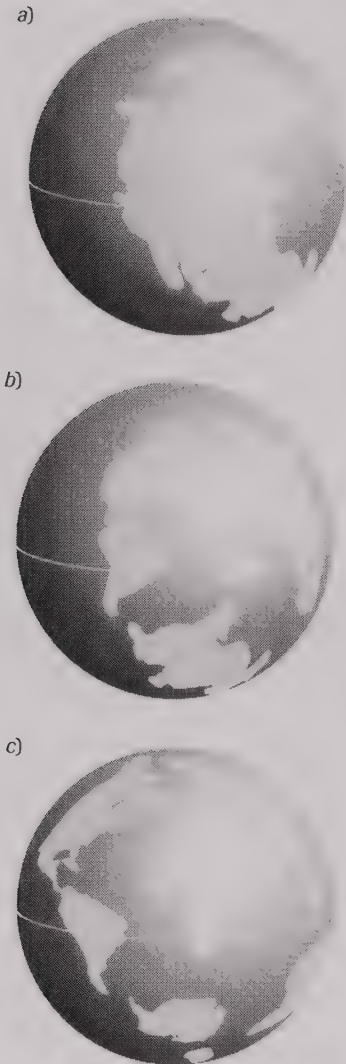


FIGURE 3.4

La dérive des continents en trois étapes : a) Il y a 270 millions d'années, les continents étaient rassemblés en un seul continent, la Pangée; b) Il y a 60 millions d'années, l'Atlantique était ouvert et l'Inde se déplaçait vers l'Asie; c) Il y a un million d'années, l'aspect des continents était semblable à celui d'aujourd'hui.

continents dans les zones de subduction. Près de 3 kilomètres carrés de croûte terrestre sont ainsi engloutis chaque année. Ces déplacements ne se font pas toujours en douceur; ils produisent de grandes failles et sont responsables de collisions colossales qui dégagent d'immenses quantités d'énergie. Ils engendrent les chaînes de montagnes, les tremblements de terre et l'activité volcanique.

La figure 3.4 donne un aperçu de l'évolution des continents au cours des 270 derniers millions d'années. La figure 3.4a présente la position des continents alors qu'ils ne formaient qu'une seule grande étendue de terre : la Pangée. Il y a environ 60 millions d'années (figure 3.4b), l'Atlantique était déjà ouvert et l'Inde, qui s'était séparée de l'Antarctique, se déplaçait vers le continent asiatique. Le choc engendré plus tard par le rattachement de l'Inde à l'Asie créa la chaîne de montagnes Himalaya. Les déplacements se sont poursuivis et, il y a un million d'années (figure 3.4c), l'aspect général des continents était à peu près l'équivalent de ce que l'on connaît aujourd'hui.

Le déplacement des plaques est un phénomène continu qui transforme lentement la morphologie des continents. Certaines plaques se déplacent de 2 à 5 cm/an, alors que d'autres avancent de 10 à 15 cm/an. Actuellement, la Californie se dirige vers l'Alaska à une vitesse de 6 à 8 cm/an, et l'Afrique prend la direction de l'Europe de telle sorte que la mer Méditerranée sera fermée dans quelques dizaines de millions d'années. L'Amérique du Nord, quant à elle, s'éloigne de l'Europe au rythme de 2 ou 3 cm/an. En fait, dans 100 millions d'années, la surface de la Terre sera à nouveau complètement transformée.

3.5 Atmosphère terrestre

La Terre est entourée d'une mince couche de gaz, l'**atmosphère**. D'autres planètes ont aussi une atmosphère (voir le chapitre 5); seule celle de la Terre offre une composition, une pression et une densité propices au développement de la vie telle que nous la connaissons. L'atmosphère terrestre n'a pas toujours été aussi accueillante qu'elle l'est aujourd'hui. En effet, l'atmosphère initiale contenait beaucoup de gaz carbonique (CO_2) et de vapeur d'eau (H_2O).

À des températures et une pression élevées, le CO_2 s'est dissous dans l'eau des océans primitifs et s'est ensuite fixé aux roches sédimentaires en formant des carbonates avec d'autres éléments chimiques. L'oxygénation de l'atmosphère terrestre a



été réalisée par la **photosynthèse**, processus par lequel les plantes et certaines bactéries utilisent l'énergie du Soleil pour convertir le CO_2 en hydrates de carbone. Cette réaction chimique libère de l'oxygène et c'est de là que vient l'oxygène de notre atmosphère.

Aujourd'hui, les principaux éléments qui composent l'atmosphère terrestre sont l'azote (N_2) à 78 % et l'oxygène (O_2) à 21 %, produits en grande partie grâce à la respiration des êtres vivants. On trouve aussi des gaz rares, dont l'argon (Ar) à 0,93 %, des traces de CO_2 , d'eau (H_2O) et de méthane (CH_4), quelques polluants et des poussières. Le CO_2 , l' H_2O et le CH_4 sont des gaz dits à **effet de serre**. L'activité humaine fait sensiblement augmenter leur concentration dans l'atmosphère, ce qui contribue à provoquer une élévation de la température moyenne sur Terre.

La pression atmosphérique, qui est de 1 bar au sol, diminue rapidement avec l'altitude (voir l'encadré portant sur le mal des hauteurs). Bien que l'atmosphère de la Terre s'étende jusqu'à une altitude supérieure à 1 600 kilomètres, 90 % de ses 5 millions de milliards de tonnes sont concentrées dans la troposphère (voir plus bas), soit à moins de 13 kilomètres de la surface.

La densité de l'atmosphère diminue aussi en fonction de l'altitude. Ainsi, elle varie de $1,2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ à la surface de la Terre à $1,0 \times 10^{-13} \text{ g/cm}^3$ à 200 kilomètres d'élévation. Cette dernière valeur de densité est si faible qu'on peut presque dire que c'est un vide. C'est même une densité plus faible que celle des meilleurs vides que l'on est en mesure de créer mécaniquement.

L'atmosphère terrestre remplit beaucoup de fonctions qui nous sont très utiles. Tout d'abord, elle absorbe une partie importante des radiations solaires. De plus, elle sert de « thermostat » ou de

Le mal des hauteurs

D'où vient ce malaise que ressentent plusieurs alpinistes ou randonneurs en haute montagne ?

Les manifestations du mal des hauteurs (ou mal d'altitude) vont des maux de tête à l'œdème pulmonaire, en passant par l'insomnie, les hallucinations et la perte d'appétit. On peut même mourir du mal des hauteurs si l'on ne retourne pas assez vite à une altitude plus basse ou si l'on ne soigne pas ses malaises.

Le mal des hauteurs est attribuable à la baisse de pression de l'oxygène dans l'air, en fonction de l'altitude. Cette baisse de pression fait diminuer le taux d'oxygène dans l'air. On dit aussi que l'oxygène se raréfie. S'il y a moins d'oxygène dans l'air, il y a moins d'oxygène disponible pour les échanges entre les poumons et le sang. Les malaises ressentis pendant une ascension trop rapide ou à une altitude trop élevée constituent les mécanismes

de défense mis en branle par le corps humain pour combler le manque d'oxygène.

Les effets de l'altitude se font sentir à partir de 2 500 à 3 000 mètres environ (voir le tableau), ce qui correspond à une altitude d'environ trois fois la hauteur du mont Tremblant, au nord de Montréal. (À titre informatif, le som-

met le plus élevé du Québec, le mont D'Iberville, culmine à 1 652 mètres de hauteur.) La gravité et l'intensité des effets dépendent de chaque personne. Pour diminuer le risque d'être atteint du mal

des hauteurs, il est important de bien s'acclimater, c'est-à-dire de ne pas grimper à de trop hautes altitudes en trop peu de temps. Il faut laisser à son corps le temps de s'ajuster au manque d'oxygène.

Altitude (en mètres)	Quantité d'oxygène disponible
0 (Au sol)	100 %
3 000	69 %
6 000	47 %
8 000	35 %
8 850 (sommet de l'Everest)	30 %

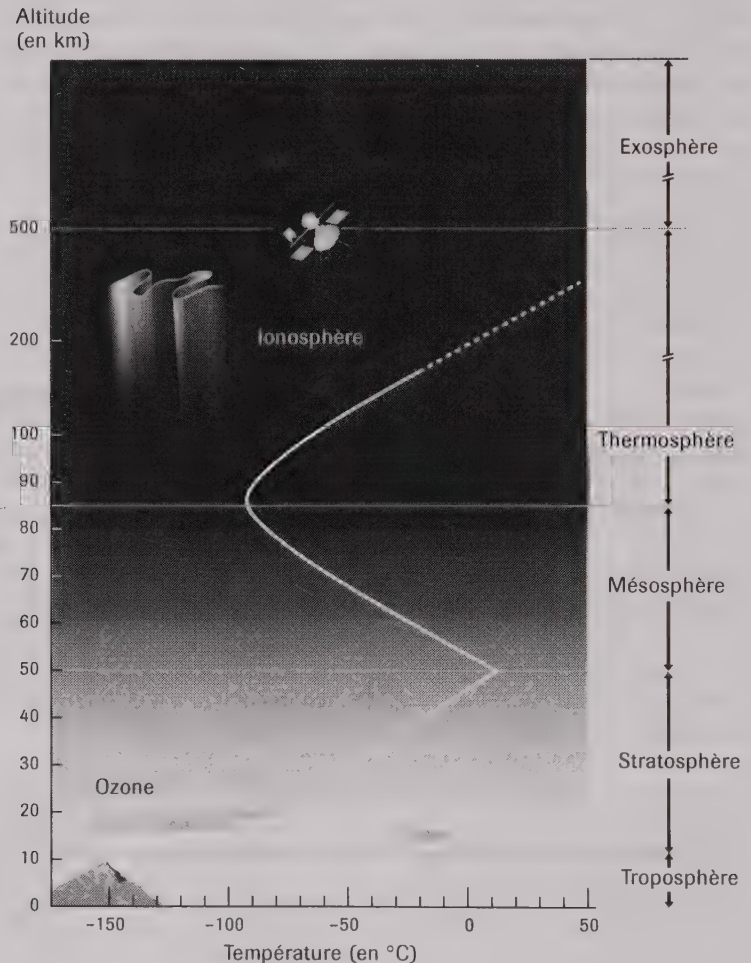


régulateur de température en nous protégeant des hautes températures le jour et des basses la nuit. Enfin, elle consomme des milliers de météorites (voir le chapitre 6) qui autrement nous tomberaient littéralement sur la tête.

L'atmosphère terrestre est divisée en plusieurs couches d'épaisseurs différentes et de propriétés distinctes. La figure 3.5 montre la structure de l'atmosphère terrestre et indique l'altitude et la température associées à chaque couche.

FIGURE 3.5

Les couches de l'atmosphère terrestre. Pour chacune, on trouve l'altitude et la variation de température à l'intérieur.



Troposhère

La troposphère est la partie habitable de l'atmosphère. Son épaisseur augmente des pôles (6 kilomètres) à l'équateur (17 kilomètres), pour une moyenne d'environ 13 kilomètres. La



température de la troposphère décroît graduellement d'environ 6°C par kilomètre d'altitude pour atteindre quelque -60°C à son sommet. La troposphère compte pour 80 % à 85 % de la masse totale de l'atmosphère. L'ensemble des nuages se forment dans cette couche, qui est le siège des événements météorologiques quotidiens tels les vents et les précipitations.

Stratosphère

Directement au-dessus de la troposphère, la stratosphère s'étend jusqu'à une altitude de 50 kilomètres. C'est dans la stratosphère que se trouve la couche d'ozone dont on entend tant parler. Sous l'action du rayonnement solaire ultraviolet de très courte longueur d'onde, les molécules d'oxygène (O_2) sont transformées en ozone (O_3). Cette réaction chimique libère de la chaleur qui provoque une augmentation de la température, laquelle peut atteindre 0°C vers 50 kilomètres d'altitude. L'ozone est essentielle à la pérennité de la vie sur Terre : elle la protège contre les rayons ultraviolets en provenance du Soleil (voir le tableau 2.1 sur les ondes électromagnétiques).

Mésosphère

Dans la mésosphère, dont l'altitude va de 50 kilomètres à 85 kilomètres, la température chute avec l'augmentation de l'altitude et atteint -100°C . Cela en fait la couche la plus froide de l'atmosphère terrestre.

Thermosphère

De 85 kilomètres à 500 kilomètres environ se trouve la thermosphère. La température y croît régulièrement pour atteindre $1\,500^{\circ}\text{C}$ selon l'activité du Soleil. C'est à l'intérieur de cette couche que se trouve l'**ionosphère**. Cette dernière est composée de particules chargées (des ions et des électrons libres), d'où le nom d'**ionosphère**. Elle fut découverte par Guglielmo Marconi (1874–1937) au moment où il tentait de relier l'Europe à l'Amérique

Alors la Terre, la santé, ça va ?

Peu de journées passent sans qu'on ait entendu ou lu une nouvelle à caractère environnemental. Pluies acides, eau contaminée, espèces menacées, trous dans la couche d'ozone, smog urbain, etc., voilà autant de sujets qui préoccupent les environmentalistes. À cela s'ajoutent les inquiétudes quant à l'épuisement potentiel de certaines ressources naturelles non renouvelables et l'introduction d'orga-



nismes génétiquement modifiés (OGM) dans notre alimentation.

Discutez en petits groupes, en classe ou dans un court texte, de l'un ou l'autre des sujets qui préoccupent les spécialistes en environnement (biologistes, écologistes, etc.). Faites une recherche sur le sujet choisi et tentez de présenter plus d'une façon de voir le phénomène. Soumettez quelques suggestions pour que la situation actuelle ne devienne pire ou qu'elle s'améliore.

MATIÈRE À RÉFLEXION



par la radio, sa nouvelle invention. Le physicien s'aperçut que les ondes radio étaient réfléchies sur l'ionosphère et qu'elles pouvaient parcourir des distances considérables. Ce phénomène est rendu possible en raison de la composition particulière de l'ionosphère. En effet, l'ionosphère est principalement constituée d'ions et d'électrons libres qui interagissent fortement avec les ondes radio. C'est aussi dans l'ionosphère que se forment les aurores polaires (voir la section 3.6).

Exosphère

L'exosphère est la couche atmosphérique la plus élevée de l'atmosphère. Aussi appelée **thermosphère externe**, elle commence à environ 500 kilomètres d'altitude et se perd dans l'espace interplanétaire. Au-delà de 10 000 kilomètres, les atomes et les molécules qui constituent la couche (surtout de l'hélium et de l'hydrogène) s'échappent constamment dans l'espace. C'est dans l'exosphère que se trouvent les ceintures de Van Allen (voir la section 3.6).

Propriétés optiques de l'atmosphère

L'atmosphère terrestre comporte de nombreuses propriétés optiques. Elle agit notamment sur la lumière solaire et nous en fait voir les couleurs. Elle fait aussi paraître les astres légèrement plus hauts qu'ils ne le sont en réalité.

La couleur du ciel

Nous avons tous observé que le ciel est bleu le jour et que les couchers de Soleil sont orangés ou rougeâtres. Le phénomène en cause est la diffusion de Rayleigh, du nom du physicien britannique lord John William Strutt Rayleigh (1842–1919). Lorsque la lumière du Soleil atteint l'atmosphère, ses rayons frappent les atomes, les molécules et les poussières, et sont dispersés dans toutes les directions. C'est ce qu'on appelle la **diffusion**. Les longueurs d'onde plus courtes sont plus facilement diffusées que les longueurs d'onde plus longues. Ainsi, le bleu est davantage diffusé que le rouge. En plein jour, quand la distance (d_1) à parcourir par les rayons pour traverser l'épaisseur de l'atmosphère est plus courte (figure 3.6), le bleu est disséminé dans toutes les directions, ce qui donne la couleur caractéristique du ciel. Au coucher et au lever du Soleil, quand cette distance est plus importante (d_2), le bleu n'arrive plus à passer à travers l'atmosphère (il est trop diffusé); cela donne au Soleil sa teinte rougeâtre. Le même phénomène s'applique à tous les astres qui paraissent plus rouges lorsqu'ils sont près de l'horizon.

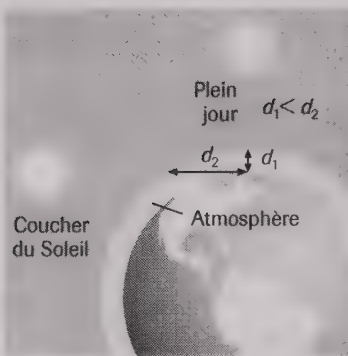


FIGURE 3.6

La distance (d_1) que doit parcourir la lumière solaire du jour pour traverser l'épaisseur de l'atmosphère est beaucoup plus petite que celle qu'elle doit parcourir au coucher du Soleil (d_2).



C'est aussi le phénomène de diffusion qui fait que les nuages sont blancs. Toutes les longueurs d'onde de la lumière solaire y sont dispersées de manière égale par les molécules d'eau des nuages. Il n'y a donc aucune longueur d'onde qui l'« emporte » sur les autres, et la lumière diffusée est blanche.

La position apparente des astres

Les étoiles n'occupent pas exactement la position à laquelle elles semblent être. Cela est attribuable à un phénomène qui fait que, lorsque la lumière des astres pénètre dans l'atmosphère, celle-ci se « courbe » pour donner l'illusion que les astres sont plus hauts qu'ils ne le sont en réalité. Ils paraissent même un peu ovales.

Pour expliquer le phénomène qui fait paraître certains astres légèrement ovales, il faut bien comprendre ce qu'est la **réfraction de la lumière** : lorsque la lumière passe d'un milieu d'une certaine densité à un milieu d'une autre densité, elle change de direction. On dira qu'elle est **réfractée**. La figure 3.7 montre le changement de direction de la lumière à son passage de l'air à du verre. Comme le verre est plus dense que l'air, le rayon se rapproche d'une ligne verticale fictive servant de point de repère. Le phénomène de réfraction explique l'apparence pliée que prend une paille dans un verre d'eau (figure 3.8).

Pour les astres non ponctuels comme le Soleil et la Lune, la déviation des rayons lumineux en provenance du haut de l'astre n'est pas la même que pour ceux du bas de l'astre. Cela s'explique par le fait que la région de l'atmosphère que doivent traverser les rayons du bas est plus dense que celle que doivent traverser les rayons du haut. On observe donc une compression apparente du diamètre vertical de l'astre. Notons qu'il n'y a pas de compression du diamètre horizontal puisque les rayons qui traversent l'atmosphère à la même hauteur sont déviés de la même manière. Le résultat final est que le Soleil et la Lune paraissent très légèrement ovales lorsqu'ils sont bas sur l'horizon.

La réfraction de la lumière est également à l'origine du phénomène qui fait paraître les astres légèrement plus hauts dans le ciel. Sur la figure 3.9, la lumière de l'étoile au zénith n'est pas déviée (réfractée), car elle pénètre directement dans l'atmosphère, sans angle ou presque. Cependant, la lumière provenant de l'étoile à gauche de la figure se réfracte toujours de plus en plus au fur et à mesure qu'elle pénètre dans l'atmosphère. Celle-ci étant de plus en plus dense en s'approchant du sol, la lumière se courbe de façon de plus en plus prononcée. Mentionnons que cet effet de courbure est tout à fait négligeable pour l'astronome amateur.

Densité air < densité verre

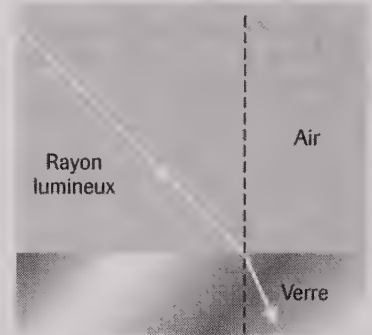


FIGURE 3.7

Un rayon lumineux se propageant dans l'air est réfracté à son passage dans le verre en raison de la différence de densité des deux substances. Ce phénomène s'appelle la réfraction de la lumière.

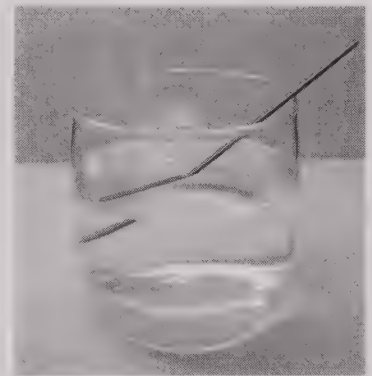


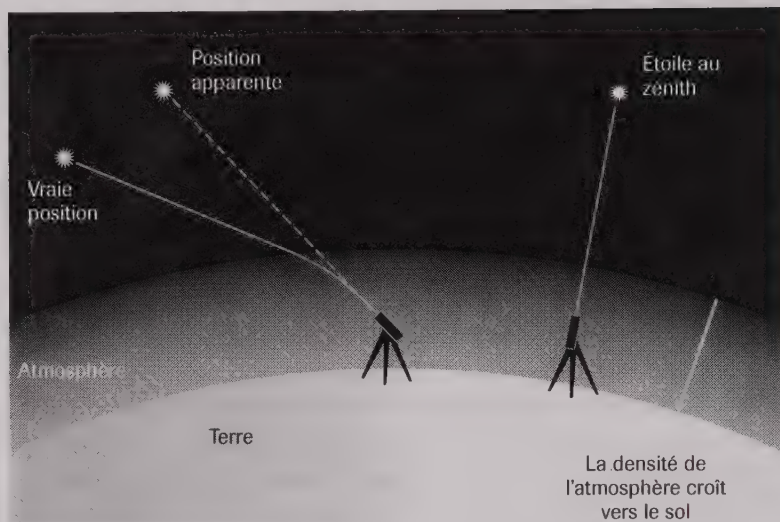
FIGURE 3.8

Phénomène de réfraction dans un verre d'eau



FIGURE 3.9

La position apparente d'une étoile est légèrement différente de sa position réelle en raison de la réfraction de la lumière de l'étoile à son passage dans l'atmosphère. La trajectoire de la lumière est sensiblement courbe; cela est attribuable à la variation graduelle de la densité de l'atmosphère.



La réfraction de la lumière stellaire dans l'atmosphère est également responsable du scintillement des étoiles, qui n'a rien à voir avec les étoiles elles-mêmes. Le scintillement est produit par les déplacements d'air dans l'atmosphère terrestre, phénomène également appelé **turbulence**. La réfraction de la lumière des étoiles sur des poches d'air chaud et d'air froid successives cause des déviations aléatoires des rayons lumineux, ce qui leur donne leur aspect scintillant. Dans le cas des planètes, qui ont des dimensions « perceptibles » par l'œil humain – contrairement aux étoiles qui sont des sources ponctuelles, c'est-à-dire sans dimensions –, les rayons lumineux qu'on perçoit depuis la Terre proviennent de leurs diverses parties et neutralisent mutuellement leurs déviations aléatoires dans l'atmosphère. Ainsi, lorsque vous observez dans le ciel un astre qui ne scintille pas, vous contemplez vraisemblablement une planète, et non une étoile.

3.6 Champ magnétique terrestre

Cela fait déjà près de deux mille ans que l'on se sert de pierres de magnétite (pierre sensible au champ magnétique des aimants) dans des compas de marine et dans les boussoles. Cependant, il a fallu plusieurs siècles avant que l'on comprenne que la force qui fait s'orienter l'aiguille d'une boussole ne vient pas du ciel, mais de la Terre elle-même. Ainsi, on peut dire que la Terre agit comme un aimant et, de façon simplifiée, comme un barreau aimanté. Tout comme celui-ci, la Terre a



un pôle Nord et un pôle Sud magnétiques, et produit un champ magnétique (figure 3.10). Notons toutefois que les pôles magnétiques de la Terre ne coïncident pas avec les pôles géographiques. Le pôle Sud magnétique est au nord, à plus de 10° du pôle Nord géographique, dans l'Arctique canadien, et le pôle Nord magnétique se situe dans l'hémisphère Sud, en Antarctique. Il existe une convention en physique qui stipule que les lignes de champ magnétique sortent du pôle Nord d'un aimant et entrent dans son pôle Sud. Puisque les lignes du champ magnétique terrestre sortent près du pôle Sud de la Terre, on considère que le pôle Nord magnétique est dans l'hémisphère Sud et que le pôle Sud magnétique est dans l'hémisphère Nord. Cependant, dans la plupart des textes portant sur le champ magnétique terrestre, on évite toute confusion en associant le Nord magnétique au Nord géographique et le Sud magnétique au Sud géographique.

La valeur du champ magnétique terrestre est plutôt faible, mais suffisante pour orienter l'aiguille d'une boussole et aider les oiseaux migrateurs, certains insectes, les dauphins et de nombreux autres animaux à s'orienter.

D'où vient le champ magnétique terrestre ?

Un champ magnétique est habituellement produit par un courant, c'est-à-dire par des charges électriques en mouvement : c'est l'effet dynamo. La Terre se comporte à peu près comme une énorme dynamo. Le mouvement plutôt rapide de rotation de la Terre provoquerait des mouvements de charges (ions et électrons) à l'intérieur de la partie fluide du noyau, ce qui induirait un champ magnétique puissant. L'étude du champ magnétique d'autres objets du Système solaire vient appuyer cette hypothèse :

- a) Jupiter tourne sur elle-même en 10 heures (rotation très rapide) et son champ magnétique est très puissant.
- b) La Lune tourne sur elle-même en 27 jours (rotation assez lente) et son champ magnétique est très faible.
- c) Vénus effectue une rotation sur elle-même en 243 jours (rotation très lente) et n'a presque pas de champ magnétique.

Ainsi, l'importance du mouvement de la matière au cœur des objets en rotation dépendrait de la vitesse de rotation même de l'objet et engendrerait un champ magnétique en relation avec la vitesse de rotation. Une autre hypothèse concernant l'origine du champ magnétique est liée à la chaleur qui se dégage du centre de la Terre vers les couches extérieures en

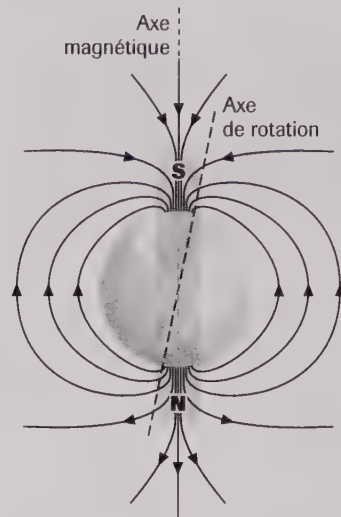


FIGURE 3.10

Le champ magnétique de la Terre s'apparente au champ magnétique produit par un barreau aimanté.



provoquant des mouvements de convection dans le noyau externe, contribuant ainsi au champ magnétique.

La réalité est certainement plus complexe et l'origine du champ magnétique terrestre réside probablement dans une combinaison de ces deux phénomènes et d'autres encore mal compris ou inconnus.

Évolution du champ magnétique

De part et d'autre des dorsales océaniques, là où le plancher avance lentement mais régulièrement depuis des millénaires, on trouve de l'information précieuse sur le passé du magnétisme terrestre. En effet, en analysant le magnétisme des parties durcies du plancher des océans, on remarque des bandes (semblables à un code à barres) de polarité magnétique inversée. D'une bande à l'autre, les pôles magnétiques sont inversés selon une fréquence irrégulière. Ces bandes indiquent qu'il y a eu, au cours des 200 derniers millions d'années, environ 200 renversements des pôles magnétiques ! Les raisons exactes de ces renversements ne sont pas très bien connues. Ils pourraient avoir été causés par exemple par des interactions particulières entre le noyau et le manteau, ou encore par de violentes collisions entre la Terre et des météorites de plusieurs millions de tonnes. Ces collisions auraient neutralisé le champ magnétique en provoquant de fortes turbulences dans les zones liquides de la Terre. La rotation de celle-ci, combinée avec des effets de marée attribuables à la Lune, ferait ensuite réapparaître le champ magnétique dans une autre direction. Quoi qu'il en soit, l'inversion du champ magnétique terrestre est un long processus qui peut s'étendre sur 10 000 ans et qui se produit à intervalles longs de quelques millions d'années.

Sur une plus petite échelle de temps, le champ magnétique se transforme et se déplace à des rythmes qu'on peut presque mesurer quotidiennement. En effet, les pôles magnétiques de la Terre ne sont pas immobiles : ils décrivent de petits cercles tous les 500 ans et parcourent quotidiennement une ellipse qui peut faire déplacer le pôle Nord magnétique à plus de 80 kilomètres de sa position moyenne. La figure 3.11 montre le chemin moyen parcouru par le pôle Nord magnétique depuis 1900. En 2005, il aura quitté le Canada en direction de la Sibérie !

Magnétosphère

On appelle **magnétosphère** la zone du champ magnétique terrestre qui est restreinte par le vent solaire (particules en provenance du Soleil ; voir le chapitre 4). La figure 3.12 reprend

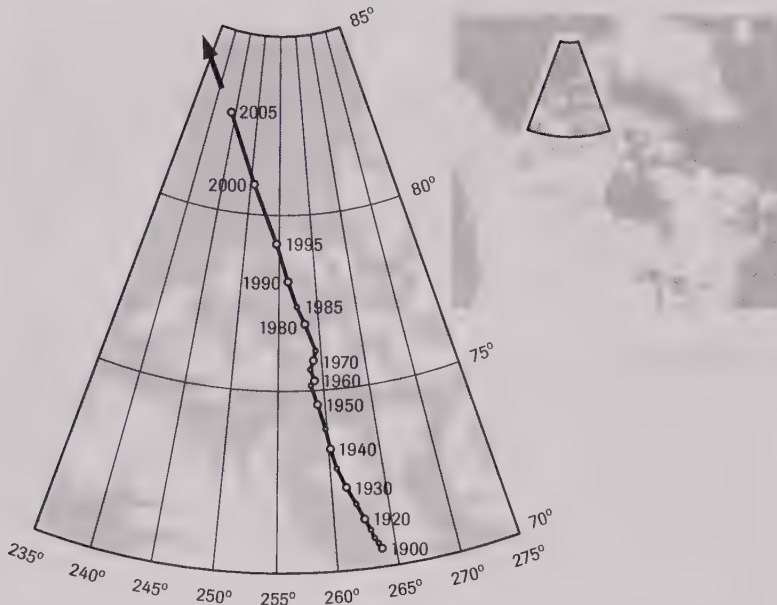


FIGURE 3.11

Le Nord magnétique connaît des fluctuations quotidiennes et se déplace de quelques dizaines de kilomètres chaque année. Actuellement, il quitte le Canada et se dirige vers la Sibérie.

de façon plus réaliste le tracé du champ magnétique présenté à la figure 3.10. La magnétosphère est parfois considérée comme une couche de l'atmosphère. Elle prolonge ainsi l'ionosphère et débute à une altitude de 1 000 kilomètres pour finir à plus de 50 000 kilomètres d'altitude. La magnétosphère protège les êtres vivants de la Terre contre les rayons cosmiques et les particules énergétiques du vent solaire. Ces dernières, lorsqu'elles entrent en interaction avec le champ magnétique terrestre, donnent lieu aux aurores polaires et forment les ceintures de Van Allen.

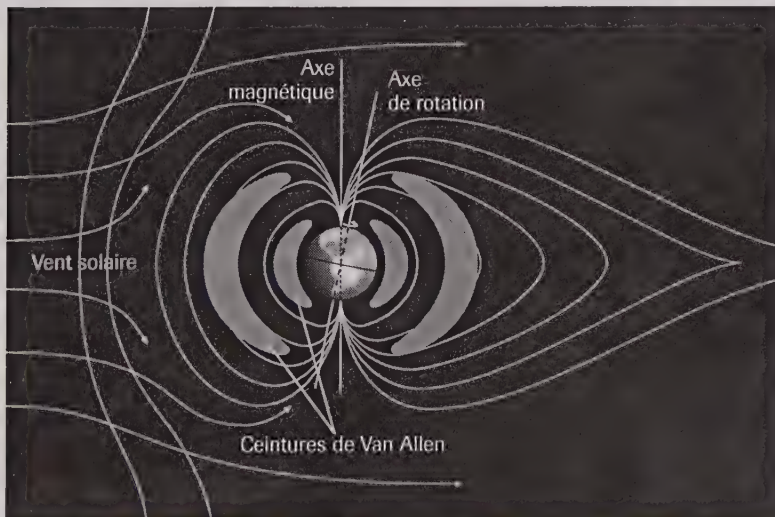


FIGURE 3.12

La partie de la magnétosphère qui fait face au Soleil est limitée par le vent solaire. La magnétosphère inclut les ceintures de Van Allen et est en partie responsable des aurores polaires.

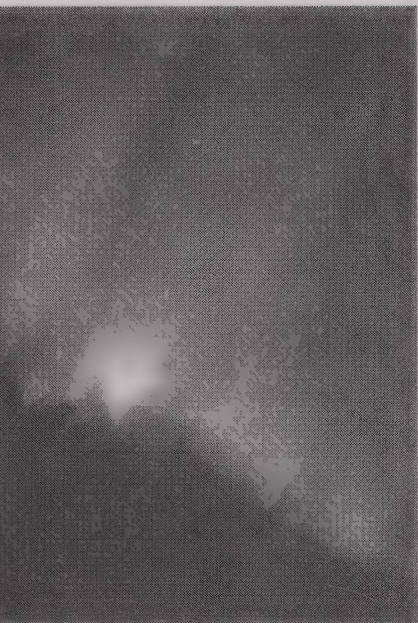


Les ceintures de Van Allen

Dans la magnétosphère, le champ magnétique terrestre capture des particules chargées en provenance du Soleil et produit ainsi deux ceintures de particules autour de la Terre. On a nommé ces ceintures en l'honneur du physicien américain James Alfred Van Allen (né en 1914) qui les a découvertes en 1958 à l'aide du premier satellite américain Explorer I.

Principalement composée de protons, la ceinture intérieure est également constituée d'ions et d'électrons. Elle va de 300 à 1 000 kilomètres d'altitude et peut atteindre jusqu'à 10 000 kilomètres. La ceinture extérieure est surtout composée d'électrons en quantité variable suivant leur disponibilité. Elle s'étend de 10 000 à 40 000 kilomètres d'altitude. Un cosmonaute exposé sans protection aux radiations des ceintures de Van Allen subirait une dose de radiation nettement supérieure à la limite mortelle.

Aurores polaires



Aurore polaire

Le phénomène le plus spectaculaire attribuable au champ magnétique est sans contredit les aurores polaires. On les appelle **aurores boréales** dans l'hémisphère Nord et **aurores australes** dans l'hémisphère Sud. Contrairement à une ancienne croyance populaire, ce phénomène ne résulte pas de la réflexion du Soleil sur les glaces des pôles, mais plutôt de la capture de particules chargées en provenance du Soleil par le champ magnétique terrestre. Une fois prisonnières, ces particules suivent une trajectoire en forme d'entonnoir dans la direction des pôles. Au fur et à mesure que les particules s'approchent de ceux-ci et qu'elles pénètrent dans l'atmosphère, les gaz de l'atmosphère sont ionisés et émettent ensuite de la lumière.

Les aurores se produisent à des altitudes allant de 80 à 1 000 kilomètres et peuvent prendre toutes sortes de formes et de couleurs selon l'intensité et l'énergie des faisceaux de particules solaires et selon le type d'atomes frappés par les particules. C'est ainsi que les aurores apparaissent le plus souvent dans des teintes de vert et de bleu et plus rarement de rouge. Le tableau 3.2 présente les longueurs d'onde et la molécule impliquée pour certaines couleurs d'aurores, ainsi que l'altitude à laquelle elles se produisent.

La forme d'une aurore polaire peut s'apparenter à des draperies ou à des traînées se déplaçant doucement. De plus, il semble que les aurores émettraient même certains sons de hautes fréquences ressemblant à du vent dans des fils ; les



TABLEAU 3.2

Couleurs des aurores polaires

Couleur	Molécule	Longueur d'onde (en nm)	Altitude (en km)
Bleu-violet	Azote	391,4 et 427,8	1 000
Vert	Oxygène	557,7	100-150
Rouge	Oxygène	630,0 et 636,4	150-300

animaux y seraient plus sensibles que l'humain. Le phénomène d'aurore polaire n'est pas unique à la Terre. En effet, on en a également observé dans l'atmosphère de Jupiter et de Saturne.

Observation d'une aurore***En vedette bientôt près de chez vous : aurore boréale !***

Le Canada constitue une place de choix pour l'observation d'aurores boréales, bien que ce soit à l'intérieur des cercles polaires qu'elles sont habituellement visibles. Les aurores peuvent être contemplées toute l'année, lorsque le ciel est noir (pas de Lune ni de pollution lumineuse urbaine) et

sans nuages. Dans l'hémisphère Nord, les aurores se produisent vers le Nord. Elles sont plus fréquentes pendant les périodes d'activité solaire intense (voir le chapitre 4), quand le flux de particules dans le vent solaire est plus élevé.

3.7 Rotation de la Terre

Nous avons tous appris très jeunes que la Terre tourne. Mais comme nous ne ressentons pas les effets de ce mouvement de rotation, comment aurions-nous pu le déduire par nous-mêmes ? Qu'est-ce qui nous laisse croire que la Terre tourne ? Tous les astres vus de la Terre (Lune, Soleil, étoiles, planètes, etc.) ont un mouvement similaire d'une durée d'environ 24 heures qui laisse croire que la Terre est immobile au milieu d'astres qui tournent autour d'elle. Historiquement, l'hypothèse de la Terre immobile a longtemps tenu. Mais elle n'arrivait pas à expliquer certains mouvements de planètes, notamment.

Longtemps, les preuves voulant que la Terre tourne sur elle-même ont été de nature **observationnelle**. La première preuve **mécanique** a été faite en 1851, avec l'expérience du pendule de Foucault, nommé d'après son inventeur, le physicien français Léon Foucault (1819–1868). Elle constitue d'ailleurs la principale preuve de la rotation de la Terre. En effet, un pendule qu'on lâche sans le pousser oscille toujours dans la même direction, dans le même plan. Cette direction est fixe par rapport à l'Univers, c'est-à-dire par rapport aux étoiles lointaines en raison de la première loi de Newton. Cette loi, aussi appelée



FIGURE 3.13

Aux pôles, le plan d'oscillation d'un pendule de Foucault met 24 heures à faire un tour complet par rapport à la Terre. En réalité, c'est la Terre qui se déplace sous le pendule.

loi d'inertie, postule qu'un corps en mouvement ou au repos tend à rester dans son état de mouvement ou de repos tant qu'on n'y applique pas une force externe. Donc, comme la Terre tourne, un pendule oscillant toujours dans la même direction paraît tourner par rapport à la surface de la planète. En réalité, c'est nous qui, avec la Terre, nous déplaçons pendant que le pendule continue son balancement, sans changer de direction (figure 3.13).

Cette expérience ne peut pas être réalisée avec n'importe quel pendule. En effet, pour éliminer le plus possible les effets du frottement au point d'attache du système, il faut fabriquer un immense pendule dont la masse oscillante est assez lourde. Le pendule utilisé par Foucault pour que les Parisiens puissent « voir tourner la Terre » était constitué d'un fil d'acier de 77 mètres de longueur et d'une boule pesant 28 kilos et mesurant 18 centimètres de diamètre! Le pendule mettait 16 secondes pour effectuer un aller-retour, et la direction de son oscillation variait de 2,5 mm à chacun de ces aller-retour.

Le temps que prend un pendule pour faire un tour complet est donné par l'équation suivante :

$$P = 24 \text{ h} / \sin A$$

où P est la période de rotation du pendule ;

A est la latitude du lieu où se déroule l'expérience.

Par exemple, si l'on faisait osciller un pendule de Foucault à Québec, où la latitude est de 47° , nous trouverions : $24 / \sin 47^\circ \approx 33 \text{ h}$. C'est le temps que prendrait le pendule pour faire un tour complet. Aux pôles, on obtiendrait 24 heures et à l'équateur l'infini, c'est-à-dire qu'il n'y aurait aucune rotation du pendule.

Le mouvement de rotation de la Terre est contraire à celui des aiguilles d'une montre, c'est-à-dire qu'elle tourne d'ouest en est. C'est la rotation de la Terre qui fait les jours et les nuits. La durée du jour (24 heures) est basée sur ce mouvement. Aujourd'hui, les astronomes connaissent avec une très grande précision la vitesse de rotation de notre planète. À l'équateur, cette vitesse est d'environ 1 670 km/h, ce qui équivaut à près d'une fois et demie la vitesse du son. Toutefois, elle n'est pas constante. Les variations de la vitesse de rotation de la Terre sont groupées en trois catégories.

- 1 Le **ralentissement séculaire**, attribuable au frottement des marées qui entraîne une diminution de la vitesse de rotation. Cela correspond à une augmentation de la durée du jour de 0,001 64 seconde par siècle, c'est-à-dire environ 1 seconde par 60 000 ans. Le tableau 3.3 présente



la durée du jour estimée pour les 500 millions d'années (Ma) passées et pour les 500 millions d'années à venir. On peut voir également le nombre de jours que compte l'année correspondante.

TABLEAU 3.3

Variation de la longueur des jours et des années au cours des âges

Temps (en Ma)	Longueur du jour (en heures)	Longueur de l'année (en jours)
-500	21,69	404,24
-300	22,61	387,69
-50	23,77	368,81
0	24,00	365,25
50	24,23	361,76
300	25,39	345,27
500	26,31	333,12

- ② La **variation saisonnière**, attribuable au régime des vents, au processus de fonte des glaces aux pôles, etc. Les écarts maximums avec la durée moyenne du jour atteignent +0,0010 s en mars et -0,0011 s en août.
- ③ Les **fluctuations diverses**. Certaines de ces fluctuations semblent avoir pour cause des mouvements de masses à l'intérieur de la Terre. Ces déplacements agissent sur des périodes décennales; tantôt ils ralentissent la rotation, tantôt ils l'accélèrent. Les plus importants écarts observés jusqu'ici sur la durée moyenne du jour ont été de -0,005 s (en 1871) et de +0,002 s (en 1907). Ces fluctuations peuvent toutefois s'accumuler au cours de plusieurs décennies et produire des écarts notables. Il existe aussi des fluctuations irrégulières dont l'origine est mal connue.

3.8 Révolution de la Terre autour du Soleil

La Terre tourne sur elle-même, et tourne aussi autour du Soleil. Les scientifiques appellent **rotation** le mouvement d'un astre qui tourne sur lui-même et **révolution** le mouvement d'un astre qui tourne autour d'un autre astre.

La Terre parcourt ainsi près d'un milliard de kilomètres, dans le sens anti-horaire, pendant sa révolution autour du Soleil. Sa trajectoire est légèrement elliptique, c'est-à-dire qu'elle corres-



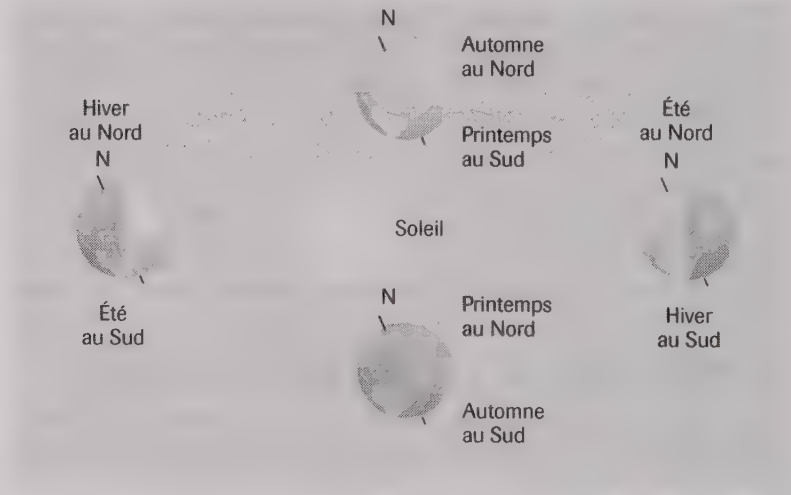
pond à un cercle un peu aplati. Le temps que prend la Terre pour effectuer une révolution est une année, donc 365 jours environ. En fait, l'année bissextile (qui compte 366 jours) revient tous les quatre ans pour pallier le décalage entre le temps réel de révolution et la mesure de 365 jours qu'on utilise.

Les saisons

La première idée qui nous vient à l'esprit lorsqu'on réfléchit à ce qui peut causer les saisons, c'est souvent la variation de la distance entre la Terre et le Soleil au cours de la révolution. À juste titre, nous pouvons supposer que l'orbite elliptique de la Terre, qui entraîne une variation dans la distance Terre-Soleil, est responsable des saisons; ainsi, quand on serait plus proche du Soleil, il ferait plus chaud et quand on en serait plus éloigné, il ferait plus froid. Cependant, si c'était le cas, ce serait l'été en même temps partout sur la Terre, c'est-à-dire à la fois dans l'hémisphère Nord et dans l'hémisphère Sud. Et pourtant, ce n'est pas du tout le cas! Les saisons sont inversées d'un hémisphère à l'autre. En réalité, ce facteur «éloignement du Soleil» influence à peine les saisons. Tout au plus contribue-t-il très légèrement à adoucir les saisons du Nord et à les rendre plus rigoureuses dans le Sud. Le principal facteur à l'origine des saisons est l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre de $23,5^\circ$ par rapport à la perpendiculaire à son plan de révolution autour du Soleil (figure 3.14).

FIGURE 3.14

Au cours de la révolution de la Terre autour du Soleil, la façon dont les rayons frappent tantôt l'hémisphère Nord, tantôt l'hémisphère Sud, marque le cycle des saisons.



Comment l'inclinaison de la Terre est-elle responsable des saisons? Examinons la figure 3.15. Des rayons lumineux (imaginez une lampe de poche) qui frappent une surface perpendicu-

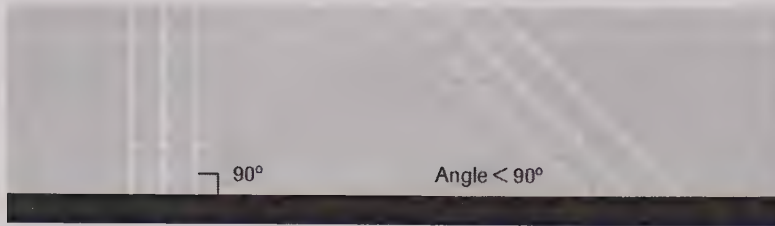


FIGURE 3.15

Une source de lumière fournit une certaine quantité d'énergie par mètre carré, lorsque ses rayons frappent la surface directement. Si la même source est dirigée autrement sur la surface, la quantité d'énergie par mètre carré est moindre.

lairement produisent une certaine quantité d'énergie par mètre carré. Si les mêmes rayons atteignent la surface avec un certain angle, ils produisent la même quantité d'énergie, mais celle-ci se trouve répartie sur une superficie plus grande. Il y a donc moins d'énergie par mètre carré. En hiver, dans l'hémisphère Nord, les rayons du Soleil nous atteignent moins directement qu'en été. C'est ainsi que les rayons d'hiver produisent moins d'énergie par mètre carré au sol. Le Soleil nous semble donc moins chaud. En plus de cette inclinaison des rayons, la durée d'ensoleillement par jour en hiver étant beaucoup plus courte qu'en été, il n'y a vraiment que très peu d'énergie solaire transmise à l'hémisphère Nord durant cette période. Et, pendant ce temps, c'est l'été dans l'hémisphère Sud qui reçoit plus directement le rayonnement solaire.

La description de l'origine des saisons ne nous informe pas sur les sources des variations de climat entre différentes régions d'un même hémisphère ou sur les différences de climat d'un hémisphère à l'autre. Par exemple, bien que les régions fortement peuplées du Québec soient situées à des latitudes équivalentes à Vancouver, au Sud de la France ou au Nord de l'Italie, les hivers y sévissent avec plus de rigueur, les accumulations de neige étant plus importantes et les températures moyennes plus faibles. Ces différences sont attribuables à une série de facteurs qui n'ont rien à voir avec la position de la Terre dans l'espace : présence d'un océan ou d'une chaîne de montagnes à proximité, direction des vents dominants, etc.

L'orbite elliptique de la Terre, quant à elle, a pour effet de faire varier légèrement la quantité d'énergie solaire reçue selon que la Terre est à son point le plus rapproché du Soleil (périhélie) ou à son point le plus éloigné (aphélie). Contrairement à ce que notre intuition pourrait nous laisser croire, c'est quand c'est l'hiver dans l'hémisphère Nord (et donc l'été dans l'hémisphère Sud) que la Terre est à peu près le plus proche du Soleil. Théoriquement, cela aurait pour effet de diminuer la rigueur de nos hivers et, à l'opposé, de tempérer nos étés. Toutefois, comme la « personnalité » climatique d'une région est fortement liée à sa position géographique, nous ne percevons pas vraiment ces effets.

Il est intéressant de noter que la plus basse température jamais enregistrée (jusqu'à ce jour) sur la Terre a été mesurée en Antarctique, à la base russe Vostok II, le 21 juillet 1983 : $-89,2^{\circ}\text{C}$. À l'inverse, la température la plus élevée jamais notée sur la Terre est de $57,7^{\circ}\text{C}$. Elle a été observée en Libye, en 1922.

La température moyenne à la surface de la Terre se situe aux environs de 10°C . Les scientifiques s'inquiètent en ce moment d'une augmentation sensible de la température moyenne sur la planète. L'augmentation des rejets de gaz à effet de serre contribuerait à élever la température sur Terre. La moyenne de 10°C peut également être perturbée par des événements ponctuels tels que l'éruption d'un gros volcan. Par exemple, les cendres et les poussières rejetées par l'éruption du volcan Pinatubo (figure 3.16), aux Philippines, en 1991, ont provoqué à elles seules une baisse temporaire de $0,5^{\circ}\text{C}$ de la température moyenne de la Terre.



FIGURE 3.16

Éruption du volcan Pinatubo, aux Philippines, en 1991

À nos latitudes, l'année est divisée en quatre saisons :

- le printemps, qui débute à l'équinoxe vers le 21 mars ;
- l'été, qui débute au solstice vers le 21 juin, le jour le plus long ;
- l'automne, qui débute à l'équinoxe vers le 23 septembre ;
- l'hiver, qui débute au solstice vers le 22 décembre, le jour le plus court.

Le mot **équinoxe** signifie que la longueur du jour est égale à la longueur de la nuit. Le mot **solstice**, quant à lui, vient du latin *solstitium*, de *sol*, « soleil », et *store*, « s'arrêter » : « arrêt du Soleil ».



Soleil de minuit

Les cercles arctique et antarctique, aussi appelés **cercles polaires**, correspondent aux parallèles de latitude nord ou sud ($\pm 66,5^\circ$) où l'on peut observer le Soleil de minuit l'été autour du 22 juin (il ne se couche pas) ou aucun Soleil pendant au moins 24 heures, autour du 22 décembre (le Soleil ne monte pas au-dessus de l'horizon). À l'extrême, aux pôles, on observe une seule longue journée de six mois et une aussi longue nuit.

3.9 Autres mouvements de la Terre

Si l'on vous disait que les saisons seront inversées dans 13 000 ans, le croiriez-vous? En effet, dans 13 000 ans, les saisons seront inversées par rapport à aujourd'hui en raison du changement graduel de direction de l'axe de rotation de la Terre par rapport aux étoiles. Celui-ci, tout en gardant une inclinaison de $23,5^\circ$, décrit lentement un cône, dont il fait le tour complet en 26 000 ans (figure 3.17).

On appelle ce mouvement **précession des équinoxes**. Il est attribuable à des forces attractives exercées par le Soleil et la Lune. On fait souvent la comparaison entre ce mouvement et celui d'une toupie. Les conséquences de ce mouvement sont:

- 1 Une différence de 20 minutes entre l'année sidérale et l'année tropique. L'année sidérale (voir la section 3.10) est le temps pris par la Terre pour effectuer une révolution

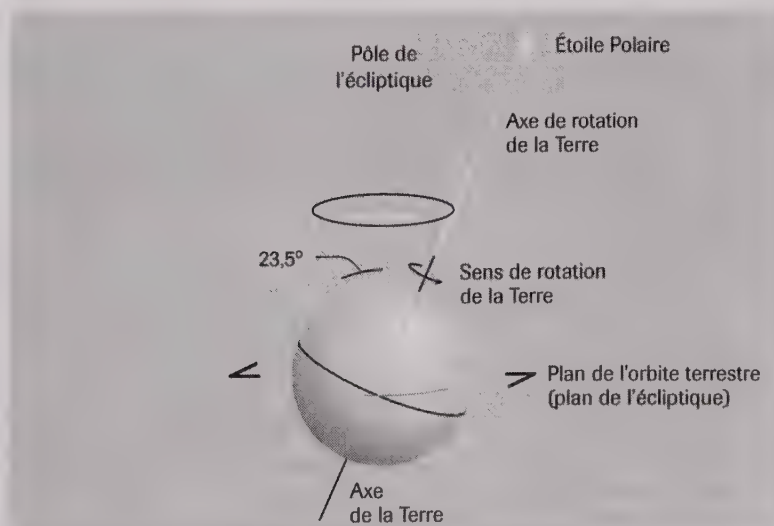


FIGURE 3.17

Précession des équinoxes: l'axe de rotation de la Terre décrit un cône sur une période de 26 000 ans.



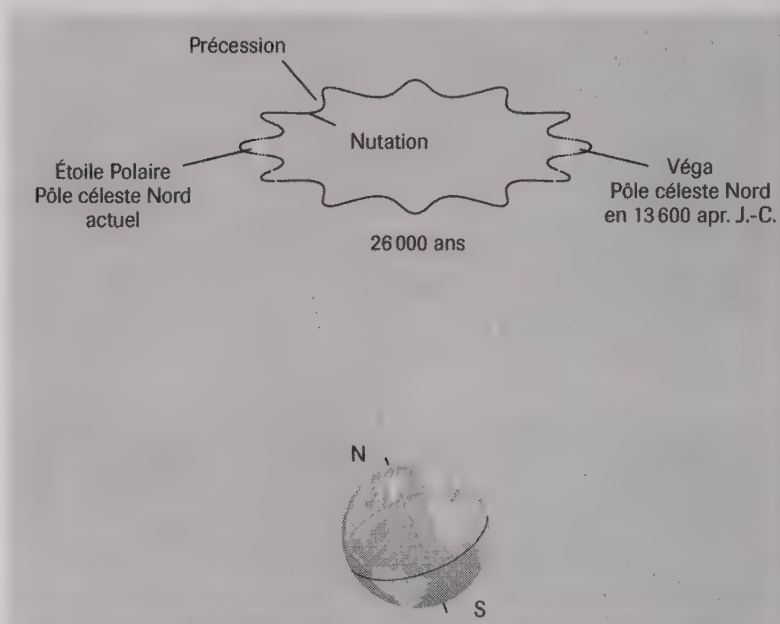
complète autour du Soleil, par rapport aux étoiles fixes. L'année tropique est définie comme l'intervalle de temps entre deux équinoxes du printemps consécutifs. Notre calendrier est basé sur la valeur de l'année tropique.

- ② Le déplacement des pôles célestes. En l'an 13 600, ce ne sera plus l'étoile Polaire qui indiquera le nord mais plutôt Véga, dans la constellation de la Lyre.
- ③ Dans 13 000 ans, l'axe de la Terre occupera une position symétrique à celle qu'il occupe actuellement. Les saisons seront inversées, ce qui produira des variations climatiques par rapport à aujourd'hui.

Un autre mouvement, appelé **nutaton**, se superpose à la précession sous forme de petites ondulations (figure 3.18). La période de ce mouvement est de 18,6 ans. La nutation est attribuable à l'inclinaison de l'orbite de la Lune autour de la Terre.

FIGURE 3.18

Le mouvement de nutation consiste en de petites oscillations de l'axe de rotation se superposant à la précession.



Malgré tous ces mouvements, la Terre nous paraît bien immobile. En réalité, elle se déplace autour du Soleil à une vitesse moyenne de 29,78 km/s (107 000 km/h), qui lui-même se déplace à une vitesse de 220 km/s (792 000 km/h) autour du centre de la Galaxie, se déplaçant elle-même par rapport aux autres galaxies, etc. Nous ne sommes donc jamais à la même place dans l'Univers. Nous sommes de grands voyageurs errant dans le cosmos à bord de notre vaisseau spatial, la Terre.



3.10 Définitions du temps

Le temps est une notion fondamentale aussi bien en science que dans la vie de tous les jours. Si, dans notre vie quotidienne, nous n'avons pas besoin d'une définition très précise du temps, il en va tout autrement en science et surtout en astronomie. Voici les quelques définitions du temps les plus utilisées en astronomie.

Temps sidéral

Le temps sidéral est un temps mesuré par rapport aux étoiles lointaines et fixes. Par exemple, le jour sidéral est le temps que met la Terre pour effectuer une rotation complète par rapport à une étoile, soit 23 h 56 min 4 s (figure 3.19).

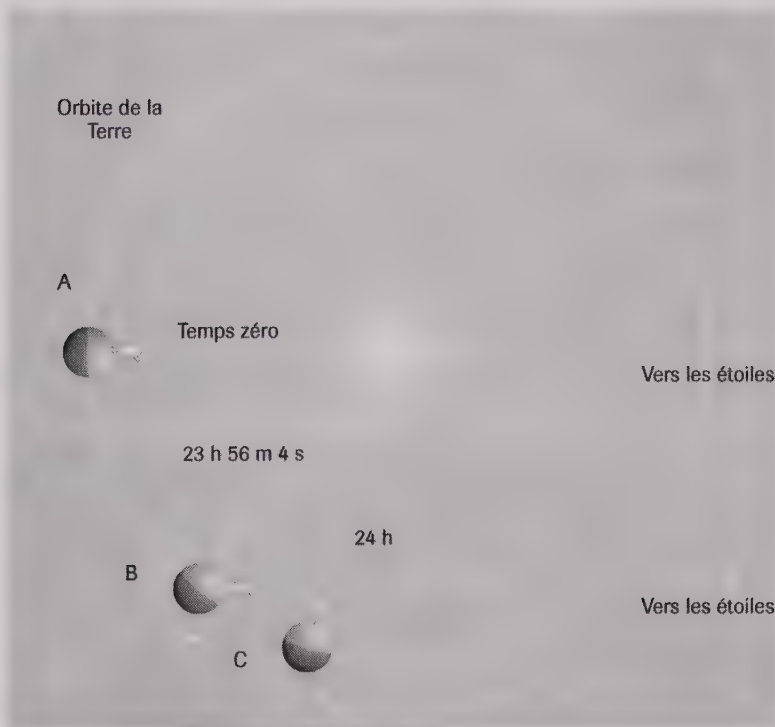


FIGURE 3.19

On note une différence de 4 minutes entre le jour sidéral et le jour solaire (ou jour vrai). En B, un jour sidéral a été exécuté et, en C, un jour solaire a été exécuté. Noter que le déplacement de la Terre autour du Soleil a été grandement exagéré sur la figure. En réalité, la Terre parcourt moins d'un degré en une journée.

Supposons qu'au moment où une étoile brillante comme Sirius passe juste au-dessus de la pointe d'un sapin dans votre cour, vous actionniez un chronomètre. Le lendemain, quand Sirius repasserait exactement au même endroit, le chronomètre indiquerait 23 h 56 min, soit la durée du jour sidéral. Cette



définition du temps est très utile aux astronomes. De la même façon, une année sidérale est le temps mis par la Terre pour effectuer une révolution complète autour du Soleil.

Temps solaire ou temps vrai

Le temps solaire (ou temps vrai) est un temps mesuré en référence au mouvement apparent du Soleil. Ainsi, un jour solaire vrai est la durée qui sépare deux passages consécutifs du Soleil à un méridien de référence. Dans l'exercice précédent, si l'on remplaçait Sirius par le Soleil, on trouverait la durée du jour solaire vrai. Cette durée varie d'un jour à l'autre en raison de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre et de l'excentricité de son orbite. Le temps mesuré va de 23 h 46 min à 24 h 14 min.

Temps solaire moyen

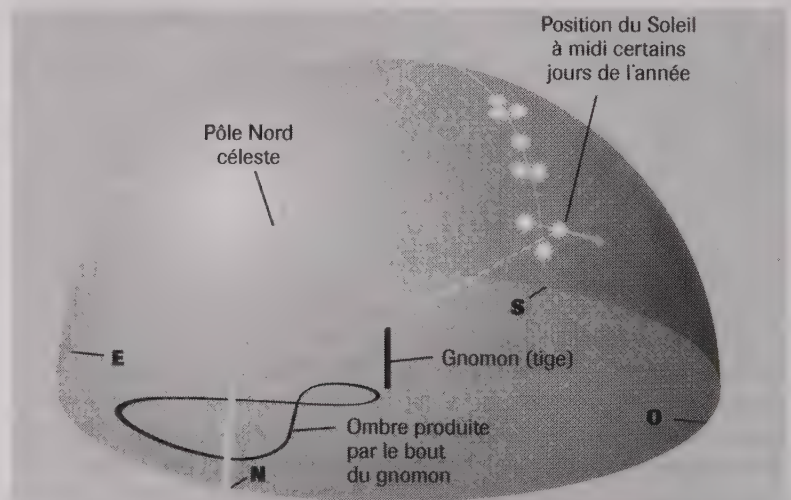
Dans le cas du jour solaire, on trouve le jour solaire moyen en faisant une moyenne des jours solaires vrais. C'est donc un temps fictif, mais il a l'avantage de nous donner des jours égaux de 24 heures.

Équation du temps

L'équation du temps est la différence entre le temps solaire moyen (TSM) et le temps solaire vrai (TSV) ($E = TSM - TSV$). Comme le jour solaire vrai varie, la différence varie elle aussi et peut s'élever jusqu'à 16 minutes. On peut représenter graphiquement l'équation du temps par un **analemme** (figure 3.20). L'analemme est un graphique en forme de «8» que l'on trouve

FIGURE 3.20

L'analemme est le tracé de l'ombre produite par la tige verticale d'un cadran solaire. Sa position est donnée par la différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai.





sur plusieurs cadrans solaires. C'est l'ombre faite par la tige verticale du cadran solaire à midi au cours d'une année qui définit son tracé.

Temps légal

Le temps légal est le temps solaire moyen dans chacun des fuseaux horaires du monde. La Terre est divisée en 24 fuseaux de 15° , chacun ayant son propre temps. La figure 3.21 illustre les fuseaux horaires du Canada.

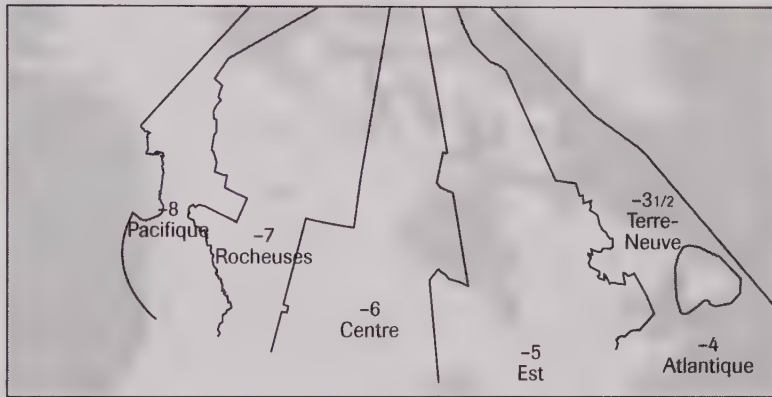


FIGURE 3.21

Le Canada compte six fuseaux horaires.

Temps universel

Le temps universel (TU) est le temps légal (TL) à 0° de longitude, c'est-à-dire à Greenwich, en Grande-Bretagne. Ce temps est utilisé surtout par les astronomes, les aviateurs et les navigateurs, qui ont ainsi tous le même temps de référence.

Au Québec, le TU est égal au TL + 5 h en hiver et au TL + 4 h en été.

Jour julien

Pour faciliter certains calculs, les astronomes utilisent souvent le jour julien (JJ). Celui-ci est évalué indépendamment de tout calendrier en retenant comme unité de mesure le jour et la fraction de jour. Le jour 0 a commencé au début de la période julienne, soit le 1^{er} janvier 4713 av. J.-C. Le jour julien commence à 12 h TU au lieu de 0 h comme les jours normaux. Par exemple, le 5 janvier 2002 à 0 h TU, nous étions au 2 452 279,5 JJ.

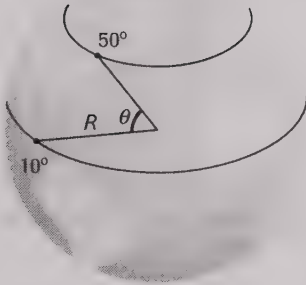


FIGURE 3.22

Pour calculer la distance entre deux points sur la surface terrestre, il faut connaître l'angle sous-tendu par les rayons respectifs des deux points.

3.11 Distance entre deux points sur la Terre

Pour calculer la distance entre deux points sur la Terre, on peut appliquer une méthode semblable à celle qu'Ératosthène a employée pour mesurer la circonférence de la Terre.

Définissons d'abord le **radian**. On définit un angle en radians comme étant l'arc sous-tendu par l'angle divisé par le rayon du cercle :

$$\theta = \text{arc}/\text{rayon} = d/R$$

Connaissant l'angle entre deux points sur la Terre et le rayon R , nous pouvons trouver la distance d entre ces deux points, en nous servant de la règle de trois. Par exemple, transformons d'abord l'angle θ (thêta) en radians (figure 3.22) :

$$360^\circ \rightarrow 2\pi$$

$$40^\circ \rightarrow \theta$$

On trouve θ en faisant : $40^\circ \times 2\pi/360^\circ = 2\pi/9 = 0,7 \text{ rad}$

Puis, utilisons la définition du radian pour trouver la distance entre les deux points :

$$d = R\theta = 6\,367 \text{ km} \times 0,7 = 4\,457 \text{ km}$$

C'est à partir de ce procédé qu'on définit le mille marin comme étant égal à l'arc sous-tendu par une minute d'arc :

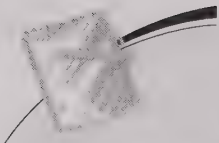
$$d = (1/60)^\circ \times (2\pi/360^\circ) \times 6\,367 \text{ km}$$

$$d = 1\,852 \text{ m} = 1,852 \text{ km} = 1 \text{ mille marin}$$

Le nœud, unité de vitesse employée dans la navigation, a été défini à partir de cette définition du mille marin. Un nœud représente une vitesse de 1 mille marin à l'heure.

3.12 Coordonnées célestes

La position des corps célestes est déterminée de la même manière qu'une position à la surface de la Terre, c'est-à-dire avec une longitude et une latitude, en degrés. Rappelons qu'un degré peut être divisé en 60 minutes (') et que chaque minute peut être divisée en 60 secondes ("). Toutefois, il existe plusieurs systèmes différents de coordonnées célestes. Et à chaque système est associé un vocabulaire bien particulier.



Coordonnées célestes et initiation au cherche-étoiles
(voir page 94)



Coordonnées équatoriales

Les coordonnées équatoriales sont les plus employées en astronomie. Dans ce système de coordonnées, l'**ascension droite** (α) est l'équivalent céleste de la longitude (figures 3.23 et 3.24). Elle est mesurée en heures, minutes et secondes. Notons que le temps sidéral est égal à l'ascension droite d'un astre sur le méridien d'où on le mesure.

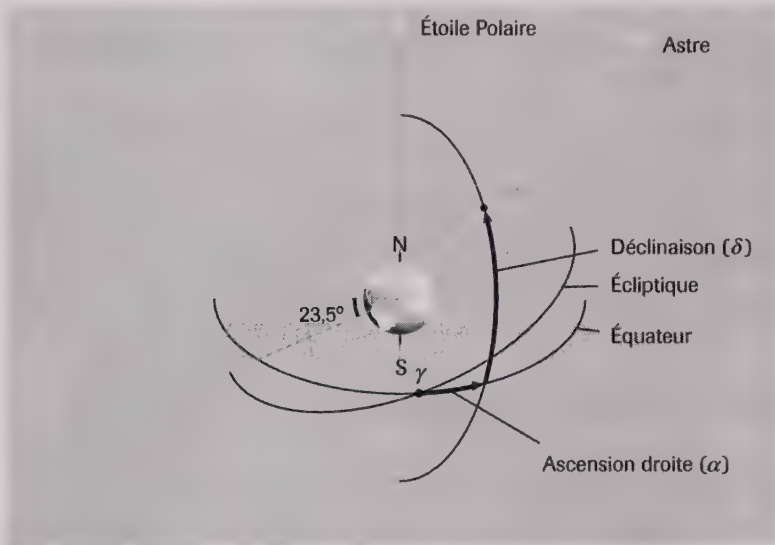


FIGURE 3.23

Représentation des repères servant à déterminer les coordonnées équatoriales

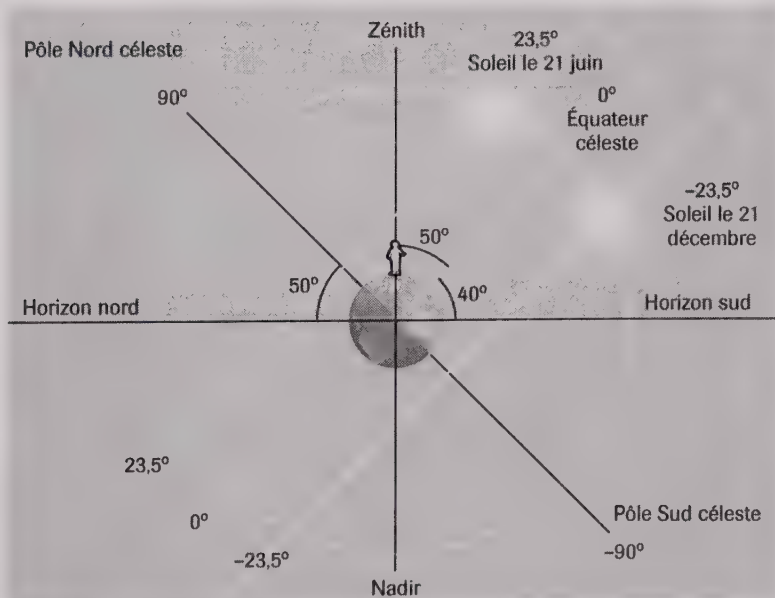


FIGURE 3.24

Sphère céleste telle qu'observée depuis Sept-Îles, à 50° de latitude



La **déclinaison** (δ) est l'équivalent céleste de la latitude. Elle se mesure en degrés, minutes et secondes. Ainsi, la déclinaison de l'équateur céleste est 0° , celle du pôle Nord céleste 90° et celle du pôle Sud céleste -90° .

Le **zénith** est le point le plus haut de la voûte céleste en un lieu donné. On peut aussi dire que c'est la perpendiculaire à cet endroit.

Le **nadir** est le point opposé au zénith.

L'**écliptique** est le grand cercle de la trajectoire du Soleil sur la sphère céleste.

Le **point vernal** (γ) est l'endroit où l'ascension droite est 0 h. Il correspond à l'intersection de l'équateur céleste et de l'écliptique sur la sphère céleste (à l'endroit dans le ciel où se trouve le Soleil à l'équinoxe du printemps). C'est l'équivalent céleste du méridien de Greenwich sur la Terre.

Il existe d'autres systèmes de coordonnées plus simples mais plus régionaux. En voici un qui est fort simple à utiliser.

Coordonnées horizontales

Dans ce système de coordonnées (figure 3.25), l'observateur indique la position d'un astre par rapport à son lieu d'observation, comme s'il était au centre de l'Univers. La position de l'astre est définie par deux angles : la hauteur et l'azimut.

La **hauteur** (ou altitude) est l'angle calculé entre l'horizon et la hauteur de l'astre (mesurée directement à la verticale de l'horizon). La mesure peut aller de 0° à 90° . Il est intéressant de noter que la hauteur du pôle céleste (étoile Polaire) au-dessus de l'horizon correspond à la latitude du lieu où l'on se trouve.

L'**azimut** nous dit de combien de degrés il faut se tourner pour apercevoir l'objet. Il se compte sur l'horizon et peut prendre des valeurs de 0° à 360° qu'on mesure du nord vers l'est (sens rétrograde ou sens des aiguilles d'une montre). Le Nord a un azimut de 0° , l'Est de 90° , le Sud de 180° et l'Ouest de 270° .

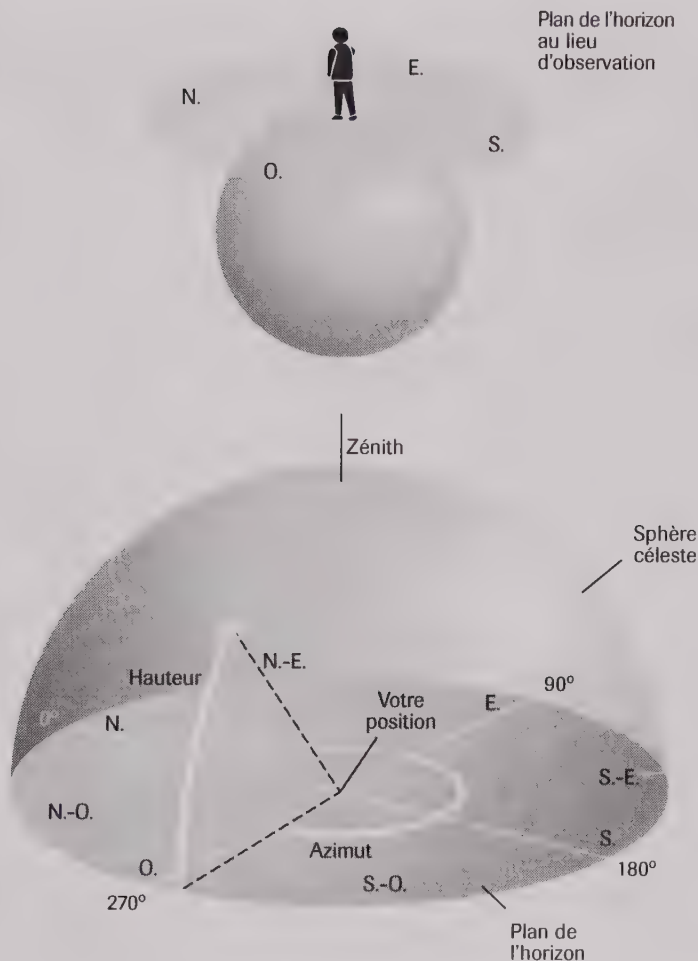


FIGURE 3.25

Dans les coordonnées horizontales, la valeur en angle de la hauteur et de l'azimut permettent à l'observateur de connaître la position d'un astre.

Questions de révision

1. Vrai ou faux ?
 - a) La Terre est parfaitement ronde.
 - b) La Terre agit comme un aimant parce qu'il y a des courants de charges électriques dans ses parties fluides.
 - c) Les aurores boréales sont des reflets du Soleil sur les glaces polaires.
 - d) Les pôles magnétiques sont fixes et immobiles.
2. Parmi les phénomènes suivants, lequel prouve que la Terre tourne sur elle-même ?
 - a) L'expérience du pendule de Foucault
 - b) L'ombre circulaire projetée sur la Lune pendant une éclipse lunaire
 - c) L'ombre circulaire projetée sur le Soleil pendant une éclipse solaire
 - d) La forme des aurores boréales
 - e) Le phénomène des saisons
3. Comment s'appelle le mouvement de la Terre sur elle-même en 24 heures ?
 - a) Déclinaison
 - b) Translation



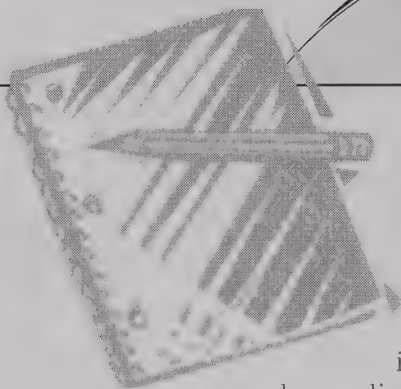
- c) Rotation
 - d) Précession
 - e) Nutation
4. Comment s'appelle le mouvement en forme de cône qu'exécute l'axe de rotation de la Terre par rapport aux étoiles fixes en 26 000 ans ?
- a) Déclinaison
 - b) Translation
 - c) Rotation
 - d) Précession
 - e) Nutation
5. Comment s'appelle le temps associé à la durée d'une rotation complète de la Terre sur elle-même par rapport au Soleil ?
- a) Temps légal
 - b) Temps moyen
 - c) Temps universel
 - d) Temps sidéral
 - e) Temps vrai
6. Comment s'appelle le temps légal mesuré à Greenwich ?
- a) Temps légal
 - b) Temps moyen
 - c) Temps universel
 - d) Temps sidéral
 - e) Temps vrai
7. Comment s'appelle le temps associé à la durée d'une rotation complète de la Terre sur elle-même par rapport aux étoiles ?
- a) Temps légal
 - b) Temps moyen
 - c) Temps universel
 - d) Temps sidéral
 - e) Temps vrai
8. Comment s'appelle le temps donné par nos horloges ?
- a) Temps légal
 - b) Temps moyen
 - c) Temps universel
 - d) Temps sidéral
 - e) Temps vrai
9. Dans quelle partie de l'atmosphère vivons-nous ?
- a) Troposphère
 - b) Stratosphère
 - c) Ionosphère
 - d) Exosphère
10. Sur quelle partie de l'atmosphère les ondes radio se réfléchissent-elles ?
- a) Troposphère
 - b) Stratosphère
 - c) Ionosphère
 - d) Exosphère
11. Dans quelle partie de l'atmosphère trouve-t-on la couche d'ozone ?
- a) Troposphère
 - b) Stratosphère
 - c) Ionosphère
 - d) Exosphère
12. Pourquoi le Soleil paraît-il rouge orangé lorsqu'il se couche ?
- a) Parce que l'atmosphère réfracte les rayons lumineux.
 - b) Parce que l'atmosphère laisse passer plus facilement le bleu que le rouge.
 - c) Parce que l'atmosphère laisse passer plus facilement le rouge que le bleu.
 - d) Parce que l'atmosphère absorbe 25 % des radiations en provenance du Soleil.
 - e) Parce que l'atmosphère est teintée de rouge.
13. Les ceintures de Van Allen sont :
- a) Des champs magnétiques terrestres très intenses.
 - b) Des prolongements de l'atmosphère composés de noyaux, d'électrons et d'atomes ionisés captés par le champ magnétique terrestre.
 - c) Synonymes d'aurores boréales.
 - d) Des particules chargées qui produisent de la lumière par ionisation en pénétrant dans l'atmosphère.
 - e) Des météorites qui tournent autour de la Terre.
14. Pourquoi le ciel est-il bleu ?
- a) Parce que l'atmosphère réfracte les rayons lumineux.
 - b) Parce que l'atmosphère diffuse plus le bleu que le rouge.
 - c) Parce que l'atmosphère diffuse plus le rouge que le bleu.
 - d) Parce que l'atmosphère absorbe 25 % des radiations en provenance du Soleil.
 - e) Parce que l'atmosphère est teintée de rouge.



- 15.** Les aurores boréales sont :
- a) Des champs magnétiques terrestres très intenses.
 - b) Des prolongements de l'atmosphère composés de noyaux, d'électrons et d'atomes ionisés captés par le champ magnétique terrestre.
 - c) Synonymes de ceintures de Van Allen.
 - d) Des particules chargées qui produisent de la lumière par ionisation en pénétrant dans l'atmosphère.
 - e) Des météorites qui tournent autour de la Terre.
- 16.** Quel est l'âge de la Terre ?
- a) 10 000 ans
 - b) 5,6 millions d'années
 - c) 4,6 milliards d'années
 - d) 10 milliards d'années
 - e) 15 milliards d'années
- 17.** Quelle est la méthode employée pour mesurer l'âge de la Terre ?
- 18.** Que signifie le mot **équinoxe** ?
- 19.** Quelles sont les trois couches internes de la Terre ?
- 20.** Quelle est la principale cause des saisons ?
- 21.** Écrire le mot correspondant aux définitions suivantes :
- a) Équivalent de la latitude sur la sphère céleste.
 - b) Équivalent de la longitude sur la sphère céleste.
 - c) Le point le plus haut de la voûte céleste.
 - d) Le Greenwich céleste.
- 22.** À quel moment de l'année le Soleil est-il le plus haut au-dessus de l'horizon ?
- 23.** Sur quelle couche de la Terre flottent les continents ?
- 24.** Par quel moyen pouvons-nous sonder les profondeurs de la Terre ?
- 25.** Quelle est l'origine de la chaleur dans la croûte terrestre ?
- 26.** Que signifie la demi-vie d'un élément radioactif ?
- 27.** Dans quelle couche de l'atmosphère se trouve la plus grande partie de la masse totale de l'atmosphère ?
- 28.** Nommez les deux principaux éléments présents dans l'atmosphère terrestre.
- 29.** Quelle est la propriété de l'atmosphère qui donne l'illusion que les astres sont plus hauts qu'ils ne le sont en réalité ?
- 30.** Au pôle Nord, quelle est la durée de la plus longue « nuit » ?
- 31.** Quelle est la hauteur (en degrés) au-dessus de l'horizon de l'étoile Polaire aux endroits suivants :
- a) Montréal ?
 - b) Val-d'Or ?
 - c) Mexico ?
- 32.** Placez en ordre croissant d'altitude les différentes couches de l'atmosphère terrestre (stratosphère, ionosphère, troposphère et mésosphère).
- 33.** Quelle serait la période de rotation du pendule de Foucault aux endroits suivants ?
- a) Montréal
 - b) Val-d'Or
 - c) Mexico
- 34.** Si initialement nous avons 400 kilogrammes d'uranium 238, combien en restera-t-il :
- a) au bout de 4,5 milliards d'années ?
 - b) au bout de 9 milliards d'années ?



ACTIVITÉ



Coordonnées célestes et initiation au cherche-étoiles

Dans cette activité, vous serez initiés au cherche-étoiles et vous vous familiariserez avec les coordonnées célestes étudiées à la section 3.12.

Pour réaliser cette activité, vous devez disposer d'un cherche-étoiles qui comporte une règle mobile graduée en degrés¹. Une lecture sur cette règle vous donne la déclinaison (δ) de l'objet qui vous intéresse. Vous trouverez au dos du cherche-étoiles les explications pour les autres mesures ou lectures pouvant être réalisées.

- 1 On appelle **étoiles circumpolaires** ou **constellations circumpolaires** les étoiles ou les constellations qui, pour un observateur à une latitude donnée, ne se couchent jamais, c'est-à-dire qu'elles sont toujours au-dessus de l'horizon.

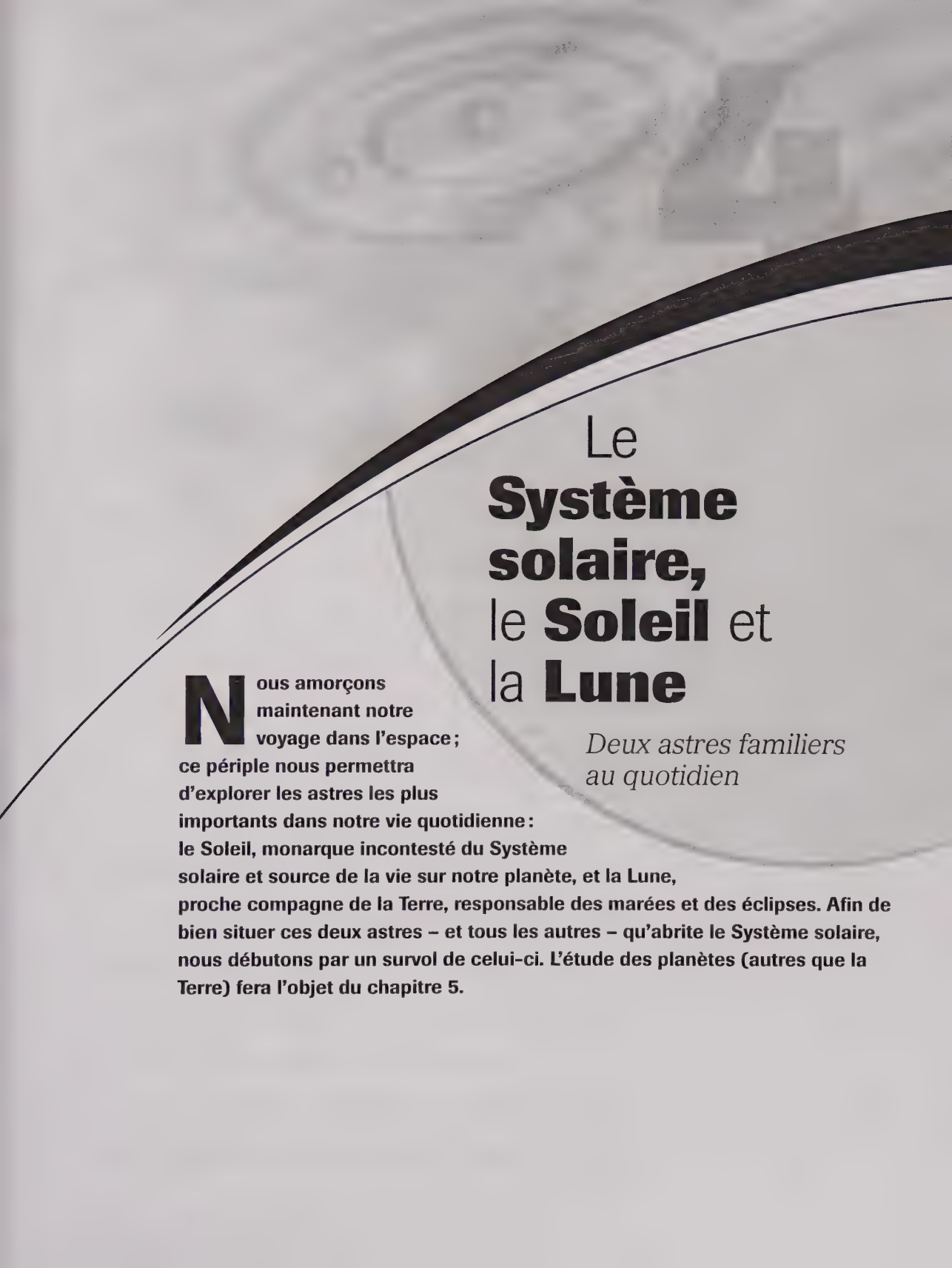
Sur le cherche-étoiles, trouver trois constellations circumpolaires.

- 2 Placez le cercle mobile du cherche-étoiles de telle sorte qu'il montre la carte du ciel visible, ce soir, à 22 h 00.
 - i) Quelle constellation se trouve au zénith ?
 - ii) Quelles constellations se lèvent (horizon est) ?
 - iii) Quelles constellations se couchent (horizon ouest) ?
- 3 À quelle heure le Soleil s'est-il levé aujourd'hui ? À quelle heure se couchera-t-il ?
- 4 À quelle heure l'étoile Arcturus, dans la constellation du Bouvier, s'est-elle levée aujourd'hui ? À quelle heure se couchera-t-elle ?
- 5 Dans quelle constellation (ou près de quelle constellation) le Soleil se trouve-t-il en ce moment ?
- 6 Trouvez l'ascension droite α et la déclinaison δ des étoiles suivantes :
 - i) Arcturus (dans le Bouvier)
 - ii) Sirius (dans le Grand Chien)
 - iii) Véga (dans la Lyre)
 - iv) Capella (dans le Cocher)

1. Vous pouvez vous procurer un cherche-étoiles de ce type dans la plupart des librairies ainsi que dans les boutiques spécialisées dans la vente de télescopes.



- 7 Indiquez dans quelle constellation se trouve chacune des planètes suivantes, si leurs coordonnées sont :
 - i) Mars 16 h 10 -22° 50 m
 - ii) Jupiter 18 h 30 -22° 23 m
 - iii) Saturne 05 h 10 +20° 49 m
- 8 Trouvez votre « vrai » signe astrologique en cherchant la constellation dans laquelle se trouvait le Soleil le jour de votre naissance. Comparez votre réponse avec votre signe astrologique officiel.



Le **Système solaire,** le **Soleil** et la **Lune**

Nous amorçons maintenant notre voyage dans l'espace ; ce périple nous permettra d'explorer les astres les plus importants dans notre vie quotidienne : le Soleil, monarque incontesté du Système solaire et source de la vie sur notre planète, et la Lune, proche compagne de la Terre, responsable des marées et des éclipses. Afin de bien situer ces deux astres – et tous les autres – qu'abrite le Système solaire, nous débutons par un survol de celui-ci. L'étude des planètes (autres que la Terre) fera l'objet du chapitre 5.

*Deux astres familiers
au quotidien*

**DANS LES PAGES QUI SUIVENT,
VOUS APPRENDREZ À :**

- Connaître les principales composantes du Système solaire.
- Distinguer une planète d'une étoile.
- Décrire les classifications de planètes.
- Distinguer les différentes configurations de planètes.
- Décrire le mouvement rétrograde des planètes.
- Connaître les différentes couches et les principales caractéristiques du Soleil.
- Énoncer les caractéristiques des taches solaires.
- Décrire l'activité énergétique du Soleil et en établir la source.
- Indiquer les principales caractéristiques de la Lune.
- Décrire les mouvements de la Lune et leurs conséquences.
- Distinguer les différentes couches internes de la Lune.
- Reconnaître les principaux éléments de la surface de la Lune.
- Distinguer les étapes de l'évolution de la Lune.
- Énoncer et analyser les diverses théories portant sur l'origine de la Lune.



4.1 Le Système solaire

Le Système solaire comprend, outre le Soleil, les planètes et leurs lunes, les comètes et les astéroïdes, les poussières interplanétaires et les particules éjectées du Soleil qui forment le vent solaire. Officiellement, on reconnaît neuf planètes dans le Système solaire. Pour avoir le statut de planète, un objet céleste doit être en révolution autour du Soleil et posséder une masse assez importante.

Nous indiquons qu'il y a « officiellement neuf planètes », car, depuis le début des années 90, les techniques d'observation et de détection d'objets situés au-delà de Neptune et de Pluton (8^e et 9^e planètes respectivement du Système solaire) ont connu une progression fabuleuse, ce qui laisse croire à certains astronomes que la découverte d'un objet de la taille de Pluton (2 300 kilomètres de diamètre) pourrait survenir d'une année à l'autre. Par exemple, en l'an 2000, on a découvert un objet de 900 kilomètres de diamètre au-delà de l'orbite de Neptune, baptisé **Varuna**. Un peu plus tard, l'étude du Système solaire profond par la Nasa a permis d'identifier deux objets d'environ 1 000 et 1 200 kilomètres de diamètre respectivement nommés **Ixion** et **Quaoar**. Pour que ces objets soient comptés parmi les planètes du Système solaire, il suffirait que les astronomes décrètent que leur taille est suffisamment importante.

Dans cette région de l'espace, désignée **ceinture de Kuiper**, du nom de l'astronome américain d'origine néerlandaise Gerard Pieter Kuiper (1905–1973), on estime à 70 000 le nombre de corps célestes de diverses dimensions, dont plus de 400 ont été identifiés à ce jour. Ce sont tous des objets très difficiles à voir, car ils sont froids, ce qui veut dire qu'ils rayonnent peu (leur rayonnement est surtout dans l'infrarouge) et que, étant très éloignés du Soleil, ils reçoivent peu de lumière et, par conséquent, réfléchissent peu. Il reste donc beaucoup à faire avant de connaître tout ce qui peut s'y cacher. Éventuellement, des corps célestes tels que Varuna, Ixion et Quaoar seront peut-être considérés comme des planètes. La course à la découverte d'une dixième planète est toujours présente.

Il ne faut pas confondre la ceinture de Kuiper, située au-delà des orbites de Neptune et de Pluton, avec la ceinture d'astéroïdes qui se trouve entre les orbites de Mars et de Jupiter, bien que les objets qui les composent soient de même nature. Le tableau 4.1 comporte la liste des planètes (avec leur symbole) dans l'ordre croissant de leur distance du Soleil. On y a



inséré la ceinture d'astéroïdes et la ceinture de Kuiper pour compléter l'information. Les distances sont données en **unités astronomiques (UA)**, une UA étant égale à la distance moyenne Terre-Soleil, soit près de 150 millions de kilomètres.

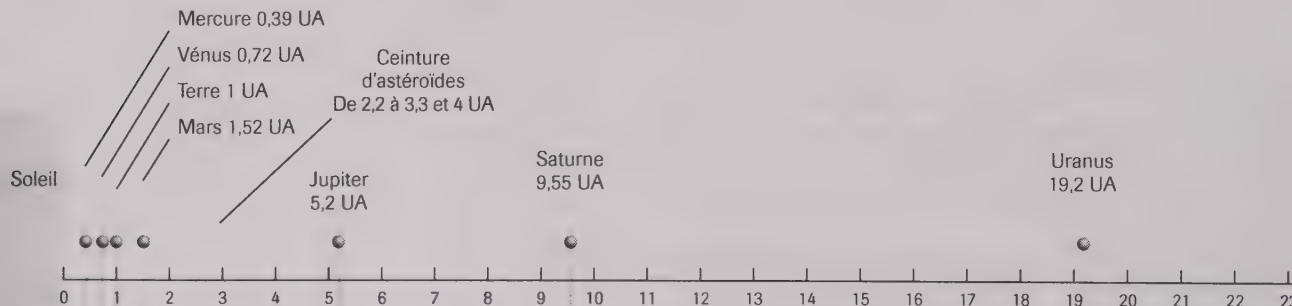
TABLEAU 4.1

Planètes en ordre croissant de distance par rapport au Soleil

Planète	Symbole	Distance moyenne du Soleil (en UA)
Mercure	☿	0,39
Vénus	♀	0,72
Terre	♁	1
Mars	♂	1,52
Ceinture d'astéroïdes		De 2,2 à 3,3 et 4
Jupiter	♃	5,2
Saturne	♄	9,55
Uranus	♅	19,2
Neptune	♆	30,1
Pluton	♇	39,3
Ceinture de Kuiper		De 30 à 100

FIGURE 4.1

Représentation à l'échelle de la distance à laquelle les planètes tournent autour du Soleil. Noter la variation de la position de Pluton dont l'orbite très elliptique la fait parfois déclasser Neptune au titre de 8^e planète du Système solaire.





La figure 4.1 présente, à l'échelle, la distance au Soleil pour chaque objet du tableau 4.1, sauf la ceinture de Kuiper. On remarque que Pluton s'éloigne et se rapproche du Soleil le long de son orbite de forme elliptique. Nous dirons que Pluton a une orbite très **excentrique**, ou très allongée.

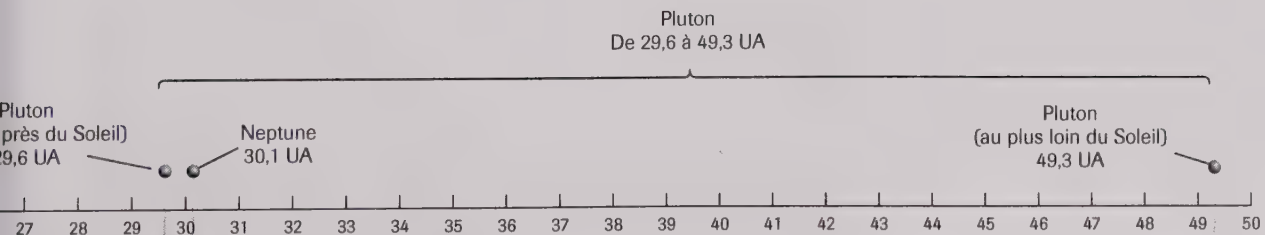
Au-delà de la ceinture de Kuiper, aux confins du Système solaire, à des milliers d'UA du Soleil, se trouverait le nuage de Oort. Cette immense région a été nommée ainsi en hommage à celui qui en prédit l'existence en 1950, l'astronome néerlandais Jan Hendrik Oort (1900–1992). Selon le scientifique, ce nuage constituerait un bassin important de comètes de longue période (voir le chapitre 6 pour plus d'information sur les comètes). On croit que plusieurs millions de comètes et de débris issus de la formation du Système solaire s'y trouveraient. L'existence de ce nuage n'est encore qu'une théorie, les objets étant beaucoup trop éloignés et trop petits pour avoir été observés.

Pour retenir l'ordre des planètes

Pour retenir l'ordre des planètes plus facilement, on peut employer la phrase suivante qui indique la première lettre de chaque planète :

« *Mon Vieux Tu M'As Jeté Sur Une Nouvelle Planète* »

Dans cette phrase, le « A » de « As » nous rappelle où se situe la ceinture d'astéroïdes.



L'orbite de Pluton étant très excentrique, elle fait parfois passer celle-ci à l'intérieur de l'orbite de Neptune.

*Une UA est égale à la distance Terre-Soleil, soit près de 150 000 000 km.



Planète ou étoile ?

Comment faire la différence entre une étoile et une planète dans le ciel ?

Pour ne pas confondre une planète avec une étoile, il faut d'abord se rappeler qu'une **planète** est un corps froid qui ne produit pas lui-même de lumière visible. On dit qu'il est **non auto-lumineux**. Ainsi, nous voyons les planètes grâce à la réflexion des rayons solaires sur leur surface ou même sur leur atmosphère.

Une **étoile**, quant à elle, est un corps gazeux brûlant qui puise son énergie

des réactions thermonucléaires se produisant en son cœur. C'est un corps **auto-lumineux**.

L'astronome amateur peut facilement distinguer une étoile d'une planète dans le ciel, puisque cette dernière, contrairement à une étoile, ne scintille pas. (L'origine du scintillement est expliquée dans la section 3.5 qui porte sur l'atmosphère terrestre.)

4.2 Les planètes : mouvements, classification et observation

Mouvements des planètes

Les planètes tournent toutes autour du Soleil à peu près dans le même plan (figure 4.2). Cela veut dire que, vu de profil, leur plan orbital est plutôt semblable à celui de la Terre. Mercure et Pluton, avec des angles d'inclinaison de 7° et de 17° respectivement, ont les orbites les plus inclinées de toutes les planètes. Sur la Terre, on appelle **zodiaque** la bande dans le ciel dans laquelle se déplacent le Soleil, la Lune et toutes les planètes (sauf Pluton). Au centre du zodiaque se trouve la trajectoire du Soleil dans son mouvement apparent autour de la Terre. Cette trajectoire est appelée **écliptique**. Les planètes suivent donc approximativement la trajectoire du Soleil dans le ciel, le long de l'écliptique, dans le zodiaque.

Toutes les planètes tournent autour du Soleil dans le sens direct, c'est-à-dire dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, ou sens anti-horaire. Cela vient de la façon dont le Système solaire s'est formé, il y a près de 5 milliards d'années. Cependant, les planètes ne tournent pas toutes à la même vitesse sur leur orbite autour du Soleil. La vitesse orbitale des planètes diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'astre. En effet, la force gravitationnelle responsable du mouvement de rotation diminue avec le carré de la distance entre la planète et le Soleil. Plus la force est faible, plus la vitesse orbitale est faible. Ainsi, Mercure est la planète dont le mouvement autour du Soleil est le plus rapide et Pluton le plus lent.

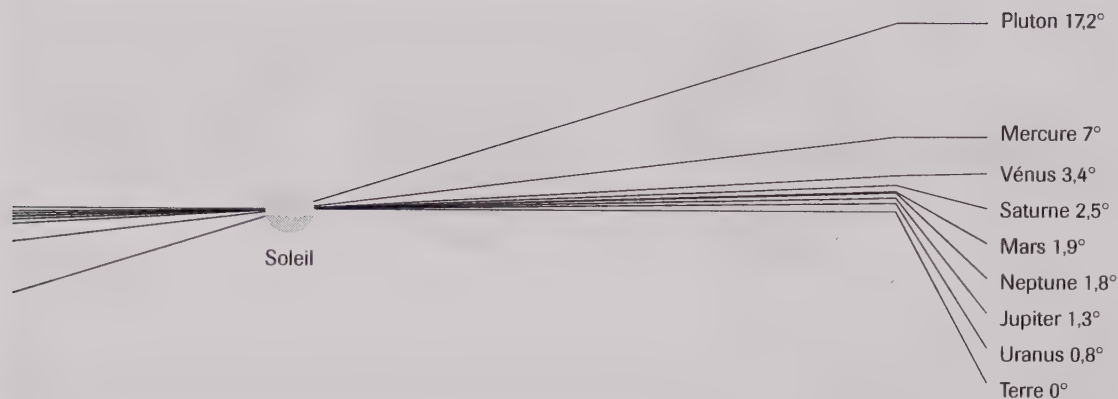


FIGURE 4.2

Les plans de l'orbite des planètes sont dans la plupart des cas très voisins de celui de la Terre. C'est Pluton qui, de loin, présente le plan d'orbite le plus incliné.

Classification des planètes

Les planètes sont classées en deux catégories, selon leur composition chimique.

Les **planètes telluriques** sont Mercure, Vénus, la Terre et Mars. Elles sont composées d'un noyau métallique et d'une croûte rocheuse, ce qui leur donne une densité assez élevée (environ cinq fois la densité de l'eau). Les planètes telluriques possèdent peu ou pas de satellites et se distinguent par leur taille assez petite et leur relative proximité du Soleil.

Les **planètes joviennes** sont Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Elles sont toutes beaucoup plus grosses que la plus importante planète tellurique (la Terre), beaucoup plus éloignées du Soleil, beaucoup moins denses (de 0,7 à 1,8 fois la densité de l'eau) et possèdent de nombreux satellites. Leur composition chimique est très proche de celle du Soleil, avec une grande quantité d'hydrogène et d'hélium. Ces planètes n'ont pas de croûte. On croit qu'elles possèdent un petit noyau métallique et rocheux, entouré d'une épaisse couche de glaces, à son tour entourée d'une importante couche d'hydrogène et d'hélium gazeux. Cependant, il n'y a pas de frontière définie entre chaque couche des planètes joviennes.

Pluton, la plus lointaine et la plus petite des planètes du Système solaire, n'appartient à aucune catégorie. Sa composition est souvent associée à celle de Ganymède, l'un des satellites de Jupiter.

La figure 4.3 illustre les dimensions relatives des planètes du Système solaire. À cette échelle, on perçoit difficilement la courbure du Soleil. Si l'on avait voulu dessiner celui-ci en

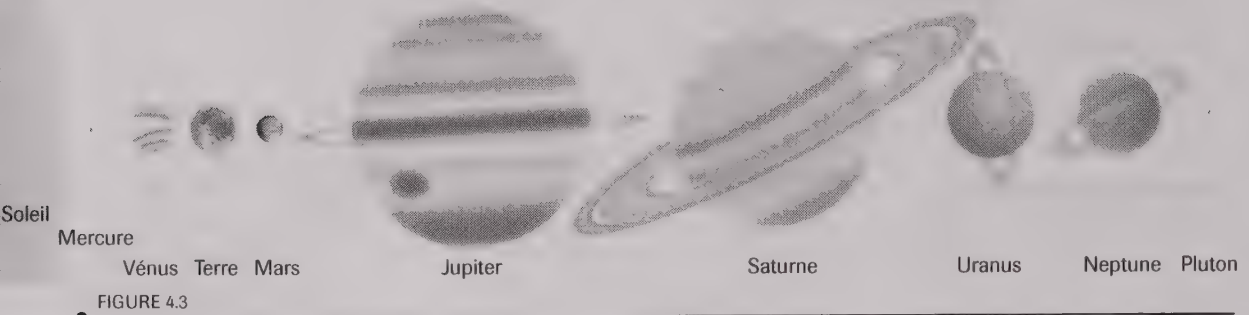


FIGURE 4.3

Représentation à l'échelle de la taille des neuf planètes du Système solaire. À cette échelle, le Soleil est tellement grand qu'on perçoit à peine sa courbure sur l'illustration. S'il était représenté en entier, il aurait un diamètre de près de 30 centimètres.

entier, son diamètre aurait été de près de 30 cm ! Rappelons qu'une étude plus détaillée des planètes du Système solaire est présentée au chapitre 5.

Alors que la classification tellurique-jovienne est réalisée à partir de caractéristiques physiques, on peut également classer les planètes selon la position de leur orbite dans le Système solaire, par rapport à la Terre. Ainsi, on appelle **planètes intérieures** les planètes dont l'orbite se trouve à l'intérieur de celle de la Terre. Mercure et Vénus sont donc des planètes intérieures. À l'inverse, on désigne **planètes extérieures** les planètes dont l'orbite se trouve à l'extérieur de celle de la Terre. C'est le cas des six autres planètes : Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton.

Observation des planètes

Les planètes visibles à l'œil nu sont Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Très tôt, les premiers astronomes les ont observées et ont consigné leurs déplacements dans le ciel par rapport aux autres étoiles. En général, nuit après nuit, les planètes se déplacent dans le sens direct (sens contraire des aiguilles d'une montre) dans le ciel. C'est ce mouvement, en combinaison avec les déplacements apparents du Soleil et de la Lune, qui avait fait croire aux anciens que la Terre était fixe au centre de l'Univers, car tout semble tourner autour de celle-ci. Toutefois, l'observation attentive de soir en soir des planètes permet de constater des irrégularités dans la direction de leur mouvement. Par exemple, Mars semble parfois revenir sur ses pas durant quelques semaines, puis reprendre son chemin normalement dans le sens direct. Ce mouvement étrange, qui peut rappeler celui d'une boucle, s'appelle **mouvement**



rétrograde (figure 4.4). Toutes les planètes présentent un mouvement rétrograde à un moment ou un autre. Quelle explication les Anciens ont-ils tenté de donner à ce phénomène ? Ptolémée, comme nous avons vu au chapitre 1, a tenté d'expliquer ce mouvement en tenant pour acquis qu'il était bel et bien réel. Mais c'est Copernic qui, le premier, trouva la bonne explication, à savoir que le recul des planètes n'est qu'une illusion attribuable au mouvement propre de la Terre et à celui de la planète observée. Mars, comme les planètes extérieures, parcourt son orbite plus lentement que la Terre qui en vient à la «rattrapper» dans sa course autour du Soleil. La position de la planète observée dans le ciel ne suit donc pas une trajectoire rectiligne. En réalité, tout se passe comme si nous étions en train de doubler une voiture sur une autoroute : au moment du dépassement, la voiture dépassée semble reculer. C'est ce qui arrive, en quelque sorte, avec la planète observée.

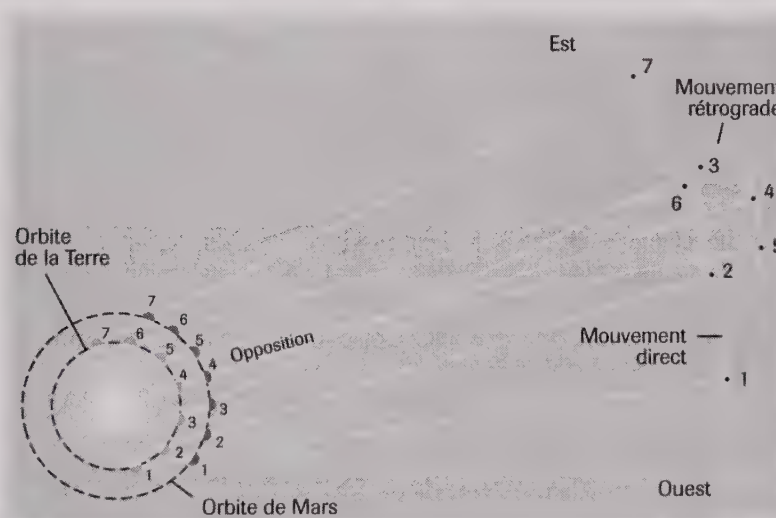


FIGURE 4.4

Mars, comme toutes les planètes extérieures, se déplace plus lentement que la Terre autour du Soleil. Cela résulte en un mouvement rétrograde apparent qui donne l'impression que les planètes inversent leur course.

En astronomie, un vocabulaire particulier sert pour décrire certaines positions bien précises des planètes par rapport au Soleil et à la Terre. On emploie les mots **opposition**, **quadrature**, **élongation** et **conjonction**. La connaissance de ces mots et la compréhension de ce qu'ils signifient sont très importantes pour quiconque tente de repérer les planètes et de comprendre leur mouvement. Voici d'abord les principales configurations des planètes extérieures, puis les configurations des planètes intérieures.



FIGURE 4.5

Selon la position qu'occupe une planète par rapport à la Terre et au Soleil, son observation sera plus ou moins aisée. Les configurations principales planète-Soleil-Terre sont différentes selon que la planète observée est *a)* extérieure ou *b)* intérieure.

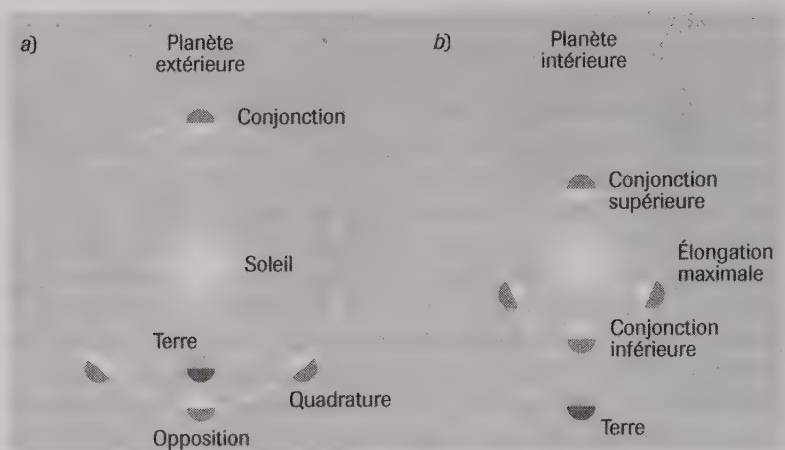


TABLEAU 4.2

Oppositions de Mars, de Jupiter et de Saturne, de 2003 à 2010

Planète	Année	Date
Mars	2003	29 août
	2005	7 nov.
	2007	25 déc.
	2010	30 janvier
	2012	4 mars
Jupiter	2003	2 février
	2004	4 mars
	2005	4 avril
	2006	5 mai
	2007	6 juin
	2008	9 juillet
	2009	15 août
	2010	21 sept.
Saturne	2002	18 déc.
	2004	1 ^{er} janvier
	2005	14 janvier
	2006	28 janvier
	2007	11 février
	2008	24 février
	2009	9 mars
	2010	22 mars

Planètes extérieures

Opposition

Une planète extérieure est en **opposition** (figure 4.5a) lorsqu'elle est alignée avec la Terre et le Soleil, et que la Terre se trouve entre les deux. À son opposition, une planète extérieure est visible toute la nuit. Opposée au Soleil, elle se lève au coucher de celui-ci et se couche au lever. C'est pour cette raison, et parce qu'elle est à sa position la plus rapprochée de la Terre, que c'est le meilleur moment pour l'observer. De plus, la planète en opposition se trouve au méridien à minuit¹. Le tableau 4.2 donne les dates des oppositions de Mars, de Jupiter et de Saturne jusqu'en 2010.

Quadrature

Une planète extérieure est en **quadrature** (figure 4.5a) lorsqu'elle forme un angle droit avec la Terre et le Soleil.

Conjonction

Une planète extérieure est en **conjonction** (figure 4.5a) lorsqu'elle est alignée avec la Terre et le Soleil, et que le Soleil est situé entre la Terre et la planète. Dans ce cas, elle est à peu près impossible à observer, parce qu'elle est derrière le Soleil, et qu'il fait jour sur Terre à ce moment. Elle se trouve au méridien à midi.

1. L'expression «être au méridien» ou «passer au méridien» signifie que l'objet observé est vis-à-vis du méridien (mesure de la longitude) sur lequel se trouve l'observateur. Lorsqu'un astre passe au méridien, il culmine, c'est-à-dire qu'il se trouve au point le plus élevé de sa trajectoire apparente.



Planètes intérieures

Élongation maximale

Une planète intérieure est à sa plus grande **élongation** ou à son **élongation maximale** (figure 4.5b) lorsque l'angle entre la planète et le Soleil est à son maximum. L'élongation maximale peut atteindre 47° pour Vénus et 28° pour Mercure. C'est le meilleur moment pour les observer. Pendant la plus grande élongation est, Vénus apparaît au télescope comme une minuscule réplique de la Lune au premier quartier. Vénus peut alors se coucher jusqu'à quatre heures après le Soleil dans les meilleures conditions. On dit à ce moment que Vénus est « **étoile** » **du soir**. Elle est « **étoile** » **du matin** et se lève avant le Soleil au moment de sa plus grande élongation ouest. Le tableau 4.3 donne les dates des élongations maximales de Vénus jusqu'en 2011.

Conjonction inférieure

Une planète intérieure est en **conjonction inférieure** (figure 4.5b) lorsqu'elle est alignée avec la Terre et le Soleil et qu'elle se situe entre ceux-ci. À ce moment, la planète se trouve devant le Soleil et est donc très difficile à observer. Exceptionnellement, sous des conditions appropriées, on peut voir Vénus ou Mercure passer devant le disque solaire.

Conjonction supérieure

Une planète intérieure est en **conjonction supérieure** (figure 4.5b) lorsqu'elle est alignée avec la Terre et le Soleil, et que le Soleil est situé entre la Terre et la planète. Comme dans le cas de la conjonction pour les planètes extérieures, la planète est derrière le Soleil, donc presque impossible à observer.

TABLEAU 4.3

Élongations maximales de Vénus, de 2003 à 2011

Année	Date	Position
2003	11 janvier	47° O.
2004	30 mars	46° E.
2004	18 août	46° O.
2005	4 novembre	47° E.
2006	25 mars	47° O.
2007	9 juin	45° E.
2007	29 octobre	46° O.
2009	15 janvier	47° E.
2009	6 juin	46° O.
2010	20 août	46° E.
2011	9 janvier	47° O.

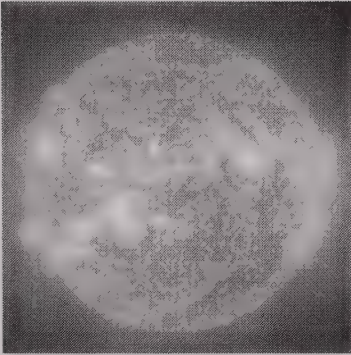
La plupart des sept jours de la semaine ont été nommés à partir des astres les plus anciennement connus du Système solaire. En effet, comme nous l'avons étudié au chapitre 1, les anciens croyaient que le ciel contenait des étoiles fixes et sept astres mobiles : le Soleil, la Lune et les cinq planètes visibles à l'œil nu (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne). Aujourd'hui, on peut facilement établir un

lien de nature linguistique entre les noms donnés aux planètes et les jours de la semaine, dans plusieurs langues issues d'Europe. Voici la correspondance plus ou moins parfaite, mais tout de même présente, entre le nom des jours et celui des astres, pour le français et l'anglais. On aurait pu faire la même chose pour l'espagnol ou l'allemand, et l'on aurait trouvé un degré équivalent de correspondance.

Noms des astres en français	Jours en français	Noms des astres en anglais	Jours en anglais
Soleil	Dimanche	Sun	Sunday
Lune	Lundi	Moon	Monday
Mars	Mardi	Mars	Tuesday
Mercure	Mercredi	Mercury	Wednesday
Jupiter	Jeudi	Jupiter	Thursday
Vénus	Vendredi	Venus	Friday
Saturne	Samedi	Saturn	Saturday

En français, dimanche et samedi ne correspondent pas au nom de leur astre respectif pour des raisons historiques. En effet, **dimanche** vient

plutôt du latin *dominicus*, qui signifie « jour du Seigneur », et **samedi** vient du latin *sabbatum*, qui veut dire « sabbat ».



4.3 Le Soleil

Le Soleil, l'astre le plus brillant du ciel terrestre, représente à lui seul plus de 99,8 % de la masse du Système solaire. C'est l'étoile la plus proche de nous. Le Soleil est tel un roi régnant sur son cortège de planètes. Il constitue la plus essentielle de toutes nos sources d'énergie. Sans lui, la vie telle qu'on la connaît n'aurait pu se développer. Les Anciens l'ont vénéré, lui réservant une place primordiale dans leurs religions et dans leurs légendes. Certaines civilisations anciennes ont longtemps cru que les éclipses étaient des manifestations de dieux maléfiques tentant de nuire au Soleil. Au fil des siècles, l'importance mythologique accordée au Soleil a lentement diminué, le déclin s'amorçant vraiment avec les interrogations des savants de la Grèce antique. Ceux-ci ont tenté de mesurer l'éloignement du Soleil, de comprendre son mouvement, etc. Aujourd'hui, tous les phénomènes relatifs au Soleil (éclipses, activités solaires, durée de vie) sont bien compris ou, du moins, relativement bien expliqués et prévisibles.

Le Soleil est de plus en plus étudié, et l'on dispose aujourd'hui de plusieurs sondes et satellites qui l'observent en permanence. Il arrive souvent que les observations soient mises en commun pour encore mieux comprendre les phénomènes étudiés. Parmi les projets en cours les plus connus, mentionnons la sonde Ulysse, lancée en 1990, qui étudiera les pôles du Soleil au moins jusqu'en 2004, et SOHO (pour Solar and Heliospheric Observatory), lancé en 1995, qui constitue un observatoire permanent autour du Soleil. Genesis, lancé en 2001, reviendra sur Terre en 2004 avec des échantillons de vent solaire, cueillis à 1,5 million de kilomètres de notre planète.

Bien que le Soleil soit d'une importance capitale pour la Terre, il n'en reste pas moins une étoile tout à fait banale par rapport aux autres étoiles de notre Univers. En effet, le Soleil est une étoile de taille et de luminosité moyennes qui a déjà fait la moitié de sa vie, soit près de 5 milliards d'années. Cependant, son caractère « ordinaire » et sa proximité en font un modèle parfait pour l'étude de la composition et du comportement des autres étoiles éloignées.

Le tableau 4.4 présente la fiche d'identité du Soleil. On y trouve de l'information pertinente sur ses caractéristiques physiques, en données brutes et en rapport avec les données de la Terre.

Dans le tableau, on observe que la période de rotation du Soleil n'est pas la même aux pôles qu'à l'équateur. En effet, le Soleil



Par rapport à la Terre

TABLEAU 4.4

**Fiche d'identité
du Soleil**

Diamètre	1 392 000 km	109 fois
Volume	$1,412 \times 10^{18} \text{ km}^3$	1 300 000 fois
Masse	$1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$	332 000 fois
Densité	1,41 g/cm ³	25 %
Accélération gravitationnelle	274 m/s ²	28 fois
Distance moyenne du Soleil à la Terre	149 600 000 km ou 1 unité astronomique (UA)	
Temps mis par la lumière du Soleil pour atteindre la Terre	8 min 18 s	
Inclinaison de l'axe de rotation	7°	
Période de rotation	25 jours à l'équateur 35 jours aux pôles	
Luminosité apparente	600 000 fois celle de la pleine Lune	
Composition chimique	Hydrogène (H), hélium (He) et presque tous les autres éléments connus	

effectue une rotation en 25 jours, dans le sens direct à l'équateur. Cette valeur augmente progressivement avec la latitude, pour atteindre 35 jours aux pôles. Comment cela est-il possible ? Cette différence dans la vitesse de rotation est une preuve que le Soleil n'est pas un solide mais plutôt une masse fluide, dont chacune des parties ne tourne pas à la même vitesse que les autres. C'est ce qu'on appelle la **rotation différentielle**. C'est d'abord en observant le déplacement des taches solaires – régions plus sombres à la surface du Soleil – que les premiers astronomes, dont Galilée en 1611, ont pu calculer la période de rotation de l'astre sur lui-même.

Toutes les mesures du tableau 4.4 sont des données qui concernent le Soleil dans son ensemble. Aucune ne nous informe sur ce qui compose son intérieur. En fait, ce n'est qu'au XIX^e siècle, avec le développement des techniques de spectroscopie (voir le chapitre 2), que les astronomes ont découvert que notre étoile était essentiellement faite de gaz très chauds. Nous savons aujourd'hui que l'hydrogène (H) compte pour environ 71 % de la masse totale du Soleil et l'hélium (He), environ 27 %. Les 2 %



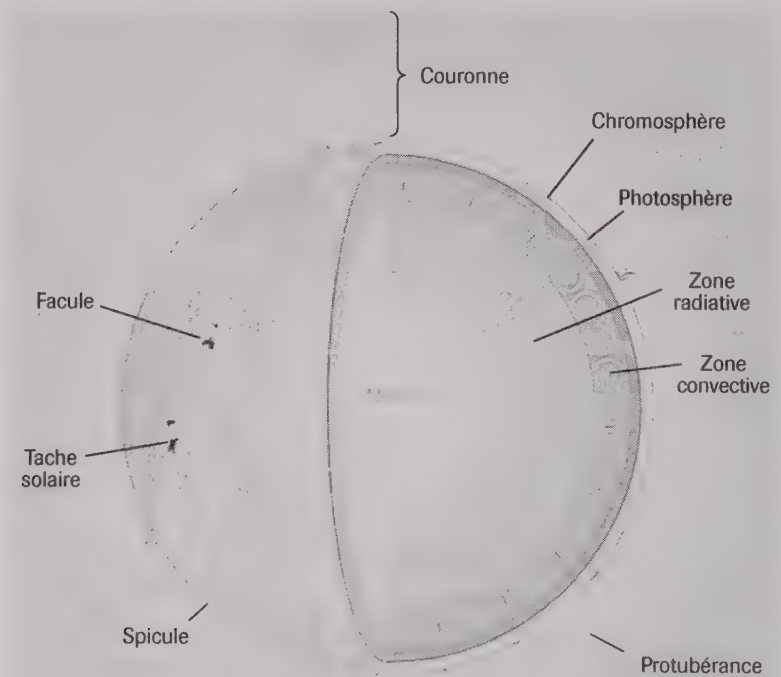
qui restent sont surtout composés d'oxygène (O), de carbone (C), d'azote (N) et de silicium (Si). Si l'on examine la composition du Soleil du point de vue de l'abondance des atomes de chaque gaz, alors les atomes d'hydrogène comptent pour 91,2 % et les atomes d'hélium pour 8,7 %. Les atomes des autres éléments constituant le Soleil ne représentent donc que 0,1 %. La différence dans les pourcentages est attribuable au fait qu'un atome d'hélium est plus lourd qu'un atome d'hydrogène.

C'est grâce à l'application des techniques de spectroscopie sur le Soleil que l'hélium fut d'abord découvert. Un spectre d'émission du Soleil enregistré en 1868 contenait une raie dont l'origine chimique était encore inconnue. C'est l'astronome britannique sir Norman Lockyer (1836–1920) qui, la même année, donna le nom d'**hélium** à l'élément chimique hypothétique associé à cette raie, du nom de Hélios, divinité personnifiant le Soleil.

Nous verrons plus loin que la proportion d'hydrogène au sein du Soleil diminue lentement au profit de l'hélium et des éléments plus lourds, au fur et à mesure que l'hydrogène est transformé par des réactions nucléaires. Ainsi, alors que le

FIGURE 4.6

Le Soleil comporte plusieurs couches de caractéristiques et de propriétés différentes.





Soleil existe depuis environ 5 milliards d'années, sa masse actuelle et la quantité d'hydrogène encore disponible à ce jour lui donneront une vie utile de 5 autres milliards d'années. Ensuite, il deviendra une géante rouge (voir le chapitre 7), puis s'éteindra doucement.

Couches du Soleil

Le Soleil est constitué de plusieurs couches concentriques de pression et de température distinctes (figure 4.6). Chaque couche interagit avec les couches voisines, sous l'effet du puissant champ magnétique solaire et des courants de matière à l'intérieur du Soleil. Voyons d'abord la couche la plus extérieure ; nous terminerons avec le noyau du Soleil.

La **couronne** s'étend jusqu'à plusieurs millions de kilomètres au-delà de la surface du Soleil. Elle constitue la partie extérieure de ce qu'on peut appeler l'**atmosphère** du Soleil. Les atomes de gaz qui la composent ont une température d'environ 1 000 000 kelvins². Cette température très élevée est attribuable au fait que le gaz de la couronne est très raréfié et donc plus facile à chauffer. L'énergie en provenance du Soleil, aidée du champ magnétique solaire, se dissipe en chaleur dans les rares atomes de la couronne. Cependant, comme les particules du gaz sont relativement éloignées les unes des autres, la température moyenne de la couronne est nettement plus faible que 1 000 000 K. En temps normal, on ne peut voir la couronne. Elle est visible seulement aux éclipses totales du Soleil ou à l'aide d'un coronographe (figure 4.7), sorte de télescope qui possède un disque bloquant la lumière intense du disque solaire.

La **chromosphère** est la région de l'atmosphère solaire située directement sous la couronne. Elle s'étend jusqu'à 10 000 kilomètres au-dessus de la surface du Soleil et sa température varie de 6 000 à 20 000 K. La chromosphère est le siège de violentes explosions, alimentées par de puissantes forces magnétiques.

La **photosphère** est la surface visible du Soleil. Presque toute la lumière que l'on reçoit de celui-ci vient de la photosphère, d'où son nom. Elle a environ 300 kilomètres d'épaisseur et sa température moyenne est de 5 800 K. C'est sur la photosphère

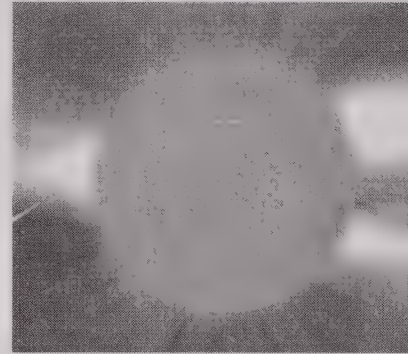


FIGURE 4.7

Couronne solaire dévoilée grâce à un coronographe

2. L'échelle des kelvins est l'échelle de température habituellement utilisée en astronomie. La température de zéro kelvin (0 K) correspond à -273 degrés Celsius (°C), la plus basse qui puisse exister. Une augmentation de température de 1 kelvin correspond à une augmentation de 1 °C. À de très hautes températures, on peut inversement parler de degrés Celsius ou de kelvins (et non de degrés kelvins), sans risquer que cela pose vraiment de problèmes de compréhension.



que l'on peut observer les taches solaires (voir page suivante). On dit que la photosphère est la **surface** du Soleil, simplement parce que c'est la couche la plus visible depuis la Terre. Cependant, cette « surface » n'a rien de solide : c'est une zone de gaz chauds dont la pression est d'environ 0,1 bar et la densité de 10^{-9} g/cm³.

Tout juste au-dessous de la photosphère se trouve la **zone convective**, immense zone au sein de laquelle la chaleur s'évacue sous forme de bulles de fluides chauds qui remontent jusqu'à la surface du Soleil. Ces mouvements sont appelés **mouvements de convection**, très similaires aux mouvements des bulles dans de l'eau qui bout. La zone convective a une épaisseur d'environ 200 000 kilomètres. La température peut y atteindre 1 000 000 K et sa densité est de 0,01 g/cm³, soit à peine plus que celle de l'atmosphère terrestre.

La **zone radiative**, comme son nom l'indique, constitue la partie du Soleil où le transfert d'énergie et de chaleur se fait essentiellement par rayonnement ou radiation. La densité y est d'environ 10 g/cm³, ce qui rend le passage difficile à certaines particules qui sont émises par le noyau. Par exemple, un photon en provenance du centre de l'étoile prend plusieurs centaines de milliers d'années avant de se frayer un chemin jusqu'à la surface, subissant sur son chemin d'innombrables collisions avec les atomes d'hydrogène et d'hélium environnants. À l'inverse, les neutrinos, particules issues des réactions nucléaires au sein du Soleil qui interagissent peu avec leur environnement, parviennent très facilement à la surface du Soleil. Les neutrinos que nous recevons sur Terre peuvent donc nous informer directement sur les conditions internes du Soleil. La zone radiative est la couche la plus épaisse du Soleil, avec 300 000 kilomètres d'épaisseur, et sa température varie de 1 000 000 à 7 000 000 K en allant vers l'intérieur du Soleil.

Le **noyau** est bien entendu le cœur du Soleil. Il mesure 200 000 kilomètres de rayon et sa température s'élève à 15 000 000 K. La pression qui y règne est prodigieuse : environ 200 milliards de bars. (Rappelons que la pression à la surface de la Terre est de 1 bar.) La densité du noyau est d'environ 150 g/cm³, soit plus de 25 fois la densité moyenne de la Terre. Ainsi, le noyau contient 40 % de la masse du Soleil, alors que son volume n'occupe que 2 % du volume total. Dans ces conditions infernales de pression et de température, les atomes du milieu sont si agités et si rapprochés les uns des autres qu'ils entrent assez fortement en collision pour en arriver à se fusionner et commencer une série de réactions nucléaires. Toute l'énergie du Soleil vient de la fusion nucléaire qui se produit en son cœur.



Activité solaire et taches solaires

Les premières manifestations de l'intense activité solaire à avoir été observées par l'humain sont les taches solaires. Cela fait déjà plus de 2 500 ans que des astronomes chinois ont décelé des taches sombres (figure 4.8) sur le disque solaire. Ils faisaient leurs observations à l'œil nu, au coucher du Soleil, par temps brumeux, pour éviter d'être aveuglés. Nous savons aujourd'hui que ces taches correspondent à des régions plus froides (donc moins lumineuses) de la photosphère. Leur température est de quelques centaines de kelvins inférieure au reste de la photosphère, dont la température moyenne est de 5 800 K.

Les taches qu'on dit **sombres** sont donc lumineuses, mais moins que le reste de la surface solaire. Ainsi, par comparaison, elles paraissent sombres. Elles sont à l'origine des éruptions solaires qui libèrent brusquement d'énormes quantités d'énergie. Les taches apparaissent principalement dans des zones bien déterminées de la surface solaire, entre 8° et 35° au nord, et au sud de l'équateur solaire. Leur forme est irrégulière et leur dimension varie de 1 000 à 200 000 kilomètres, ce qui peut donc dépasser largement les dimensions de la Terre. Les taches comportent deux parties : une plus foncée, l'ombre, et une plus claire, la pénombre (figure 4.9). La photosphère présente également des zones plus claires que le reste du Soleil que l'on appelle les **facules**, du latin *facula*, qui signifie « petite torche ». Ce phénomène, tout comme l'ensemble de ce qui concerne l'activité et les taches solaires, n'est pas encore totalement expliqué. En effet, encore aujourd'hui, leur origine et leur comportement sont mal connus. Il semble cependant presque assuré qu'elles soient produites par l'action violente et combinée des forces magnétiques et des forces des fluides à l'intérieur du Soleil.

Le nombre de taches solaires, ainsi que leur taille et leur forme, varie continuellement. En 1843, un astronome amateur allemand, Samuel Heinrich Schwabe (1789–1875), observa le Soleil chaque jour de temps clair et compta le nombre de taches solaires. Bien qu'il fut alors à la recherche d'une planète inconnue qui aurait été très près du Soleil, ses observations menèrent quelques années plus tard à une importante découverte : le nombre de taches varie selon un cycle de 11 ans. C'est-à-dire que, tous les 11 ans³, le Soleil connaît un maximum de taches, et donc un maximum d'activité (figure 4.10). Pendant un maximum d'activité solaire, le nombre de taches peut atteindre 1 800 par année, alors qu'il peut être de moins de 200 au cours d'un minimum. Depuis la découverte du cycle des taches solaires, certains chercheurs ont tenté de trouver des traces de



FIGURE 4.8

Taches solaires

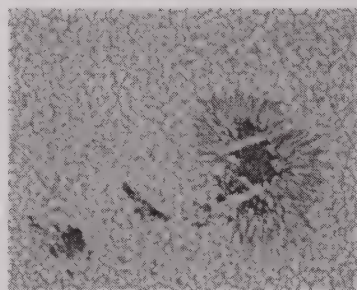


FIGURE 4.9

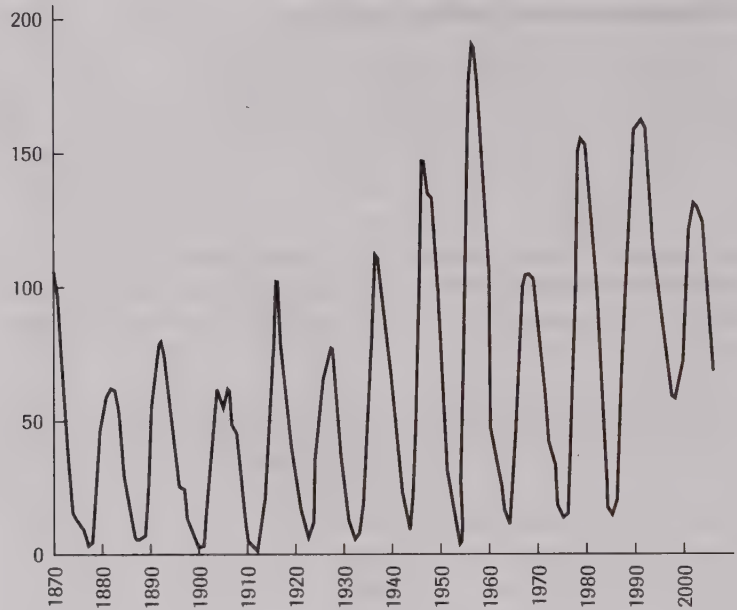
Tache solaire vue de plus près

3. En réalité, la période du cycle n'est pas constante ; elle varie de 9,5 à 12,5 ans.



FIGURE 4.10

Le nombre de taches solaires varie périodiquement. On assiste à un maximum d'activité solaire environ tous les 11 ans.



ce cycle dans la nature : les anneaux de croissance des arbres, en particulier, font encore aujourd'hui l'objet de recherches à cet égard.

Bien que le cycle de 11 ans soit plutôt régulier, il y a déjà eu une période de très faible activité solaire pendant laquelle le cycle a presque disparu. Dans des rapports d'observation des taches de 1645 à 1715, les astronomes ont constaté qu'il y a eu pendant cette période une absence presque totale de taches sur le Soleil. C'est ce que l'on nomme le **minimum de Maunder**. Cette disparition du cycle est restée, jusqu'à ce jour, sans explication. Curieusement, elle coïncide avec une période climatique des XVII^e et XVIII^e siècles, appelée **petite ère glaciaire**. Pendant cette période, des rivières qui restaient habituellement libres de glaces gelaient, et des sommets sans neige l'été restaient couverts toute l'année. Les liens entre l'activité solaire et le climat terrestre est un sujet d'étude relativement jeune.

La durée du cycle solaire est directement liée aux variations du champ magnétique du Soleil. Ce dernier, un peu comme le champ magnétique de la Terre, peut être comparé au champ magnétique produit par un barreau aimanté (bien qu'il soit beaucoup plus complexe en réalité). Cependant, alors que le champ magnétique de la Terre est relativement stable, celui du Soleil se renverse tous les 11 ans, à un moment qui coïncide avec l'augmentation du nombre de taches. Par exemple, lors de la dernière période de forte activité solaire au début de



2001, le pôle Nord magnétique solaire est passé relativement rapidement de l'hémisphère Nord à l'hémisphère Sud. La situation se renversera de nouveau au prochain maximum d'activité solaire, prévu en 2012.

La complexité du champ magnétique solaire se manifeste jusque dans les taches solaires. Les astronomes ont observé qu'il y a un champ magnétique très développé autour des taches. En effet, chaque groupe de taches possède ses propres pôle Nord et pôle Sud magnétiques. Comme pour le champ magnétique global du Soleil, à chaque nouveau cycle de 11 ans, la polarité du champ magnétique des taches est inversée. Selon les astronomes, l'hypothèse la plus probable expliquant le cycle de 11 ans est l'effet que produit la rotation différentielle (de 25 jours à l'équateur à 35 jours aux pôles) du Soleil sur le champ magnétique. Les mouvements de convection à l'intérieur de ce dernier produisent des courants de charges électriques (effet dynamo) qui à leur tour induisent des champs magnétiques puissants. En raison de la rotation différentielle, les lignes de force du champ magnétique s'enroulent, s'étirent et se ressèrent. Tous les 11 ans, pour une raison mal connue, l'enroulement devient instable et cause une diminution du champ magnétique. Puis le cycle recommence. Les scientifiques ont observé des cycles semblables sur d'autres étoiles, d'où l'hypothèse que c'est fort probablement un phénomène commun à plusieurs étoiles.

L'activité solaire ne se manifeste pas que par les taches solaires. En fait, plusieurs autres formes de manifestations des effets combinés du champ magnétique solaire et de la convection des fluides très chauds peuvent être étudiées. Par exemple, on observe sur la photosphère une sorte de granulation de dimensions de 700 à 2 000 kilomètres de longueur. Les **granules** sont produites par d'innombrables jaillissements de gaz de convection provenant du centre du Soleil (figure 4.11). Chaque granulation ne dure pas plus de quelques minutes. Les granules peuvent faire penser aux cellules de la peau vues à la loupe.

Les **protubérances** consistent en un autre phénomène lié à l'activité solaire. Ce sont d'immenses éruptions qui projettent des nuages de gaz brûlants très haut au-dessus de la photosphère, dans la chromosphère (figure 4.12). Les protubérances se présentent sous deux formes : en arche ou éruptives. On peut parfois observer les unes et les autres lorsqu'elles débordent du disque de la Lune au moment des éclipses solaires totales. Ces éruptions (ou protubérances) se développent très rapidement et peuvent se déplacer jusqu'à 1 000 km/s et atteindre facilement 100 000 kilomètres de hauteur.

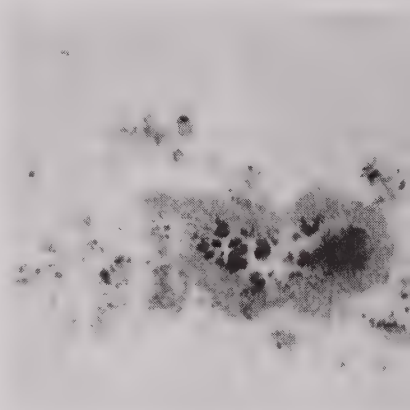


FIGURE 4.11

Tache solaire et granules

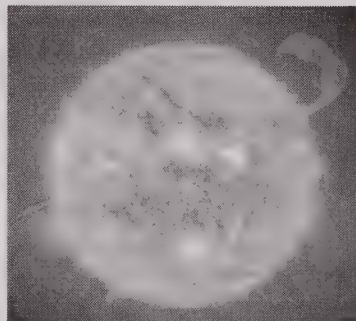


FIGURE 4.12

Les protubérances peuvent atteindre 100 000 kilomètres de hauteur.



Dans la chromosphère, surtout près des régions polaires, on observe fréquemment des protubérances plus petites, appelées **spicules**, qui éjectent de la matière de la surface dans la couronne à des vitesses de 20 à 50 km/s. La durée de vie des spicules est de l'ordre d'une minute et chaque spicule peut avoir un diamètre de 1 000 kilomètres et atteindre une hauteur de 10 000 kilomètres.

La matière éjectée pendant tous ces types d'explosions constitue une petite contribution au courant régulier de particules chargées (électrons, protons) qu'émet le Soleil dans toutes les directions de l'espace interplanétaire. On appelle ce courant le **vent solaire**. La principale source du vent solaire consiste dans les particules très chaudes et très agitées de la couronne solaire que la gravité du Soleil ne réussit plus à retenir. Le vent solaire, accéléré par des vagues magnétiques, s'échappe à des vitesses allant le plus souvent de 400 à 800 km/s, mais pouvant atteindre 2 000 km/s. Le Soleil expulse ainsi en 8 heures la même quantité de gaz qu'en contient toute l'atmosphère terrestre.

Le vent solaire est soufflé jusqu'à une distance de près de 300 UA du Soleil, ce qui est plus de 7 fois la distance Pluton-Soleil. La zone du Système solaire baignée par le vent solaire est appelée **héliosphère**. Cette zone est limitée par les rayons cosmiques provenant de l'Univers.

Sur Terre, le champ magnétique terrestre nous protège du vent solaire en capturant les particules chargées ou en les faisant dévier. Les aurores polaires sont un résultat spectaculaire de la capture de particules du vent solaire par la magnétosphère (voir la section 3.6). Cependant, les conséquences du vent solaire peuvent parfois être plus sérieuses. En effet, au cours des périodes de forte activité solaire, le nombre de phénomènes très explosifs à la surface du Soleil croît, ce qui fait augmenter l'intensité et la densité du vent solaire. Il en résulte qu'un nombre plus élevé qu'à l'habitude de particules réussissent à atteindre les couches plus basses de l'atmosphère terrestre, produisant ce qu'on appelle un **orage magnétique**. Les effets d'un orage magnétique et d'une activité solaire accrue sont importants : perturbation de la propagation des ondes radio, influence sur les satellites, bris de réseaux de transport d'électricité, etc.

L'énergie solaire

L'origine de l'énergie solaire a longtemps préoccupé les scientifiques. Dans l'histoire, la détermination de la source d'énergie du Soleil est fortement liée au calcul de l'âge de la Terre et, par conséquent, du Soleil. Au milieu du XIX^e siècle, alors que les géologues avaient déjà calculé que certaines for-



Les orages magnétiques

Quand le Soleil perturbe le réseau électrique

Le 10 mars 1989, un fort vent issu d'une gigantesque éruption solaire quittait la surface du Soleil à destination de la Terre. Deux jours plus tard, des fluctuations de tension se faisaient déjà sentir sur le réseau de transport d'électricité d'Hydro-Québec, en raison de la variation brusque et importante du champ magnétique terrestre. Malgré toutes les manœuvres des techniciens et des ingénieurs d'Hydro-Québec pour maintenir la stabilité du réseau, les dispositifs de protection se sont déclenchés, ce qui a engendré une panne de courant généralisée. Le 13 mars à 2 h 44, en quelques secondes, le Québec a été plongé dans le noir durant plus de 9 heures.

Depuis cette panne, Hydro-Québec a renforcé son réseau et mis en place de nouveaux systèmes de protection. D'autres fortes tempêtes solaires ont eu lieu, et aucun bris n'a été observé, ni interruption de courant.

Un peu comme les aurores polaires sont visibles dans des régions situées à des latitudes assez élevées, les effets des orages électriques sont aussi associés aux régions plus nordiques. Au Québec, cependant, le réseau

de transport d'électricité est de plus vulnérable que celui d'autres pays de même latitude, d'une part en raison de la longueur des lignes de transport, et d'autre part en raison de la composition du sol. En effet, la roche du Bouclier canadien empêche le courant de circuler dans la Terre, ce qui permettrait au réseau de se « décharger » par lui-même. Comme celui-ci ne peut le faire, les courants électriques produits par les orages électriques cherchent alors un chemin plus facile : ils voyagent donc par les lignes électriques, qui sont de bonnes conductrices d'électricité, et passent par les transformateurs qui ne sont pas conçus pour recevoir ce type de courant. Les dispositifs de protection détectent ces courants anormaux et désactivent les appareils nécessaires au transport d'électricité. C'est ce qui cause la panne.

Les astronomes n'arrivent pas à prédire de façon fiable les éruptions solaires ni les orages magnétiques. Cependant, les techniques de prévision se raffinent et les connaissances sur les phénomènes solaires augmentent, ce qui a entraîné la création de véritables bulletins météo solaires. Le site Internet www.spaceweather.com en est un des meilleurs exemples.

mations rocheuses existaient depuis des centaines de millions d'années, le célèbre physicien britannique sir William Thomson, lord Kelvin (1824–1907), estimait que le Soleil devait avoir au plus quelques dizaines de millions d'années. Son calcul était basé sur la croyance selon laquelle la source d'énergie de l'astre était de nature chimique, comme le feu. Dans l'esprit du scientifique, la Terre s'était détachée du Soleil et se refroidissait lentement, achevant la combustion en son intérieur. La valeur de l'âge de la Terre estimée par Kelvin, beaucoup plus petite que les nouvelles évaluations des géologues, était insuffisante face aux calculs de Darwin dans sa théorie de l'évolution de la vie sur Terre proposée quelques années plus tôt. Celui-ci estimait en outre que la Terre devait être âgée d'au moins plusieurs centaines de millions d'années.

Ce n'est qu'avec le développement des connaissances sur la radioactivité et sur la physique de l'atome, au début du XX^e siècle, que les physiciens sont arrivés à estimer de façon plus précise l'âge de la Terre et conséquemment celui du Soleil, et à décrire le mécanisme qui produit toute l'énergie du Soleil : la fusion nucléaire. Dans la fusion nucléaire à l'intérieur du Soleil, ce sont les atomes d'hydrogène qui se fusionnent pour donner de l'hélium et libérer de l'énergie. On peut ainsi dire que, fondamentalement, la fusion nucléaire consiste dans la transformation d'une partie de la masse ou de la matière en énergie. Cette



transformation de masse en énergie se fait dans le respect de la célèbre équation d'Einstein, $E = mc^2$, où m est la masse de matière qui se transforme, c la vitesse de la lumière et E l'énergie équivalente à la masse m . Dans ce processus de fusion, la perte de masse du Soleil est de l'ordre de 4 200 000 tonnes par seconde. Cela correspond à une fraction infime (2×10^{-23}) de sa masse totale, perte presque négligeable par rapport à sa masse totale, ce qui explique sa durée de vie totale de 10 milliards d'années, dont environ 4,5 milliards se sont écoulées. L'énergie dégagée par la fusion à l'intérieur du Soleil équivaut, chaque seconde, à l'explosion de plusieurs milliers de milliards de bombes atomiques, soit environ $3,8 \times 10^{20}$ mégawatts (MW). C'est l'équivalent de 380 millions de milliards de centrales hydro-électriques moyennes d'environ 1 000 MW chacune.

Nous savons que le Soleil est principalement composé d'hydrogène, qui compte pour plus de 90 % du nombre d'atomes total. Lorsque l'hydrogène, formé de 1 proton et de 1 électron se fusionne pour former de l'hélium (2 protons + 2 neutrons + 2 électrons), une grande quantité d'énergie est libérée. Cette fusion s'effectue selon deux processus :

- ① La **réaction proton-proton** (ou chaîne proton-proton), qui fournit 90 % de l'énergie solaire. Cette réaction domine nettement au cœur des étoiles de petite ou de moyenne taille et de température modérée comme le Soleil. La figure 4.13 illustre comment les atomes s'associent les uns aux autres pour en arriver à produire un atome d'hélium.
- ② Le cycle carbone-azote-oxygène (CNO), aussi appelé **cycle de Bethe**, du nom du physicien américain d'origine allemande Hans Albrecht Bethe (né en 1906), qui fournit 10 % de l'énergie solaire. Le cycle CNO se déclenche dès que la température au cœur des étoiles excède 15 ou 16 millions de kelvins, environ. Il est donc prédominant dans les étoiles plus chaudes que le Soleil dont la température au noyau est estimée à quelque 15 millions de kelvins. Le cycle CNO débute par la fusion d'un atome d'hydrogène avec un atome de carbone. Au fil des étapes du cycle, trois autres atomes d'hydrogène seront fusionnés avec les produits de la première fusion. Les produits finaux de la réaction sont un atome d'hélium et un atome de carbone. Le carbone joue ainsi le rôle de catalyseur, ce qui veut dire qu'il est totalement restitué à la fin du cycle.

En plus des noyaux illustrés à la figure 4.13 et du rayonnement énergétique, d'autres particules sont émises lors des réactions

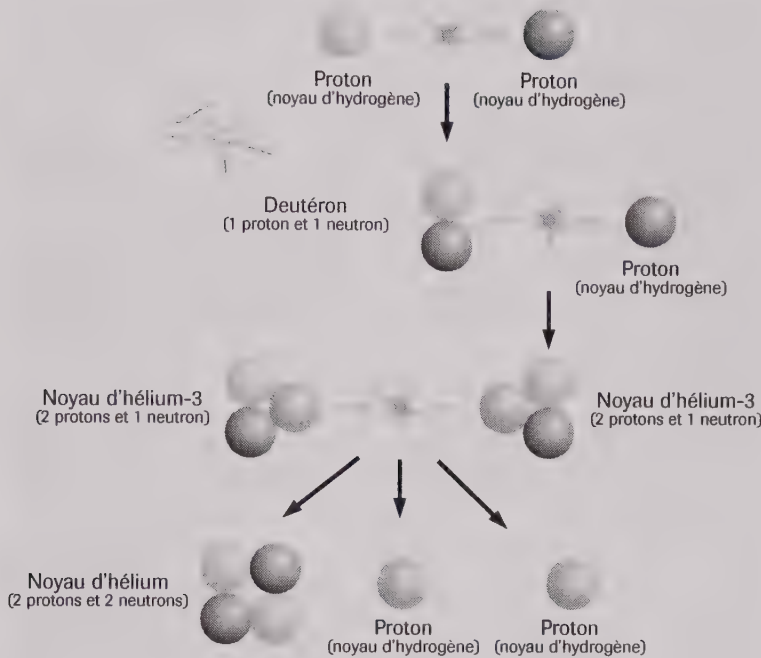


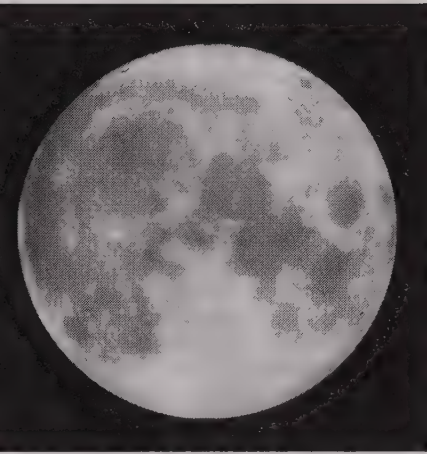
FIGURE 4.13

Dans la chaîne proton-proton, un proton (le noyau d'un atome d'hydrogène) fusionne avec un autre proton pour donner un deutéron (noyau de deutérium, formé de 1 proton et de 1 neutron). Ce dernier fusionne avec un autre proton pour donner de l'hélium-3 (2 protons et 1 neutron). Enfin, deux hélium-3 fusionnent ensemble pour former un hélium-4 (2 protons et 2 neutrons) et 2 protons qui iront recommencer la chaîne. Chaque réaction engendre une légère perte de masse qui prend la forme d'énergie (lumière et chaleur) et de particules, dont les neutrinos.

nucléaires au cœur du Soleil. L'une d'entre elles, le **neutrino**, est produite en quantité phénoménale au cœur du Soleil et revêt une grande importance en astronomie. Les neutrinos ont une masse très faible et réagissent très peu avec la matière, ce qui rend leur détection difficile.

À la fin des années 90, un immense bassin d'eau lourde (molécule formée de deux atomes de deutérium et d'un atome d'oxygène) de 12 mètres de diamètre a été installé à plus de 2 000 mètres sous la surface terrestre, près de Sudbury, en Ontario. Ce bassin et l'ensemble des instruments qui l'accompagnent constituent le Sudbury Neutrino Observatory (SNO). Déjà, les résultats de recherche obtenus par le SNO ont permis à la communauté scientifique d'en savoir beaucoup plus sur le neutrino.

Grâce à l'énergie nucléaire, le Soleil compte encore 5 milliards d'années de vie utile devant lui. Aujourd'hui, il a consommé par fusion nucléaire près de la moitié de l'hydrogène initial disponible en son cœur. Quand celui-ci sera épuisé et que les réactions nucléaires cesseront, le Soleil passera aux dernières phases de sa vie. Il deviendra d'abord une géante rouge qui englobera la Terre avant de terminer ses jours en naine blanche. Les étapes de la mort des étoiles font l'objet du chapitre 7.



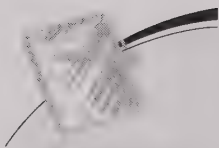
4.4 La Lune

L'astre le plus mythique du Système solaire est probablement notre unique satellite naturel, la Lune. Plusieurs croyances y sont d'ailleurs toujours rattachées. Ainsi, bien que peu de gens associent encore la pleine Lune aux loups-garous, l'idée persiste que les naissances sont plus nombreuses à la pleine Lune, alors que les statistiques montrent qu'il n'en est rien. De plus, bien que l'on n'aurait pas l'idée, comme l'empereur romain Tibère, d'aller se faire couper les cheveux à la Lune croissante pour qu'ils repoussent avec plus de vigueur, d'aucuns associent volontiers des comportements étranges ou anormaux à la pleine Lune. Rappelons seulement que tous les mythes associés à la Lune sont de l'ordre des croyances et n'ont pas de fondement scientifique.

Avant que les outils d'observation se perfectionnent, les Anciens croyaient que la Lune était un disque plat. Comme celle-ci montre toujours la même face et que les structures de sa surface se présentent toujours à la même position, on a tardé à imaginer que la Lune pouvait être en réalité une sphère en rotation. Toutefois, en y regardant de plus près, on peut prouver qu'elle est bien sphérique.

Première observation : les cratères à la surface de la Lune paraissent circulaires quand ils sont au centre du disque lunaire. Par contre, plus on s'éloigne du centre pour s'approcher des bords du disque, plus les cratères paraissent elliptiques. Cette différence ne peut être expliquée que si la Lune est sphérique ; en effet, lorsqu'on regarde un cercle tracé sur une feuille avec un certain angle, celui-ci paraît ovale. Seconde observation : l'ombre des montagnes sur la Lune présente des longueurs variables selon sa position par rapport au **terminateur** (ligne de démarcation entre la partie sombre et la partie éclairée de la Lune). Ce phénomène est impossible dans le cas d'un disque lunaire plat.

Le tableau 4.5 présente la fiche d'identité de la Lune. Certains termes ou phénomènes indiqués sont vus en détail plus loin dans la section.



**Diamètre de
la Lune et
distance
Terre-Lune**

(voir page 145)

Révolution et rotation de la Lune

Dans le tableau, on note facilement que le temps écoulé entre deux nouvelles Lunes (mois synodique ou révolution synodique) n'est pas le même que le mois sidéral, qui est le temps d'une révolution autour de la Terre. La différence de valeurs



TABLEAU 4.5

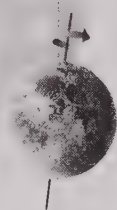
**Fiche d'identité
de la Lune**

		Par rapport à la Terre
Diamètre	3 476 km	27,2 %
Volume	$2,20 \times 10^{10} \text{ km}^3$	2,0 %
Masse	$7,35 \times 10^{22} \text{ kg}$	1,2 %
Densité	$3,34 \text{ g/cm}^3$	61 %
Accélération gravitationnelle	$1,63 \text{ m/s}^2$	16,7 %
Distance moyenne de la Lune à la Terre	384 400 km	30 fois le diamètre terrestre
Excentricité	0,05	
Période de révolution sidérale ou mois sidéral¹	27,3 jours (27 jours 7 h 43 min)	
Période de révolution synodique ou mois synodique²	29,5 jours (29 jours 12 h 44 min)	
Inclinaison de l'orbite par rapport à l'orbite terrestre	$5,1^\circ$	
Période de rotation³	27,3 jours (27 jours 7 h 43 min)	
Inclinaison de l'axe de rotation	$6,68^\circ$	
Albédo⁴	12 %	
Atmosphère	Aucune (ou extrêmement ténue)	
Température		
Surface éclairée par le Soleil	100 °C	
Surface à l'ombre	-50 °C	
La nuit	-170 °C	

1. Le mois sidéral est la durée de la révolution de la Lune autour de la Terre.
2. Le mois synodique est le temps entre deux phases identiques de la Lune (lunaison).
3. La période de rotation est le temps pris par la Lune pour faire un tour sur elle-même.
4. L'albédo est le pourcentage de lumière réfléchi par un astre non auto-lumineux. Sur la Lune, l'albédo des hautes terres (régions montagneuses) est de 15 % et celui des basses terres (les mers), constituées de lave volcanique beaucoup plus foncée, est de 8 %.

entre les révolutions sidérale et synodique trouve une origine similaire à la différence entre le jour sidéral sur Terre et la durée du jour solaire moyen (voir le chapitre 3). Sur la figure 4.14, on observe que, pendant que la Lune effectue une rotation complète sur elle-même en 27,3 jours, la Terre avance de 27° sur sa propre orbite autour du Soleil. À cette nouvelle position, la

Terre



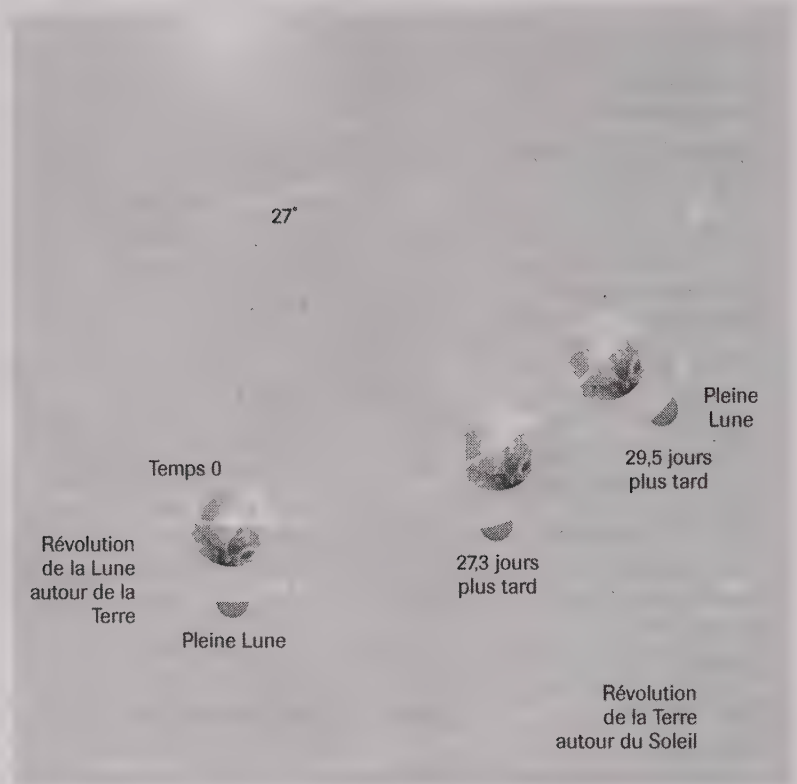
Lune



Lune n'est pas encore tout à fait pleine et il faudra encore un peu plus de deux jours pour que la configuration Soleil-Terre-Lune permette une pleine Lune. Le cycle des phases lunaires est donc étalé sur 29,5 jours.

FIGURE 4.14

La durée du mois sidéral lunaire n'est pas égale au temps entre deux nouvelles Lunes en raison du déplacement de la Terre sur son orbite de révolution.



Dans le tableau 4.5, on peut aussi observer que la durée de la révolution sidérale est la même que la durée de la période de rotation de la Lune sur elle-même. Si le même phénomène existait pour la Terre, celle-ci tournerait sur elle-même au même temps qu'elle prend pour faire le tour du Soleil, soit 365 jours ! C'est cette correspondance entre les deux durées qui fait que l'on voit toujours la même face de la Lune, ce qui nous donne la fausse impression que la Lune ne tourne pas sur elle-même (figure 4.15). On appelle **face cachée de la Lune** la partie de la surface lunaire qu'il nous est ainsi impossible de voir depuis la Terre. Si l'on demeurait à un endroit fixe sur la Lune, on n'y verrait pas de coucher ni de lever de la Terre ; celle-ci apparaîtrait presque immobile dans le ciel.

Comme la Lune nous montre toujours la même face, on pourrait croire que seulement 50 % de sa surface peut être observée

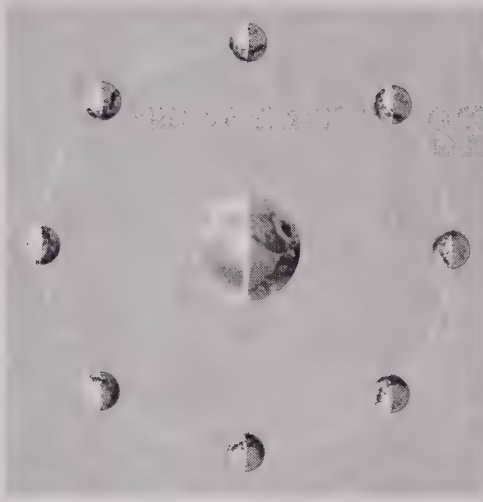


FIGURE 4.15

L'impression que la Lune ne tourne pas sur elle-même vient de la correspondance exacte entre le temps qu'elle prend pour effectuer un tour complet sur elle-même et le temps qu'elle prend pour faire le tour de la Terre.

à partir de la Terre. Toutefois, deux caractéristiques font qu'elle se dévoile un peu plus. D'abord, comme l'indique le tableau 4.5, l'axe de rotation de la Lune est incliné de $6,68^\circ$, ce qui revient à dire que son équateur est incliné de la même valeur par rapport à son plan orbital. Vue de la Terre, cette inclinaison donne l'impression que la Lune a un mouvement d'oscillation appelé **libration en latitude**. Ce mouvement apparent nous permet de voir, toutes les deux semaines, les régions polaires. Un autre élément du tableau 4.5 nous permet d'expliquer que l'on voit plus de 50 % de la surface de la Lune : l'excentricité de son orbite. L'excentricité est une mesure de l'allongement d'une orbite. Une orbite qui n'est pas tout à fait circulaire est dite **elliptique**, et la mesure de son excentricité informe sur le degré d'allongement de l'orbite. Dans sa course autour de la Terre, la Lune possède une vitesse de révolution qui varie entre une valeur maximale au périhélie (point le plus rapproché de l'orbite) et une valeur minimale à l'apogée (point le plus éloigné de l'orbite). Comme la rotation de la Lune sur elle-même se fait à vitesse constante, la variation dans la vitesse de révolution fait que nous voyons un petit peu plus à l'est ou à l'ouest, selon que la rotation est en avance ou en retard sur la révolution (figure 4.16). Ce mouvement s'appelle **libration en longitude**. Grâce à la combinaison des deux mouvements de libration, nous pouvons voir de la Terre jusqu'à 59 % de la surface lunaire.

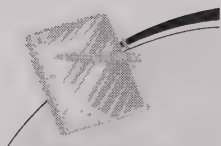
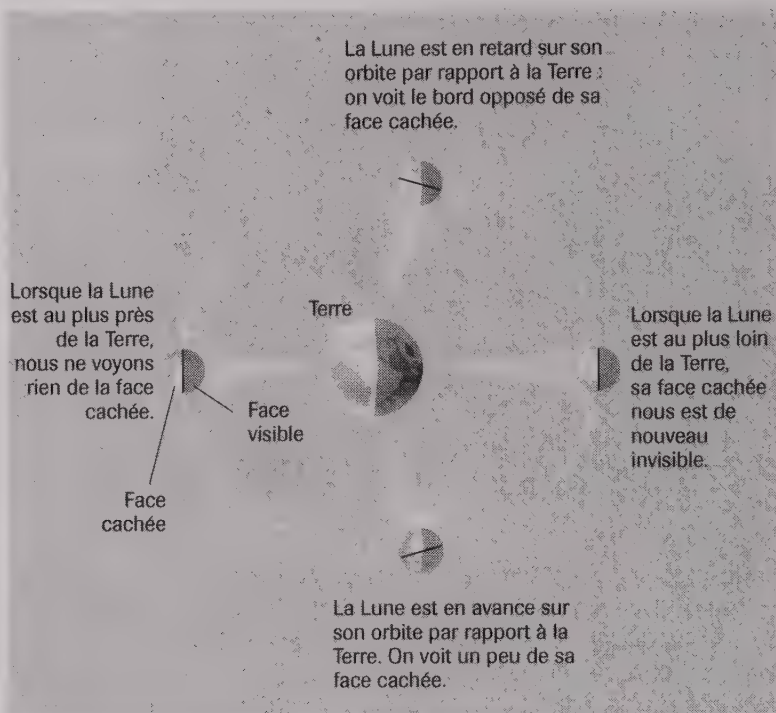
Phases de la Lune

De pleine Lune en pleine Lune, les phases de la Lune se succèdent pour nous présenter des portions de sa surface éclairée



FIGURE 4.16

La face cachée de la Lune ne représente que 41 % de toute la surface lunaire.



Observation de la Lune

(voir page 147)

par le Soleil et visible depuis la Terre. Elles sont attribuables aux variations de position de la Lune et du Soleil par rapport à la Terre. La figure 4.17 en présente les principales. On sait depuis longtemps comment calculer le moment précis de la prochaine nouvelle Lune ou de la prochaine pleine Lune. Pour les astronomes amateurs, il est bien commode d'avoir accès à cette information afin de prévoir les sorties d'observation. Ainsi, les observations qui porteront sur des objets peu lumineux du ciel (galaxies, nébuleuses, etc.) se feront dans la période de la nouvelle Lune. Sinon, elles se feront avant que la Lune se soit levée ou après qu'elle s'est couchée. Pour mieux prévoir vos sorties d'observation des prochaines années, sachez que tous les 19 ans, soit toutes les 235 lunaisons, les mêmes phases se retrouvent à la même place dans le calendrier : c'est ce que l'on appelle le **cycle de Méton**.

Marées

Le phénomène des marées est principalement lié à la force de gravité entre les astres. Sur Terre, les forces d'attraction gravitationnelle entre le Soleil et la Terre sont environ deux fois moins importantes que les forces de gravitation entre la Lune et la Terre. En effet, bien que le Soleil soit beaucoup plus massif que

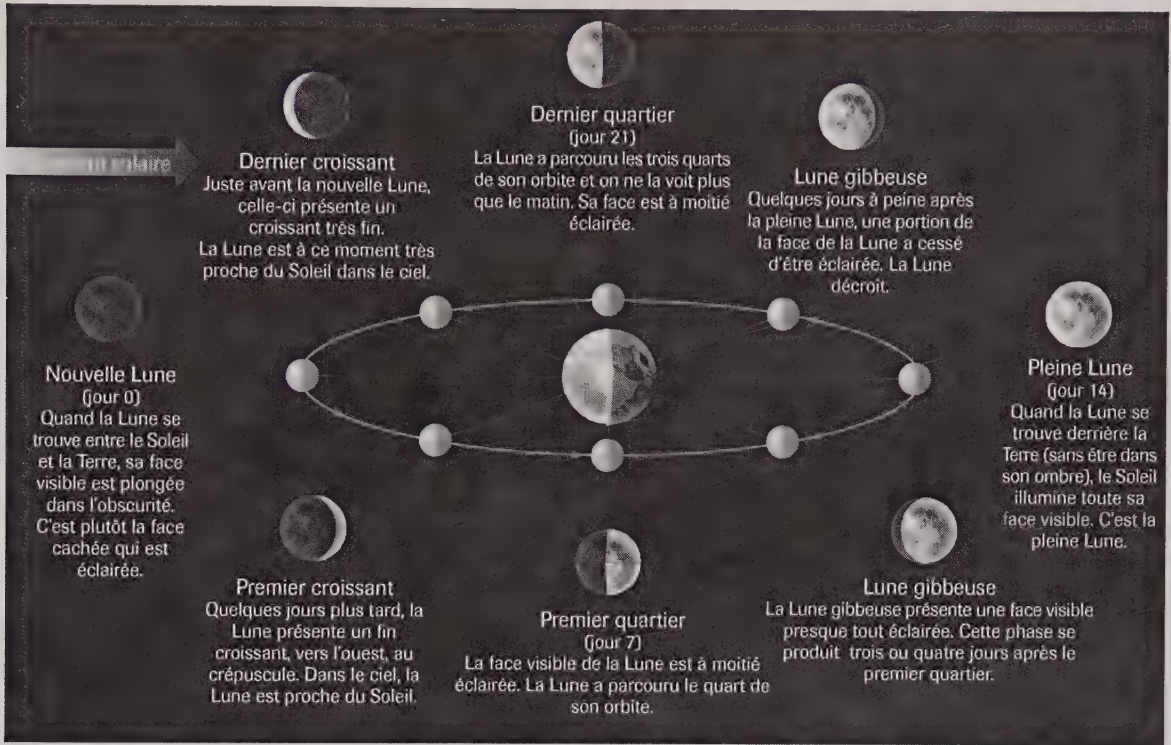


FIGURE 4.17

Les phases de la Lune se succèdent en fonction de la position de celle-ci sur son orbite. Sur ce schéma, les rayons du Soleil viennent de la gauche ; les dessins en médaillon représentent ce qu'un observateur de l'hémisphère Nord verrait.

la Lune, son influence ne vaut que 45 % de l'influence de la Lune, en raison de l'éloignement du Soleil par rapport à la Terre.

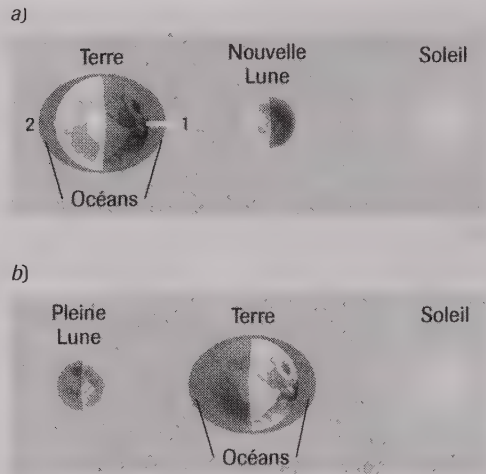
On assiste à deux marées hautes et deux marées basses pendant un cycle de 24 heures et 50 minutes. Cela signifie que, sur la Terre, simultanément, on a deux renflements (marées hautes). Ceux-ci sont causés par la différence d'intensité de l'attraction gravitationnelle entre la partie de la Terre qui fait face à la Lune et la partie de la Terre qui est éloignée de la Lune. Les figures 4.18 et 4.19 illustrent les situations possibles.

Sur la figure 4.18a, on peut observer que le point 1 est plus près de la Lune que le point 2. Ainsi, la force d'attraction au point 1 est plus grande que la force d'attraction au point 2. L'explication de la marée du point 1 est donc évidente : l'attraction gravitationnelle crée un renflement. Au point 2, cependant, le renflement est plutôt causé par le « manque » d'attraction gravitationnelle. L'eau du point 2 étant moins attirée vers la Lune, elle n'est pas « écrasée » sur la Terre. Par



FIGURE 4.18

Les grandes marées se produisent lorsque la Lune est *a)* derrière la Terre et le Soleil (nouvelle Lune) ou *b)* entre la Terre et le Soleil (pleine Lune).



conséquent, il y a un renflement de chaque côté de la Terre, d'où deux marées simultanées par jour.

Tous les plaisanciers et amateurs de sports nautiques devraient savoir que le cycle des marées est de 24 h 50 min. Quiconque a observé la Lune soir après soir à la même heure a remarqué qu'elle se déplace dans le ciel un peu chaque soir. Ce décalage est attribuable à la révolution synodique de la Lune, d'une durée de 29,5 jours. La Lune met donc 29,5 jours avant de passer au-dessus du même méridien à la même heure. Ainsi, le décalage de 50 minutes dans l'horaire des marées correspond à un glissement de $1/29^e$ de jour. C'est ce qui fait que l'heure des marées avance de 50 minutes par jour avant de revenir à la même heure 29,5 jours plus tard.

On appelle **grandes marées** ou **vives-eaux** les marées d'amplitude maximale. Celles-ci se produisent lorsque le Soleil, la Terre et la Lune sont alignés, au moment de la pleine Lune et de la nouvelle Lune (figure 4.18). Les forces attractives du Soleil se conjuguent aux forces attractives de la Lune. C'est au moment des équinoxes que les grandes marées atteignent leur plus grande ampleur, car le Soleil est alors dans le plan de l'équateur terrestre.

On appelle **petites marées** ou **mortes-eaux** les marées d'amplitude minimale. Celles-ci se produisent lorsque l'axe Terre-Soleil est perpendiculaire à l'axe Terre-Lune, au moment du premier et du dernier quartier (figure 4.19). Dans cette configuration, les forces attractives du Soleil et de la Lune ne s'exercent pas dans la même direction. Comme l'influence de la Lune sur les marées est plus grande que celle du Soleil, cela a pour effet de diminuer l'amplitude de la marée.

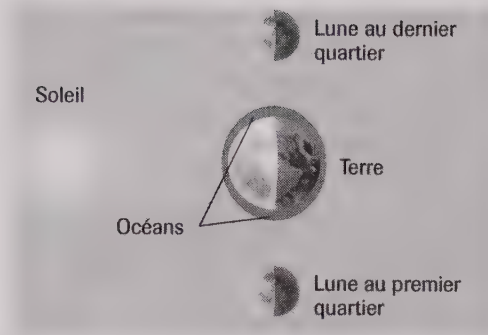


FIGURE 4.19

Les petites marées se produisent lorsque l'axe Terre-Lune est perpendiculaire à l'axe Terre-Soleil.

L'ampleur des marées de vives-eaux et de mortes-eaux varie également en fonction de la distance de la Lune et du Soleil par rapport à la Terre.

L'amplitude des marées varie beaucoup d'un endroit à l'autre sur la Terre. Le calcul détaillé de ces amplitudes est très complexe; il dépend de nombreux facteurs dont la profondeur des océans, la forme des côtes et leur localisation sur le globe. Les marées les plus importantes observées sur la Terre sont celles de la baie de Fundy, dans l'Est du Canada, qui peuvent atteindre jusqu'à 16 mètres d'amplitude.

Les forces de marées n'agissent pas que sur les masses liquides tels les océans, mais également sur les masses solides, comme la croûte terrestre. L'amplitude du soulèvement de la croûte terrestre varie avec la latitude; elle est nulle aux pôles et peut atteindre 40 centimètres à l'équateur. En fait, la mer monte et descend en raison de la différence entre la marée continentale et la marée océanique.

De la même façon que la Terre subit des forces de marée attribuables à la Lune, la Lune subit des forces de marée attribuables à la Terre. Puisque la masse de la Terre est 81 fois celle de la Lune, les forces de marée exercées par la Terre sur la Lune sont beaucoup plus importantes que celles de la Lune sur la Terre. Le sol lunaire subit deux renflements opposés pouvant atteindre une dizaine de mètres d'amplitude. Toutefois, sur la Lune, contrairement à ce qui se produit sur la Terre, ces déformations ne se déplacent pas, puisque la Lune présente toujours la même face à la Terre.

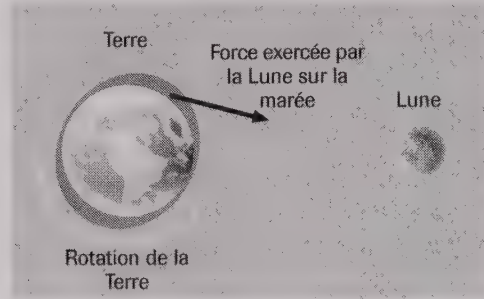
Les forces des marées sont à l'origine de la synchronisation de la période de rotation de la Lune et de sa période de révolution autour de la Terre, ce qui fait que nous voyons toujours la même face de la Lune. De façon similaire, la Lune, par l'entremise des marées qu'elle crée, a le même effet sur la Terre en ralentissant très lentement son mouvement de rotation



(figure 4.20). Ce ralentissement s'effectue à un rythme de 1 seconde, tous les 60 000 ans (voir la section 3.7 sur la rotation de la Terre). En fin de compte, la Terre présentera donc toujours la même face à la Lune, et celle-ci ne sera visible que depuis certaines régions du globe.

FIGURE 4.20

Quand la Terre tourne, la marée tend à être emportée par le mouvement de rotation. Cependant, l'attraction de la Lune ramène constamment la marée sur de nouvelles régions du globe. Le mouvement de la marée est donc contraire au mouvement de rotation de la Terre. C'est ce qui cause le léger ralentissement de la rotation de la Terre et l'allongement graduel de la durée du jour.



Il est normal que la Lune ait été « synchronisée » avant la Terre, puisqu'elle est 81 fois plus légère. La tendance vers la synchronisation est normale pour tout système composé de deux astres en rotation l'un par rapport à l'autre. Dans le Système solaire, Pluton et son satellite Charron ont déjà atteint cet état stable.

Les marées influencent aussi le mouvement de révolution de la Lune et font ainsi augmenter la distance Terre-Lune. En fait, la Lune s'éloigne progressivement de la Terre depuis sa formation. Le rythme actuel d'éloignement est de 1,2 mètre par siècle. Lorsque la Terre et la Lune auront atteint leur état stable, cette dernière sera à sa distance maximale de la Terre. Selon plusieurs théories, le système Terre-Lune cessera d'évoluer à partir de ce moment.

Il existe une hypothèse (peu connue et peu reconnue) qui veut que la Lune, après avoir atteint sa distance maximale, se rapprocherait à nouveau de la Terre pour repasser en deçà de sa distance actuelle et avancerait vers notre planète jusqu'à un point où elle se désagrégerait sous l'effet des forces de marée devenues trop grandes pour maintenir sa cohésion. On dit qu'elle aurait alors franchi la **limite de Roche**, établie par le mathématicien français Édouard Roche (1820–1883) en 1849. Au passage de la limite de Roche, la Lune éclaterait en mille morceaux, formant par la suite un anneau autour de la Terre ; ces morceaux tomberaient finalement sur celle-ci. C'est ce qui est arrivé à la comète Shoemaker-Levy, en juillet 1994, à l'approche de Jupiter. Au passage de la limite de Roche de Jupiter, la comète s'est brisée en 21 morceaux. Si ces événements devaient se produire pour la Lune, ils auraient lieu dans



un avenir très lointain, soit plusieurs milliards d'années, peut-être même après la mort du Soleil.

Éclipses

Les éclipses sont les phénomènes les plus spectaculaires associés à notre satellite, la Lune. Il y a éclipse de Lune lorsque la Terre est placée entre le Soleil et la Lune, et que cette dernière passe dans l'ombre ou la pénombre de la Terre (figure 4.21). Il

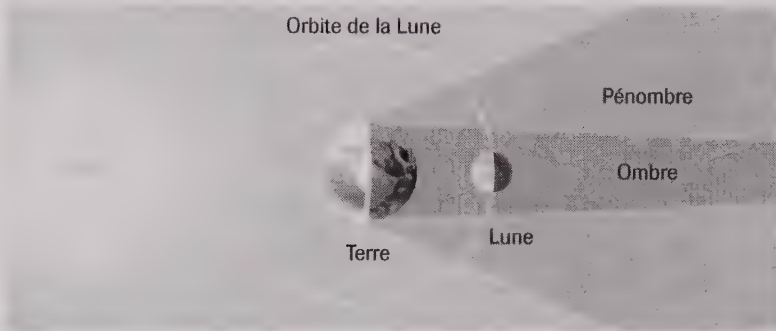


FIGURE 4.21

Une éclipse de Lune peut être totale, partielle ou de pénombre. La pénombre correspond à l'espace derrière la Terre qui n'est éclairé que par le dessous ou le dessus.

y a éclipse de Soleil lorsque la Lune est placée entre le Soleil et la Terre et que l'ombre ou la pénombre de la Lune tombe sur une petite région de la Terre (figure 4.24). Ces configurations sont les mêmes que celles qui causent les phases de pleine Lune et de nouvelle Lune. Pourquoi n'y a-t-il pas plus souvent des éclipses ? L'explication de la rareté des éclipses réside dans l'inclinaison de $5,1^\circ$ de l'orbite de la Lune par rapport à l'orbite terrestre. Sans cette inclinaison, il y aurait 25 éclipses solaires et lunaires par année, soit autant de pleines Lunes et de nouvelles Lunes. En réalité, il n'y a que 7 éclipses tout au plus par année sur le globe. La figure 4.22 illustre la différence entre la configuration Soleil-Terre-Lune qui donne lieu à une nouvelle Lune ou une pleine Lune, et la configuration qui donne lieu à une éclipse de Soleil ou de Lune. La seconde configuration est rare, et cela contribue à la fascination que nous pouvons éprouver pour les éclipses.

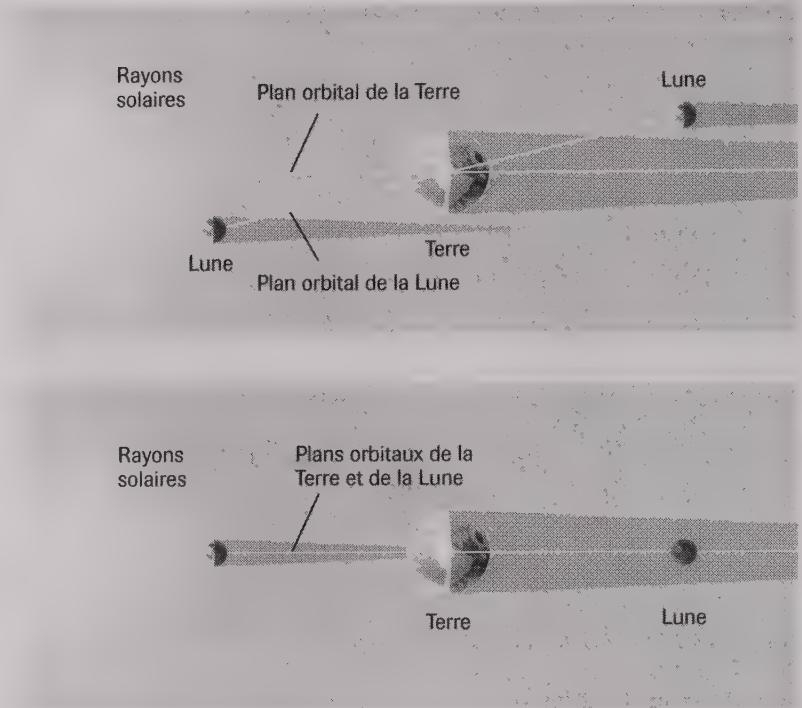
Les éclipses se répètent presque exactement après un cycle de 18 ans et $11 \frac{1}{2}$ jours. C'est ce qu'on appelle le **cycle saros**. Il faudra attendre trois cycles saros, soit environ 54 ans, pour observer une éclipse au même endroit depuis la Terre.

Le nombre d'éclipses lunaires par année est le même que le nombre d'éclipses solaires. Cependant, dans toute votre vie, vous observerez plus d'éclipses de Lune que d'éclipses de Soleil. Pourquoi ? D'abord, parce que les éclipses lunaires durent



FIGURE 4.22

C'est en raison de l'inclinaison de l'orbite de la Lune par rapport à l'orbite terrestre que les éclipses sont rares. Celles-ci ne se produisent que lorsque la Lune croise le plan orbital de la Terre.



plus longtemps que les éclipses solaires. Cela augmente donc les chances que vous puissiez en faire l'observation. Ensuite, parce que la zone d'observation est beaucoup plus grande pour une éclipse de Lune que pour une éclipse de Soleil. Ainsi, à moins de toujours voyager là où se produisent les éclipses solaires, vous devrez être patients avant de pouvoir assister au spectacle.

Éclipses de Lune

Le tableau 4.6 de la page 134 comporte les dates des prochaines éclipses de Lune, ainsi que les régions du monde où elles pourront être observées.

On compte trois sortes d'éclipses de Lune : l'éclipse totale, l'éclipse partielle et l'éclipse de pénombre. Les figures 4.21 et 4.22 illustrent les conditions dans lesquelles un type d'éclipse pourra se produire. La figure 4.23, quant à elle, présente une coupe transversale de l'ombre de la Terre à la distance de la Lune.

Il y a une **éclipse totale** quand l'ombre de la Terre couvre tout le disque lunaire. Pendant une éclipse totale, la Lune ne devient pas complètement noire. Elle prend plutôt une teinte orangée. Cela vient du fait que, malgré que la Lune soit entièrement

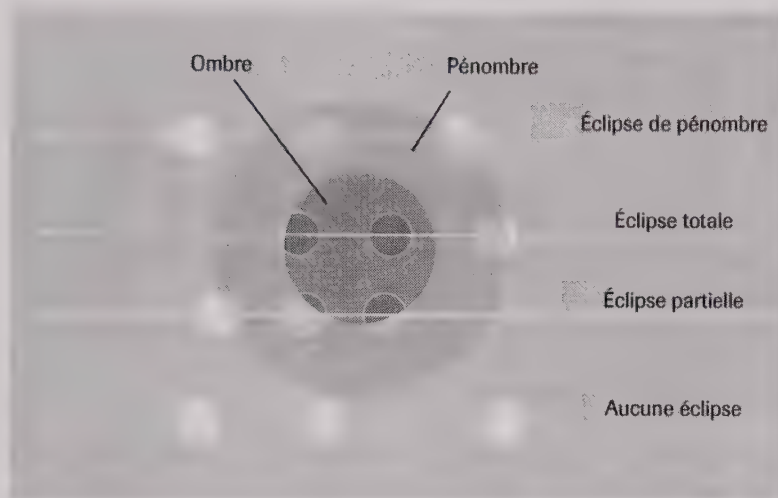


FIGURE 4.23

Ombre et pénombre de la Terre vues en coupe transversale. Selon le type d'éclipse qui a lieu, le disque lunaire passe partiellement ou entièrement dans l'ombre ou la pénombre.

dans l'ombre de la Terre, elle est légèrement éclairée par la lumière du Soleil qui est réfractée par l'atmosphère terrestre.

Il y a **éclipse partielle** quand une partie seulement de la Lune est obscurcie par l'ombre de la Terre.

Il y a **éclipse de pénombre** quand la Lune passe entièrement dans la pénombre de la Terre. La pénombre correspond à une grande zone à demi obscurcie autour du cône d'ombre. Les éclipses de pénombre sont difficiles à observer, car la diminution de l'éclat de la Lune est à peine perceptible.

La durée d'une éclipse de Lune est d'environ 2 heures si l'on mesure le temps que prend la Lune pour passer dans l'ombre de la Terre. Cependant, si l'on considère le temps total de passage dans l'ombre et la pénombre, la durée de l'éclipse peut s'étendre jusqu'à 4 heures.

Éclipses de Soleil

Bien que les éclipses de Lune soient intéressantes, les éclipses de Soleil sont sans doute les plus impressionnantes. Très longtemps, les éclipses solaires ont semé la frayeur chez certains peuples. Les peuples indigènes de l'Amérique du Sud, par exemple, vivaient les éclipses comme des événements néfastes par lesquels le Soleil était menacé. Plusieurs rituels étaient alors destinés à sauver le Soleil.

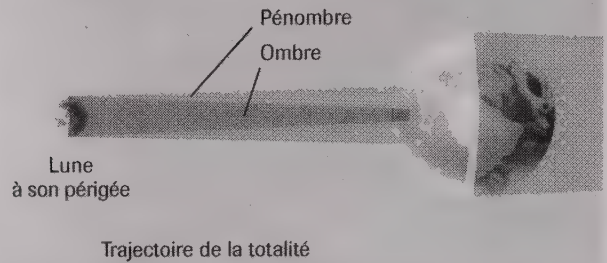
On distingue trois sortes d'éclipses de Soleil : l'éclipse totale, l'éclipse annulaire et l'éclipse partielle. La figure 4.24 montre les diverses positions du Soleil, de la Lune et de la Terre qui donnent lieu à un type d'éclipse. Pour bien comprendre la



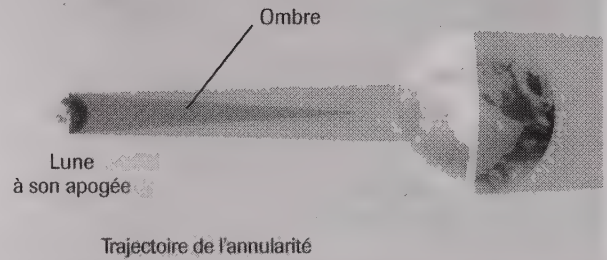
FIGURE 4.24

Une éclipse de Soleil peut être totale, annulaire ou partielle. Elle est totale lorsque la Lune est près de son péri-gée et que l'alignement est parfait. Elle est annulaire lorsque la Lune et le Soleil sont alignés et que la Lune est près de son apogée. Elle est partielle lorsque la Lune et le Soleil ne sont pas parfaitement alignés.

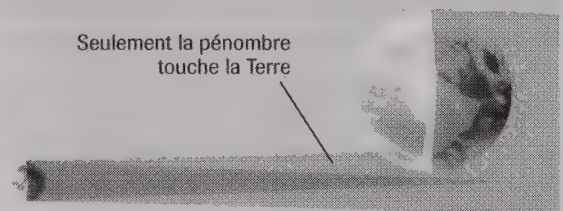
a) Éclipse de Soleil totale



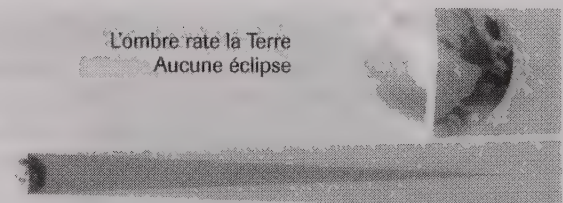
b) Éclipse de Soleil annulaire



c) Éclipse de Soleil partielle



d) Aucune éclipse





différence entre une éclipse totale et une éclipse annulaire, il faut se rappeler que la Lune suit une orbite elliptique autour de la Terre et que la distance Terre-Lune passe d'environ 350 000 kilomètres (périgée) à environ 400 000 kilomètres (apogée) selon la position de la Lune autour de son orbite.

Il y a **éclipse totale** de Soleil quand le disque lunaire couvre entièrement le disque solaire et qu'il nous cache tout le Soleil, sauf la couronne. Cela est possible lorsque la Lune est à son périgée, ou du moins assez proche de la Terre pour que son ombre atteigne la planète. Pour un endroit donné, une éclipse totale ne dure jamais plus de quelques minutes; la durée maximale est de 8 minutes. L'ombre de la Lune sur la Terre se déplace à une vitesse d'environ 1 700 kilomètres à l'heure à l'équateur. La bande de noirceur totale correspondant à la trajectoire de l'ombre de la Lune sur la Terre varie selon la distance de la Lune à la Terre. La largeur de la bande ne dépasse jamais 270 kilomètres, ce qui est très mince à l'échelle planétaire. C'est pour cette raison que l'on observe rarement une éclipse totale de Soleil au même endroit sur la Terre. Tous les 18 mois, il est possible d'observer quelque part sur la Terre une éclipse totale.

Pendant une éclipse solaire, les animaux se comportent souvent de façon confuse et se préparent à aller passer la nuit. Certaines fleurs se referment. Les oiseaux cessent de chanter. Les étoiles les plus brillantes et les planètes paraissent dans le ciel obscurci. La température locale peut chuter de près de 10 °C. Toutefois, il arrive souvent que le pourcentage du disque solaire caché par la Lune soit insuffisant pour que l'éclipse puisse être perceptible sur Terre.

Il y a **éclipse annulaire** lorsque la Terre, la Lune et le Soleil sont parfaitement alignés, mais que le disque de la Lune n'arrive pas à couvrir tout le disque solaire et laisse paraître une bande annulaire étroite de la photosphère. Cela se produit lorsque la Lune est près de son apogée et que son ombre ne réussit pas à atteindre la Terre. Une éclipse annulaire peut durer jusqu'à 12 minutes, mais la plupart du temps la durée est d'environ 6 minutes.

Il y a **éclipse partielle** lorsque la pénombre ou une partie de l'ombre de la Lune frappe la Terre. Dans cette situation, pour l'observateur, seulement une partie du Soleil est obscurcie. Les phases initiales et finales des éclipses annulaires ou totales pourraient être des éclipses partielles.

Le tableau 4.7 (page 135) donne les dates des prochaines éclipses de Soleil.



TABLEAU 4.6

Principales éclipses lunaires, de 2003 à 2010

Date	Type d'éclipse	Durée de la totalité	Zone de visibilité
16 mai 2003	Totale	53 min	Côte est de l'Amérique du Nord, Amérique du Sud, côte ouest de l'Afrique
9 novembre 2003	Totale	24 min	Côte est du continent américain, Europe, Afrique
4 mai 2004	Totale	1 h 16 min	Afrique, Europe orientale, Asie centrale
28 octobre 2004	Totale	1 h 21 min	Continent américain, Europe occidentale, Afrique occidentale
24 avril 2005	De pénombre		Asie orientale, Australie, océan Pacifique, continent américain
17 octobre 2005	Partielle	58 min	Asie, Australie, océan Pacifique, Amérique du Nord
14 mars 2006	De pénombre		Continent américain, Europe, Afrique, Asie
7 septembre 2006	Partielle	1 h 33 min	Europe, Afrique, Asie, Australie
3 mars 2007	Totale	1 h 14 min	Continent américain, Europe, Afrique, Asie
28 août 2007	Totale	1 h 31 min	Asie orientale, Australie, océan Pacifique, continent américain
21 février 2008	Totale	51 min	Océan Pacifique central, continent américain, Europe, Afrique
16 août 2008	Partielle	3 h 9 min	Amérique du Sud, Europe, Afrique, Asie, Australie
9 février 2009	De pénombre		Europe de l'Est, Asie, Australie, océan Pacifique, Amérique du Nord occidentale
7 juillet 2009	De pénombre		Australie, océan Pacifique, continent américain
6 août 2009	De pénombre		Continent américain, Europe, Afrique, Asie occidentale
31 décembre 2009	Partielle	1 h 2 min	Europe, Afrique, Asie, Australie
26 juin 2010	Partielle	2 h 44 min	Asie orientale, Australie, océan Pacifique, ouest du continent américain
21 décembre 2010	Totale	1 h 13 min	Asie orientale, Australie, océan Pacifique, continent américain, Europe



TABLEAU 4.7

Principales éclipses solaires, de 2003 à 2010

Date	Type d'éclipse	Durée maximale	Zone de visibilité
31 mai 2003	Annulaire	3 min 37 s	Pôle Nord, Islande, Groenland
23 novembre 2003	Totale	1 min 57 s	Antarctique
19 avril 2004	Partielle		Antarctique, Afrique australe
14 octobre 2004	Partielle		Nord-est de l'Asie, Hawaï, Alaska
8 avril 2005	Totale puis annulaire	42 s	Nouvelle-Zélande, océan Pacifique austral, Amérique centrale
3 octobre 2005	Annulaire	4 min 32 s	Espagne, Sahara, Afrique orientale
29 mars 2006	Totale	4 min 7 s	Afrique centrale, Turquie, Russie
22 septembre 2006	Annulaire	7 min 9 s	Nord de l'Amérique du Sud, Atlantique austral et Afrique occidentale
19 mars 2007	Partielle		Asie, Alaska
11 septembre 2007	Partielle		Amérique du Sud, Antarctique
7 février 2008	Annulaire	2 min 12 s	Antarctique, Nouvelle-Zélande et Australie orientale
1 ^{er} août 2008	Totale	2 min 27 s	Nord du Canada, Groenland, Sibérie, Mongolie, Chine
26 janvier 2009	Annulaire	7 min 54 s	Océan indien austral, Asie du Sud-Est
22 juillet 2009	Totale	6 min 39 s	Inde, Népal, Chine, océan Pacifique central
15 janvier 2010	Annulaire	11 min 8 s	Océan Pacifique central, Inde, Chine
11 juillet 2010	Totale	5 min 20 s	Océan Pacifique austral, sud de l'Amérique du Sud

Intérieur de la Lune

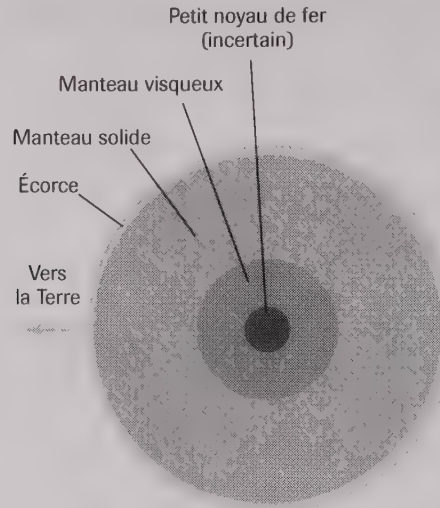
La composition interne de la Lune (figure 4.25) nous serait encore plus inconnue si l'on n'avait pu en étudier la sismologie. C'était un des objectifs des missions Apollo, dans les années 70, lors desquelles les astronautes ont déposé des sismographes à la surface de la Lune. Les appareils ont mesuré en moyenne un tremblement de Lune par jour. Ils ont aussi enregistré des tremblements plus importants se produisant



tous les 28,4 jours, soit exactement lorsque la Lune est à son périégée, moment pendant lequel les effets de marée sont plus intenses, et qu'elle se trouve plus près de la Terre.

FIGURE 4.25

L'intérieur de la Lune comporte plusieurs couches. Une croûte, un manteau solide, un manteau visqueux et peut-être un petit noyau de fer.



Grâce aux mesures effectuées par les sismographes lunaires, les planétologues ont déduit que l'épaisseur de la croûte lunaire varie de 60 kilomètres du côté qui fait face à la Terre à 130 kilomètres du côté de la face cachée. Les raisons de cet écart ne sont toujours pas bien comprises. Cependant, l'écart expliquerait pourquoi les mers (coulées de lave durcie) sont plus nombreuses du côté visible de la Lune que de l'autre. En effet, une croûte plus mince étant plus facile à percer, il y a été plus facile pour la lave venant de l'intérieur de la Lune de s'écouler jusqu'à la surface.

La croûte lunaire est plus rigide que la croûte terrestre. Elle est aussi plus épaisse et il n'y a pas d'eau à l'état libre à l'intérieur, ce qui implique que les roches internes de la Lune sont soudees plus solidement que celles de l'intérieur de la Terre.

Sous la croûte se trouve un manteau rigide d'environ 1 000 kilomètres d'épaisseur, suivi d'un manteau visqueux de quelque 400 kilomètres et, au centre, fort probablement un petit noyau de fer d'environ 400 kilomètres de rayon. Le noyau de la Lune compterait pour à peine quelques pourcents de la masse totale de la Lune, ce qui est très petit par rapport au noyau de la Terre, qui occupe 30 % de la masse totale de la planète.



Surface de la Lune

La surface de la Lune est parsemée de cratères causés par des météorites ou d'anciens volcans (figure 4.26). On y trouve aussi des mers, qui se présentent comme des zones plus sombres à la surface. Ces mers ne contiennent pas d'eau; elles sont plutôt des zones peu accidentées (d'où le nom de **mers**) contenant de la lave solidifiée par le temps. Les mers sont plus jeunes que le reste des éléments de la surface de la Lune. Elles se sont formées 800 millions d'années après la Lune.

Les mers, les cratères et les autres structures lunaires sont illustrées sur la figure 4.27. On a donné aux cratères des noms d'astronomes ou de philosophes célèbres.

À partir de roches lunaires recueillies par des missions automatisées ou par les astronautes au cours de missions habitées, les scientifiques ont établi un scénario d'évolution de la surface de la Lune, divisé en cinq grandes périodes :

1 L'ère prénectarienne (de 4,6 Ga⁴ à 3,92 Ga)

L'ère prénectarienne s'étend de la naissance de la Lune, il y a 4,6 Ga, à la formation de la mer du Nectar (d'où le nom **prénectarienne**), il y a 3,92 Ga. Au tout début, la Lune se serait formée assez rapidement, c'est-à-dire sur une période de 60 à 80 millions d'années, par accréation. La dernière phase de sa formation fut si violente que l'énergie libérée pendant les derniers impacts fit fondre la Lune, ce qui lui aurait permis de se différencier. La **différenciation**, comme nous l'avons déjà indiqué (voir le chapitre 3), est le processus pendant lequel les matériaux lourds, des métaux surtout, coulent vers le noyau au centre et les matériaux plus légers restent en surface pour former l'écorce. En se refroidissant graduellement, la Lune s'est dotée d'une croûte relativement importante à la fin de cette période.

2 L'ère nectarienne (de 3,92 Ga à 3,85 Ga)

L'ère nectarienne n'a duré que 70 millions d'années, pour se terminer avec la formation de la mer des Pluies, bassin de 1 500 kilomètres de diamètre. Les missions Apollo ont montré que les zones montagneuses sur la Lune ne sont pas issues du processus d'accréation initial. Elles ont plutôt été formées 500 millions d'années après celle de la Lune. C'est dans cette période que les montagnes et les reliefs



FIGURE 4.26

Surface cratérisée de la Lune

4. Rappel: 1 Ga est une giga-année, soit un milliard d'années.
1 Ma est une méga-année, soit un million d'années.



ont été créés et que la Lune a subi une phase de violentes collisions météoritiques appelée le **grand bombardement**.

3 L'ère imbrienne (de 3,85 Ga à 3,15 Ga)

L'ère imbrienne a débuté avec la création de la mer des Pluies par la collision d'un astéroïde de 100 kilomètres de

FIGURE 4.27

La surface de la Lune présente des mers, des cratères, des monts, des baies, etc.



CRATÈRES

- | | | | |
|----------------|------------------|-------------------|----------------|
| 1. Albategnius | 11. Cléomède | 21. Langrenus | 31. Pline |
| 2. Alphonsus | 12. Copernic | 22. Longomontanus | 32. Posidonius |
| 3. Archimède | 13. Ératosthène | 23. Maginus | 33. Ptolémée |
| 4. Aristarque | 14. Eudoxe | 24. Manilius | 34. Schickard |
| 5. Aristote | 15. Fracastorius | 25. Maurolycus | 35. Schiller |
| 6. Arzachel | 16. Fra Mauro | 26. Messala | 36. Taruntius |
| 7. Atlas | 17. Gassendi | 27. Petavius | 37. Théophilus |
| 8. Blancanus | 18. Grimaldi | 28. Piccolomini | 38. Timocharis |
| 9. Bond | 19. Hipparque | 29. Pitatus | 39. Tycho |
| 10. Clavius | 20. Kepler | 30. Platon | 40. Walter |

AUTRES STRUCTURES

- | | | | |
|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| a) Baie des Iris | d) Baie Torride | g) Monts Altai | j) Monts Hæmus |
| b) Baie du Centre | e) Alpes | h) Monts Caucases | k) Mur Droit |
| c) Baie de la Rosée | f) Monts Apennins | i) Monts Carpathes | l) Vallée de Rheita |



diamètre avec la Lune. Puis une intense activité volcanique a duré environ 700 millions d'années. Le refroidissement de la Lune s'est poursuivi jusqu'à la fin de l'ère imbrienne. À ce moment, la croûte était devenue assez épaisse pour résister aux chocs et aux remontées de lave à l'origine de la création des mers.

④ L'ère ératosthénienne (de 3,15 Ga à 1,2 Ga)

À partir de l'ère ératosthénienne, le visage de la Lune ne changera à peu près plus. C'est une période très tranquille par rapport aux précédentes. Il y aura encore la formation de quelque deux douzaines de cratères moyens (100 kilomètres de diamètre). C'est à partir de ce moment que l'on pourra, en quelque sorte, qualifier la Lune d'**astre mort**.

⑤ L'ère copernicienne (de 1,2 Ga jusqu'à aujourd'hui)

Caractérisée par une très faible activité, l'ère copernicienne s'étend jusqu'à nos jours. Les cratères Copernic (810 Ma) (figure 4.28) et Tycho (109 Ma) ont été formés dans cette ère.

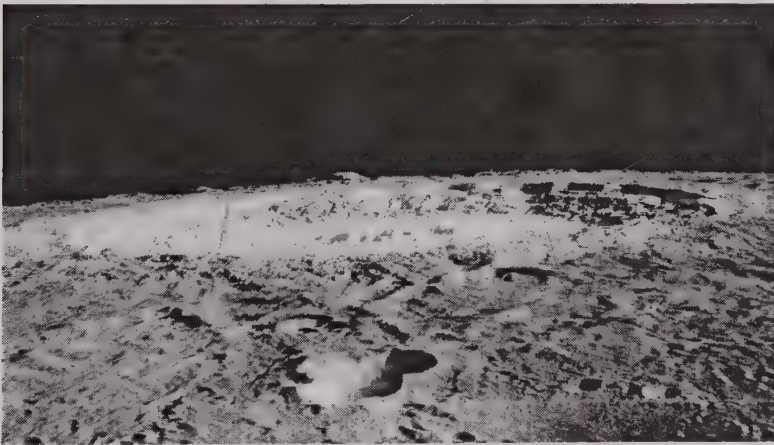


FIGURE 4.28

Cratère Copernic

Aujourd'hui, il n'y a donc presque pas d'érosion sur la Lune et les roches n'ont pas été dérangées depuis des millions, voire des milliards d'années.

Le sol lunaire est couvert d'une mince couche de poussières et de roches de 1 à 20 mètres d'épaisseur, appelée **régolite**. Les poussières sont surtout formées de fragments cristallins et vitreux et de petites billes de verre de diverses couleurs produites par de nombreux impacts de météorites.



Sur ce sol un peu mou, les pas des astronautes américains ont laissé des traces qui seront visibles encore plusieurs millions d'années. Lentement, elles se recouvriront d'une couche de micrométéorites qui finira par les masquer.

Juste au-dessous de la surface lunaire, on trouve des masses de matière compacte appelées **mascons** (de *mass concentrations*, en anglais). Les planétologues pensent que ce sont des météorites riches en nickel ou des régions constituées de matériaux denses qui auraient gelé dans la croûte lunaire lors de sa formation. Les mascons ont été découverts grâce à des anomalies dans l'orbite des satellites artificiels gravitant autour de la Lune. Qui sait si les mascons ne constitueront pas un jour des sites possibles d'exploitation minière ?

Exploration de la Lune

Seul objet du Système solaire à avoir été visité par des missions habitées, la Lune a également été l'objectif du plus grand nombre de missions automatisées. À ce jour, plus de 70 mis-

sions ont contribué à mieux nous faire connaître notre seul satellite naturel. De ce nombre, seulement 3 missions ont eu lieu depuis 1976. Entre 1969 et 1972, six missions, soit Apollo 11, 12, 14, 15, 16 et 17, ont permis à 12 hommes de marcher sur la Lune. Les missions précédant les missions habitées ont permis, entre autres choses, de développer les technologies d'alunissage. Plusieurs expéditions se sont traduites par un échec dans leur tentative d'atteindre doucement la surface de la Lune.

Plus récemment, les observations effectuées par la sonde spatiale Clémentine en 1994 ont semblé indiquer la présence d'eau sous forme de glace dans le fond de certains cratères qui ne reçoivent jamais la lumière du Soleil, près du pôle Sud de la Lune.

MATIÈRE À RÉFLEXION

L'homme remarchera-t-il sur la Lune ?

Cela fait déjà plus de trente ans que le voyage vers la Lune est devenu réalité. De 1969 à 1972, six missions ont permis à des hommes de fouler le sol de la Lune. Toutefois, depuis que la mission Apollo 17 a quitté, en décembre 1972, le sol lunaire, seuls des engins automatisés s'y sont posés. Plus économiques, chars lunaires et sondes ont, depuis ce temps, ramassé des échantillons de cailloux, les ont analysés et en ont rapporté une partie sur la Terre.

Maintenant que le rêve d'explorer la Lune est réalisé, il fait place à des rêves de colonisation. Certains croient que le temps n'est pas si loin où l'on verra une base spatiale lunaire, des cités sous



cloche ou des rampes de lancement de vaisseaux qui s'élanceraient vers les étoiles. D'autres croient également à l'installation, dans un avenir plutôt rapproché, d'un grand télescope sur la face cachée de la Lune, pour éviter le « clair de Terre ».

Que pensez-vous de ces projets ? Croyez-vous que l'être humain partira un jour à la conquête de la Lune ? Qu'est-ce qui pourrait l'encourager à le faire ? et le décourager ? Quelles sont les implications économiques, environnementales et technologiques de tels projets ? Qui sera la première femme à aller sur la Lune ? Irez-vous sur la Lune un jour ? Discutez de ces questions en classe ou en petits groupes, ou dans une courte recherche.



En 1998, la mission Lunar Prospector a été lancée pour effectuer une foule d'observations et pour vérifier les hypothèses nées des expéditions de Clémentine. Il avait été prévu que la sonde effectue un écrasement dirigé en juillet 1999 dans une zone ombragée d'un cratère sélectionné. On estimait à moins de 10 % les chances que les résidus éjectés par la collision mettent au jour des éléments prouvant qu'il y a bel et bien de l'eau sur la Lune. L'étude de l'écrasement a été réalisée par le télescope spatial Hubble et plusieurs satellites artificiels; l'expérience n'a donné aucun résultat tangible. C'est-à-dire que si la mission Lunar Prospector n'a pas pu démontrer la présence d'eau sur la Lune, elle n'a pas non plus contribué à éliminer cette hypothèse. Il faudra explorer cette région de la Lune plus à fond pour obtenir la certitude qu'il y a bien ou non de la glace d'eau à cet endroit. À cet effet, l'une des prochaines missions vers la Lune, Smart-1, doit être lancée au début de 2003 pour prendre fin en 2006. Cette mission est menée par l'Agence spatiale européenne, qui en sera à sa première visite sur la Lune. C'est une mission inhabitée qui, outre qu'elle mettra à l'essai une nouvelle technologie de propulsion, tentera d'obtenir de nouveaux indices quant à la présence de glace sur la Lune.

Il va sans dire que si la présence d'eau est confirmée, cette découverte sera très importante pour l'exploration et l'exploitation future de notre satellite naturel.

Origine de la Lune

L'âge estimé de la Lune correspond au même âge que la Terre, soit 4,6 milliards d'années. L'analyse d'échantillons lunaires rapportés de diverses missions a permis de déterminer l'âge et la composition des roches à la surface de la Lune. Cette information, additionnée aux connaissances sur la formation de la Terre et du Système solaire, a permis d'établir quatre théories (figure 4.29a, b, c et d) ou scénarios tentant d'expliquer l'origine de la Lune.

Théorie de la fission

La Lune serait un morceau qui se serait détaché de la Terre. La séparation se serait produite sous l'effet de marées intenses créées par le Soleil alors que la Terre était encore fluide et en rotation très rapide sur elle-même.

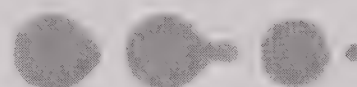


FIGURE 4.29a

Théorie de la co-accrétion

La Lune et la Terre auraient été formées en même temps au début du Système solaire, le plus naturellement possible, par accrétion. La Lune serait donc la sœur de la Terre.



FIGURE 4.29b

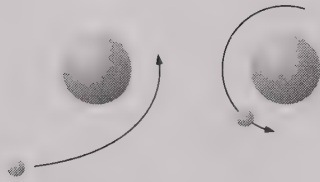


FIGURE 4.29c

Théorie de la capture

La Lune se serait formée dans une autre région du Système solaire et aurait été capturée par la Terre alors qu'elle tournait autour du Soleil sur une orbite indépendante.

Théorie de la collision



La Lune se serait formée à partir des débris arrachés à la Terre à la suite d'une collision avec un objet de la grosseur de la planète Mars, il y a environ 4,6 milliards d'années.

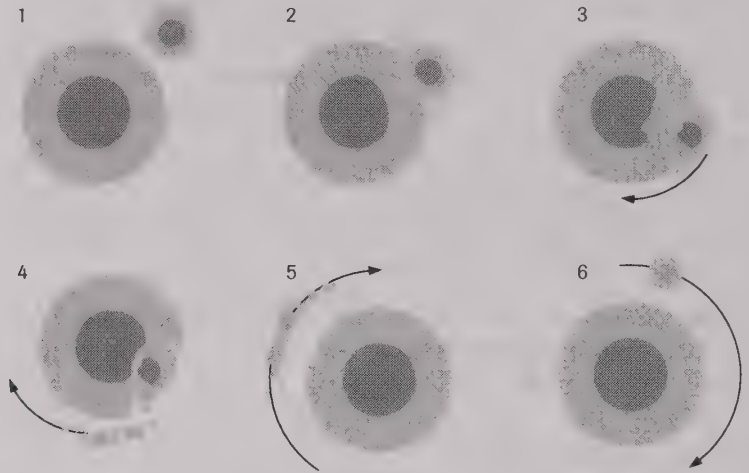


FIGURE 4.29d

Les trois premières théories se heurtent à d'énormes difficultés lorsqu'on tente d'expliquer à la fois les similitudes et les différences dans la composition chimique de la Terre et de la Lune, ainsi que lorsqu'on étudie les données dynamiques se rapportant aux deux astres, comme la période de rotation. Par exemple, aucune de ces théories n'explique de façon satisfaisante la très faible proportion de métaux dans la structure interne de la Lune. La quatrième théorie, celle de la collision, est la seule qui prévoit des compositions chimiques et des valeurs relatives au mouvement de la Lune et de la Terre qui sont conformes aux données actuelles sur les deux astres. Cela en fait la théorie la plus satisfaisante à ce jour.

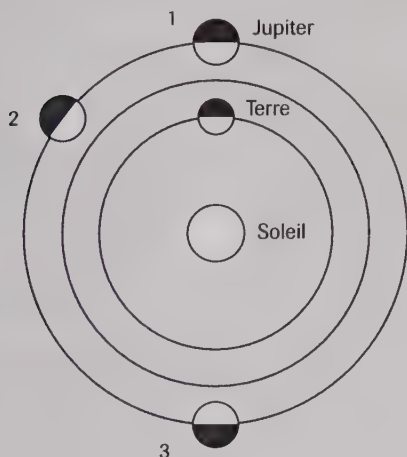
Quelle est la seule structure terrestre construite par l'homme et visible depuis la Lune? Plusieurs croient que c'est la Grande Muraille de Chine. Cela n'est pas tout à fait vrai,

ni tout à fait faux. En réalité, il semble que ce que l'on voit est le sable accumulé le long du mur et non le mur lui-même, qui n'a que dix mètres de largeur.

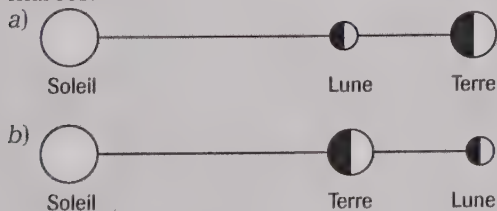


Questions de révision

1. Vrai ou faux ?
 - a) Nous pourrions nous poser sur les taches sombres du Soleil, car elles sont plus froides que le reste du Soleil.
 - b) Les taches sombres sont lumineuses.
 - c) Les taches sombres obéissent à un cycle de 35 ans.
 - d) Les protubérances sont d'immenses explosions à la surface du Soleil.
 - e) Normalement, la couronne solaire n'est pas visible.
 - f) Parce qu'il y a de nombreuses mers sur la Lune, les astronautes pourraient s'y déplacer en bateau.
2. Associez les mots avec les chiffres correspondants sur le dessin :
 - a) Conjonction
 - b) Quadrature
 - c) Conjonction supérieure
 - d) Opposition
 - e) Conjonction inférieure



3. Dans chaque cas, indiquez si ces positions entraîneront de grandes ou de petites marées.



4. À l'aide de la carte de la Lune (fig. 4.27), indiquez les coordonnées des cratères suivants :
 - a) Gassendi
 - b) Kepler
 - c) Platon
 - d) Copernic
 - e) Archimède
 - f) Posidonius
5. Quelle est la différence entre une étoile et une planète ?
6. Qu'entend-on par **mouvement rétrograde des planètes** ?
7. Qu'est-ce que le vent solaire ?
8. Que peut-on conclure du fait que la vitesse de rotation du Soleil n'est pas la même aux pôles qu'à l'équateur ?
9. Nommez et expliquez brièvement les trois sortes d'éclipses de Soleil.
10. Comment s'appelle la surface visible du Soleil ?
11. Qu'est-ce que le nuage de Oort ?
12. Quelle est la source d'énergie du Soleil ?
13. Pourquoi les planètes se déplacent-elles toutes près de l'écliptique ?
14. Nommez les quatre planètes telluriques.
15. Nommez et expliquez brièvement les trois sortes d'éclipses de Lune.
16. Comment s'appelle l'atmosphère du Soleil ?
17. Que signifie un albédo de 15 % pour une planète ?
18. Pourquoi voyons-nous toujours la même face de la Lune ?
19. Qu'est-ce que le cycle de Méton ?
20. Nommez deux observations prouvant la nature sphérique de la Lune.
21. Lorsque la pleine Lune se lève, où se trouve exactement le Soleil et que fait-il ?

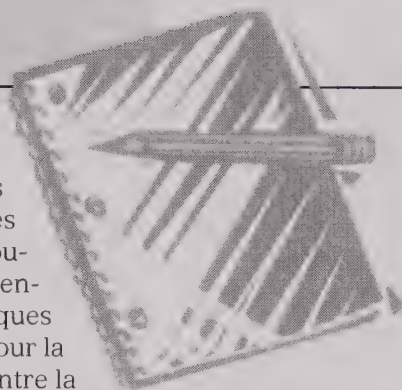


- 22.** Placez, en ordre croissant de distance au Soleil, les neuf planètes « officielles » du Système solaire.
- 23.** À quels astres du Système solaire associez-vous les jours de la semaine ?
- 24.** Pourquoi la Lune ne devient-elle pas complètement sombre pendant une éclipse totale de Lune (elle est plutôt orange foncé) ?
- 25.** Pourquoi n'observons-nous pas une éclipse de Lune chaque mois ?
- 26.** Pourquoi la face cachée de la Lune a-t-elle beaucoup moins de mers que la face visible ?
- 27.** Pouvons-nous voir un lever de Terre sur la Lune ? Expliquez.
- 28.** Nommez les planètes qui ne peuvent pas être en opposition.
- 29.** Quelles planètes n'ont pas d'élongation maximale ?
- 30.** Quel pourcentage du Système solaire représente environ la masse du Soleil ?
- 31.** Classez, en ordre croissant de distance à partir du centre, les couches internes du Soleil : zone radiative, noyau, zone convective et photosphère.
- 32.** Actuellement, quelle est la théorie de l'origine de la Lune la plus acceptée ? Expliquez.
- 33.** À quelle période de l'histoire de la Lune associez-vous le « grand bombardement » ?



Diamètre de la Lune et distance Terre-Lune

Historiquement, la détermination du diamètre de la Lune et de sa distance par rapport à la Terre sont étroitement liées. Les Grecs ont d'ailleurs été les premiers à donner une estimation valable de ces deux mesures, s'appuyant sur la première pour trouver la seconde. La présente activité vous fera reprendre, dans une version plus moderne, les techniques employées par les Grecs, il y a plus de 2 000 ans, pour la mesure du diamètre de la Lune et de la distance entre la Terre et la Lune.



Détermination du diamètre de la Lune

La technique qu'ont employée les Grecs pour estimer le diamètre de la Lune est toute simple : mesurer l'ombre que projette la Terre sur le parcours de la Lune lors d'une éclipse de Lune, et comparer la taille de l'ombre avec la taille du disque lunaire. S'il l'on connaît la taille de la Terre, on peut déduire la taille de son ombre, et ensuite la taille du disque de la Lune.

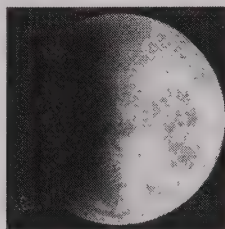
Les Grecs estimaient que le diamètre de l'ombre de la Terre sur la Lune était égal à deux ou trois fois le diamètre de la Lune, ce qui est raisonnablement proche de la réalité. Ils avaient également réussi à déterminer de combien le diamètre du cône d'ombre formé par la Terre est diminué lorsqu'il atteint la Lune. Cette diminution est d'environ 25 %. Cela veut dire que la Terre, dont le rayon moyen est égal à 12 760 km, produit une ombre qui, sur la Lune, n'a plus qu'environ 9 600 km de diamètre ($12\,760\text{ km} \times 75\%$).

La figure suivante montre une éclipse de Lune. L'ombre de la Terre, plus grande que le disque lunaire, couvre partiellement celui-ci. Suivez la procédure suivante et voyez si vous êtes en mesure d'arriver à une valeur du diamètre lunaire proche de la valeur acceptée aujourd'hui, soit 3 476 km. Les Grecs avaient obtenu 4 800 km. Il faut se rappeler que la mesure du diamètre de la Terre dont les Grecs disposaient surestimait la taille de la Terre.

1. Sur la figure, tracez le cercle qui circonscrit l'ombre de la Terre projetée sur la Lune.
2. Mesurez en millimètres (mm) le diamètre du cercle que vous venez de tracer.
3. Mesurez en millimètres (mm) le diamètre du disque lunaire.



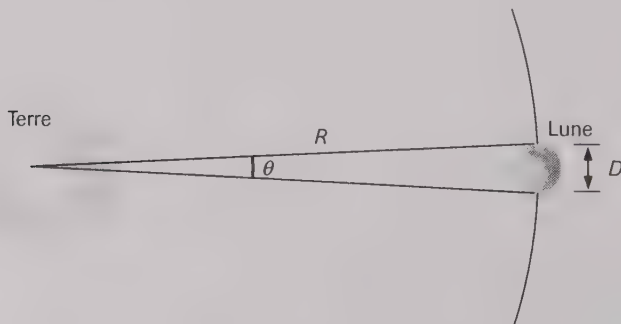
4. Calculez le diamètre de la Lune en kilomètres (km) en vous servant du diamètre approximatif de l'ombre de la Terre (9 600 km) et des deux mesures précédentes. (Vous devrez effectuer une règle de trois.)
5. Comparez le résultat de la question n° 4 avec le diamètre réel de la Lune. Êtes-vous satisfait de votre estimation ?



Détermination de la distance entre la Terre et la Lune

Si l'on dispose d'une estimation valable de la taille de la Lune, on peut, à l'aide d'un peu de géométrie, trouver une valeur de la distance Terre-Lune. Sur la figure suivante, le diamètre de la Lune est représenté par la lettre D , la distance Terre-Lune par la lettre R et l'angle θ sous-tendu par le disque lunaire depuis la Terre est d'environ $0,517^\circ$. Voici la procédure à suivre pour calculer D .

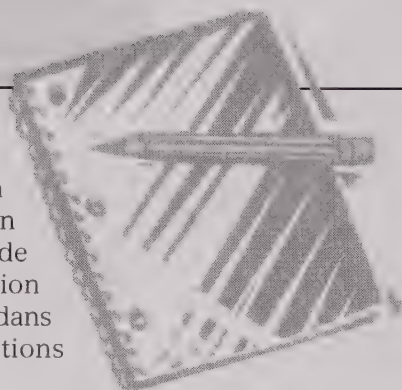
1. Trouvez la circonférence de l'orbite de la Lune en kilomètres (km) en multipliant votre valeur du diamètre de la Lune par 696. (Il faut juxtaposer le disque lunaire 696 fois pour faire un tour complet de 360° .)
2. Calculez le rayon de l'orbite de la Lune (équivalant à la distance R Terre-Lune) à l'aide de la formule pour la circonférence $C = 2\pi R$.
3. Comparez le résultat obtenu avec la distance moyenne Terre-Lune reconnue aujourd'hui, soit 384 000 km. Êtes-vous satisfait de votre estimation ?





Observation de la Lune

La présente activité comporte deux volets. Le premier consiste dans l'observation quotidienne de la Lune, pendant deux semaines environ. En dessinant, soir après soir, sur la fiche d'observation fournie à cet effet, la forme de la partie brillante de la Lune, vous serez en mesure de décrire l'évolution de ses phases, ainsi que le mouvement de la Lune dans le ciel. Le second volet présente quelques questions portant sur divers aspects relatifs à la Lune.



Quand et comment observer ?

Les observations doivent être effectuées pendant 15 soirs consécutifs, entre 19 h 00 et 23 h 00. Vous devrez choisir une période de deux semaines de telle sorte que la Lune sera levée au moment de noter vos observations. Ne confondez pas une nouvelle lune avec l'absence de Lune dans le ciel attribuable au fait qu'elle ne soit pas encore levée.

Instructions d'observation

1. Observez la Lune pendant 15 jours consécutifs. Effectuez vos observations entre 19 h 00 et 23 h 00, si possible, toujours à la même heure.
2. Notez, sur la fiche d'observation (page 149), le jour et l'heure de chaque observation. (Employez la notation de 0 h 00 à 24 h 00.)
3. Indiquez par un « x », dans le rectangle allongé, la position relative de la Lune par rapport à l'horizon sud. Par exemple, si la Lune est observée près du coucher du Soleil, à l'ouest, le « x » devra être placé à l'extrémité droite du rectangle, près de la lettre « O ».
4. Dans chaque cercle, dessinez la forme éclairée de la Lune, telle que vous la voyez au moment de l'observation. Par exemple, dans le cas de la pleine Lune, noircissez tout le cercle, et dans le cas d'un quartier de lune, la moitié du cercle.

Que faire si le ciel est trop couvert pour permettre une bonne observation ?

Dans le cas où un ciel nuageux rend impossible une observation, ne notez rien pour cette journée et tracez un grand « X »



dans le cercle. Le lendemain, notez, comme à l'habitude, les observations dans le cercle suivant.

Questions portant sur les observations

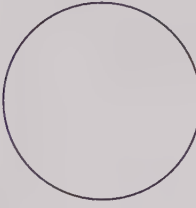
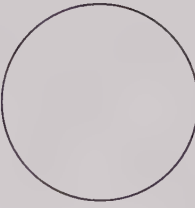
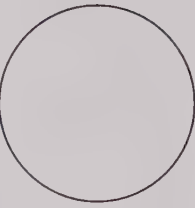
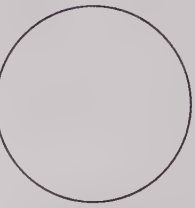
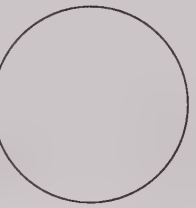
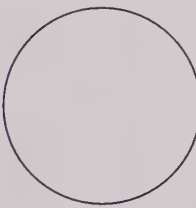
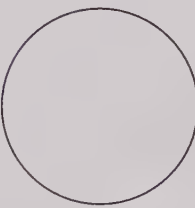
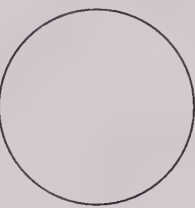
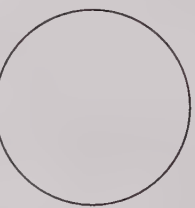
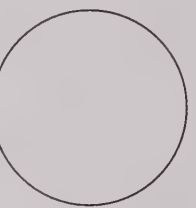
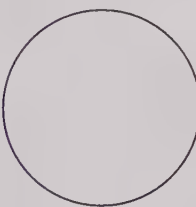
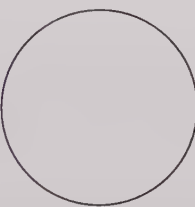
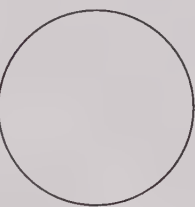
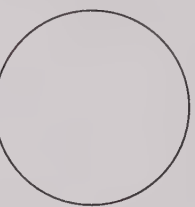
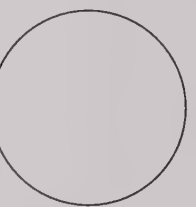
1. Dans quelle direction la Lune se déplace-t-elle dans le ciel par rapport aux étoiles ? d'est en ouest, ou d'ouest en est ?
2. Dans quel sens ce mouvement s'effectue-t-il par rapport à la rotation de la Terre ? dans le même sens ou dans le sens contraire ?
3. À la lumière de vos observations, estimez la durée (en jours) d'une lunaison complète. Rappel : une lunaison est le temps qui s'écoule entre deux nouvelles lunes consécutives.

Questions supplémentaires portant sur la Lune

1. Comment peut-on distinguer le premier quartier de Lune du dernier quartier ?
2. À quelle phase la Lune est-elle au moment :
 - a) d'une éclipse de Lune ?
 - b) d'une éclipse de Soleil ?
3. Vous observez une pleine Lune et celle-ci se trouve sur le méridien du lieu. Quelle heure est-il ?
4. De quelle phase de la Lune s'agit-il si vous l'observez :
 - a) à l'ouest juste après le coucher du Soleil ?
 - b) à l'est juste avant le lever du Soleil ?
5. Si la Lune se trouve directement au-dessus de vous (sur le méridien) un soir, à 21 h 00, où sera-t-elle le soir suivant à la même heure ?



Fiche d'observation

 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:
 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:
 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:	 E S O Jour: Heure:



Les planètes

*À la rencontre
du Soleil*

Nous poursuivons ici notre exploration du Système solaire en étudiant en profondeur chacune des huit planètes autres que la Terre. Nous nous intéresserons à leurs dimensions, leur composition et leurs mouvements dans l'espace. Nous les comparerons entre elles et établirons leurs particularités, leurs similitudes et leurs différences. Nous jetterons un coup d'œil sur les résultats des observations de quelques sondes spatiales qui, depuis les dernières décennies, ont permis de faire progresser nos connaissances sur les astres du Système solaire.

**DANS LES PAGES
QUI SUIVENT,
VOUS APPRENDREZ À :**

- Reconnaître les principales caractéristiques de chacune des huit planètes du Système solaire autres que la Terre.
- Comparer les planètes entre elles et décrire leurs différences et leurs similitudes.
- Étudier l'origine de chacune des planètes.
- Nommer et décrire les principaux satellites du Système solaire.
- Connaître les meilleurs moments pour observer les principales planètes.
- Décrire les missions spatiales liées à l'exploration planétaire.



5.1 Mercure

Mercure est tout en extrêmes. Planète la plus proche du Soleil, la plus rapide dans sa révolution autour de celui-ci et le plus difficile à observer de tous les astres visibles à l'œil nu, sa surface connaît les écarts de température les plus importants du Système solaire (plus de 600° C!).



TABLEAU 5.1

Fiche d'identité de Mercure

		Par rapport à la Terre
Diamètre	4 878 km	38 %
Volume	$6,08 \times 10^{19} \text{ m}^3$	5,6 %
Masse	$3,30 \times 10^{23} \text{ kg}$	5,5 %
Densité	5,43 g/cm ³	98 %
Accélération gravitationnelle	3,70 m/s ²	38 %
Distance moyenne au Soleil	57 900 000 km (0,39 UA)	
Excentricité	0,206	
Période de révolution (année sidérale)	88 jours	
Inclinaison de l'orbite par rapport à l'orbite terrestre	7,0°	
Période de rotation (jour sidéral)	58,6 jours	
Inclinaison de l'axe de rotation	0°	
Albédo¹	11 %	
Atmosphère	Très raréfiée	
Pression à la surface	10^{-12} bar	
Température	Max. : 430 °C; min. : -180 °C	
Nombre de satellites	0	

Terre



Mercure

1. Rappelons que l'albédo est une mesure, en pourcentage, de la proportion de lumière qui est réfléchiée par la surface d'un astre non auto-lumineux. La composition de l'atmosphère peut aussi faire varier l'albédo. L'albédo de Mercure laisse supposer que la composition de sa surface est semblable à celle de la Lune.



Au premier coup d'œil, lorsqu'on observe Mercure depuis la Terre, on croirait voir la sœur jumelle de la Lune, étant donné sa surface accidentée. Toutefois, en y regardant de plus près, on note quelques bonnes différences.

C'est grâce à la sonde américaine Mariner 10, qui a survolé la planète en 1974 et 1975, qu'on a pu obtenir des détails de sa surface. En s'en approchant parfois à seulement quelques centaines de kilomètres, Mariner 10 a pu photographier la plus petite planète tellurique et a permis de cartographier environ 45 % de sa surface.

Pendant cette mission, on a aussi découvert sur Mercure une atmosphère très ténue, principalement composée d'hydrogène et d'hélium et alimentée par le vent solaire. L'atmosphère se renouvelle sans cesse dans la mesure où les atomes qui la composent en sont rapidement expulsés par la chaleur intense qui règne à la surface de la planète.

On a longtemps cru que Mercure présentait toujours la même face au Soleil, ce qui impliquait qu'elle avait un jour sidéral égal à sa période de révolution. Des observations plus précises faites dans les années 60 avec le radiotélescope d'Arecibo ont permis de montrer qu'il n'en est pas tout à fait ainsi. Mercure met 88 jours pour effectuer une révolution complète et 59 jours pour faire un tour sur elle-même (jour sidéral). Le rapport entre sa période de rotation et sa période de révolution est donc exactement $2/3$, ce qui signifie qu'elle effectue trois tours sur elle-même pendant qu'elle fait deux tours autour du Soleil. Cela se traduit par un jour très long sur Mercure : le temps d'un lever de Soleil mercurien au suivant est de 176 jours terrestres (figure 5.1). Ainsi, un habitant de Mercure célébrerait plus souvent son anniversaire qu'il ne verrait de couchers de Soleil !

C'est en raison de ce jour très long que, vue de la Terre, Mercure donne l'impression de toujours montrer la même face au Soleil. La longueur du jour explique également en partie les écarts de température spectaculaires à la surface de la planète. Les jours sont si longs que deux régions, situées près de l'équateur et diamétralement opposées, sont tour à tour très longtemps exposées au Soleil ou très longtemps cachées de celui-ci. On nomme ces deux régions des **pôles de chaleur**. Une des structures importantes de la surface de Mercure, le bassin Caloris (figure 5.2), a été nommée ainsi en raison de sa proximité à un pôle de chaleur (le nom vient du latin *calor*, qui signifie « chaleur »).

Le rapport $2/3$ entre les périodes de rotation et de révolution n'est pas le fait du hasard. Il est plutôt le résultat de l'interaction gravitationnelle entre le Soleil et Mercure. Celle-ci est

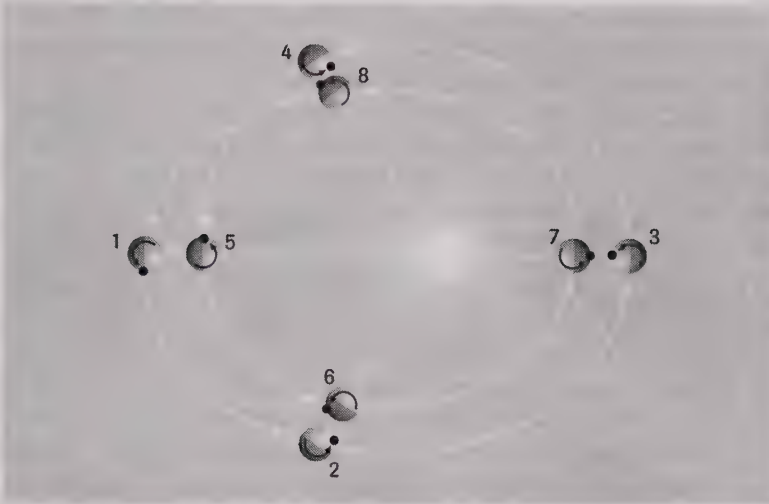


FIGURE 5.1

Vous préférez les anniversaires aux couchers de Soleil ? Mercure est la destination toute désignée pour vous ! Supposons que vous vous trouviez à l'endroit indiqué par le point noir à la position 1. Cette position correspond, pour vous, au lever du Soleil. Ainsi, la position 2 est le milieu de l'avant-midi, la position 3 midi et la position 4 le milieu de l'après-midi. À la position 5, au coucher du Soleil, Mercure a fait un tour complet autour de celui-ci ; il s'est écoulé une année. Au cours de la révolution suivante, vous vivrez une nuit mercurienne aux positions 6, 7 et 8, pour assister de nouveau au lever du Soleil en 1. Il s'est donc écoulé une seule journée depuis votre départ, mais Mercure a fait deux révolutions autour du Soleil. Vous aurez donc vieilli de deux années mercuriennes pendant une seule journée ! Le rapport 2/3 peut être vérifié sur cette illustration. En effet, on peut vérifier que, de la position 1 à 8, pendant les deux révolutions, Mercure effectue trois tours sur elle-même.

marquée par des forces de marée importantes attribuables à la forte excentricité de l'orbite de Mercure. En quelques millions d'années, le Soleil a freiné la rotation de Mercure. Les périodes se sont ensuite stabilisées selon ce rapport qui est un exemple de ce qu'on appelle la **résonance gravitationnelle**. On trouve dans l'Univers plusieurs exemples de résonance gravitationnelle de ce genre. Le mouvement de la Lune, par exemple, qui montre toujours la même face à la Terre, s'est stabilisé dans un rapport 1/1.

La surface de Mercure (figure 5.3) est au moins autant criblée de cratères que la Lune. C'est la caractéristique géologique la plus visible sur Mercure et c'est ce qui nous fait dire que Mercure et la Lune se ressemblent. Cependant, la géologie mercurienne est plus complexe que la géologie lunaire, avec de



FIGURE 5.2

Le bassin Caloris a été nommé ainsi en raison de sa proximité d'un pôle de chaleur.

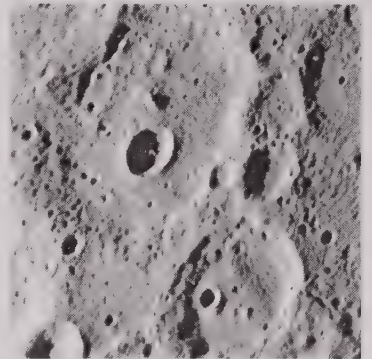


FIGURE 5.3

Cratères à la surface de Mercure



longues failles et d'énormes escarpements. Ces derniers peuvent atteindre jusqu'à 3 kilomètres de hauteur et des centaines de kilomètres de longueur. Certains coupent des cratères en deux, indiquant ainsi qu'ils sont le résultat de compressions titanesques qui se sont produites après la formation de ces cratères. Ils constituent probablement des cicatrices de l'impact qui a formé la structure la plus importante à la surface de Mercure, le bassin Caloris.

Le bassin Caloris est un cratère colossal de 1 300 kilomètres de diamètre, bordé de montagnes et dont la hauteur atteint approximativement 2 000 mètres. Il a vraisemblablement été formé par l'impact violent d'un corps d'au moins 100 kilomètres de diamètre, quelques millions d'années seulement après que Mercure s'est formée. L'impact aurait même laissé, en plus des escarpements, des cicatrices jusqu'à l'antipode de la collision par la propagation d'une violente onde de choc. Il s'en est probablement fallu de peu que Mercure n'éclate en mille morceaux.

En 1991, le VLA (radiotélescope situé au Nouveau-Mexique) fit une découverte très surprenante. En effet, ses 27 antennes ont observé que les ondes radars réfléchies par le pôle Nord de Mercure indiquaient la présence d'une région à forte réflectivité qui pourrait bien être de la glace d'eau. Mercure aurait donc des calottes polaires aux deux pôles.

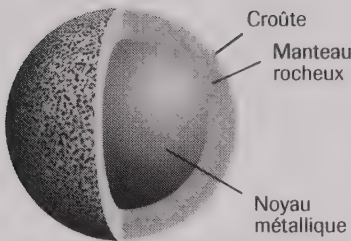


FIGURE 5.4

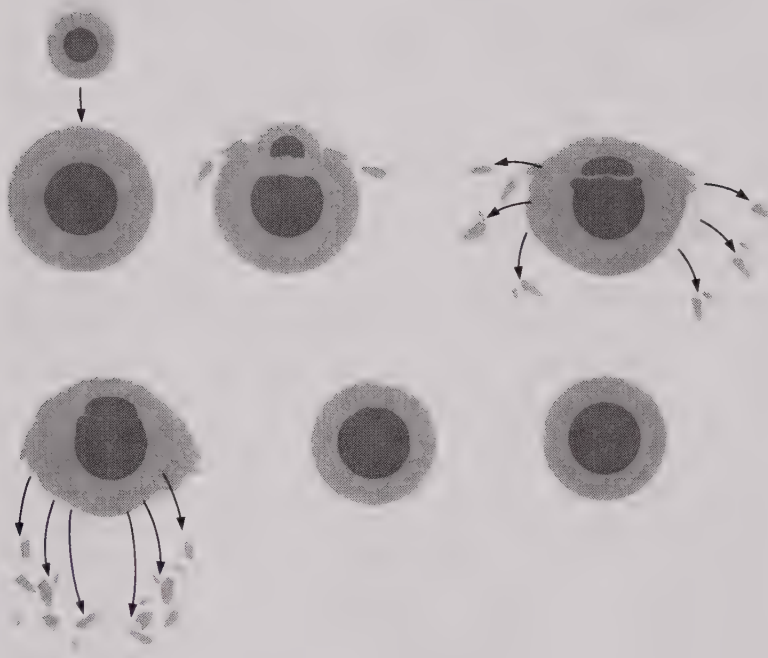
Mercure est constituée d'un noyau de fer très volumineux, d'un manteau rocheux épais de 600 kilomètres environ et d'une mince croûte.

Mercure et la Terre sont les planètes les plus denses du Système solaire. Tout comme pour la Terre, la densité élevée de Mercure signale la présence d'un gros noyau de fer en son centre. Celui-ci prend un espace considérable au cœur de la planète avec un rayon d'environ 1 800 kilomètres, ce qui représente 75 % du rayon total. Le noyau est recouvert d'un manteau rocheux d'à peine 600 kilomètres d'épaisseur et d'une croûte mince (figure 5.4).

Mercure est la seule planète à posséder un noyau métallique qui prenne autant de place dans sa structure interne. Parmi tous les scénarios proposés pour expliquer une aussi forte teneur en métaux dans une planète tellurique, il y en a un qui recueille le plus large consensus. Dans ce scénario (figure 5.5), on suppose qu'à sa formation Mercure présentait une abondance de métaux comparable à celle des autres planètes telluriques. Relativement peu de temps après sa formation, Mercure aurait été percutée directement par un objet de très grande taille, comprenant lui aussi un noyau métallique. L'impact aurait été tel que les deux noyaux auraient fusionné, pendant qu'une grande quantité de roches des manteaux des deux objets aurait été éjectée. Le scénario prévoit que, dans le cas d'une telle



FIGURE 5.5

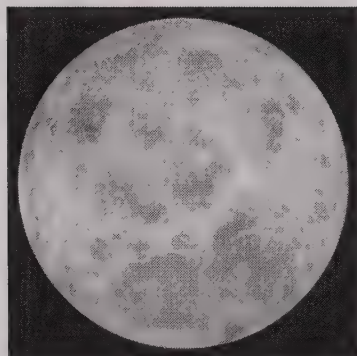


L'abondance anormalement élevée de métaux à l'intérieur de Mercure est expliquée par une théorie qui suggère que la planète serait entrée en collision directe avec un objet assez gros. La violence de l'impact aurait permis aux noyaux des deux objets de fusionner et aurait fait s'éjecter une grande fraction des deux manteaux rocheux. Par la suite, Mercure, transformée, aurait repris lentement sa forme.

collision, la composition de la planète résultante ressemble à la composition actuelle de Mercure.

L'origine de Mercure, la nature de ce qui se trouve aux calottes polaires et la composition exacte de son atmosphère sont autant d'éléments qui échappent encore à la connaissance des astronomes. La sonde Messenger (pour **M**ercury **S**urface **E**nvironment, **G**eochemistry and **R**anging), qui doit être lancée en 2004, leur apportera sûrement quelques éléments de réponse. Messenger doit étudier Mercure de près en 2009 après l'avoir survolée deux fois en 2008.

Mercure n'est pas facile à observer pour l'amateur. Son orbite est si près du Soleil que, la plupart du temps, son éclat est noyé dans la lumière solaire, ce qui en rend l'observation particulièrement difficile. Cependant, on peut voir Mercure plus facilement lorsqu'elle est à son élongation maximale ouest, en l'observant le matin juste avant le lever du Soleil ou lorsqu'elle est à son élongation maximale est, le soir, juste après le coucher du Soleil. Mercure présente, dans sa révolution autour du Soleil, un cycle de phases similaire à celui de la Lune. Cela est attribuable au fait qu'elle est une planète intérieure (voir la sous-section sur les planètes intérieures à la page 107).



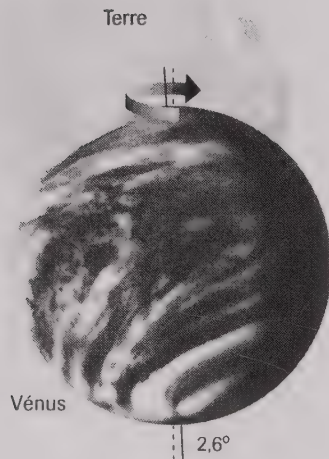
5.2 Vénus

Vénus, qui porte pourtant le nom de la déesse romaine de l'amour et de la beauté, n'est pas une planète très accueillante pour quiconque ose s'en approcher. Ses nuages extrêmement corrosifs d'acide sulfurique, la pression abyssale à sa surface et sa température infernale qui fait fondre le plomb et le zinc ne sont pas des conditions très attirantes pour le touriste sidéral en quête d'exotisme.

TABLEAU 5.2

Fiche d'identité de Vénus

		Par rapport à la Terre
Diamètre	12 104 km	95 %
Volume	$9,29 \times 10^{20} \text{ m}^3$	85 %
Masse	$4,87 \times 10^{24} \text{ kg}$	82 %
Densité	5,24 g/cm ³	95 %
Accélération gravitationnelle	8,87 m/s ²	91 %
Distance moyenne au Soleil	108 200 000 km (0,723 UA)	
Excentricité	0,007	
Période de révolution (année sidérale)	224,7 jours	
Inclinaison de l'orbite par rapport à l'orbite terrestre	3,4°	
Période de rotation (jour sidéral)	243 jours (rétrograde)	
Inclinaison de l'axe de rotation	2,6°	
Albédo	65 %	
Atmosphère	Gaz carbonique (96 %) Azote (3,5 %) Traces d'eau, d'argon, de monoxyde de carbone et d'acide sulfurique Nuages d'acide sulfurique	
Pression à la surface	90 bars	
Température	480 °C	
Nombre de satellites	0	





Pourtant, vue de la Terre, Vénus est attrayante et lumineuse. Communément appelée **étoile du Berger**, car c'est le premier astre qui s'« allume » le soir et le dernier qui s'« éteint » le matin, elle apparaît uniformément blanche au télescope. Sa surface nous est cachée par sa dense atmosphère de dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO_2) à 96 % et par ses épais nuages d'acide sulfurique (H_2SO_4). À certains moments de l'année, Vénus est l'astre le plus brillant du ciel après la Lune et le Soleil. Son albédo (65 %) est le plus élevé de toutes les planètes du Système solaire, en raison surtout de l'épaisse couche nuageuse qui réfléchit généreusement la lumière solaire. Cela en fait la planète la plus facile à trouver et à observer, particulièrement pendant ses élongations maximales.

Même avec un télescope amateur, on peut constater que Vénus présente des phases tout comme Mercure et la Lune, en fonction de sa position par rapport à la Terre et au Soleil. À l'intérêt d'observer ces phases s'ajoute l'effet notable de la distance entre Vénus et la Terre, qui varie de 40 à 260 millions de kilomètres. Cet écart fait changer de façon importante le diamètre apparent de Vénus. Par exemple, au moment de la conjonction supérieure, quand Vénus est pleine ou presque, elle est le plus éloignée de la Terre et son diamètre apparent est petit (10" d'arc). À l'inverse, au moment de la conjonction inférieure, quand Vénus ne présente qu'un mince croissant très allongé, la distance entre les deux planètes est à son minimum et le diamètre apparent de Vénus est grand, avec 66" d'arc (figure 5.6).

La période de rotation d'une planète est habituellement mesurée en observant le déplacement d'un détail précis à la surface. Dans le cas de Vénus, cette façon de procéder est très impré-

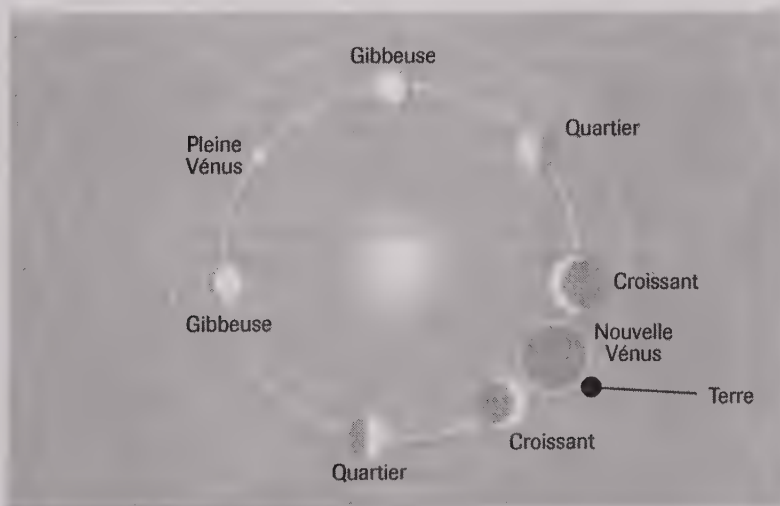


FIGURE 5.6

Vénus présente des phases dans le ciel terrestre. La taille et l'apparence de la partie éclairée de la planète varient selon sa position par rapport à la Terre. Les phases vénusiennes portent le même nom que les phases lunaires.



cise, car les nuages obstruent la vue de sa surface. Il a été observé que la couche nuageuse effectue une rotation complète dans le sens rétrograde (sens des aiguilles d'une montre) en 4 jours. Toutefois, cette mesure ne donne aucune information sur la rotation de la planète elle-même. Des mesures faites à l'aide d'ondes radars, qui traversent les nuages vénusiens, ont montré que Vénus tourne, à l'instar de ses nuages, dans le sens rétrograde. Toutefois, elle ne fait un tour sur elle-même qu'en 243 jours terrestres. Cette lente rotation, combinée à la révolution sidérale de 224,7 jours, donne des journées vénusiennes (d'un lever de Soleil à l'autre) de 117 jours. D'ailleurs, sur Vénus, en raison de la rotation rétrograde, le Soleil se lève à l'ouest et se couche à l'est. Vénus est la seule planète du Système solaire qui a la particularité de tourner « à l'envers » sur elle-même. On ne dispose toujours pas d'explication entièrement satisfaisante au sujet de la lenteur et de la nature rétrograde de la rotation de Vénus.

Les sondes qui ont atterri² sur le sol de Vénus ont enregistré des températures pouvant atteindre 480 °C. La température sur Vénus est la même le jour et la nuit en raison de l'important effet de serre que causent son atmosphère et sa couche nuageuse. Bien que celles-ci ne laissent passer qu'une faible proportion des rayons solaires qui frappent la planète, c'est suffisant pour que le sol de Vénus absorbe de la chaleur. Lorsque cette chaleur est réémise dans l'atmosphère, le gaz carbonique et l'acide sulfurique l'empêchent de s'échapper, ce qui contribue à maintenir des températures très élevées au sol. C'est ce qu'on appelle l'**effet de serre**.

La pression au sol sur Vénus est phénoménale : elle vaut 90 fois la pression normale sur Terre. Cette pression est équivalente à celle qui règne sous la mer à 900 mètres de profondeur. Elle est attribuable à la densité très élevée de l'atmosphère. Une densité si élevée qu'on pourrait voler sur Vénus sans trop d'efforts. C'est ainsi que certaines sondes envoyées sur Vénus afin qu'elles traversent l'atmosphère et s'écrasent au sol ont plutôt atterri en douceur, ralenties par la densité très forte de l'atmosphère. Les enregistrements de ces sondes ont indiqué qu'au sommet des nuages de Vénus les vents sont de l'ordre de 350 km/h, alors que, près du sol, ils ne dépassent guère 3 ou 4 km/h.

Vénus a reçu la visite de plus de 20 sondes, soviétiques et américaines. Les Soviétiques, avec leur projet Venera, ont été les premiers à lancer des sondes vers Vénus au début des années 60. Cependant, les trois premières missions Venera (de

2. Comme on peut le voir, le verbe **atterrir** ne signifie pas uniquement « se poser sur la Terre ». Il se dit également d'un engin volant qui prend contact avec le sol.



Vive l'effet de serre... naturel!

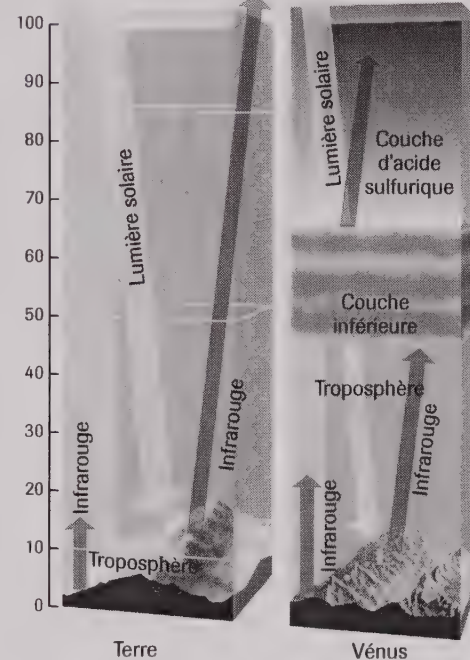
Sans effet de serre, le nombre de destinations soleil serait beaucoup moins élevé sur la Terre. En effet, c'est grâce à un effet de serre tout à fait naturel que la température moyenne terrestre est de 15 °C, et non de -18 °C, comme ce serait le cas si l'atmosphère ne comportait pas de gaz dits **à effet de serre**. Les plus importants sur la Terre sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'ozone (O₃), l'oxyde nitreux (N₂O) et la vapeur d'eau (H₂O).

Ainsi, bien qu'ils ne représentent qu'à peine 1 % de toute l'atmosphère de la Terre, les gaz à effet de serre jouent un rôle crucial dans la régulation de la température de l'air, notamment en piégeant une partie de la chaleur (rayonnement infrarouge) transportée par les rayons solaires. Plus la proportion de gaz à effet de serre est élevée, plus ce piégeage est important. Sur Vénus, par exemple, les épais nuages d'acide sulfurique et la très grande quantité de dioxyde de carbone dans son atmosphère piègent la chaleur à un point tel que la température de surface dépasse les 450 °C.

Quoique le scénario vénusien soit extrême, il illustre bien l'importance du rôle des gaz à effet de serre dans le réchauffement de la température à la surface des planètes. Ce qui inquiète les scientifiques, aujourd'hui, c'est

l'augmentation sensible de la concentration des gaz à effet de serre dans notre atmosphère, surtout en raison des activités industrielles intenses et de notre consommation énergétique élevée.

Altitude
(en km)



La température moyenne sur la Terre a légèrement augmenté (de 2 ou 3 dixièmes de degrés) depuis les cinquante dernières années et, selon plusieurs spécialistes, c'est là le premier signe montrant que le processus de réchauffement climatique est enclenché. Les conséquences à long terme d'un réchauffement continu seraient catastrophiques pour l'homme : augmentation du niveau des mers, déplacement des zones climatiques, fonte des grandes masses glaciaires continentales (Groenland, Antarctique), etc.

La population occidentale (responsable d'une grande partie de l'émission de gaz à effet de serre) tout comme les autorités gouvernementales sont aujourd'hui au fait des conséquences de la surconsommation et du rejet important de gaz à effet de serre pour la température de la

planète. Cependant, notre mode de vie et nos modèles économiques font encore trop souvent obstacle aux efforts à engager pour freiner le réchauffement de la planète.

1961 à 1965) ont échoué, ce qui a permis aux Américains d'être les premiers à obtenir des données d'une sonde survolant la planète, avec Mariner 2, lancée en 1962. Le projet d'exploration de Vénus des Soviétiques s'est étendu de 1961 à 1983 et a permis le lancement de 16 sondes, incluant les trois premières. Les résultats de ces missions s'ajoutent à ceux des missions américaines Mariner (2, 5 et 10), Vega, Pionner Venus et, plus récemment, Magellan. Ajoutons à cette liste la sonde Galileo, qui, en route vers Jupiter, a survolé Vénus en 1990.

On dit souvent de Vénus qu'elle est la planète jumelle de la Terre. Pourtant, ce qu'on vient d'étudier n'a rien de comparable avec notre propre planète : jours très longs, atmosphère inhospitalière, chaleur insupportable. Vénus comporte cepen-



MATIÈRE À RÉFLEXION

Que puis-je faire ?

En classe, en petits groupes ou dans une courte recherche, dressez une liste de gestes simples qui pourraient être faits au quotidien et qui contribueraient à faire diminuer votre émission personnelle (ou familiale) de gaz à effet de serre. Vous devrez probablement d'abord établir une liste exhaus-



sive des gaz à effet de serre émis par l'homme et les circonstances dans lesquelles ces gaz sont émis (industrie, circulation aérienne, automobile, etc.). Vous serez alors mieux en mesure de déterminer quelle influence vous, personnellement, pourriez avoir sur la réduction d'émission de gaz à effet de serre.

dant plusieurs caractéristiques physiques semblables à celles de la Terre. De dimensions physiques comparables (masse, diamètre), leurs intérieurs ont presque la même densité et 70 % de la surface de Vénus est formée de plaines basses, comme c'est le cas sur la Terre, si l'on retranche l'eau des océans. Tout cela fait croire aux astronomes que Vénus et la Terre se sont formées selon des scénarios très semblables, même si leur

évolution les a différenciées par la suite.

Ainsi, l'intérieur de Vénus est fort probablement très semblable à celui de la Terre. Il serait constitué d'un noyau ferreux d'environ 3 000 kilomètres de rayon, recouvert d'un manteau rocheux de 3 000 kilomètres d'épaisseur et d'une croûte un peu plus épaisse que celle de la Terre (figure 5.7).

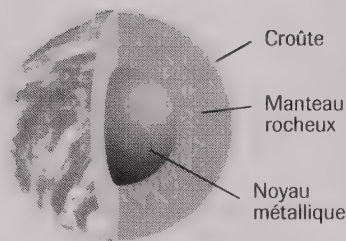


FIGURE 5.7

L'intérieur de Vénus ressemble à celui de la Terre : une croûte et un manteau rocheux recouvrent un noyau de fer.

Les missions sur Vénus ont permis de décrire avec passablement de précision le sol vénusien. Elles ont aussi bien étudié les plaines basses qui occupent la plus grande part de la surface que la proportion de sa surface (22 %) constituée de plateaux montagneux d'environ 3 000 mètres d'altitude. Ces plateaux peuvent être comparés à des continents dont les principaux sont Aphrodite Terra, Ishtar Terra, Alpha Regio et Beta Regio. Aphrodite Terra, par exemple, a la taille de la moitié nord de l'Afrique et comporte des massifs dont l'altitude culmine à près de 9 000 mètres. Ishtar Terra, pour sa part, a une superficie égale à celle des États-Unis. À l'est de Ishtar Terra se trouve la chaîne du mont Maxwell. Cette chaîne constitue une partie des 8 % de la surface de Vénus qui sont faits de zones montagneuses pouvant dépasser 11 000 mètres. Le mont Maxwell culmine à près de 12 kilomètres d'altitude. Il est le seul élément de la surface de Vénus qui porte un nom masculin, car il a été nommé avant que soit adoptée la convention voulant que tous les éléments de Vénus soient féminins.

Toutes ces connaissances et bien d'autres ont été obtenues (ou confirmées) notamment lors de la mission Magellan, au début des années 90. Durant quatre ans, soit de 1990 à 1994, la sonde américaine a cartographié, avec une précision jamais atteinte auparavant, toute la surface de Vénus au moyen d'ondes centimétriques (micro-ondes) pouvant facilement traverser les épais

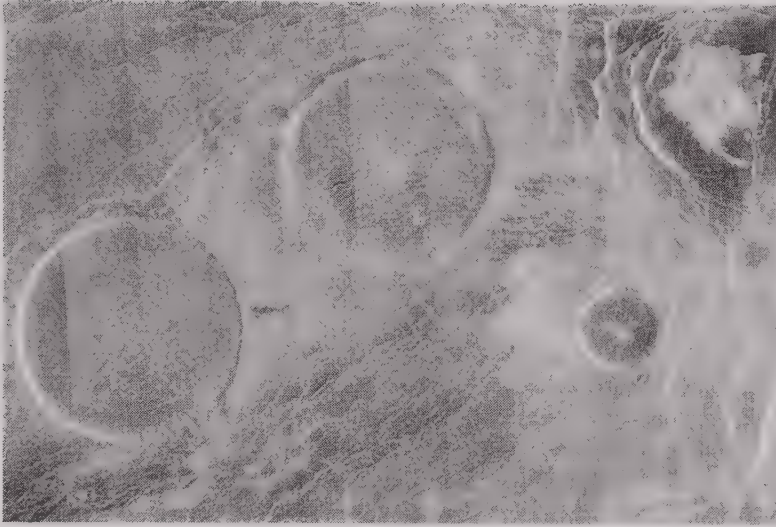


FIGURE 5.8

Sol de Vénus cartographié par la sonde Magellan

nuages de la planète (figure 5.8). La précision des données obtenues par Magellan a permis de déduire que la surface de Vénus est relativement récente (environ 500 millions d'années). C'est le faible nombre de cratères qui a mené à cette estimation. Sous cet aspect, la surface de Vénus ressemble donc plus à ce que l'on trouve sur la Terre que sur la Lune ou Mercure.

Une surface jeune est souvent l'indice d'une activité volcanique récente (ou peut-être en cours) ou d'un important processus d'érosion. Celle-ci est habituellement causée par les précipitations, les marées et de forts vents. Sur Vénus, il ne pleut pas, il n'y a pas d'océans liquides et les vents à la surface sont faibles. Cependant, ces vents, même légers, suffisent à causer des traînées de sable et à former de petites dunes, ce qui a pu être observé sur des images radars. Cela contribue, sur de longues périodes, à aplanir la surface de la planète.

Plusieurs volcans parsèment la surface de Vénus, ce qui confirme qu'il y a déjà eu une activité volcanique importante. Les écoulements de lave auraient contribué à diminuer le nombre de cratères visibles à la surface. Il y aurait peut-être même quelques volcans actifs sur Vénus, mais cela doit être vérifié. Pour l'instant, l'indice dont les astronomes disposent en faveur de cette hypothèse consiste dans de grandes variations de quantité de dioxyde de soufre dans l'atmosphère de Vénus. Étant donné que, sur Terre, cette substance est associée à l'activité volcanique, les astronomes croient que cela pourrait vouloir dire la même chose sur Vénus.

Si l'activité volcanique sur Vénus était confirmée, cela indiquerait qu'il y a une certaine activité dans le manteau. Vénus ne semble



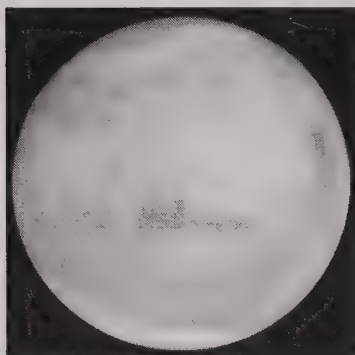
pas montrer de mouvement de plaques tectoniques comme sur la Terre; en revanche, dans certaines régions, on a observé des plissements de la croûte attribuables à des pressions entre les plaques. Vraisemblablement, la température élevée de Vénus ramollit la croûte et favorise ce genre de plissements.

La composition du sol de Vénus a pu être déterminée grâce aux sondes Venera qui l'ont photographié et analysé (figure 5.9). D'après ces analyses, le sol est recouvert de roches basaltiques, volcaniques et granitiques, ainsi que de roches renfermant des silicates. Certaines sondes Venera qui se sont posées sur le sol de Vénus n'ont eu que le temps de prendre quelques photos avant d'être détruites par la chaleur infernale et l'immense pression qui y règnent. D'autres, cependant, ont réussi à faire mieux que ce qui leur était demandé. En effet, Venera 13 a survécu 2 heures et 7 minutes avant de succomber à ces épreuves. Le temps prévu de survie était de 32 minutes.



FIGURE 5.9

Photographies du sol de Vénus prises par la sonde Venera 14



5.3 Mars

Mars, la planète rouge, est la plus invitante et la plus hospitalière des planètes du Système solaire, sans compter la Terre, bien entendu! C'est d'ailleurs fort probablement vers elle que se rendront (pas avant plusieurs décennies, cependant) les premiers vols habités hors du système Terre-Lune. Certaines caractéristiques de Mars pourraient faire sentir un Terrien presque comme s'il était chez lui: Mars présente un cycle des saisons similaire à celui de la Terre, et la durée du jour y est d'un peu plus de 24 heures. La température à l'équateur peut monter jusqu'à 27 °C le jour et, Mars étant plus petite que la Terre, l'accélération gravitationnelle y est moindre, ce qui pourrait faciliter certains déplacements.

Toutefois, d'autres facteurs sauront en décourager plus d'un sans une bonne préparation: la température moyenne y est de -55 °C, avec des minima pouvant atteindre -140 °C, l'atmosphère de gaz carbonique y est irrespirable pour l'humain et aucune eau à l'état liquide n'a encore été trouvée.

Pour l'instant, l'éventualité de la présence, même temporaire, de l'homme sur Mars est encore incertaine. Mais cela n'empêche pas les plus optimistes de rêver au jour où l'homme aura transformé l'atmosphère de cette planète pour qu'on puisse y

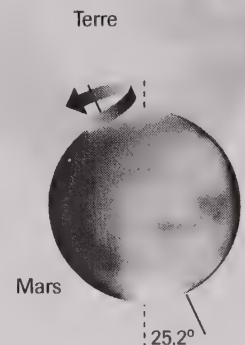


vivre sans devoir porter une combinaison spatiale et sans devoir se servir d'un système particulier pour respirer. La première étape vers la « terraformation » de Mars serait la production à grande échelle de gaz à effet de serre (des chlorofluorocarbones ou CFC, surtout), afin d'augmenter la température moyenne sur la planète. Cela déclencherait une série d'événements – naturels pour leur part – qui devraient mener à l'établissement d'une atmosphère respirable, dans 100 000 ans ! Pour toutes ces raisons et bien d'autres, les Russes et les Américains souhaitent s'y installer au début du troisième millénaire. C'est un de leurs principaux objectifs à long terme.

TABLEAU 5.3

Fiche d'identité de Mars

		Par rapport à la Terre
Diamètre	6 794 km	53%
Volume	$1,64 \times 10^{20} \text{ m}^3$	15%
Masse	$6,41 \times 10^{23} \text{ kg}$	11%
Densité	3,94 g/cm ³	71%
Accélération gravitationnelle	3,72 m/s ²	38%
Distance moyenne au Soleil	228 000 000 km (1,52 UA)	
Excentricité	0,09	
Période de révolution (année sidérale)	686,7 jours	
Inclinaison de l'orbite par rapport à l'orbite terrestre	1,85°	
Période de rotation (jour sidéral)	24,62 heures	1,026 jour
Inclinaison de l'axe de rotation	25,2°	
Albédo	15%	
Atmosphère	Gaz carbonique (95%) Azote (2,8%) Argon (1,6%) Oxygène (0,13%) Monoxyde de carbone (0,07%) Eau (0,03%)	
Pression à la surface	0,007 bar	
Température	Température moyenne: -55 °C Aux pôles: -140 °C À l'équateur, le jour: 27 °C max.	
Nombre de satellites	2	



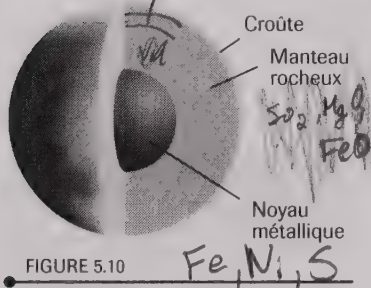


FIGURE 5.10

L'intérieur de Mars est semblable à ceux de Vénus et de la Terre, à la différence que son noyau occupe un peu moins d'espace en son centre.

L'angle d'inclinaison de l'axe de rotation de Mars a une valeur très proche de celui de la Terre : $25,2^\circ$ pour Mars contre $23,5^\circ$ pour la Terre. Cela explique la présence de saisons similaires sur les deux planètes. Cependant, l'orbite de Mars étant plus excentrique que l'orbite terrestre, les hémisphères Nord et Sud connaissent des saisons très différentes en durée et en intensité. Au Sud, l'été survient lorsque Mars est le plus proche du Soleil (périhélie). Les étés du Sud sont donc plus chauds et plus courts que les étés du Nord (qui se produisent lorsque Mars est le plus éloignée du Soleil [aphélie]). Les hivers du Sud quant à eux sont plus longs et plus froids que ceux du Nord.

Malgré les nombreuses missions réalisées sur Mars (voir p. 169), la composition interne de la planète demeure mystérieuse. Mars étant une planète tellurique, les astronomes supposent que sa structure interne (figure 5.10) ressemble à celles de la Terre et de Vénus. Le noyau, d'environ 1 200 kilomètres de rayon, serait surtout constitué de fer à l'état solide. S'il était liquide, il produirait un champ magnétique plus intense que celui qu'on a détecté jusqu'à présent. Au-delà du noyau se trouve un manteau rocheux de 2 100 kilomètres d'épaisseur, recouvert d'une épaisse croûte de 100 kilomètres. Conséquemment, l'activité tectonique y est très réduite. Pour le moment, aucun indice de mouvement horizontal de plaques tectoniques (comme sur la Terre) n'a été perçu. L'activité tectonique sur Mars semble se limiter à quelques endroits où il y a des volcans, et elle est essentiellement verticale.

Les photos de Mars révèlent de nombreux cratères, d'anciens volcans, des lits de rivières asséchées, des chaînes de montagnes et des fissures. La surface de la planète est jonchée de roches et de cailloux, recouverts d'une couche d'oxyde de fer de couleur rouille. C'est ce qui donne à Mars sa teinte brun-rouge qui permet à l'astronome averti de la distinguer des autres planètes dans le ciel. C'est également, bien entendu, ce qui lui vaut le surnom de « planète rouge ». Certaines photos prises par le télescope Hubble montrent que des tempêtes de sable et de poussière balayent parfois le globe entier.

Le plus grand volcan de Mars, et qui plus est le plus grand volcan de tout le Système solaire, est *Olympus Mons*, ou mont Olympe (figure 5.11). Il est si vaste et ses pentes sont à ce point douces qu'un randonneur n'aurait pas l'impression de faire une ascension en gravissant ses parois. Il mesure 600 kilomètres de diamètre à sa base, 65 kilomètres au sommet et son altitude atteint plus de 25 kilomètres. Il fait donc trois fois l'altitude de l'Everest (8,85 km) et est même plus haut que les îles Hawaï, si l'on mesure leur altitude à partir du fond de l'océan (9,1 km) (figure 5.12a). Sur la Terre, quand des volcans comparables sont

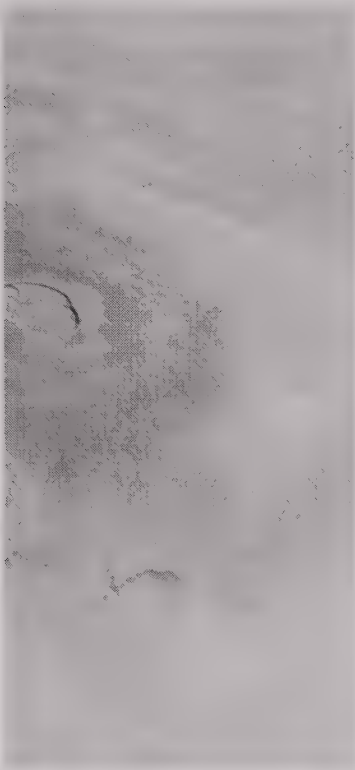


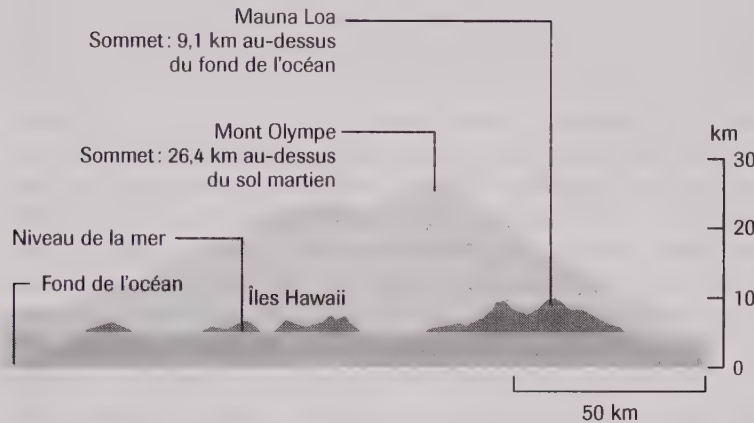
FIGURE 5.11

Sur Mars, le Mont Olympe a été photographié par la sonde Mars Global Surveyor. 



créés, leur forme est donnée par l'empilement de la lave des éruptions successives. Cependant, alors que sur la Terre les volcans sont emportés loin de leurs sources de lave en raison des mouvements de l'écorce, ceux de Mars restent fixes au-dessus des leurs, ce qui leur permet d'atteindre de plus grandes dimensions. On pense que le mont Olympe, comme tous les volcans martiens, est aujourd'hui éteint. La dernière éruption remonte probablement à plus de 800 millions d'années.

a)



b)

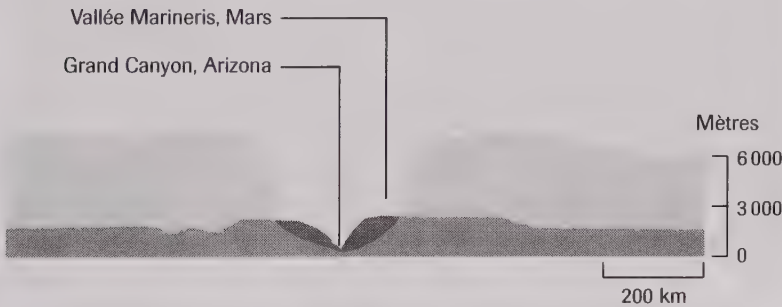


FIGURE 5.12a ET 5.12b

Certaines structures martiennes n'ont aucune comparaison sur Terre. a) Le Mauna Loa, qui a plus de 9 km d'altitude à partir du fond de l'océan, est bien petit à côté du mont Olympe. b) Le Grand Canyon fait figure de petite fissure à côté de la vallée Marineris.

Au moins un quart de la région équatoriale de Mars présente un vaste réseau de canyons et de failles qui constitue la *Valles Marineris* ou vallée Marineris (voir la figure 5.13). Cette région ressemble un peu au Grand Canyon, en Arizona, mais les dimensions de la vallée de Mars sont beaucoup plus importantes. Mesurant 5 000 kilomètres de long et 120 de large (avec des sections à 600 kilomètres de large) et pouvant atteindre 6 kilomètres de profondeur, soit 4 fois la profondeur du Grand Canyon américain (figure 5.12b), la vallée Marineris s'est probablement formée à la suite de l'affaissement du sol martien le long d'une faille. Il se pourrait que de l'érosion fluviale ait contribué au creusement de certaines parties de la vallée, mais cela reste à vérifier.



Parmi les autres structures géologiques intéressantes sur Mars, notons la région de Tharsis, à l'extrémité ouest de la vallée Marineris, immense renflement de 10 kilomètres de haut et de 4 000 kilomètres de long sur lequel on trouve 3 grands volcans semblables au mont Olympe : Arsia, Pavonis et Ascraeus. Plus à l'ouest, dans l'hémisphère Sud, se trouve aussi un cratère d'impact de 2 000 kilomètres de diamètre et de 6 kilomètres de profondeur. De façon générale, l'hémisphère Sud de Mars est constitué de régions montagneuses cratérisées similaires à celles de la Lune, tandis que l'hémisphère Nord est composé de nombreuses plaines, plus jeunes et peu élevées qui ont peut-être été recouvertes, jadis, d'un océan de 1 700 mètres de profondeur (*Oceanus Borealis*).

L'origine de plusieurs structures à la surface de Mars est expliquée plus facilement si l'on examine l'hypothèse d'une érosion fluviale importante dans son passé. Des canyons et des régions au profil semblable à des lacs asséchés laissent croire que Mars a peut-être eu beaucoup d'eau au début de son histoire. Il semble en effet que, pendant 700 millions d'années, Mars ait connu des conditions identiques à celles régnant sur la Terre. Le volcanisme martien aurait ainsi rejeté suffisamment de gaz pour doter la planète d'une atmosphère dense et chaude, autorisant ainsi l'apparition d'eau liquide, de rivières, de mers et peut-être même de microorganismes (voir la section « De la vie sur Mars ? », p. 170). Mais, Mars étant plus petite que la Terre, son cœur se serait refroidi très vite et ses volcans se seraient éteints, cessant de renouveler son atmosphère. Celle-ci se dispersa en grande partie dans l'espace, la planète se refroidit et Mars devint un désert aride.

Selon les estimations des astronomes, l'eau des débuts de Mars serait cachée sous sa surface, dans une sorte de permafrost, ainsi que dans les calottes polaires. Les plus récentes observations de la sonde Odyssey ont soulevé un vent d'optimisme chez les chercheurs d'eau martienne. En effet, la sonde a détecté la présence importante d'hydrogène à près d'un mètre sous la surface, ce qui est un indice majeur en faveur de la présence d'eau gelée, celle-ci étant formée d'hydrogène et d'oxygène. Beaucoup de travail d'analyse des données d'Odyssey reste à faire avant d'en arriver à une conclusion définitive. Cependant, il est maintenant permis de rêver : il y a probablement beaucoup d'eau gelée à l'intérieur de Mars.

On pense aussi qu'il se trouve de l'eau aux pôles, dans les calottes glaciaires. Les calottes sont constituées d'une mince couche de gaz carbonique et d'eau solides. La superficie couverte par les calottes augmente l'hiver lorsque le gaz carbonique de l'atmosphère gèle et vient les alimenter. La variation



de la taille des calottes est assez importante pour qu'elle modifie l'aspect des pôles de la planète au télescope. Les dernières observations des sondes martiennes semblent montrer que la calotte australe consisterait surtout en un bloc de glace sèche (gaz carbonique solide) et la calotte boréale serait, du moins en été, surtout constituée de glace normale (glace d'eau).

Depuis le début des années 60, plus de 30 sondes ont été envoyées vers Mars dans le but d'en étudier l'atmosphère, le climat, le sol et la géologie. Cependant, plusieurs missions vers la planète rouge n'ont donné aucun résultat, avec des sondes perdues, des contacts radio interrompus indéfiniment ou des échecs de lancement. La malchance s'est d'abord acharnée de façon particulière sur les Soviétiques dont seulement quelques-unes des 16 missions (de 1960 à 1996) ont réussi à transmettre des images à la Terre. Ce sont donc les Américains qui ont fourni les premières images de Mars en 1964 et en 1969, avec les sondes Mariner 4, 6 et 7. En 1976, les sondes américaines Viking 1 et 2 ont été les premières à se poser sur le sol martien dans le but d'y analyser des échantillons et d'en retourner des images (figure 5.13). Entre-temps, en 1971 et 1972, Mariner 9 avait cartographié environ 70 % de la surface de Mars.

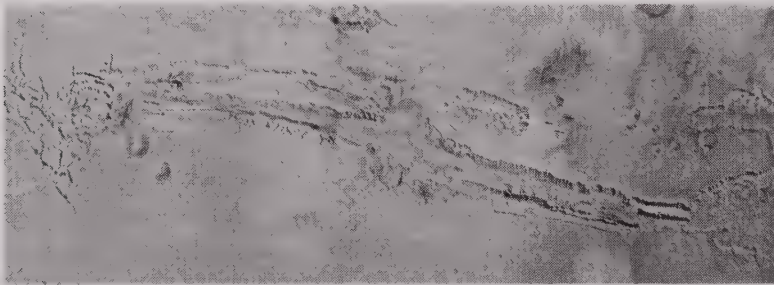


FIGURE 5.13

Sur Mars, la vallée Marineris a été photographiée par une sonde Viking.

Dans les années 90, la malchance a changé de cible : les Américains n'ont pu obtenir aucun résultat de trois missions sur cinq, en raison d'une perte de contact radio avec les sondes. De fortes critiques ont par la suite été adressées à la NASA qui s'est fait demander de réduire les coûts de son programme d'exploration du Système solaire (des centaines de millions de dollars avaient été investis dans les missions qui ont échoué) et qui a dû travailler plus fort à justifier aux yeux du public que tant d'argent et d'énergie soient consacrés à l'exploration des planètes.

La sonde Mars Pathfinder, qui s'est posée sur le sol de Mars en 1997, et qui y a libéré le véhicule Sojourner, a été une source de



FIGURE 5.14

Le véhicule Sojourner, photographié par la sonde Mars Pathfinder

fascination à l'époque (figure 5.14). Sojourner a parcouru une soixantaine de mètres, a transmis plus de 500 images et réalisé 16 analyses chimiques de roches et de sol.

Au moment d'aller sous presse, deux sondes envoyaient de l'information sur Mars à la Terre : Mars Global Surveyor et Mars Odyssey. La mission de cette dernière s'étend jusqu'en 2004. Par la suite, la sonde servira vraisemblablement de relais de communication pour les missions futures. Près de dix missions doivent être lancées vers Mars dans les deux premières décennies de notre millénaire. L'une de ces missions, appelée Mars Sample Return Lander, prévoit se poser sur Mars et rapporter des échantillons de sol sur Terre. Le projet est encore sous évaluation à la NASA, mais le départ est prévu pour 2011.

De la vie sur Mars ?

Depuis longtemps, Mars alimente les fantasmes de l'homme qui rêve de trouver les traces laissées par une civilisation extra-terrestre. La littérature de science-fiction et l'industrie cinématographique ont souvent mis en scène des Martiens, les fameux bonshommes verts, leur attribuant parfois des rôles de gentils, parfois de méchants.

En 1877, l'astronome italien Giovanni Schiaparelli (1835–1910) annonce qu'il a découvert des « canaux » sur Mars. Selon lui, ces canaux ne seraient pas naturels, mais construits par des êtres intelligents. Plusieurs autres astronomes lui emboîtèrent le pas et découvrirent d'autres canaux. Le plus célèbre défenseur de la découverte de Schiaparelli, l'astronome américain Percival Lowell (1855–1916), en dessina plus de 400 sur des cartes détaillées. Il imagina qu'il y avait, aux intersections de ces canaux, des oasis, des lacs, voire des villes. Malgré que plusieurs autres observations aient été réalisées par la suite et aient montré que ces canaux n'existaient pas, la controverse entourant cette théorie s'est poursuivie jusque dans les années 60. Les astronomes y ont définitivement mis un terme grâce aux premières photos prises par la sonde américaine Mariner 4. On n'y décèle pas de canaux visibles à la surface de Mars. Certains canyons ou anciens lits de fleuves à la surface ont peut-être induit les défenseurs des canaux en erreur. À défaut d'avoir trouvé les traces d'une civilisation intelligente sur Mars, les scientifiques ont espéré y découvrir des formes microscopiques de vie. Toutefois, les sondes Viking n'ont pas détecté l'ombre d'une trace de vie, si primitive fût-elle.

À l'époque des sondes Viking, une équipe de chercheurs de Berkeley, en Californie, ont cru voir sur certaines photos de la surface de Mars une structure ressemblant étrangement à un



visage géant (1,0 km de large sur 2,6 km de long) regardant vers le ciel et situé dans le voisinage d'un petit groupe de montagnes de forme pyramidale (figure 5.15). Ces chercheurs y auraient vu les traces d'une civilisation martienne aujourd'hui disparue. Mais, en 1998, la sonde Mars Global Surveyor mit fin à la controverse en photographiant en haute résolution la région du visage. L'étude de cette photo élimine tout doute possible quant à sa réelle nature ; c'est bien une petite montagne et non une figure sculptée par une civilisation extraterrestre.

Les prochaines missions vers Mars tenteront, entre autres choses, de trouver des indices voulant que des microorganismes aient déjà pu se développer sur Mars. Tous les espoirs sont dorénavant permis depuis la surprenante découverte faite par une équipe de spécialistes en planétologie, en 1996, qui ont trouvé les premières molécules organiques fossilisées à l'intérieur d'une météorite martienne (ALH84001) tombée sur la Terre il y a environ 13 000 ans et trouvée en Antarctique en 1984 (figure 5.16). Les molécules trouvées pourraient être des microorganismes très primitifs, du type bactérie, qui se seraient développés quelques centaines d'années après la formation de Mars. La découverte en soi d'une météorite dont l'origine serait martienne n'est pas unique : des 22 000 météorites trouvées sur la Terre, 24 semblent venir de la planète rouge. Ce qui est particulier, c'est qu'on ait pu trouver, dans une de ces météorites, des indices quant au développement d'une vie primitive sur Mars. L'interprétation des observations des chercheurs qui ont analysé la ALH84001 est encore aujourd'hui très controversée. Toutefois, elle donne un signe encourageant sur l'éventualité de trouver un jour des traces de vie ancienne sur Mars.

Satellites de Mars

Mars possède deux satellites, Phobos (la « peur ») et Deimos (la « terreur »), de forme un peu bizarre et qui ressemblent à de grosses roches toutes bosselées. Ils sont si petits que leur gravité est assez faible pour qu'un bon sauteur puisse s'en libérer. Phobos et Deimos ont été découverts par l'astronome américain Asaph Hall (1829–1907), en 1877. Les deux satellites sont probablement des astéroïdes anciens qui ont été capturés par Mars. On pense également qu'ils pourraient avoir été formés en même temps que Mars ou qu'ils sont le résultat d'une collision. Une meilleure connaissance de l'origine de Phobos et de Deimos pourrait donner aux scientifiques de l'information précieuse sur la formation du Système solaire.

Les deux satellites présentent toujours la même face à Mars, comme la Lune à la Terre. Phobos, qui est très près de Mars

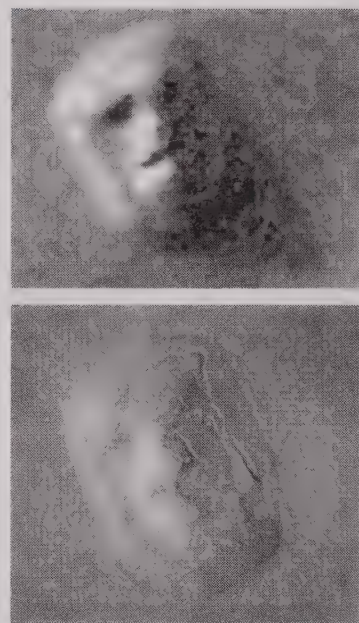


FIGURE 5.15

En basse résolution, le « visage » de Mars apparaît (photo du haut). Une image en haute résolution ne montre plus qu'une simple montagne (photo du bas).



FIGURE 5.16

La météorite martienne ALH84001



(leurs surfaces sont à moins de 6 000 kilomètres de distance), s'en rapproche au rythme de 1,8 m tous les 100 ans. Dans 40 millions d'années, Phobos sera tombé sur Mars ou se sera brisé en morceaux qui auront formé un anneau autour de la planète. Deimos, pour sa part, plus éloigné de Mars, s'en distance très lentement et s'échappera un jour de l'emprise gravitationnelle de la planète.

Phobos comporte un immense cratère de 10 kilomètres de diamètre, appelé Stickney. Une série de rainures sur Phobos témoignent de la violence du choc qu'a probablement provoqué l'impact responsable de ce cratère.

La rapidité avec laquelle Phobos effectue sa révolution autour de Mars a une conséquence intéressante : le satellite se lève à l'ouest et se couche à l'est, trois fois par jour martien.

Les données principales sur tous les satellites du Système solaire sont contenues dans un tableau figurant en annexe.

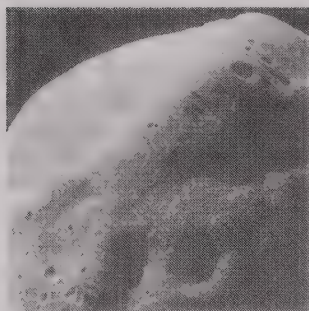


TABLEAU 5.4

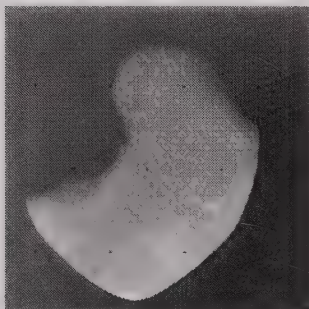
Fiche d'identité de Phobos

Dimensions	22 × 28 × 18 km
Albédo	6%
Période de rotation autour de Mars	7 h 39 min
Distance au centre de Mars	9 380 km
Distance à la surface de Mars	5 983 km

TABLEAU 5.5

Fiche d'identité de Deimos

Dimensions	16 × 12 × 10 km
Albédo	6%
Période de rotation autour de Mars	30 h 21 min
Distance de Mars	23 460 km





5.4 Jupiter



Maintenant que nous avons terminé l'étude des planètes telluriques, nous entreprenons notre voyage vers les plus grosses planètes du Système solaire : les planètes joviennes, aussi appelées **géantes gazeuses**, en raison de leur composition chimique à base d'hydrogène et d'hélium. Jupiter est la plus volumineuse et la plus massive de toutes les planètes du Système solaire. Elle est 1 300 fois plus grosse et 318 fois plus massive que la Terre. C'est la faible densité de Jupiter, à peine plus élevée que la densité de l'eau, qui lui donne une masse plutôt « faible » par rapport à son volume.

Dans le ciel terrestre, Jupiter est la planète la plus brillante après Vénus, sauf en de très rares occasions où Mars est aussi brillante que Jupiter. Facile à observer plusieurs mois d'affilée, Jupiter offre un spectacle émouvant à quiconque l'observe aux jumelles : on peut suivre la ronde toujours différente de ses quatre plus gros satellites. Ceux-ci apparaissent tels de petits points blancs alignés aux côtés de la planète. Avec une lunette, on peut voir que les satellites sont placés dans le même sens que des bandes de nuages alternées, claires et sombres, que présente le disque de Jupiter.

Jupiter, comme toutes les autres planètes joviennes, est un objet fluide (c'est-à-dire gazeux et liquide) dont la densité augmente graduellement vers le centre. Il n'y a donc pas de surface liquide (comme des océans) ou solide (croûte ou écorce) nous permettant de mesurer aisément la période de rotation de la planète. Les astronomes y sont toutefois arrivés, d'abord en se servant du mouvement des nuages de Jupiter. Ainsi, comme dans le cas du Soleil, la valeur de la période de rotation de Jupiter mesurée à l'équateur est différente de la valeur mesurée aux pôles. Cela constitue un bon indice quant à sa composition gazeuse. D'autres techniques de mesure de la période de rotation ont également permis d'établir que la période de rotation à l'équateur est légèrement plus petite que celle des couches plus près du centre de la planète, plus denses. Ces deux dernières valeurs apparaissent d'ailleurs sur la fiche d'identité de Jupiter (tableau 5.6), et la différence entre les deux mesures de période est de 5 minutes. Cette différence appuie la thèse selon laquelle Jupiter constitue une masse fluide, du moins jusqu'à une certaine profondeur.

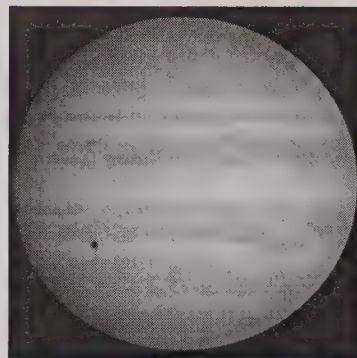
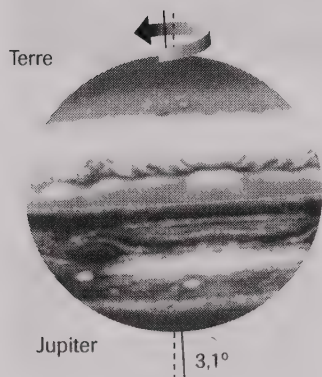




TABLEAU 5.6

Fiche d'identité
de JupiterPar rapport
à la Terre

Diamètre	142 800 km (à l'équateur) 133 600 km (aux pôles)	11 fois
Volume	$1,43 \times 10^{24} \text{ m}^3$	1 300 fois
Masse	$1,9 \times 10^{27} \text{ kg}$	318 fois
Densité	$1,33 \text{ g/cm}^3$	24 %
Accélération gravitationnelle	$24,79 \text{ m/s}^2$	2,5 fois
Distance moyenne au Soleil	778 000 000 km (5,2 UA)	
Excentricité	0,048	
Période de révolution (année sidérale)	11,86 ans	
Inclinaison de l'orbite par rapport à l'orbite terrestre	$1,3^\circ$	
Période de rotation (jour sidéral)	9 h 50 min (à l'équateur) 9 h 55 min (pour les couches plus profondes)	
Inclinaison de l'axe de rotation	$3,1^\circ$	
Albédo	52 %	
Atmosphère	Hydrogène (78 %) Hélium (20 %) Méthane (2 %) Nuages d'ammoniac Eau (traces)	
Température	-110°C (haut des nuages)	
Nombre de satellites	39 (en 2002)	



Avec une période de rotation de 9 h 55 min, Jupiter est la planète du Système solaire qui tourne le plus vite sur elle-même. Cette rotation rapide est responsable notamment de l'aplatissement de la planète, dont le diamètre aux pôles est inférieur au diamètre à l'équateur. On attribue également à la rotation rapide de Jupiter le développement de vents dominants de direction est-ouest très puissants qui font s'étirer les bandes nuageuses dans le sens de l'équateur. Ces vents, combinés à d'autres phénomènes atmosphériques, sont aussi responsables d'ouragans et de tourbillons gigantesques. Enfin, la rotation rapide de Jupiter entraîne avec elle l'hydrogène métallique du centre de la planète et engendre un fort champ magnétique. C'est d'ailleurs en effectuant des mesures sur le champ magnétique de Jupiter, lui aussi en rotation, que les astronomes ont



pu mesurer la période de rotation des couches internes de la planète.

Le champ magnétique de Jupiter est le plus intense et le plus étendu du Système solaire (sans compter celui du Soleil). Quoique sa forme soit très complexe, il peut tout de même être associé à un beigne contenant une version géante des ceintures de Van Allen terrestres. Le champ magnétique jovien est donc divisé en deux régions d'intensité différente. La partie interne, la plus intense, a une intensité de 14 fois celle du champ terrestre et s'étend à plus de 1 280 000 kilomètres au-delà de la surface de Jupiter. La partie externe est moins intense et s'allonge jusqu'à 3 400 000 kilomètres, ce qui correspond à 140 fois le diamètre de Jupiter. Globalement, la magnétosphère de Jupiter, zone occupée par le champ magnétique jovien, occupe un volume un million de fois plus grand que la magnétosphère terrestre. À certains endroits, la magnétosphère forme même une gigantesque « queue magnétique » de 700 millions de kilomètres, ce qui correspond à une distance allant au-delà de l'orbite de Saturne.

Nous avons déjà dit que Jupiter est composée principalement d'hydrogène et d'hélium, ce qui lui vaut le nom de **planète jovienne**. Une des principales caractéristiques des planètes joviennes est l'absence de distinction nette entre l'atmosphère et la planète elle-même. Dans ce contexte, ce sont les couches externes de ces planètes (incluant les nuages) qui servent à définir l'atmosphère. Un voyage vers l'intérieur de Jupiter, en partant de la couche la plus extérieure de la planète, nous amènerait d'abord dans un milieu composé à 78 % d'hydrogène moléculaire (H_2) et à 20 % d'hélium (He). La fraction restante comporte du méthane (CH_4) et d'autres molécules.

Dans cette descente vers les couches inférieures de l'atmosphère, nous rencontrerions trois sortes de nuages : des nuages d'ammoniac (NH_3), d'hydrosulfide d'ammonium (NH_4SH) et d'eau (H_2O). Des variations de température et de composition chimique dans tous ces nuages sont à l'origine de la coloration en bandes si caractéristique de Jupiter. On peut d'ailleurs associer la couleur des nuages avec leur altitude dans l'atmosphère jovienne. Ainsi, les nuages les plus en altitude sont rouges, ceux des altitudes moyennes sont bruns ou blancs et ceux de basse altitude sont bleus. Les nuages de Jupiter constituent la surface visible de la planète.

La poursuite de notre descente nous permettrait de constater une transition graduelle de l'état gazeux de l'hydrogène à l'état liquide, dans les environs de 1 000 kilomètres de profondeur (figure 5.17). C'est l'augmentation de la pression et de la

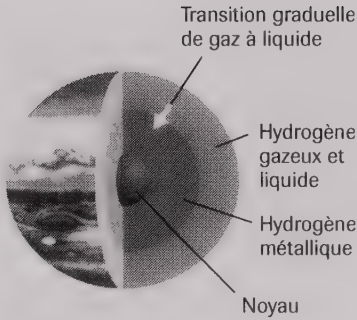


FIGURE 5.17

L'intérieur de Jupiter est surtout constitué d'hydrogène, sous forme gazeuse, liquide ou métallique, mais il comporte aussi un petit noyau rocheux. Partout où il y a de l'hydrogène, il y a également de l'hélium.

température qui fait se rapprocher les molécules d'hydrogène, celles-ci se comportant dès lors comme un liquide. À une profondeur de 25 000 kilomètres et à une température de 11 000 °C, lorsque la pression dépasse les 2 à 4 millions de bars, les molécules d'hydrogène se brisent et l'hydrogène liquide devient de l'hydrogène métallique (soupe de protons et d'électrons). Notre descente aux enfers se termine au centre de Jupiter où se trouve un petit noyau, équivalant à près de trois fois la masse de la Terre, composé de roche, de métal, d'eau et d'ammoniac. La température y atteint les 35 000 °C.

La structure la plus saisissante à la surface de Jupiter est sans contredit l'immense tache rouge (voir la figure 5.18) de 25 000 kilomètres de long sur 13 000 de large. La Grande Tache rouge (ou GTR) est un gigantesque tourbillon atmosphérique de hautes pressions³, sorte de cyclone géant presque permanent deux fois plus grand que la Terre. Sa couleur rouge serait attribuable à la présence de soufre et de phosphore. Les vents peuvent y atteindre des vitesses de 600 km/h. Ils sont nourris, d'une part, par la rotation rapide de Jupiter sur elle-même et, d'autre part, par des mouvements verticaux de convection engendrés par la chaleur interne de la planète. Le reste de la surface visible de Jupiter présente une multitude d'autres tourbillons semblables, mais de moindre importance.

La première description officielle de la Grande Tache rouge a été réalisée en 1878 par l'astronome américain Edward Emerson Barnard (1857–1923). C'était plus de 200 ans après que le savant britannique Robert Hooke, en 1664, et l'astronome français Jean-Dominique Cassini, en 1665, eurent observé des structures nuageuses semblables à celle de la Grande Tache rouge. Il se pourrait donc que la même tache existe depuis plus de 300 ans. Pour le moment, aucune théorie atmosphérique n'est en mesure d'expliquer comment une telle structure peut durer aussi longtemps.

Pioneer 10, la première sonde à survoler Jupiter, en 1973, a montré que la planète émet sous forme de rayonnement environ deux fois plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. Cela est l'indice de la présence d'une source d'énergie interne, qui proviendrait surtout de la contraction gravitationnelle résiduelle de Jupiter, mécanisme selon lequel celle-ci se contracte encore aujourd'hui sous l'effet de son propre poids. Rappelons que Jupiter, comme toutes les autres planètes, s'est formée à partir d'une nébuleuse dont les composants se sont lentement agglomérés sous l'effet de la gravitation, selon le processus

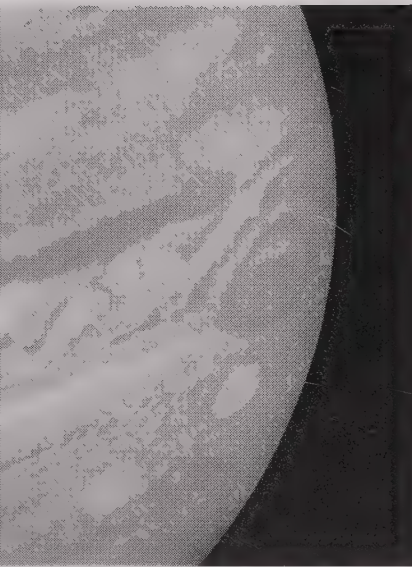


FIGURE 5.18

À remarquer: la Grande Tache rouge de Jupiter au centre, légèrement à droite. 📷

3. Sur la Terre, les zones de turbulence de ce type sont plutôt associées à des basses pressions.



d'accrétion. Ainsi, le rayon de Jupiter diminue encore de 2,5 mm par an et cela suffit à libérer de l'énergie sous forme de lumière infrarouge (chaleur) d'une puissance d'environ $2,3 \times 10^{18}$ kW (2,3 milliards de milliards de kilowatts).

C'est ce phénomène de libération d'énergie qui pourrait faire penser que Jupiter est une « étoile ratée ». Pour qu'une étoile puisse naître, la chaleur en son centre, créée par la contraction gravitationnelle de la matière, doit devenir telle que les réactions de fusion nucléaire pourront se déclencher. Pour que cela soit possible, la matière disponible doit avoir une certaine masse critique en deçà de laquelle on n'obtiendra qu'une grosse planète. Jupiter est donc trop petite et la température de son noyau trop basse (25 000 °C) pour qu'y soit déclenché le processus de fusion nucléaire. Pour qu'elle devienne une étoile, il aurait fallu que sa masse soit 80 fois plus grande.

Cette chaleur produite par Jupiter en son cœur et circulant dans les couches crée d'immenses courants de convection. Ceux-ci jouent un rôle important dans le développement des mouvements complexes des nuages.

Jupiter est également un très puissant émetteur d'ondes radio. La magnétosphère de la planète agit à la fois comme un accélérateur et un piège de particules chargées énergétiques. Ces particules sont des ions et des électrons provenant, notamment, des gaz et des débris éjectés dans la magnétosphère jovienne par des éruptions volcaniques sur le satellite Io. Les électrons les plus énergétiques émettent des fréquences radio lorsqu'ils sont piégés. Ces émissions ont conduit à la découverte du champ magnétique de Jupiter et, par la suite, ont permis d'en déterminer la structure.

Anneaux de Jupiter

Des images transmises par la sonde Voyager 1 en 1979 ont permis de découvrir des anneaux autour de Jupiter. Ces anneaux sont très ténus et ne peuvent être observés qu'à contre-jour, c'est-à-dire lorsqu'on regarde la face nocturne de la planète. Ils ont ensuite été photographiés de nouveau par Voyager 2 et plus récemment par la sonde Galileo (figure 5.19). Les anneaux de Jupiter sont plus clairs que le meilleur verre fabriqué sur la

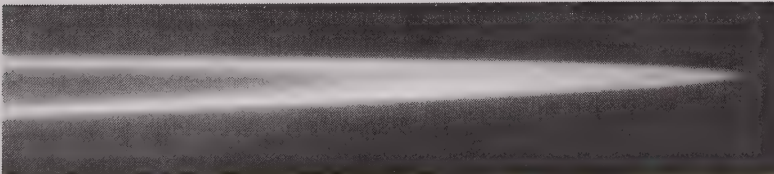


FIGURE 5.19

Les fins anneaux de Jupiter



Terre et la matière qui les compose est très sombre, ce qui leur confère un albédo de 5 % à peine. Les anneaux s'érodent lentement et leurs constituants s'échappent continuellement dans l'environnement de Jupiter. En échange, ils sont constamment alimentés par de très petites roches et des poussières issues des impacts de micrométéorites sur les satellites les plus proches de Jupiter.

Les quatre planètes joviennes comportent des anneaux. Ceux de Saturne sont les plus spectaculaires et les plus importants. On ne sait toujours pas si les anneaux planétaires sont des structures datant de l'époque de formation des planètes ou s'ils sont le résultat de phénomènes plus récents. Dans ce dernier cas, il serait fort possible que les anneaux soient éphémères. La recherche sur l'origine et la formation des anneaux planétaires se poursuit toujours et les missions actuelles et futures vers Jupiter et Saturne pourront certainement contribuer à la compréhension du phénomène.

Exploration de Jupiter

L'exploration de Jupiter a débuté dans les années 70 avec les sondes Pioneer 10 et 11 qui ont survolé Jupiter en 1973 et en 1974, respectivement. Pioneer 10 a été la première sonde à atteindre la ceinture d'astéroïdes et la première à transmettre des images de « près » de Jupiter. Jusqu'en 1998, la sonde était l'objet de fabrication humaine qui s'était le plus éloigné de la Terre. C'est maintenant Voyager 1, lancée en 1977, 16 jours après le lancement de Voyager 2, qui détient ce titre. La sonde est maintenant à plus de 80 UA du Soleil, en direction de la limite entre l'héliosphère et l'espace interstellaire. Pioneer 10, qui transporte le premier message destiné à une éventuelle civilisation extraterrestre, envoie toujours des signaux à la Terre. Les deux sondes Voyager, qui sont également toujours en contact avec la Terre, disposent de ressources énergétiques qui leur permettront de nous faire parvenir de l'information jusqu'en 2020 !

Plus récemment, Jupiter a reçu la visite de la sonde Ulysse, qui s'est servie, en 1992, de l'attraction gravitationnelle de la planète pour prendre une orbite autour du Soleil lui permettant d'en étudier les pôles, et de la sonde Cassini, en route vers Saturne. La sonde Galileo, lancée en 1989, a été la première sonde à se mettre en orbite autour d'une géante gazeuse. En 1995, elle a relâché une sonde secondaire dans l'atmosphère de Jupiter qui a fourni de l'information durant 59 minutes avant d'être détruite à 200 kilomètres sous la surface supérieure des nuages par les conditions atmosphériques violentes qui y



règnent. Globalement, Galileo aura fourni des images d'une qualité exceptionnelle de Jupiter et de quelques-unes de ses lunes (ou satellites). La vie de la sonde doit prendre fin dans l'atmosphère de Jupiter en septembre 2003.

Le prochain projet de la NASA vers Jupiter s'appelle Europa Orbiter et doit être lancé en 2008. Comme son nom l'indique, l'objectif de la mission est de mettre une sonde en orbite autour d'Europe, le quatrième satellite en importance de Jupiter. Nous verrons que l'intérêt pour Europe est grand en raison de la possible présence d'un vaste océan d'eau sous sa surface.

Satellites de Jupiter

Le nombre de satellites connus de Jupiter est en constante évolution, au rythme du développement des techniques d'observation. Ainsi, de 1999 à l'an 2001, à l'aide d'instruments terrestres, pas moins de 23 nouveaux satellites ont été découverts, s'ajoutant aux 16 déjà connus. C'est ce qui nous permet de dire que Jupiter ressemble, tout compte fait, à un mini-système solaire.

On peut diviser les satellites joviens en deux grandes catégories, les satellites réguliers (au nombre de 8) et les satellites irréguliers (on en compte 31). Les satellites réguliers ont probablement été formés à partir de la même nébuleuse que Jupiter. Quatre de ces satellites ont des dimensions comparables ou supérieures à Pluton et Mercure. Ce sont les quatre satellites qui peuvent être observés à l'aide de jumelles ou d'une lunette. C'est d'ailleurs Galilée qui, le premier, les observa en 1610. La découverte d'objets célestes en rotation autour d'un autre objet céleste donna un coup de pouce phénoménal à la théorie héliocentrique de Copernic, et montra que la Terre n'était pas la seule à posséder des lunes. Ces quatre satellites portent le nom de **satellites galiléens**, en l'honneur de leur découvreur. La fin de la présente section leur est entièrement consacrée.

Les quatre autres satellites réguliers sont appelés **satellites intérieurs**, en raison de leur orbite très rapprochée de Jupiter. Ils sont beaucoup plus petits que les satellites galiléens. Les orbites des deux satellites les plus près de Jupiter, Adrasteé et Métis, sont à la limite des anneaux de Jupiter.

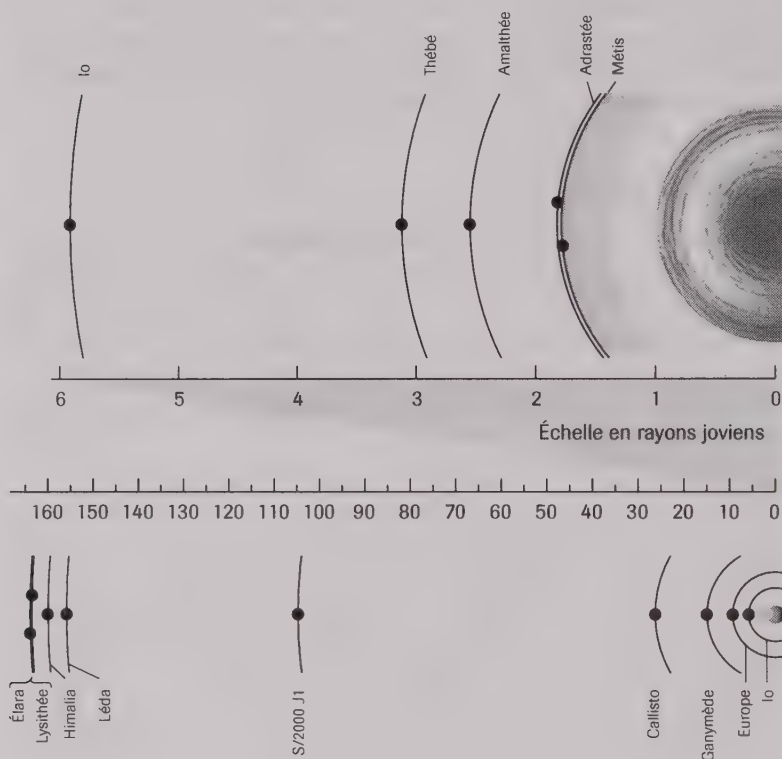
Les satellites irréguliers, quant à eux, sont probablement des objets qui étaient d'abord en orbite autour du Soleil et qui ont été capturés par Jupiter. Les arguments en faveur de la théorie de la capture sont la rotation rétrograde de la plupart de ces lunes et la forte excentricité de leur orbite. Tous les satellites irréguliers sont petits, le rayon des plus petits étant d'à peine



2 kilomètres. L'évaluation de la taille d'objets aussi petits et aussi distants de la Terre est faite à partir de la mesure de l'albédo des objets reconnus. Dans le cas de ces lunes irrégulières, leur albédo a été évalué à 4 % environ. La figure 5.20 présente les orbites des treize satellites les plus proches de Jupiter.

FIGURE 5.20

Les treize lunes les plus rapprochées de Jupiter parcourent leur orbite à des distances en deçà de 170 rayons joviens, dans le sens direct. Les autres satellites (non illustrés) se trouvent entre 175 et 340 rayons joviens, et plusieurs font leur révolution dans le sens rétrograde.



Satellites galiléens

Les quatre satellites galiléens sont le siège d'une étonnante diversité de structures et de couleurs. Les images transmises par les sondes ayant visité Jupiter en témoignent. La sonde Galileo a d'ailleurs beaucoup contribué au développement des connaissances sur les satellites galiléens.

Dans les fiches d'identité des satellites galiléens (tableaux 5.7 à 5.10), seule la période de révolution de chaque satellite est donnée (et non la période de rotation). En fait, comme c'est le cas pour notre Lune, les quatre satellites galiléens ont une période de rotation égale à leur période de révolution : ils présentent donc toujours la même face à Jupiter.



TABLEAU 5.7

Fiche d'identité d'Io

Diamètre	3 630 km
Distance de Jupiter	422 000 km 5,9 fois le rayon de Jupiter
Atmosphère	110 km d'épaisseur, alimentée par les éruptions volcaniques
Température	-145 °C
Période de révolution autour de Jupiter	1,77 jours
Densité	3,55 g/cm ³

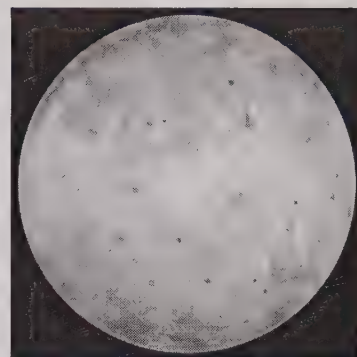


TABLEAU 5.8

Fiche d'identité d'Europe

Diamètre	3 138 km
Distance de Jupiter	671 000 km 9,4 fois le rayon de Jupiter
Atmosphère	Extrêmement ténue, composée d'oxygène
Température	-145 °C
Période de révolution autour de Jupiter	3,55 jours
Densité	3,01 g/cm ³

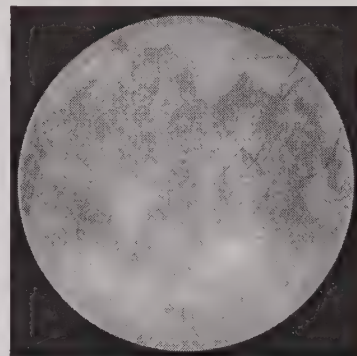
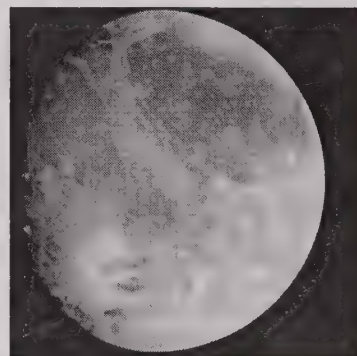


TABLEAU 5.9

Fiche d'identité de Ganymède

Diamètre	5 262 km
Distance de Jupiter	1 070 000 km 15,0 fois le rayon de Jupiter
Atmosphère	Extrêmement ténue, composée d'oxygène
Température	-145 °C
Période de révolution autour de Jupiter	7,16 jours
Densité	1,94 g/cm ³



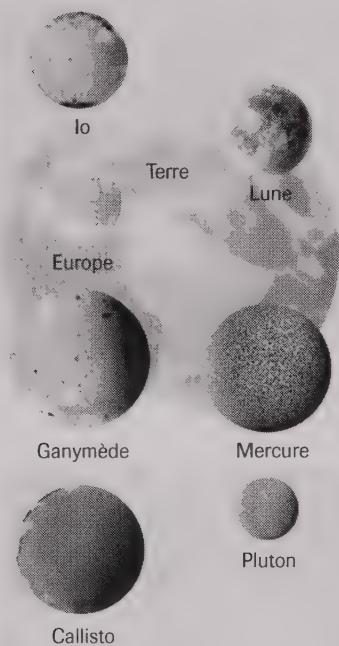
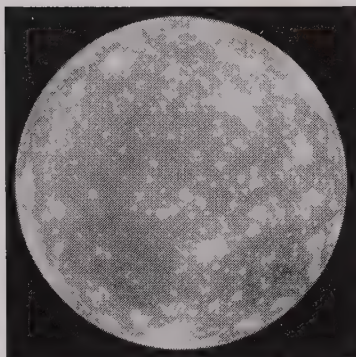


FIGURE 5.21

La taille des satellites galiléens est comparable à celles de Mercure et de la Lune. Cependant, les satellites sont tous plus gros que Pluton et beaucoup plus petits que la Terre.

TABLEAU 5.10

Fiche d'identité de Callisto

Diamètre	4 800 km
Distance de Jupiter	1 883 000 km 26,4 fois le rayon de Jupiter
Atmosphère	Extrêmement ténue, composée de gaz carbonique
Température	-145 °C
Période de révolution autour de Jupiter	16,70 jours
Densité	1,83 g/cm ³

Les trois satellites galiléens les plus rapprochés de Jupiter, soit Io, Europe et Ganymède, ont des périodes orbitales qui sont dans un rapport de 1 pour 2 pour 4. Cela est attribuable à l'effet de résonance gravitationnelle et, dans quelques millions d'années, Callisto fera partie du groupe avec une période orbitale de 2 fois celle de Ganymède et de 8 fois celle d'Io.

Le satellite galiléen le plus proche de Jupiter, Io, est l'objet le plus actif du Système solaire sur le plan du volcanisme. Les sondes Voyager et Galileo ont d'ailleurs révélé la présence de nombreux volcans en éruption sur Io (figure 5.22). Cette importante activité volcanique est entretenue par les intenses forces de marée provoquées par l'effet gravitationnel conjugué de Jupiter, Europe et Ganymède. Les gaz de soufre et de dioxyde de soufre rejetés dans l'espace d'Io par les éruptions alimentent son atmosphère. Celle-ci est 20 000 fois moins dense que celle de la Terre et il y règne à la surface une pression d'à peine 10^{-8} bar. Les images de la surface d'Io obtenues par les sondes spatiales révèlent également la présence de lacs de soufre, de montagnes et de cratères résultant de l'effondrement de cheminées volcaniques. L'intérieur d'Io serait semblable à celui de la Lune; il serait composé d'un noyau métallique et d'un manteau rocheux (figure 5.23). Cependant, selon de récentes observations de Galileo, le noyau de Io serait plutôt gros.

Le satellite suivant, Europe (figure 5.24), comporte la surface la plus lisse de tout le Système solaire. Les structures de la surface d'Europe ne dépassent guère 1 kilomètre d'élévation. Les éléments les plus visibles sont les nombreuses fissures de quelques dizaines de kilomètres de largeur et de plusieurs centaines de kilomètres de longueur. La faible quantité de cratères et de montagnes suggère que la surface d'Europe est jeune et peut-être encore active. Toutefois, cette activité ne serait pas associée à du volcanisme, comme sur Io, mais plutôt



à la capacité de la croûte d'Europe de se régénérer. Cette croûte fait d'ailleurs la particularité d'Europe : elle est constituée d'une importante couche de glaces (glace d'eau, de méthane, d'ammoniac, d'azote, glace carbonique). Les fissures à la surface pourraient donc être des zones de fracture de la croûte de glaces. Les dernières observations faites par Galileo semblent indiquer qu'il se trouverait beaucoup d'eau à l'état liquide sous ces glaces, et les astronomes soupçonnent même la présence d'un grand océan intérieur. Plusieurs croient que la présence d'un tel océan ferait d'Europe un endroit propice au développement d'une forme de vie quelconque. La sonde Europa Orbiter, qui doit visiter le satellite vers 2011, effectuera des observations en ce sens.

Ganymède est le plus grand satellite de Jupiter et le plus grand de tout le Système solaire. S'il était en orbite autour du Soleil, il aurait le statut de planète. La faible densité de Ganymède ($1,94 \text{ g/cm}^3$) témoigne de la présence d'une grande quantité de glaces. La proportion glaces-roches serait même moitié-moitié (figure 5.25). Comme dans le cas de sa voisine Europe, Ganymède a peut-être une couche liquide sous les glaces épaisses de sa surface. Sa surface est moins active que celles d'Europe et d'Io ; en effet, plus de 40 % est criblée de cratères.

Callisto est le satellite du Système solaire qui compte le plus de cratères d'impact. Il est assez semblable à Ganymède, et sa composition interne y est probablement similaire, quoique les couches de Callisto semblent être moins différenciées (figure 5.26). De plus, la croûte de Callisto semble plus épaisse que celles d'Europe et de Ganymède. On y trouve peu de failles importantes, pas de grosses montagnes ni de volcans. La présence de nombreux cratères laisse croire que la surface de Callisto date vraisemblablement de quelques milliards d'années.

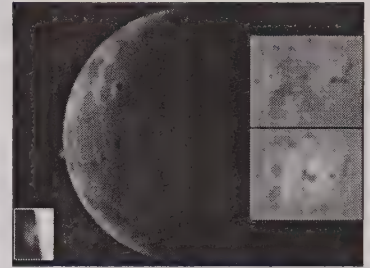


FIGURE 5.22

Éruption volcanique sur Io

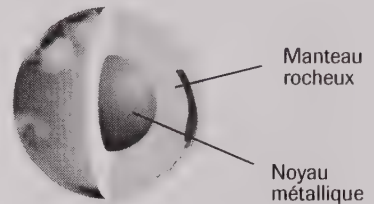


FIGURE 5.23

Intérieur de Io

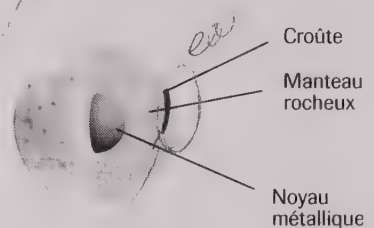


FIGURE 5.24

Intérieur d'Europe

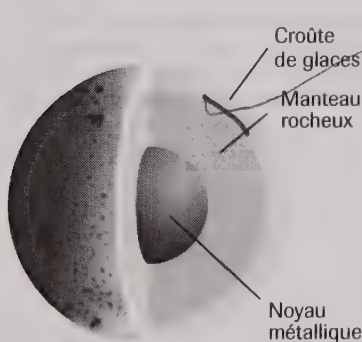


FIGURE 5.25

Intérieur de Ganymède

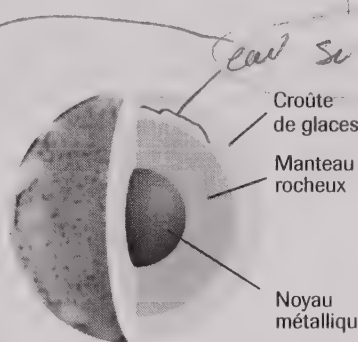


FIGURE 5.26

Intérieur de Callisto



La ronde des satellites galiléens

L'observation des lunes de Jupiter est fascinante et a mené à l'une des mesures les plus importantes de l'histoire.

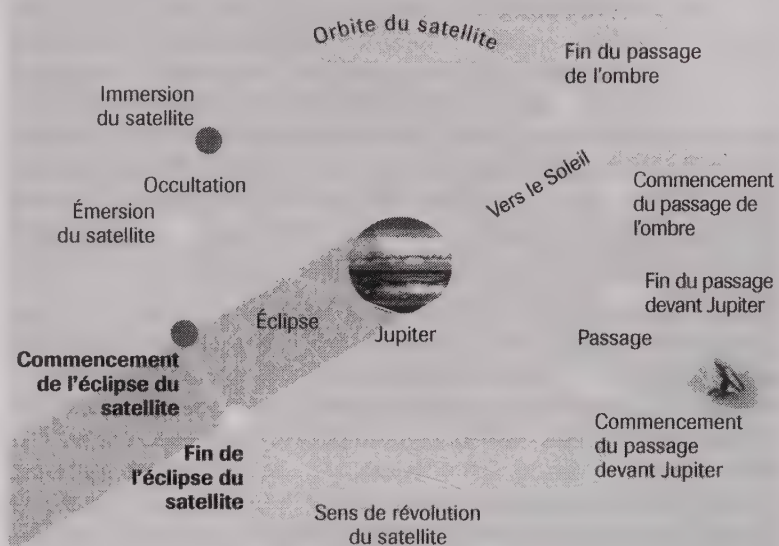
La figure ci-dessous illustre les diverses configurations Terre-Jupiter-satellite galiléen qu'il est possible d'observer au petit télescope amateur. Les trois phénomènes suivants sont particulièrement intéressants à voir :

- une éclipse quand un satellite passe dans l'ombre de Jupiter ;
- une occultation quand un satellite est masqué par le disque de Jupiter ;
- un passage quand un satellite (ou l'ombre d'un satellite) passe devant le disque de Jupiter.

C'est en 1676, alors qu'il mesurait le temps qui sépare deux éclipses, que l'astronome danois Ole Rømer (1644-1710) a pu donner la première estimation de la vitesse de la lumière. À cette époque, les scientifiques croyaient que la lumière était un phénomène instantané, qu'elle voyageait à une vitesse infinie. L'exploit de Rømer bouleversa la façon de concevoir les phénomènes lumineux de ses pairs.

Voici comment le scientifique s'y est pris. En principe, l'intervalle de temps qui sépare deux éclipses de satellite doit être constant, soit de l'ordre d'une période de révolution. Or, Rømer a constaté un retard dans le mouvement des satellites de Jupiter lorsque celle-ci était en conjonction (position la plus éloignée de la Terre). De la même façon, il a remarqué une avance dans le mouvement des satellites lorsque Jupiter était en opposition (position la plus rapprochée de la Terre). Il a attribué ces décalages

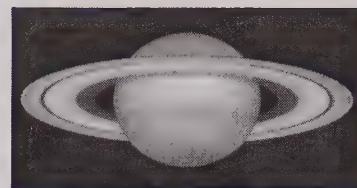
au temps mis par la lumière pour atteindre la Terre. Lorsque Jupiter est en conjonction, la lumière doit parcourir tout le diamètre de l'orbite terrestre avant de se rendre à la Terre. D'où le retard mesuré par Rømer qui était d'environ 20 minutes. L'époque à laquelle Rømer faisait ces observations était également celle à laquelle on était parvenu à mesurer la distance Terre-Jupiter. Rømer combina toutes ces mesures, ce qui lui donna une vitesse de la lumière de 214 300 km/s. Bien que cette mesure soit plutôt éloignée de la valeur réelle de près de 300 000 km/s, Rømer venait tout de même de réaliser un brillant exploit.



L'éclipse d'un satellite jovien se produit lorsque le satellite se trouve dans l'ombre de Jupiter. Selon la distance entre Jupiter et la Terre, le temps écoulé entre deux éclipses de satellite varie en fonction de la longueur du chemin que doit parcourir la lumière réfléchi sur le satellite. C'est en calculant cette variation que Rømer est arrivé à estimer la vitesse de la lumière.



5.5 Saturne

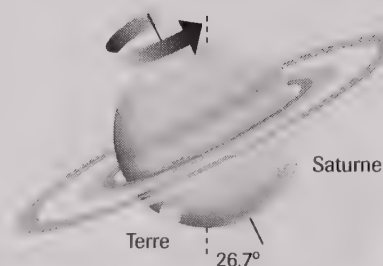


Saturne, la planète aux anneaux merveilleux, est la deuxième planète en importance du Système solaire et la dernière connue de l'Antiquité. Ses anneaux ont été observés pour la première fois par Galilée en 1610. Ce dernier croyait observer un globe flanqué de deux lunes. C'est l'astronome hollandais Christiaan Huygens (1629–1695) qui, en 1654, donna la bonne

TABLEAU 5.11

Fiche d'identité de Saturne

		Par rapport à la Terre
Diamètre	120 540 km (à l'équateur) 108 700 km (aux pôles)	9,4 fois
Volume	$8,27 \times 10^{23} \text{ m}^3$	764 fois
Masse	$5,68 \times 10^{26} \text{ kg}$	95 fois
Densité	0,70 g/cm ³	13 %
Accélération gravitationnelle	8,96 m/s ²	92 %
Distance moyenne au Soleil	1 429 000 000 km (9,54 UA)	
Excentricité	0,056	
Période de révolution (année sidérale)	29,46 ans	
Inclinaison de l'orbite par rapport à l'orbite terrestre	2,5°	
Période de rotation (jour sidéral)	10 h 14 min (à l'équateur) 10 h 40 min (pour les couches plus profondes)	
Inclinaison de l'axe de rotation	26,7°	
Albédo	52 %	
Atmosphère	Hydrogène (88 %) Hélium (10 %) Méthane (2 %) Ammoniac et autres (traces)	
Température	–180 °C (haut des nuages)	
Nombre de satellites	30 (en 2002)	



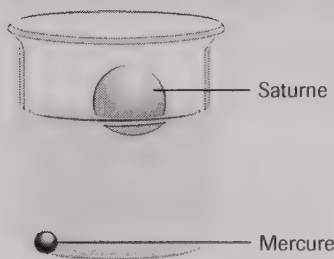


FIGURE 5.27

Saturne pourrait flotter sur l'eau si l'on arrivait à trouver un océan assez grand pour la contenir. Le même océan verrait les autres planètes, dont Mercure, qui a une densité sept fois plus élevée que Saturne, couler à pic.

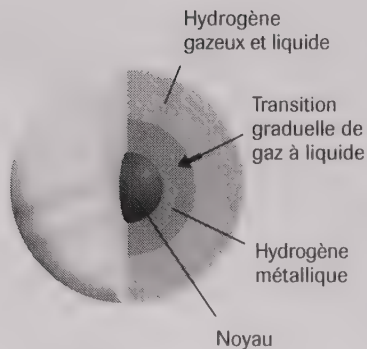


FIGURE 5.28

La structure interne de Saturne est semblable à celle de Jupiter, à la différence près que le noyau de Saturne y prend plus d'espace et que la couche d'hydrogène métallique y est plus mince.

interprétation de la nature de ces structures. Il remarqua également l'inclinaison des anneaux, qui leur donne un aspect différent au fil des ans.

La fascination pour les anneaux de Saturne a parfois fait oublier que la planète elle-même est d'une extraordinaire richesse scientifique et visuelle. À cet égard, les images transmises par les sondes Voyager 1 et 2 sont spectaculaires et instructives. Entre autres résultats d'observation, elles ont confirmé l'étrange ressemblance entre Saturne et sa voisine Jupiter et ont mis au jour une structure d'anneaux beaucoup plus complexe que ce que l'on avait d'abord soupçonné.

La plus surprenante des caractéristiques physiques de Saturne est sa densité de seulement $0,7 \text{ g/cm}^3$, ce qui est plus faible que la densité de l'eau (1 g/cm^3). Cela veut dire que, si nous pouvions trouver un océan assez grand pour contenir Saturne, celle-ci y flotterait (figure 5.27).

Saturne est également la planète du Système solaire qui présente le plus haut degré d'aplatissement des pôles par rapport à l'équateur. Quoique Jupiter affiche également un fort degré d'aplatissement des pôles (6 %), celui de Saturne est encore plus important, avec environ 10 %. Comme il a déjà été expliqué pour Jupiter, cet aplatissement est le résultat d'une grande vitesse de rotation de la planète sur elle-même (près de 10 heures pour Saturne) et de sa composition fluide, caractéristique des planètes joviennes.

Outre un fort aplatissement, Saturne et Jupiter présentent d'autres caractéristiques communes. Mentionnons la période de rotation de Saturne qui, comme c'est le cas sur Jupiter, est différente selon qu'on la mesure aux pôles, à l'équateur ou dans les couches internes de la planète. Saturne possède également un champ magnétique très étendu, malgré qu'il soit beaucoup plus faible que le champ magnétique de Jupiter. De plus, sur Saturne comme sur Jupiter, de forts vents de direction est-ouest se combinent à des mouvements de convection pour causer des perturbations atmosphériques telles qu'elles peuvent être perçues à la surface de la planète.

Saturne et Jupiter se ressemblent également sur le plan de la structure interne (figure 5.28), les différences étant souvent attribuables à la gravitation plus faible de Saturne. Le cœur de cette dernière est constitué d'un noyau dense et solide composé surtout de roches et de métaux. La température interne y est d'environ $12\,000^\circ\text{C}$. Le noyau est recouvert d'une couche d'hydrogène métallique beaucoup plus mince que celle de Jupiter. Étant donné que Saturne est environ trois fois moins massive que Jupiter, les pressions à l'intérieur de la planète



sont moins grandes, ce qui limite la zone d'hydrogène métallique. De plus, une couche d'hydrogène liquide devient gazeuse au fur et à mesure que l'on se rapproche du sommet des couches nuageuses et de l'atmosphère proprement dite de Saturne. Cette dernière est composée à 88 % d'hydrogène, à 10 % d'hélium et à 2 % de méthane. La composition des nuages est la même que pour les nuages de Jupiter.

Comme Jupiter, Saturne émet plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. Cependant, alors que Saturne est trois fois moins massive que Jupiter, elle ne produit que la moitié de l'énergie émise par Jupiter. Saturne émet donc plus d'énergie par kilogramme que Jupiter, ce qui signifie que la production énergétique de Saturne est plus performante que celle de Jupiter. L'origine de cette différence réside dans la proportion d'hélium présente dans les couches externes des deux planètes. La masse d'hélium dans les couches externes de Jupiter représente 20 % de la masse totale, alors que, dans le cas de Saturne, elle n'est que de 10 %. D'où vient cette différence, sachant que les deux planètes se sont formées de la même façon ?

L'explication vient du fait que Jupiter est plus rapprochée du Soleil que Saturne. Dans les couches externes de Jupiter, la température est assez élevée pour que l'hydrogène et l'hélium constituent un mélange indissociable. Sur Saturne, les températures sont plus faibles, et l'hélium tend à former des gouttelettes assez denses qui tombent vers des couches plus internes. La masse qui s'ajoute ainsi à l'intérieur de la planète engendre de l'énergie de la même façon que, sur Jupiter, la contraction gravitationnelle résiduelle peut en produire. Comme Saturne est également soumise à cet effet de contraction gravitationnelle, elle émet finalement un « surplus » d'énergie par rapport à Jupiter.

Exploration de Saturne

Saturne a été visitée par les sondes Pioneer 11 (1979) et Voyager 1 et 2 (respectivement en 1980 et 1981). Alors que Saturne était l'objectif final de Pioneer 11 et de Voyager 1, la sonde Voyager 2 passa près de Saturne en route vers Uranus et Neptune. Les images transmises par les trois sondes ont permis de mieux connaître la structure des anneaux de Saturne et plusieurs de ses satellites. La sonde Cassini, lancée en 1997, est actuellement (en 2002) en route vers Saturne, autour de laquelle elle se mettra en orbite en 2004. Quelques semaines après son arrivée, Cassini libérera Huygens, sonde secondaire qui descendra dans l'atmosphère de Titan, le plus gros satellite de Saturne.



Anneaux de Saturne

Les anneaux de Saturne sont de loin les plus beaux anneaux du Système solaire (figure 5.29). Leur brillance particulière vient de la présence importante de glace d'eau, qui donne un albédo pouvant aller à 60 %. On désigne les anneaux par des lettres, correspondant à l'ordre de leur découverte. Ainsi, les anneaux A, B et C (figure 5.30) sont tous visibles de la Terre et ont été découverts par Jean-Dominique Cassini (1625–1712) en 1675. Cassini a également observé une division qui semble séparer les anneaux A et B, aujourd'hui appelée la **division Cassini**. (Les sondes Voyager y ont cependant décelé une centaine d'anneaux très fins.) Les sondes Pioneer et Voyager ont par la suite découvert les anneaux D, E, F et G.

Les lettres A à G ne sont que les noms des principales structures annulaires de Saturne. Vu de près, il n'y a pas que sept anneaux autour de la planète, mais bien des milliers d'anneaux très fins dont l'apparence change en fonction de la différence

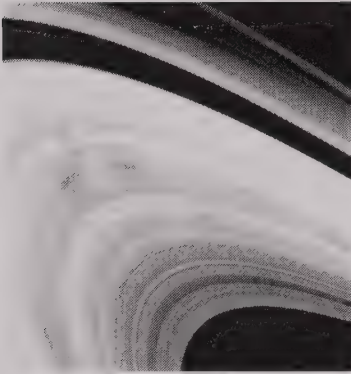


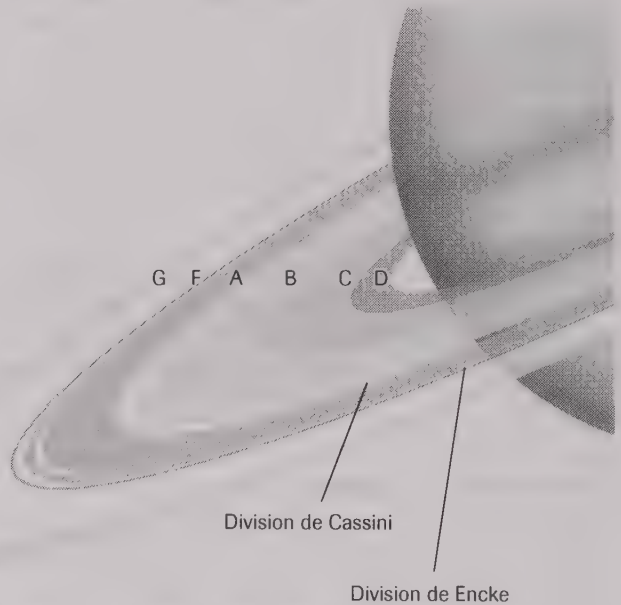
FIGURE 5.29

Les spectaculaires anneaux de Saturne

FIGURE 5.30

Les anneaux de Saturne sont divisés en sept anneaux nommés de A à G. Chacun est composé de centaines d'annelets. Les anneaux A et B sont séparés par la division de Cassini. La division de Encke est une région foncée dans l'anneau A.

E



de densité des particules qui les constituent. Le diamètre de ces anneaux varie de 134 000 kilomètres à 960 000 kilomètres et leur épaisseur de 100 à 1 000 mètres. Cela signifie que si l'on réduisait l'ensemble des anneaux à l'épaisseur d'une feuille de papier, le diamètre de celle-ci aurait plus de 200 mètres ! Le tableau 5.12 donne les caractéristiques principales de chaque structure d'anneaux et des deux divisions.



TABLEAU 5.12

Caractéristiques des anneaux de Saturne

Anneaux		Distance (en 10³ km)	Distance (en rayons de Saturne) ($R_s = 60\,270$ km)	Largeur (en km)
D	Très pâles et si près de la planète qu'ils y touchent presque.	67–75	1,11–1,24	7 500
C	Les plus pâles des anneaux visibles de la Terre. Plusieurs anneaux très fins.	75–92	1,24–1,52	17 500
B	Les plus larges, les plus brillants et les plus denses des anneaux.	92–118	1,52–1,95	25 500
Division de Cassini	Divise les anneaux A et B. Apparaît comme une bande noire de la Terre. Faite de plusieurs anneaux très fins et très pâles.	118–122	1,95–2,02	4 700
A	Les plus externes des anneaux visibles depuis la Terre. Contiennent la division de Encke.	122–137	2,02–2,27	14 600
Division de Encke	Divise les anneaux A. Les satellites les plus proches de Saturne y gravitent.	134	2,22	35
F	Extrêmement fins et étroits. Confinés par deux satellites, Prométhée et Pandore, et, sous les effets gravitationnels de ces deux satellites, composés de plusieurs anneaux tressés.	140	2,34	30–500
G	Très pâles et très fins.	169–170	2,75–2,88	8 000
E	Très pâles et très fins.	180–480	3–8	300 000

Quoique de loin les anneaux puissent avoir l'apparence de disques solides, il n'en est rien. Selon les lois de la physique, ils ne pourraient se maintenir de cette façon sans éventuellement éclater sous l'effet des forces d'attraction de Saturne et de ses satellites. En fait, les anneaux les plus importants (A, B, C, D et F) se trouvent à l'intérieur de la limite de Roche, en deçà de laquelle



des particules ne peuvent s'agglutiner et former un satellite. Les anneaux sont donc plutôt composés de particules minérales et de blocs de glace, dont la plupart ne dépassent pas la taille d'un caillou. La température des anneaux est d'environ -200°C .

Il existe de nombreuses et complexes interactions de résonance entre certains satellites et les anneaux. Par exemple, trois satellites parmi les plus proches de Saturne, Atlas, Prométhée et Pandore, sont également appelés **satellites bergers** ou **satellites gardiens**, car ils jouent un rôle important dans la stabilisation et le nettoyage du bord des anneaux vis-à-vis desquels ils se trouvent. Leur effet gravitationnel combiné empêche les particules de leurs anneaux voisins de s'échapper. Un peu de la même manière, un autre satellite, Mimas, serait responsable des lacunes de matière dans la division de Cassini. Nous verrons au chapitre 6, dans la section consacrée aux astéroïdes, que le processus qui produit ces lacunes est similaire à celui qui produit les lacunes dites de **Kirkwood** observées dans la ceinture d'astéroïdes. Le satellite le plus proche de Saturne, Pan, de seulement 10 kilomètres de diamètre, se trouve directement dans la division de Encke et a certainement contribué à sa formation.

Si Galilée n'a pu déterminer la nature des protubérances qu'il avait observées de part et d'autre de Saturne en 1610, c'est peut-être beaucoup en raison de la nature changeante de l'apparence des anneaux. En 1612, au cours d'une nouvelle observation, les protubérances avaient disparu pour réapparaître quelques années plus tard. Comment les anneaux avaient-ils pu se dissiper ainsi ? Bien sûr, ils n'avaient pas disparu ; ils se présentaient tout simplement par la tranche (figure 5.31). L'axe de rotation de Saturne étant incliné de $26,7^{\circ}$, la planète se présente, selon le moment de l'année saturnienne, de côté, par-dessus ou par-dessous. Les anneaux de Saturne sont d'une minceur telle que, lorsqu'ils se présentent de côté, il nous est impossible de les voir. Comme Saturne met près de 30 ans pour effectuer sa révolution, le spectacle des anneaux nous est caché tous les 15 ans. La prochaine « Saturne sans anneaux » se présentera à la Terre vers 2010.

FIGURE 5.31

Sur un cycle de 30 ans, Saturne et ses anneaux présentent à l'observateur un spectacle qui évolue. L'aspect changeant des anneaux est attribuable à la forte inclinaison de l'axe de rotation de la planète.





Satellites de Saturne

Saturne est entourée d'au moins 30 satellites (figure 5.32), dont le plus important est Titan (figure 5.33). Plus grand que la Lune et que Mercure, Titan est doté d'une atmosphère épaisse, plus dense que celle de la Terre. La pression qui y règne est 60 % plus élevée que la pression terrestre. Les nuages et l'atmosphère sont opaques au point où les sondes Voyager n'ont rien pu voir de la surface du satellite, ce qui, à l'époque, causa une grande déception chez les concepteurs des missions. L'un des objectifs de la mission Cassini-Huygens consiste justement dans la cartographie radar de la surface de Titan.

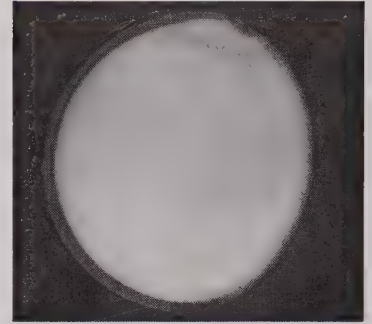


FIGURE 5.33

Titan, le satellite de Saturne le plus important

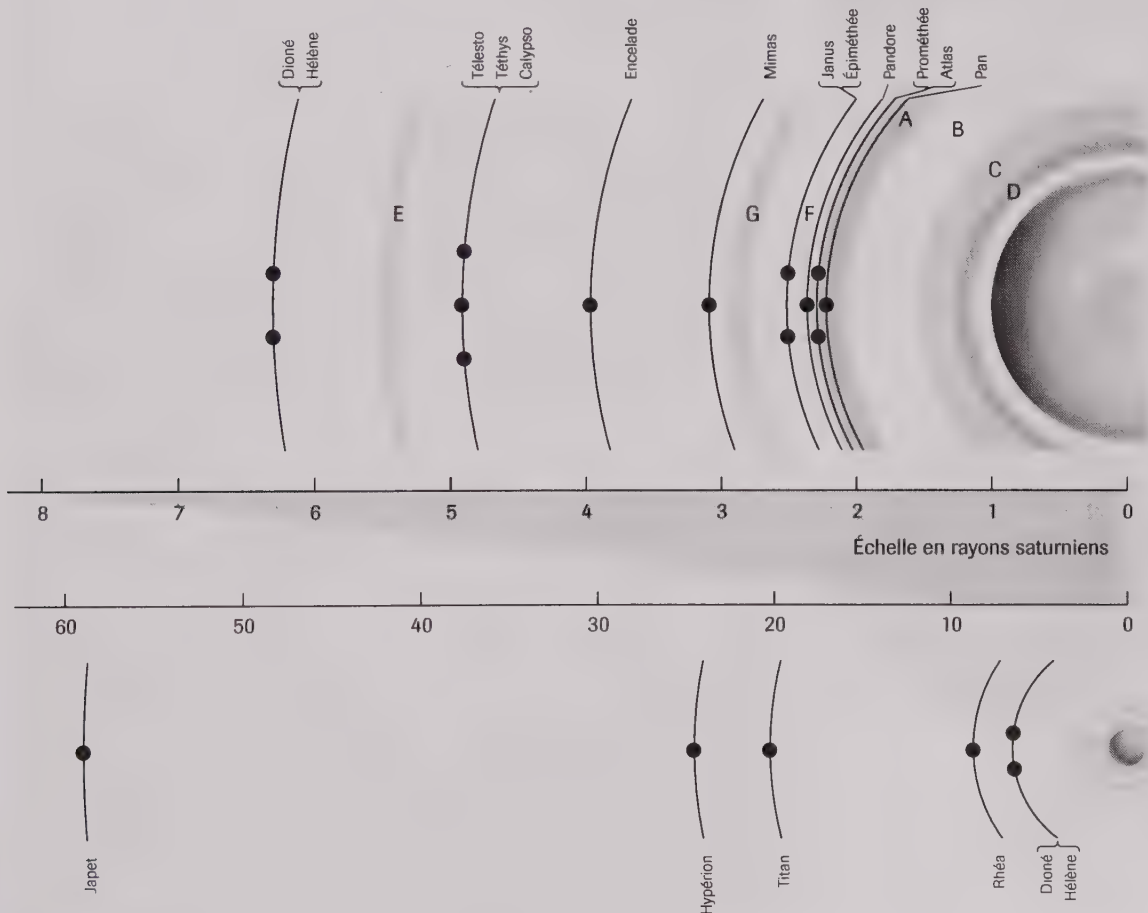


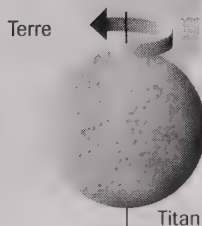
FIGURE 5.32

Les 17 lunes les plus rapprochées de Saturne parcourent leurs orbites à des distances en deçà de 60 rayons saturniens, dans le sens direct. Les autres satellites (non illustrés) se trouvent entre 180 et 390 rayons saturniens, et certains d'entre eux effectuent leur révolution dans le sens rétrograde.

TABLEAU 5.13

Fiche d'identité de Titan

Distance de Saturne	1 222 000 km (20,2 rayons saturniens)
Diamètre	5 150 km
Atmosphère	Azote (90 %) Méthane (10 %) Traces d'argon Brume d'hydrocarbures
Température	-180 °C
Période de révolution autour de Saturne	15,95 jours
Pression à la surface	1,5 bar
Albédo	20 %
Densité	1,88 g/cm ³



La composition élevée en azote (90 %) de l'atmosphère de Titan ainsi que la présence d'hydrocarbures font croire aux astronomes que les ingrédients nécessaires au développement de certaines formes de vie microscopique y sont présents. Il semble que l'atmosphère de Titan telle qu'on l'observe aujourd'hui ressemble à celle que devait avoir la Terre avant que de l'oxygène y soit ajouté. L'un des objectifs de la sonde Huygens, qui descendra dans l'atmosphère de Titan en 2004, est justement de nous faire mieux connaître la composition de celle-ci.

Les autres satellites de Saturne sont tous beaucoup plus petits que Titan et certains n'ont à peine que quelques kilomètres de diamètre. Ceux-ci ressemblent d'ailleurs plus à des rochers qu'à de véritables satellites. Ils sont pour la plupart essentiellement composés de glaces et de roches.

Plusieurs satellites de Saturne suivent des orbites synchrones, c'est-à-dire que leur période de rotation est égale à leur période de révolution. On trouve également de nombreux cas de résonance parmi les satellites de Saturne. Par exemple, la période orbitale de Mimas, le septième satellite le plus proche de Saturne, est précisément la moitié de celle de Téthys (9^e satellite), ce qui signifie une résonance de 1 pour 2. De même, Encelade (8^e) et Dioné (12^e) présentent une résonance de 1 pour 2, et Titan (15^e) et Hypérion (16^e), une résonance de 3 pour 4.



5.6 Uranus

Nos connaissances sur Uranus étaient plutôt pauvres avant que la sonde Voyager 2 survole Uranus en 1986 et transmette à la Terre une riche moisson de plus de 7 000 images. En raison de son éloignement (plus de 19 UA la séparent du Soleil), Uranus est une planète qui n'est pas facile à observer depuis la Terre. Les observations que nous a transmises Voyager 2 ont beaucoup contribué à la compréhension des phénomènes et

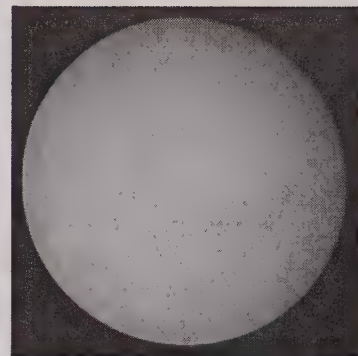
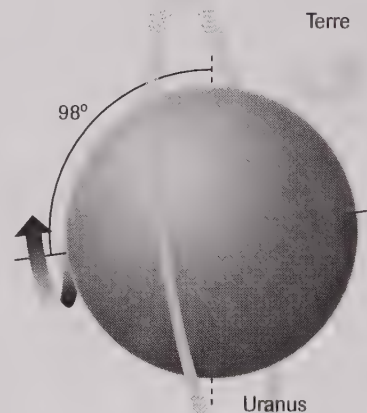


TABLEAU 5.14

Fiche d'identité d'Uranus

		Par rapport à la Terre
Diamètre	51 120 km (à l'équateur)	4 fois
Volume	$7,00 \times 10^{22} \text{ m}^3$	64 fois
Masse	$8,66 \times 10^{25} \text{ kg}$	15 fois
Densité	$1,30 \text{ g/cm}^3$	24 %
Accélération gravitationnelle	$8,8 \text{ m/s}^2$	90 %
Distance moyenne au Soleil	2 872 000 000 km (19,2 UA)	
Excentricité	0,046	
Période de révolution (année sidérale)	84 années	
Inclinaison de l'orbite par rapport à l'orbite terrestre	$0,8^\circ$	
Période de rotation (jour sidéral)	17,2 heures	
Inclinaison de l'axe de rotation	98°	
Albédo	51 %	
Atmosphère	Hydrogène (83 %) Hélium (15 %) Méthane (2 %) Ammoniac (traces) Nuages de méthane	
Température	-220°C (haut des nuages)	
Nombre de satellites	22 (en 2002)	



des caractéristiques propres aux satellites joviens du Système solaire (nombre élevé de lunes, présence d'anneaux, atmosphère se confondant à l'intérieur de la planète, etc.), tout en soulevant de nouvelles questions auxquelles les astronomes n'ont toujours pas toutes les réponses.



FIGURE 5.34

Le télescope de William Herschel

Uranus fut découverte par sir William Herschel (1738–1822) en 1781, à l'aide d'un télescope réflecteur de 16 cm qu'il avait construit lui-même (figure 5.34). L'aspect verdâtre du petit disque aux contours diffus que l'astronome britannique d'origine allemande apercevait par l'oculaire lui fit d'abord croire qu'il avait découvert une nébuleuse ou une comète. C'est le mouvement de l'objet par rapport aux étoiles qui, mesuré au fil des jours par d'autres astronomes, mena à déduire que c'était une planète, la septième connue du Système solaire. Uranus est donc la première planète à avoir été découverte grâce à la technologie du télescope. Pourtant, elle avait déjà été observée plusieurs fois aux XVII^e et XVIII^e siècles. Cependant, sa brillance dans le ciel est si faible (on peut à peine la voir à l'œil nu dans de parfaites conditions d'observation) qu'on l'avait prise pour une étoile. Plus tard, en 1787, avec un télescope de sa fabrication et de meilleur grossissement, Herschel fit la découverte des deux plus gros satellites d'Uranus, Titania et Obéron.

Parmi les caractéristiques d'Uranus qui la rendent bien différente de toutes les planètes étudiées jusqu'ici, notons sa teinte bleutée qu'elle ne partage qu'avec Neptune. Sur les photographies d'Uranus, on la voit comme une immense boule bleu-vert, uniforme, sur laquelle on décèle à peine l'ombre de quelques structures atmosphériques. Cette couleur est attribuable à la présence de nuages de méthane dans la haute atmosphère de la planète. Or, ce dernier absorbe la lumière dans le rouge et dans l'infrarouge, ce qui confère à Uranus sa teinte bleutée.

L'origine de la teinte de Neptune (v. p. 199), un peu plus bleutée qu'Uranus, réside également dans la présence de nuages de méthane dans son atmosphère. De légères variations dans la composition de l'atmosphère des deux planètes expliquent la différence de couleur entre les deux. Jupiter et Saturne, dont les atmosphères contiennent également du méthane, sont trop chaudes pour que celui-ci puisse se condenser en nuages. Elles ne présentent donc pas cette teinte bleutée particulière aux deux autres planètes joviennes, Uranus et Neptune.

La particularité la plus surprenante d'Uranus est qu'elle est presque couchée sur le plan de son orbite, son axe de rotation étant à peu près horizontal. En effet, l'axe de rotation d'Uranus est incliné à 98°, ce qui signifie qu'elle «roule» le long de sa trajectoire autour du Soleil. L'origine de cette inclinaison



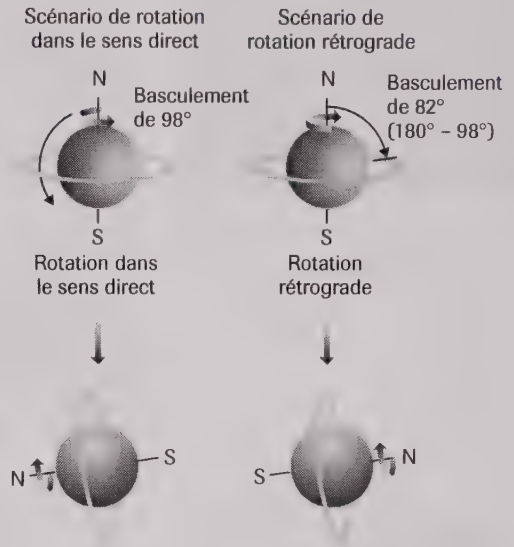
exceptionnelle est mal expliquée, mais on croit que le basculement a été provoqué par une violente collision entre Uranus et une protoplanète de la taille de la Terre, à la formation du Système solaire. Le fait que les satellites et les anneaux d'Uranus se déplacent tous dans le plan de son équateur conforte cette hypothèse.

Mouvement rétrograde ou direct?

Puisque l'axe de rotation d'Uranus est incliné à 98° , on suppose que c'est le pôle Nord qui est sous le plan de l'orbite de la planète. Dans ces conditions, le sens de rotation est direct, c'est-à-dire dans le sens contraire du mouvement des aiguilles d'une montre (par rapport à l'axe nord-sud).

Cependant, les astronomes ne s'entendent pas à savoir lequel des deux pôles d'Uranus est le pôle Nord, et donc ne sont pas en mesure de déterminer si le sens de rotation de la planète est direct ou rétrograde. La seconde partie de la figure présente le scénario de rotation rétrograde, dans lequel Uranus n'est inclinée que de 82° , ce qui place, cette fois-ci, son pôle Sud sous le plan de l'orbite de la planète.

Il semble toutefois que les astronomes aient fait leur choix : la presque totalité de la documentation scientifique confère une rotation directe à Uranus et une inclinaison de 98° .



La conséquence la plus importante de cette forte inclinaison est la présence de saisons très longues sur Uranus (figure 5.35). Selon les périodes de l'année, qui dure 84 ans, le Soleil s'approche à 8° de chacun des pôles alternativement, l'un recevant presque verticalement le rayonnement et la chaleur solaires durant 42 ans, et l'autre étant plongé dans une nuit également longue de 42 ans. Lorsque Voyager 2 a survolé Uranus en 1986, le pôle Sud faisait face au Soleil. Aujourd'hui, Uranus se trouve entre deux saisons, le Soleil éclairant davantage l'équateur de la planète. Uranus est si loin du Soleil que les longues périodes d'ensoleillement ne réussissent qu'à causer des écarts de température d'à peine 1 ou 2 degrés sur la planète.

Bien qu'Uranus comporte toutes les principales caractéristiques des planètes joviennes (champ magnétique intense, rotation rapide, nombre élevé de satellites, etc.), sa composition interne est légèrement différente de celle de Jupiter et de Saturne (figure 5.36). Par exemple, alors que ces dernières sont surtout constituées d'hydrogène, cet élément ne représente que 15 % sur Uranus. De plus, alors que Jupiter et Saturne



FIGURE 5.35

Dans sa course de 84 ans autour du Soleil, Uranus présente successivement chacun de ses pôles à celui-ci, ce qui se traduit par des saisons très inhabituelles en raison de la forte inclinaison de l'axe de rotation.

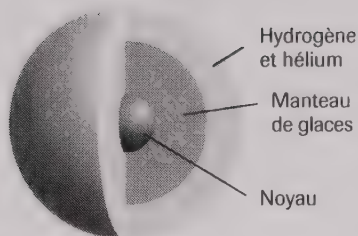
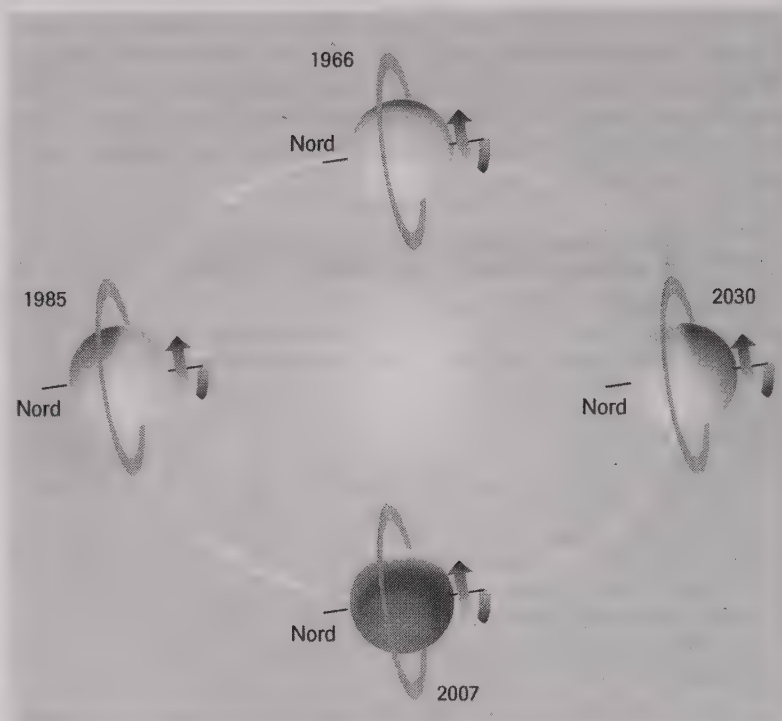


FIGURE 5.36

Uranus comporte beaucoup moins d'hydrogène que Jupiter et Saturne. Son noyau est composé de glaces, de roches et de métaux, et son manteau est constitué de glaces.

émettent plus d'énergie qu'elles n'en reçoivent du Soleil, Uranus, surtout en raison de sa masse plus faible, ne fournit presque aucune chaleur au Système solaire. L'intérieur serait composé d'un noyau de glaces, de roches et de métaux d'environ 15 000 kilomètres de diamètre, recouvert d'un épais manteau de glaces d'eau, de méthane et d'ammoniac.

L'atmosphère d'Uranus présente des traînées nuageuses parallèles à l'équateur, comme c'est le cas sur Jupiter et Saturne, emportées par des vents de direction est-ouest. L'hydrogène compose l'atmosphère d'Uranus à 83 %, alors que l'hélium compte pour 15 % et que les 2 % restant sont constitués de méthane, d'eau et d'ammoniac.

Anneaux d'Uranus

Avant de découvrir des anneaux autour d'Uranus (figures 5.37 et 5.38), les astronomes ne connaissaient que ceux de Saturne. Cette découverte, suivie de celle des anneaux de Jupiter et de Neptune, confirma que la présence d'anneaux planétaires n'était pas l'affaire d'une seule planète, mais bien de toutes les planètes joviennes. La découverte des anneaux uraniens s'est faite par hasard lorsque, en 1977, deux équipes d'astronomes



embarqués à bord d'avions équipés pour l'étude astronomique ont observé le passage d'Uranus devant une faible étoile. Pendant cette **occultation** (c'est ainsi qu'on appelle le fait qu'un objet céleste en cache un autre), les astronomes ont remarqué que l'étoile clignotait brièvement plusieurs fois. Ils ont déduit que la lumière de l'étoile ne pouvait être bloquée de cette façon que par des anneaux planétaires. On a mesuré que la planète était entourée de neuf anneaux, tous situés dans son plan équatorial. La sonde Voyager 2 a mis au jour deux autres anneaux, pour faire porter le total à 11 (figure 5.38).

Les anneaux d'Uranus sont très fins et très ténus. La plupart d'entre eux ont une largeur qui ne dépasse pas 10 kilomètres. Ils sont constitués de blocs d'au plus quelques mètres de diamètre. On a observé de larges bandes de poussières entre les anneaux, ce qui peut indiquer qu'ils subissent une lente érosion. D'ailleurs, il se pourrait que certains de ces anneaux soient des structures temporaires. Le tableau 5.15 présente les 11 anneaux d'Uranus, dans l'ordre de leur proximité de la planète. L'anneau 1986 U2 R est très large et très diffus, alors que l'anneau ϵ est le plus brillant. La figure 5.38 illustre la position des anneaux autour de Neptune.

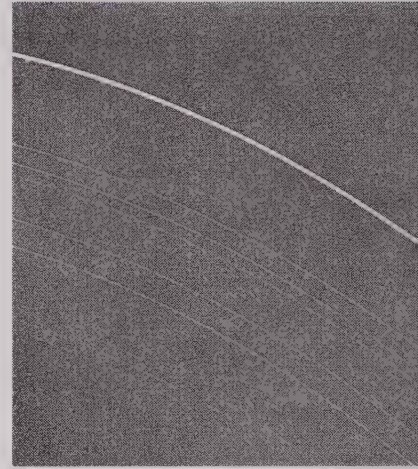
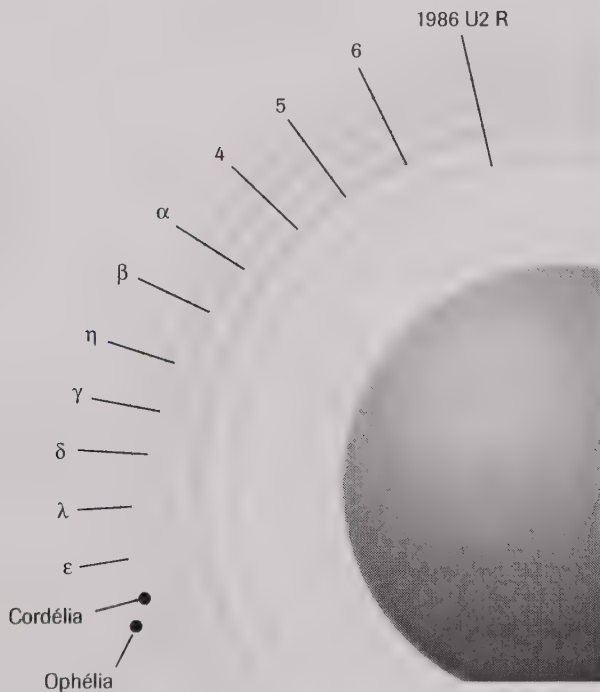


FIGURE 5.37

Les anneaux d'Uranus



Les anneaux vont de 1,49 à 2 rayons d'Uranus.

FIGURE 5.38

Hormis le 1986 U2 R, les anneaux et les satellites bergers Ophélie et Cordélia sont dessinés près de 50 fois leur largeur et leur taille habituelles.



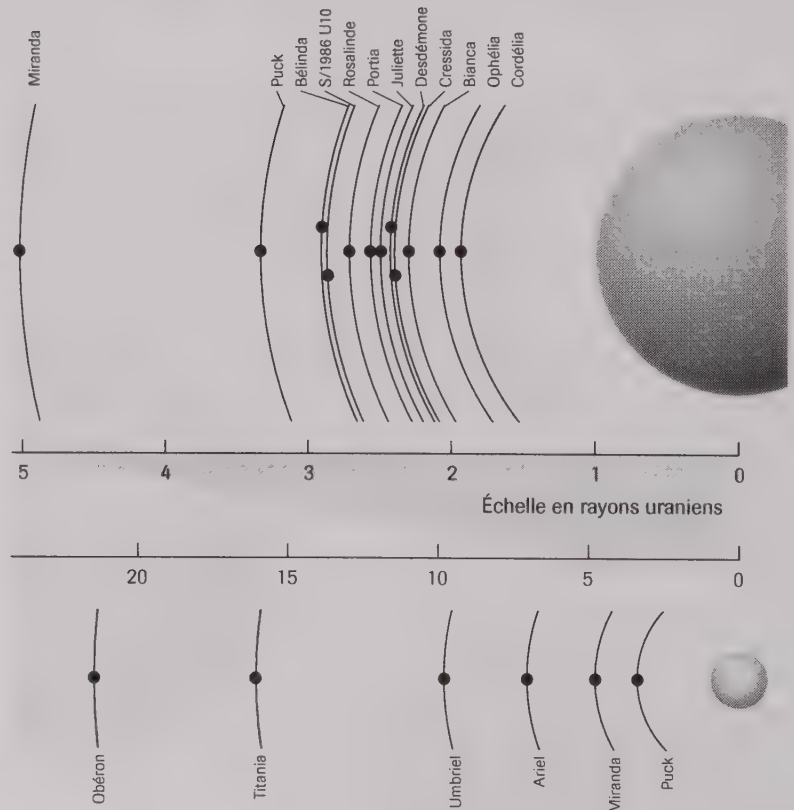
TABLEAU 5.15

Anneaux d'Uranus

Nom	Distance (en 10^3 km)	Distance (en rayons d'Uranus) ($R_U = 25\,560$ km)	Largeur (en km)
1986 U2 R	38	1,49	2 500
6	41,8	1,63	1-3
5	42,2	1,65	2-3
4	42,6	1,67	2-3
α (alpha)	44,7	1,75	4-13
β (bêta)	45,7	1,79	7-12
η (éta)	47,2	1,85	1-2
γ (gamma)	47,6	1,86	1-4
δ (delta)	48,3	1,89	3-7
λ (lambda)	50,0	1,96	2-3
ε (epsilon)	51,1	2,00	20-95

FIGURE 5.39

Les 16 lunes les plus rapprochées d'Uranus parcourent leur orbite à des distances en deçà de 25 rayons uraniens, toutes dans le sens direct. Le satellite S/1986 U10 est toujours en attente d'une certification officielle par les autorités scientifiques. Les 6 autres satellites d'Uranus, non illustrés ici, ont tous été découverts à la fin des années 90 et effectuent leur orbite à des distances allant de 280 à 700 rayons uraniens.





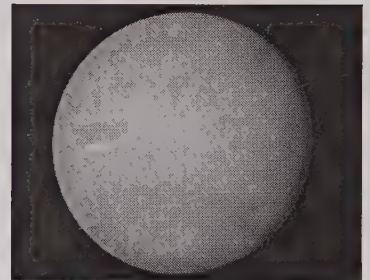
Satellites d'Uranus

Uranus est accompagnée par un cortège d'au moins 22 satellites (figure 5.39), dont les plus récemment découverts sont irréguliers et de petite taille. Avant Voyager, on connaissait 5 satellites à Uranus : Titania (1610 km), Obéron (1540 km), Umbriel (1180 km), Ariel (1160 km) et Miranda (480 km). La sonde Voyager 2 en a découvert 10 autres de moins de 200 kilomètres de diamètre. Les satellites d'Uranus présentent une grande diversité de surface et une grande richesse de motifs. Les deux satellites les plus rapprochés d'Uranus, Cordélia et Ophélia, sont des satellites bergers, c'est-à-dire qu'ils assurent la cohésion de l'anneau le plus externe d'Uranus, l'anneau ϵ (revoir la figure 5.38).

5.7 Neptune

C'est par le survol de Neptune, en 1989, que l'odyssée planétaire de Voyager 2 a pris fin (figure 5.40). Lancée 12 ans plus tôt, la sonde, qui ne devait pas aller par-delà Saturne, a fonctionné au-delà de toute attente et a permis à la communauté scientifique d'observer de près l'un des objets les plus lointains du Système solaire. Avant cet exploit, nous n'avions que très peu d'information sur cette planète. Maintenant, nous disposons de 9 000 images de Neptune et de son environnement que Voyager 2 a livrées, en plus de toutes les mesures transmises à la Terre. Aujourd'hui, les observations effectuées de la Terre et par le télescope spatial Hubble complètent nos connaissances sur Neptune.

La façon dont on a découvert Neptune est particulière : elle est la première planète dont l'existence et la position ont d'abord été déterminées par les mathématiques. En 1843, un étudiant anglais à Cambridge, John Couch Adams (1819–1892), entreprit de calculer la position de l'objet céleste qui serait responsable de la légère irrégularité de l'orbite d'Uranus. Il détermina qu'une autre planète devait se trouver au-delà de Neptune. Toutefois, ceux à qui il présenta ses calculs, qui durèrent deux ans, ne le prirent pas au sérieux. Indépendamment, en 1846, le mathématicien français Urbain Le Verrier (1811–1877) prédit également la présence d'une nouvelle planète. Il transmit ses résultats à l'astronome allemand Johann Galle (1812–1910) qui trouva la planète presque exactement à l'endroit calculé par Le Verrier. Il s'avéra que les calculs de Adams étaient également exacts, et c'est





pourquoi on leur attribue aujourd'hui à tous les deux l'honneur de la découverte de Neptune. À l'époque, c'était un exploit de pouvoir ainsi découvrir mathématiquement un astre situé à plus de 4 milliards de kilomètres de la Terre. C'est l'un des triomphes de la théorie de la gravitation universelle de Newton.

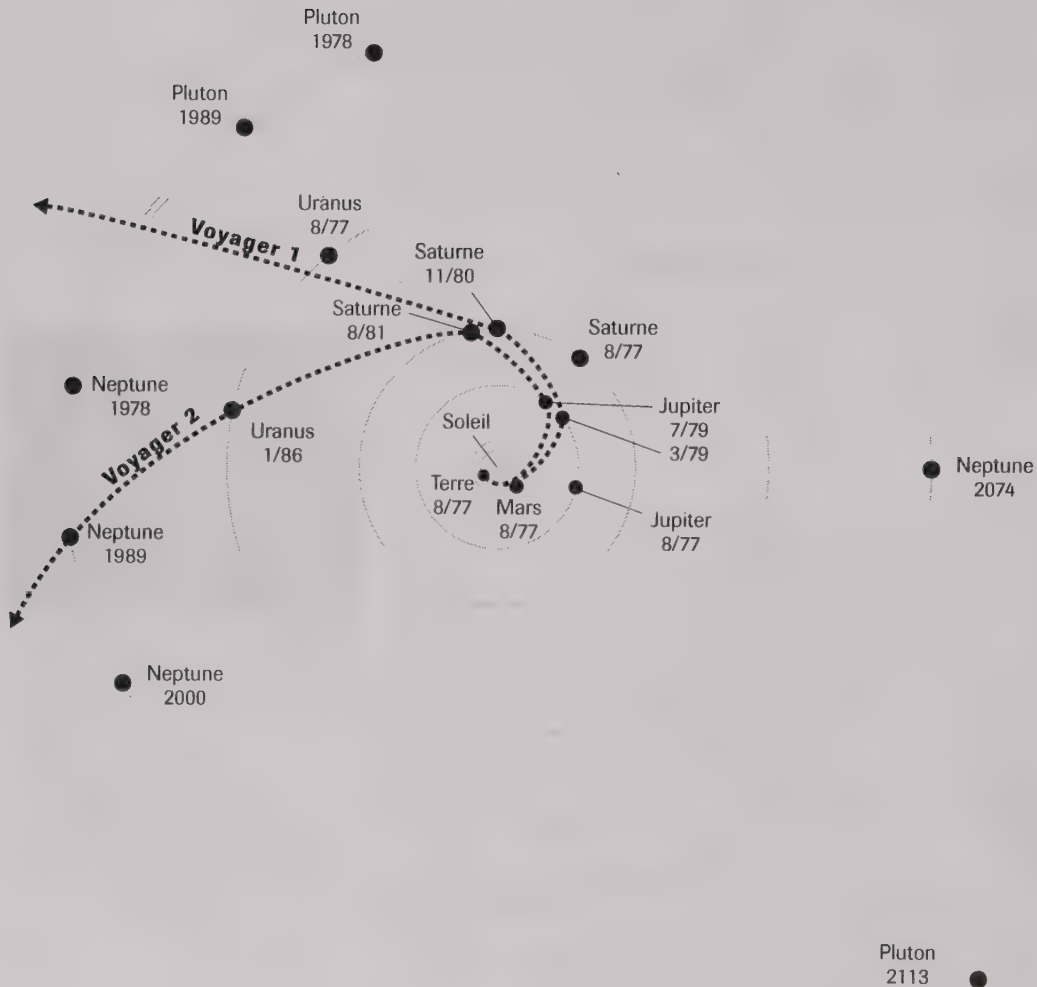


FIGURE 5.40

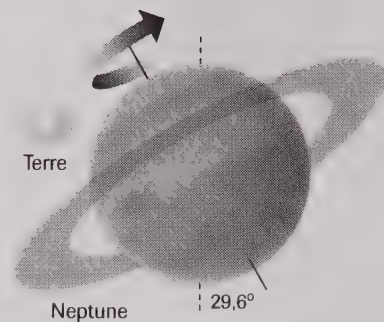
La trajectoire des sondes Voyager les a menées au-delà de l'orbite de Pluton, sans toutefois pouvoir la visiter, celle-ci ne se trouvant pas sur leur chemin. Les sondes envoient toujours des signaux à la Terre et réalisent leur nouvelle mission : Voyager Interstellar Mission. Voyager 1 est maintenant à plus de 80 UA du Soleil, près des limites d'influence de ce dernier.



TABLEAU 5.16

Fiche d'identité
de Neptune

		Par rapport à la Terre
Diamètre	49 530 km	3,9 fois
Volume	$6,36 \times 10^{22} \text{ m}^3$	58,5 fois
Masse	$1,03 \times 10^{26} \text{ kg}$	17 fois
Densité	$1,76 \text{ g/cm}^3$	32 %
Accélération gravitationnelle	$11,2 \text{ m/s}^2$	1,14 fois
Distance moyenne au Soleil	4 503 000 000 km (30,1 UA)	
Excentricité	0,01	
Période de révolution (année sidérale)	164,8 ans	
Inclinaison de l'orbite par rapport à l'orbite terrestre	$1,8^\circ$	
Période de rotation (jour sidéral)	18 heures (à l'équateur) 16,1 heures (pour les couches plus profondes)	
Inclinaison de l'axe de rotation	$29,6^\circ$	
Albédo	41 %	
Atmosphère	Hydrogène (80 %) Hélium (19 %) Méthane (1 %) Ammoniac (traces)	
Température	-230°C (haut des nuages)	
Nombre de satellites	8 (en 2002)	



Avant que Voyager 2 survole Neptune, on ne soupçonnait pas son extraordinaire activité atmosphérique. Outre sa couleur bleu profond, la planète se reconnaît aussi à ses taches sombres, plus ou moins grandes, et à des cirrus blancs. Lorsque la sonde s'est approchée de Neptune, elle a capté à la surface de son hémisphère Sud l'image d'un gigantesque ouragan sombre pouvant presque englober la Terre (12 000 kilomètres sur 8 000) et se déplaçant à plus de 1 000 km/h. Voyager 2 y a mesuré des vents d'est de 2 500 km/h, vraisemblablement les vents les plus rapides du Système solaire. On a appelé cette tempête la **Grande Tache sombre** (GTS) en référence à la Grande Tache rouge de Jupiter. Toutefois, en observant Neptune en 1994, le télescope spatial Hubble montra que la Grande Tache sombre de l'hémisphère Sud avait disparu. A-t-elle été dissipée par des vents violents ou recouverte par une couche nuageuse en haute altitude ? Les astronomes l'ignorent. Mais, quelques mois plus



tard, le télescope spatial observa la présence d'une nouvelle tache sombre dans l'hémisphère Nord. De plus, en tout temps, on peut observer d'autres structures semblables dans l'atmosphère de Neptune, quoique plus petites que les grandes taches. Ces phénomènes sont autant d'indices confortant l'idée qu'il y a une forte activité dans l'atmosphère de la planète.

L'intérieur de Neptune (figure 5.41) est probablement semblable à celui d'Uranus, leur taille et leur masse étant plutôt similaires. On y trouverait donc un noyau de glaces, de roches et de métaux, recouvert d'un manteau de différentes glaces. Neptune est la planète jovienne dont la densité est la plus élevée. Cela indique qu'elle contient une proportion encore un peu plus faible qu'Uranus d'éléments légers tels l'hydrogène et l'hélium.

À l'instar de Saturne et de Jupiter, Neptune rayonne plus d'énergie (au moins deux fois plus) qu'elle n'en reçoit du Soleil. Comme dans le cas des deux autres planètes, l'énergie est libérée par la contraction gravitationnelle à l'intérieur de la planète. Cette source d'énergie interne a pour effet que la température moyenne de l'atmosphère (-230°C) est semblable à celle d'Uranus (-220°C), bien que cette dernière soit beaucoup plus rapprochée du Soleil (deux tiers de la distance).

Neptune occupe officiellement le huitième rang des planètes en ce qui regarde la distance moyenne au Soleil, le titre de la planète la plus distante revenant à Pluton. Cependant, pendant 20 ans tous les 248 ans, Neptune devient la neuvième planète du Système solaire. Cela est attribuable à l'orbite de Pluton, qui est elliptique au point où sa trajectoire est parfois intérieure à celle de Neptune, faisant momentanément de la distance Neptune-Soleil la plus grande distance entre une planète et le Soleil.

Anneaux de Neptune

Les anneaux de Neptune ont été mis en évidence à l'aide de la technique d'occultation d'une étoile, la même qui avait permis de découvrir les anneaux uraniens. En 1984, l'astronome français André Brahic et l'équipe américaine de William Hubbard ont observé des anneaux incomplets (des arcs) autour de Neptune. Il fallut attendre les images de la sonde Voyager, prises en 1989, pour confirmer l'existence de véritables anneaux neptuniens, très pâles et pour la plupart très étroits. L'anneau Adams (tableau 5.17), le plus externe des anneaux, est celui qui comporte les arcs de matière plus dense qui avaient été observés à l'origine (figure 5.42). L'anneau du tableau 5.17 qui n'a toujours pas de nom partage son orbite avec un satellite berger, Galatée, qui confine l'anneau sans nom et semble jouer un rôle de gardien sur les arcs de l'anneau Adams.

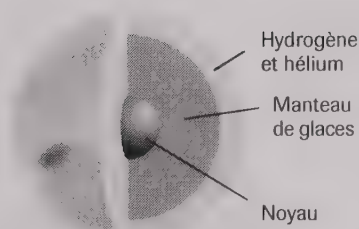


FIGURE 5.41



FIGURE 5.42

Les anneaux de Neptune. Les sections plus brillantes des anneaux sont les arcs qui avaient d'abord été observés.

TABLEAU 5.17

Anneaux de Neptune

Nom	Distance (en 10^3 km)	Distance (en rayons de Neptune) ($R_N = 24\,750$ km)	Largeur (en km)
Galle	42	1,692	2 000
Le Verrier	53,2	2,148	110
Lassell	53,2	2,148	4 000
Arago	57,2	2,310	Moins de 100
Sans nom	62,0	2,501	?
Adams	62,9	2,541	Moins de 50

Satellites de Neptune

Neptune compte 8 satellites (figure 5.43) dont le plus important est Triton, avec un diamètre de 2 700 kilomètres (plus gros que Pluton). Triton a été découvert par l'astronome britannique William Lassell en 1846, quelques jours seulement après la première observation de Neptune. Le deuxième satellite en importance de Neptune, Néréide, tout de même beaucoup plus petit que Triton avec 340 kilomètres de diamètre, fut découvert par Kuiper en 1949. Les six autres lunes neptuniennes ont toutes été découvertes par la sonde Voyager 2 en 1989.



FIGURE 5.43

Des 8 satellites de Neptune, seul Triton, le plus gros, a une révolution dans le sens rétrograde. Le huitième satellite, Néréide, est beaucoup plus éloigné de la planète que les autres satellites.

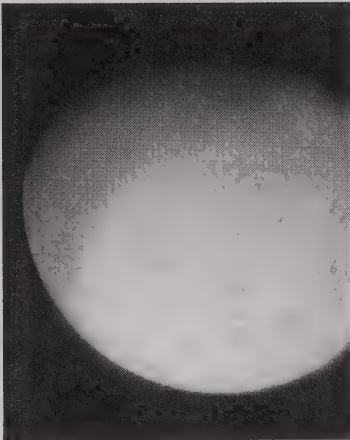
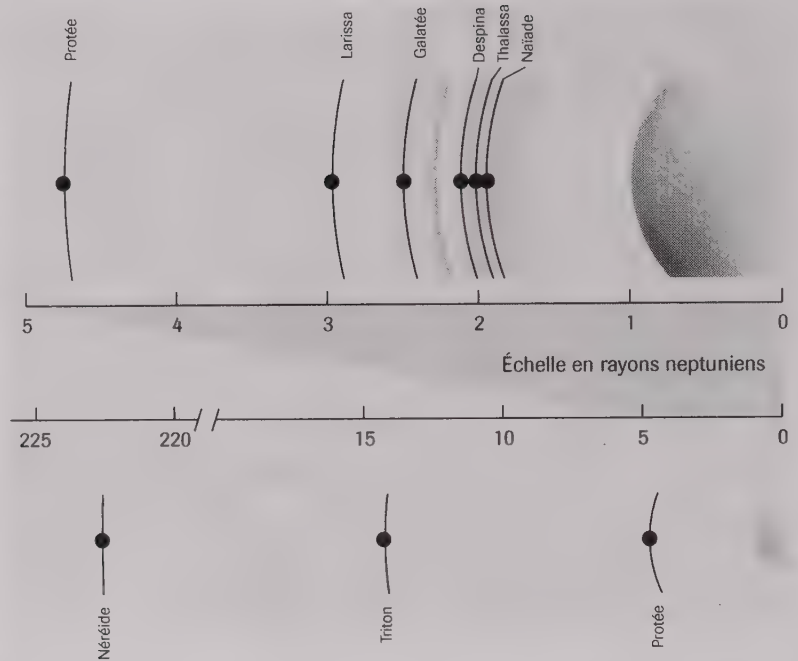


FIGURE 5.44

Triton, le plus gros satellite de Neptune

Triton (figure 5.44), avec une température de $-235\text{ }^{\circ}\text{C}$, est l'un des objets les plus froids du Système solaire. En fait, c'est l'objet céleste le plus froid à avoir été observé par une sonde terrestre. Il est le seul gros satellite du Système solaire à avoir une orbite rétrograde, c'est-à-dire dans le sens contraire de la rotation de la planète. Cela fait croire aux astronomes que Triton serait un objet capturé. Cette hypothèse est confortée par la densité relativement élevée du satellite, si on la compare avec la densité des satellites d'Uranus et de Saturne. D'ailleurs, sur le plan de la composition intérieure, leur taille et leur densité étant comparables, Triton ressemble probablement à Callisto, un des satellites de Jupiter (la densité de Triton est de $2,1\text{ g/cm}^3$ et celle de Callisto de $1,8\text{ g/cm}^3$). De plus, plusieurs similitudes entre Triton et Pluton suggèrent un rapprochement « historique » entre ces deux corps. Certains astronomes croient que Pluton aurait pu elle aussi être une lune de Neptune. D'autres proposent même que Triton a d'abord été une planète capturée par la suite par Neptune.

La surface de Triton comporte d'immenses lacs d'eau et de méthane gelé. On y a recensé une douzaine de geysers qui éjectent du méthane et de l'azote, formant ainsi des panaches qui peuvent s'élever jusqu'à 8 kilomètres de hauteur. Ces éjections sont probablement à l'origine de l'atmosphère, quoique très ténue, du satellite. Triton possède une calotte polaire sur le pôle Sud, qui est constituée de glace d'azote.



En raison du mouvement orbital du satellite en sens rétrograde et des effets de marée entre lui et Neptune, Triton se rapproche graduellement de la planète. On estime que, d'ici à 100 millions d'années, Triton ne sera plus qu'à 1 000 ou 2 000 kilomètres de Neptune, franchissant la limite de Roche, ce qui provoquera son éclatement en plusieurs morceaux qui formeront un nouvel anneau, regarniront les anneaux déjà existants ou iront s'écraser sur la planète.

5.8 Pluton

Pluton, la planète gelée, est la plus petite (plus petite que la Lune et que Mercure) et la plus éloignée des planètes du Système solaire. Son orbite très elliptique peut l'amener à plus de 49 UA (7 milliards de kilomètres) du Soleil. L'excentricité de Pluton (0,25) est la plus élevée de toutes les planètes du Système solaire et fait passer sa distance au Soleil de 29,6 UA à 49,3 UA sur une période de 248 ans (durée de l'année pluto-nienne). L'orbite de Neptune étant à 30,1 UA du Soleil, cela explique pourquoi, exceptionnellement, de 1979 à 1999, Pluton était plus près du Soleil que Neptune, perdant ainsi momentanément le titre de planète la plus éloignée. Il faudra attendre plus de 200 ans pour que cette inversion des positions se produise de nouveau.

Se pourrait-il qu'un jour Uranus et Pluton se croisent et qu'il en résulte une collision entre les deux planètes ? Pas du tout, car, même si on peut croire le contraire en regardant par le dessus les orbites des deux planètes (revoir la figure 5.40), leurs trajectoires ne se croisent jamais (figure 5.45). La distance la plus courte qu'il puisse y avoir entre les deux planètes ne dépasse pas 2,5 fois la distance Terre-Soleil. Cela est possible grâce, d'une part, à la forte excentricité de l'orbite de Pluton et, d'autre part, à l'inclinaison exceptionnelle de son orbite, de $17,2^\circ$ (revoir également la figure 4.2).

Malheureusement, Pluton étant beaucoup trop loin de Voyager 2 après son passage près de Neptune, la sonde a poursuivi son chemin sans pouvoir visiter la petite dernière, ce qui fait d'elle la seule planète du Système solaire à ne pas avoir été approchée par une sonde. Nous en savons donc beaucoup moins sur elle que sur les autres planètes et nous devons nous contenter

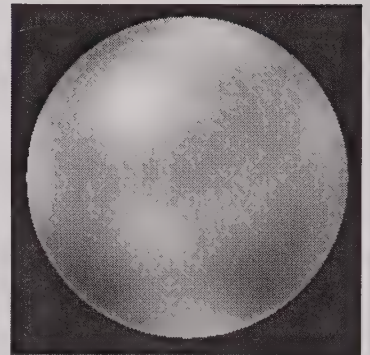




TABLEAU 5.18

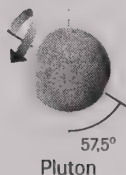
Par rapport
à la Terre**Fiche d'identité
de Pluton**

Charon



57,5°

Terre



57,5°

Pluton

Diamètre

2 300 km

18 %

Volume $7,15 \times 10^{18} \text{ m}^3$

0,7 %

Masse $1,2 \times 10^{22} \text{ kg}$

0,2 %

Densité2 g/cm³

36 %

**Accélération
gravitationnelle**0,58 m/s²

6 %

**Distance moyenne
au Soleil**

5 879 000 000 km (39,3 UA)

Excentricité

0,25

**Période de révolution
(année sidérale)**

248 ans

**Inclinaison de l'orbite par
rapport à l'orbite terrestre**

17,2°

**Période de rotation
(jour sidéral)**

-6,39 jours (rétrograde)

**Inclinaison de l'axe
de rotation**

58°

Albédo

11 %

Atmosphère

Très raréfiée

Température

-240 °C (surface)

Nombre de satellites

1

Orbite de Pluton

Orbite de Neptune
Orbite d'Uranus

FIGURE 5.45

L'orbite de Neptune et de Pluton ne se croisent pas en raison de la forte inclinaison de l'orbite de celle-ci.



des observations faites de la Terre ou à l'aide du télescope Hubble. Toutefois, même à travers l'oculaire des plus grands télescopes, Pluton apparaît comme une petite sphère sur laquelle on distingue difficilement des zones sombres et des zones claires. Dans le but d'en savoir plus, la NASA prévoit lancer en 2006 la mission New Horizons qui atteindrait Pluton vers 2015 et s'en approcherait à 15 000 kilomètres à peine, ce qui permettrait de cartographier sa surface à haute résolution. La sonde en profiterait également pour étudier le seul satellite de Pluton, Charon. Selon le projet à l'étude, la mission doit aussi étudier des objets de la ceinture de Kuiper, avant 2026. Au moment d'aller sous presse, la mission New Horizons devait encore être approuvée définitivement.

Au début du XX^e siècle, en étudiant de petites perturbations dans les orbites d'Uranus et de Neptune, l'astronome américain Percival Lowell (1855–1916) prédit l'existence d'une planète au-delà de Neptune. Il étudia en vain plusieurs clichés qu'il prit lui-même de la région de l'écliptique en quête de cette nouvelle planète. À la fin des années 20, un jeune astronome, Clyde Tombaugh (1906–1997), reprit le flambeau et tenta à son tour de trouver la neuvième planète, à l'aide de ses propres clichés. Sa quête aboutit en 1930 lorsqu'il découvrit cette planète, qu'on appela Pluton, du nom du dieu grec des Enfers. Plus tard, Tombaugh se rendit compte que Pluton figurait également sur l'une des plaques de Lowell. Aujourd'hui, nous savons que les calculs de ce dernier étaient erronés et que la découverte de Pluton relève plutôt d'un heureux hasard.

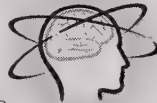
En réalité, Pluton est beaucoup trop petite pour perturber l'orbite d'Uranus et de Neptune. De plus, depuis que Voyager 2 nous a fourni une nouvelle valeur de la masse de Neptune, il est évident qu'il n'y a pas d'anomalie importante sur les orbites

MATIÈRE À RÉFLEXION

Pour ou contre l'exploration spatiale ?

L'envoi de sondes (habitées ou non) dans l'espace coûte très cher : pour une mission vers une planète, les coûts vont de quelques millions de dollars à plus d'un milliard, selon la nature du travail à réaliser. Les arguments en faveur ou contre le maintien de l'exploration spatiale sont nombreux.

On peut souhaiter qu'elle continue parce que l'on croit qu'elle permet des progrès technologiques qui peuvent par la suite contribuer à améliorer la qualité de vie des citoyens. Ou parce que l'on croit qu'elle permet aux êtres humains de mieux comprendre et connaître le monde qui les entoure. Ou simplement parce que l'exploration spatiale semble excitante.



On peut souhaiter qu'elle cesse ou qu'elle soit grandement diminuée parce que l'on croit que l'argent aurait pu être dépensé en faveur de causes sociales ou environnementales. Ou que l'on croit que l'exploration spatiale n'apporte pas suffisamment de découvertes importantes pour l'humain. On peut aussi penser aux dangers que représentent les missions habitées pour la vie des personnes à bord des sondes.

Qu'en pensez-vous ? Si vous étiez à la tête d'un pays très actif dans l'exploration spatiale, quelle importance accorderiez-vous à ce domaine ? Discutez de ce sujet en classe, en petits groupes ou dans une courte recherche.

des deux planètes bleues qui seraient attribuables à la neuvième ou à une éventuelle planète X. Il semble donc aujourd'hui peu utile de chercher au-delà de Pluton une dixième planète qui aurait une masse assez importante.

Certains aimeraient classer Pluton dans la catégorie des astéroïdes ou des objets de Kuiper, plutôt que comme une véritable planète. De l'avis de plusieurs, en effet, Pluton ne serait que le plus gros représentant des objets de la ceinture de Kuiper, tout comme Varuna, par exemple, en serait un autre. Cependant, pour des raisons historiques, Pluton a d'abord été cataloguée comme une planète et, vraisemblablement, le restera.

Nous avons énoncé l'hypothèse (v. p. 204) selon laquelle Pluton aurait également été un satellite de Neptune, avant qu'un cataclysme vienne perturber le système neptunien. Bien que les astronomes ne soient pas en mesure de décrire l'origine de ce cataclysme, ni d'expliquer la provenance de Pluton, celle-ci est tout de même liée à Neptune d'une certaine façon : Pluton est en résonance avec Neptune dans un rapport de 3 pour 2, ce qui veut dire que la période de révolution de Pluton est égale à 1,5 fois celle de Neptune.

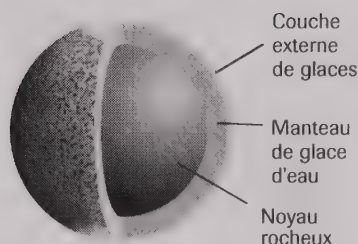


FIGURE 5.46

Il est difficile d'estimer ce qui se trouve à l'intérieur de Pluton, la planète étant très éloignée et encore fort méconnue. On peut cependant supposer qu'elle est constituée d'un important noyau rocheux, recouvert d'un manteau de glace d'eau et d'une couche externe de glaces d'eau et de méthane.

Nos connaissances sur la composition interne de Pluton sont assez minces et s'apparentent plutôt à des estimations. En raison de sa taille et de sa densité, Pluton est probablement constituée à 70 % de roches et à 30 % de glaces (figure 5.46), un peu comme Triton. Les meilleures images de Pluton indiquent la présence de calottes polaires assez réfléchissantes. Selon des observations effectuées dans les années 90 par Hubble, le constituant dominant de la surface serait l'azote. On y trouverait également du méthane, de l'eau et du monoxyde de carbone, tous gelés bien sûr.

Pluton possède une atmosphère très fine d'azote et de méthane qui est probablement temporaire. Elle se développerait par dégazage lorsque l'orbite de Pluton rapproche celle-ci du Soleil et disparaîtrait par la suite.

Le satellite de Pluton

Il s'écoula environ un demi-siècle entre la découverte de Pluton et celle de son seul satellite, Charon. Ainsi, c'est en 1978 que l'astronome américain James Christy fit la découverte de Charon grâce à l'étude de clichés où Pluton semblait étrangement étendue. C'était un indice de la présence de ce petit satellite de 1 200 kilomètres de diamètre, soit la moitié de Pluton. Si l'on compare la taille de Pluton et de Charon avec celle des autres planètes et leurs satellites, on peut dire que Charon est pres-



que aussi gros que Pluton. C'est ce qui permet aux astronomes de dire qu'on a affaire à un système planétaire double plutôt qu'à une planète avec son satellite.

À titre de comparaison, le rapport de la masse de Charon sur celle de Pluton est de 1/6. Le rapport de la masse de la Lune sur celle de la Terre est quant à lui de 1/81. On peut également souligner la distance plutôt faible entre les deux objets : mesurée du centre d'un objet à l'autre, elle est de 20 000 kilomètres, ce qui donne une distance de 18 000 kilomètres de la surface d'un objet à l'autre. C'est probablement la similitude des masses et la position des objets qui ont contribué à ce que Charon et Pluton soient en parfaite rotation synchrone (la période de révolution de Charon est égale à la période de rotation de Pluton) (figure 5.47). Cela signifie que les deux astres présentent toujours la même face à l'autre, comme un couple de danseurs tournant ensemble face à face. Ils constituent la seule paire d'objets du Système solaire à avoir évolué vers ce synchronisme parfait.

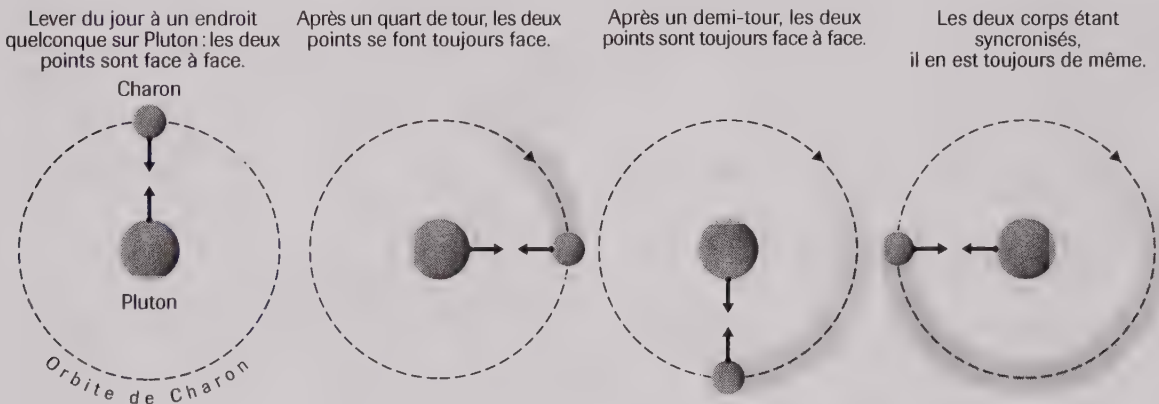


FIGURE 5.47

En raison des forces de marée entre les deux objets, Pluton et Charon sont maintenant parfaitement synchronisés dans leur mouvement. Vu de Pluton, Charon se trouve toujours au même endroit dans le ciel.

Questions de révision

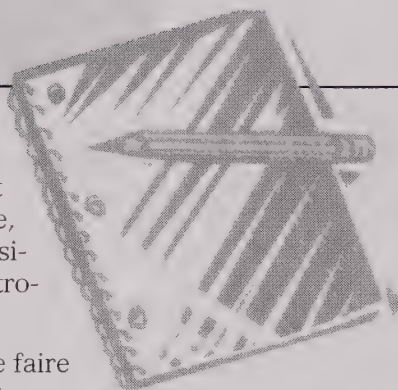
1. Quelle est la plus grosse planète du Système solaire?
2. Quelle est la planète la plus proche du Soleil?
3. À quelle planète associez-vous chacun des satellites suivants:
 - a) Phobos
 - b) Néréide



- c) Triton
 - d) Charon
 - e) Ganymède
 - f) Titania
 - g) Titan
 - h) Deimos
 - i) Europe
 - j) Io
4. Nommez une planète qui n'a pas de satellite.
5. Sur quelle planète vous sentiriez-vous le plus lourd?
6. Quelle planète du Système solaire pourrait flotter à la surface de l'eau si l'on trouvait un océan suffisamment grand? Pourquoi?
7. Quelles sont les deux planètes voisines de la Terre?
8. Sur quelle planète trouve-t-on le plus grand volcan?
9. Sur quelle planète aperçoit-on la Grande Tache sombre (GTS)?
10. Pourquoi Jupiter n'engendre-t-elle pas de réactions nucléaires?
11. Quelle planète a des saisons semblables à celles de la Terre? Pourquoi?
12. Quelle planète est une fournaise chauffée à 480 °C, jour et nuit, sous une épaisse couche nuageuse? Expliquez.
13. Quel serait votre poids sur Mars et sur la Lune par rapport à votre poids sur Terre?
14. Quelle est la longueur du jour sur Mars, Jupiter et Neptune?
15. Quelle caractéristique physique de Mercure nous indique que sa surface doit avoir une composition semblable à celle de la Lune?
16. Quelle planète a les dimensions les plus semblables à celles de la Terre?
17. Quel est le nom des sondes spatiales qui ont réussi à atterrir sur Vénus?
18. Quel est le nom du plus grand volcan de Mars?
19. Quel est le nom du plus grand volcan de Vénus?
20. À quoi ressemble *Valles Marineris* en plus petit sur la Terre?
21. Sur quel satellite de Jupiter y a-t-il des volcans actifs?
22. Quels sont les deux principaux éléments chimiques constituant Jupiter et Saturne?
23. Quelle est l'origine de l'importante activité volcanique sur Io?
24. Placez en ordre croissant de distance à Jupiter ses quatre plus gros satellites.
25. Sur quel satellite de Saturne y a-t-il une épaisse couche de nuages?
26. Quelle planète et son satellite considérons-nous comme formant plutôt une planète double? Pourquoi?
27. Nommez les quatre planètes du Système solaire qui possèdent des anneaux.
28. De quoi sont composés les anneaux de Saturne?
29. À quel objet du Système solaire associez-vous chacun des éléments suivants?
- a) Sonde Pathfinder
 - b) Sonde Magellan
 - c) Lacs de méthane gelé
 - d) Bassin Caloris
 - e) Vallée Marineris
 - f) Mont Olympe
 - g) Mont Maxwell
 - h) Phobos et Deimos
 - i) Grande Tache rouge
30. Quel est l'avenir probable de Phobos?
31. Qu'est-ce qui laisse croire qu'il pourrait y avoir des volcans actifs sur Vénus?
32. Quelle est la principale source d'énergie des planètes joviennes?
33. Qu'est-ce qui caractérise les mouvements orbitaux du couple Pluton-Charon? Comment appelle-t-on ce phénomène dont ils sont un des exemples dans le Système solaire?



Le mouvement rétrograde de Mars



L'observation du mouvement des planètes dans le ciel terrestre est riche d'enseignements. Cependant, il faut faire preuve d'une grande patience et de beaucoup d'assiduité pour arriver à prendre, pendant plusieurs semaines, des mesures de la position d'une planète pour vérifier son mouvement rétrograde.

Dans la présente activité, nous vous proposons de faire cet exercice sans avoir à mettre le nez dehors ! Pour ce faire, nous vous présentons un tableau qui donne les valeurs de l'ascension droite (α) et de la déclinaison (δ) de la planète Mars, pour l'année 2003. Ces valeurs, données pour des astres tels les planètes, la Lune ou le Soleil, s'appellent **éphémérides**.

Éphémérides de la planète Mars pour l'année 2003

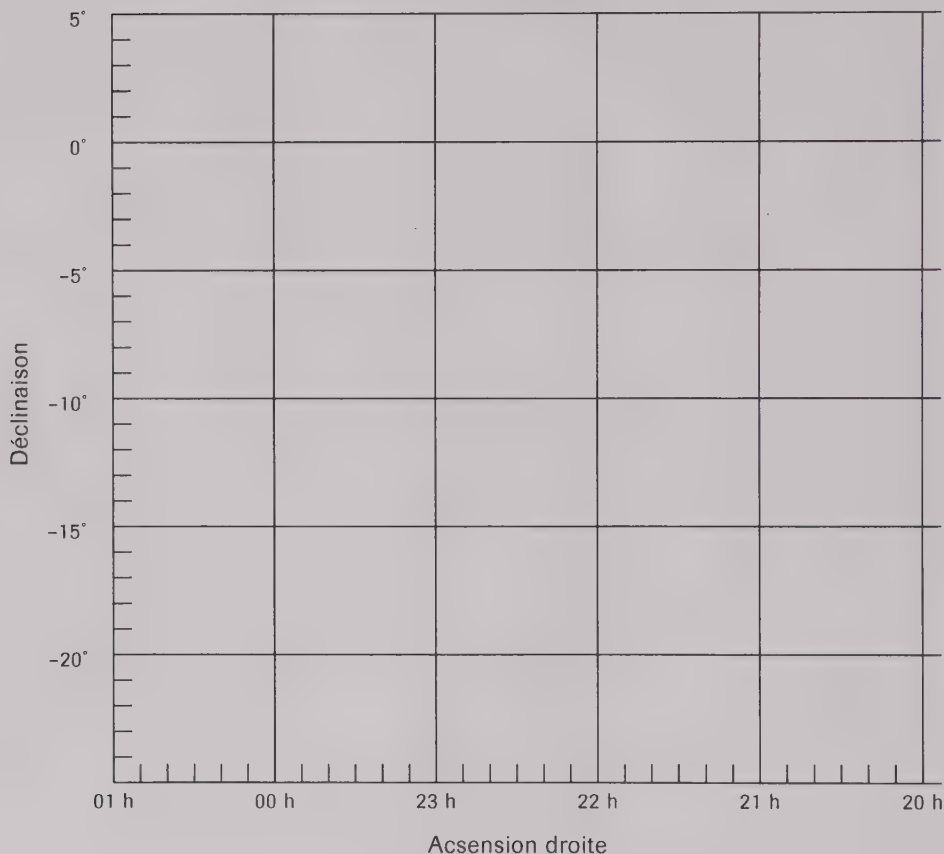
Mois	jour	α	δ
Mai	1	20 h 33 m	-20° 22'
	10	20 h 54 m	-19° 19'
	20	21 h 17 m	-18° 05'
Juin	1	21 h 43 m	-16° 35'
	10	22 h 1 m	-15° 31'
	20	22 h 18 m	-14° 29'
Juillet	1	22 h 35 m	-13° 36'
	10	22 h 45 m	-13° 10'
	20	22 h 53 m	-13° 02'
Août	1	22 h 56 m	-13° 27'
	10	22 h 53 m	-14° 07'
	20	22 h 46 m	-15° 02'
Septembre	1	22 h 34 m	-16° 03'
	10	22 h 25 m	-16° 26'
	20	22 h 18 m	-16° 22'
Octobre	1	22 h 16 m	-15° 40'
	10	22 h 19 m	-14° 39'
	20	22 h 26 m	-13° 10'
Novembre	1	22 h 40 m	-11° 00'
	10	22 h 53 m	-09° 08'
	20	23 h 9 m	-06° 53'
Décembre	1	23 h 29 m	-04° 15'
	10	23 h 47 m	-02° 00'
	20	00 h 8 m	00° 34'
	30	00 h 29 m	03° 10'



Tracer le mouvement rétrograde sur un graphique

1. Sur un graphique de la déclinaison en fonction de l'ascension droite, placez les points donnés par les valeurs du tableau. Après les avoir tous tracés, reliez-les selon leur ordre chronologique.

Graphique de la déclinaison en fonction de l'ascension droite



2. Quelle partie du tracé peut-on considérer comme un mouvement rétrograde ? Expliquez dans vos propres mots pourquoi ce mouvement s'appelle **rétrograde**.
3. Estimez les dates qui marquent le début et la fin du mouvement rétrograde de Mars en 2003. Combien de jours dure-t-il ?

Tracer le mouvement rétrograde sur la voûte céleste

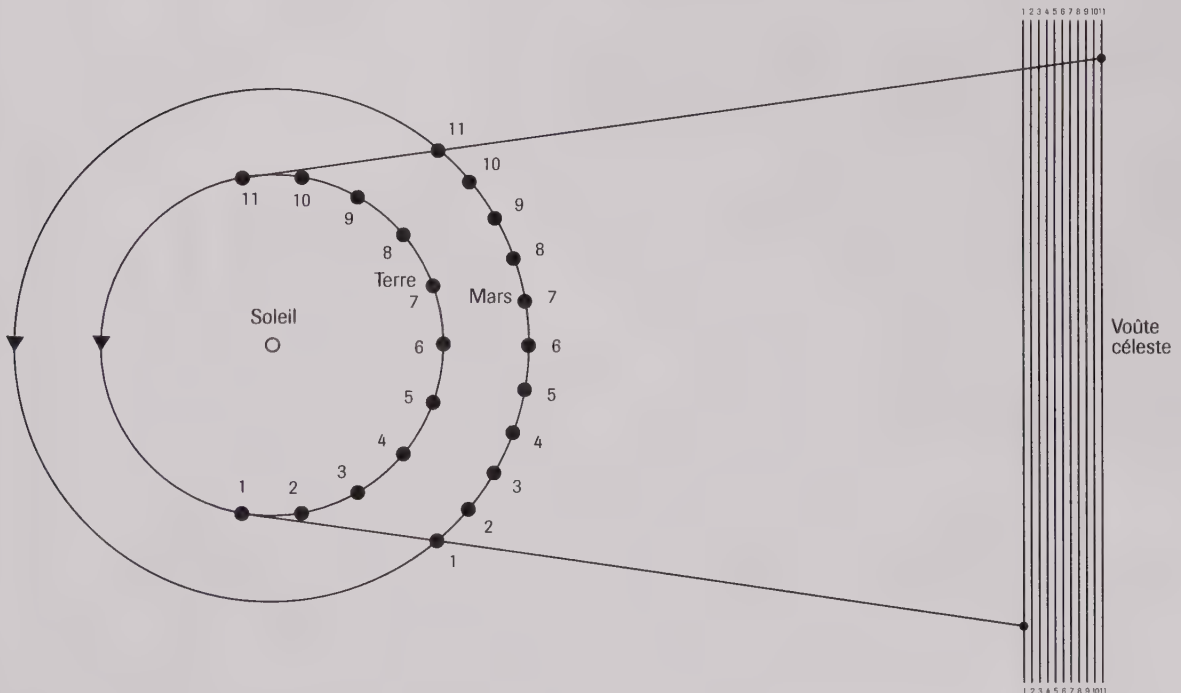
Le schéma suivant présente les orbites de la Terre et de Mars. Les points sur chaque orbite marquent les positions respec-



tives des deux planètes tous les 20 jours. La flèche dessinée sur chaque orbite indique le sens du mouvement des planètes sur leurs orbites. Rappelons que Mars et la Terre se déplacent autour du Soleil dans le sens anti-horaire.

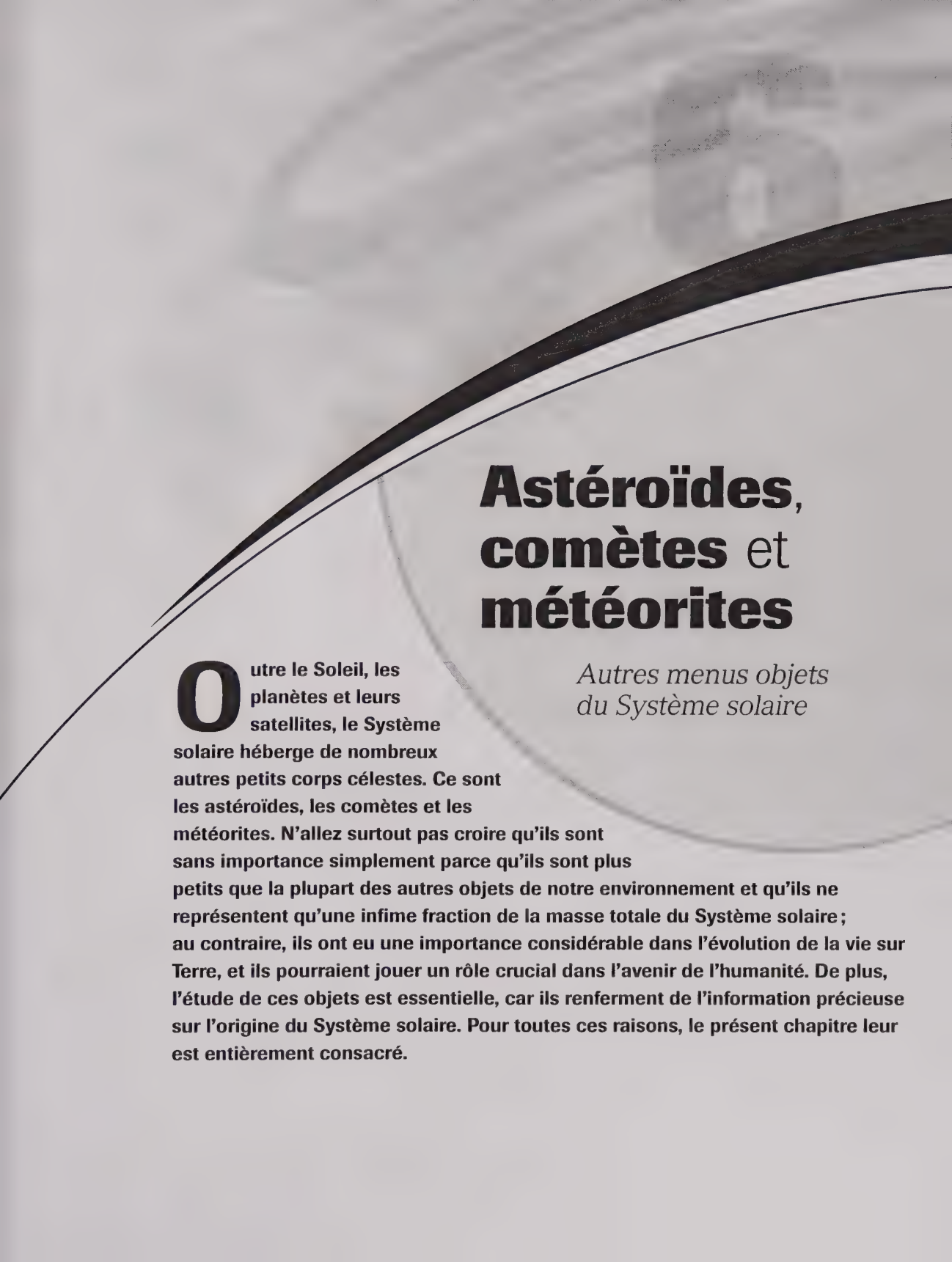
1. Sur le schéma, à l'aide d'une règle, reliez par une ligne droite les points correspondants, c'est-à-dire ceux qui portent le même nombre. Prolongez chaque ligne jusqu'à la ligne verticale de la voûte céleste dont le numéro correspond à la ligne tracée. Inscrivez le nombre qui correspond à la ligne tracée près de son intersection avec sa ligne correspondante.
2. Expliquez comment Ptolémée, qui avait observé le mouvement rétrograde de Mars, expliquait ce mouvement avec son système géocentrique. Illustrez à l'aide d'un diagramme.

Schéma du mouvement rétrograde de Mars



Durée du mouvement rétrograde : _____ jours

Note : Au début et à la fin de son mouvement rétrograde, Mars s'arrête durant 10 à 12 jours.



Astéroïdes, comètes et météorites

*Autres menus objets
du Système solaire*

Outre le Soleil, les planètes et leurs satellites, le Système solaire héberge de nombreux autres petits corps célestes. Ce sont les astéroïdes, les comètes et les météorites. N'allez surtout pas croire qu'ils sont sans importance simplement parce qu'ils sont plus petits que la plupart des autres objets de notre environnement et qu'ils ne représentent qu'une infime fraction de la masse totale du Système solaire ; au contraire, ils ont eu une importance considérable dans l'évolution de la vie sur Terre, et ils pourraient jouer un rôle crucial dans l'avenir de l'humanité. De plus, l'étude de ces objets est essentielle, car ils renferment de l'information précieuse sur l'origine du Système solaire. Pour toutes ces raisons, le présent chapitre leur est entièrement consacré.

**DANS LES PAGES
QUI SUIVENT,
VOUS APPRENDREZ À :**

- Reconnaître les principales caractéristiques des astéroïdes.
- Nommer et décrire les divers types de géocroiseurs.
- Décrire les principales parties d'une comète.
- Connaître l'origine des comètes.
- Nommer et décrire les divers types de météorites.
- Décrire et expliquer l'origine des pluies d'étoiles filantes.



6.1 Astéroïdes

En 1772, l'astronome allemand Johann Elert Bode (1747–1826) attira l'attention de la communauté scientifique en publiant une curieuse formule numérique posée six ans plus tôt par un autre astronome allemand, Johann Daniel Titius (1729–1796). Cette formule établit une relation entre les distances des planètes, exprimées en unités astronomiques, et leur rang dans l'éloignement par rapport au Soleil. Maintenant connue sous le nom de **loi de Titius-Bode**, et dorénavant présentée comme une curiosité mathématique, cette relation a néanmoins mené à la découverte de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter.

Pour établir la loi de Titius-Bode, il faut d'abord poser les nombres 0, 3, 6, 12, 24, 48 et 96 dont chacun (sauf le 0 initial et le deuxième) est le double du précédent. On ajoute ensuite 4 à chaque nombre, ce qui donne 4, 7, 10, 16, 28, 52 et 100. Les valeurs données par la loi de Titius-Bode sont obtenues en divisant par 10 chacune des valeurs précédentes¹ (voir le tableau 6.1). Leur correspondance presque exacte avec les valeurs des distances des planètes au Soleil, exprimées en unités astronomiques (UA), a étonné les astronomes de l'époque. Un peu plus tard, à la

TABLEAU 6.1

Comparaison des distances réelles des planètes au Soleil (en UA) avec les valeurs de la loi de Titius-Bode

Planète	Valeur donnée par la loi de Titius-Bode	Distance au Soleil (en UA)
Mercure	0,4	0,39
Vénus	0,7	0,72
Terre	1,0	1
Mars	1,6	1,52
??? (Ceinture d'astéroïdes)	2,8	De 2 à 4
Jupiter	5,2	5,20
Saturne	10,0	9,54
Uranus	19,6	19,2
Neptune	38,8	30,1
Pluton	77,2	39,3

1. Mathématiquement, la formule pourrait s'exprimer comme suit : $d = 0,4 + (0,3 \times N)$ où $N = 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, \dots$, soit $N = 0$ pour Mercure, 1 pour Vénus, 2 pour la Terre, 4 pour Mars, etc.



découverte d'Uranus, l'étonnement fut de nouveau au rendez-vous quand on remarqua que la distance d'Uranus au Soleil (19,2 UA) était très rapprochée de la valeur prévue par la loi de Titius-Bode, soit 19,6 UA ($(192 + 4)/10$). À partir de ce moment, les astronomes considérèrent plus sérieusement les valeurs données par la loi et Bode émit l'hypothèse qu'une planète se trouvait entre Mars et Jupiter, à la distance de 2,8 UA, valeur à laquelle aucun objet céleste n'était encore associé.

On trouva bel et bien quelques années plus tard quelque chose dans les environs de 2,8 UA du Soleil. Toutefois, plutôt que de trouver une seule grosse planète, on a trouvé des milliers de petites planètes auxquelles on a donné le nom d'**astéroïdes**. Les astéroïdes qui se situent dans l'environnement de cette orbite, entre 2 à 4 UA du Soleil, forment un groupe qu'on appelle **ceinture d'astéroïdes** ou **ceinture principale**.

L'astronome italien Giuseppe Piazzi (1746–1826) découvrit en 1801 le premier astéroïde de la ceinture principale, Cérès, à 2,77 UA, en plein dans le vide entre Mars et Jupiter. Malgré la très petite taille de Cérès (933 kilomètres de diamètre), Piazzi croyait bien avoir trouvé la planète manquante. Or, l'année suivante, un autre objet fut découvert, puis un autre en 1804 et un quatrième en 1807, tous près de l'orbite de Cérès.

Depuis, la liste des « petites planètes » découvertes n'a cessé de s'allonger. Plusieurs dizaines de milliers d'astéroïdes ont été catalogués à ce jour. Jusqu'à maintenant, on a répertorié 26 astéroïdes qui ont plus de 200 kilomètres de diamètre. On croit d'ailleurs connaître 99 % des astéroïdes de plus de 100 kilomètres de diamètre et environ 50 % dont le diamètre se situe entre 10 et 100 kilomètres. Le nombre d'astéroïdes dont le diamètre est de l'ordre de 1 kilomètre est estimé à 1 million. Quelques milliers de nouveaux astéroïdes sont découverts chaque année.

Tous les astéroïdes ne se trouvent pas dans la ceinture principale. En effet, les astronomes en ont observé près de l'orbite terrestre et de l'orbite de Mercure, et même au-delà des orbites d'Uranus et de Neptune, dans la ceinture de Kuiper. Le tableau 6.2 présente par ordre de taille les plus importants astéroïdes de la ceinture principale et leurs caractéristiques physiques et orbitales. La figure 6.1 quant à elle illustre les dimensions comparées de quatre astéroïdes par rapport à la Lune et au Canada.

La concordance remarquable entre les valeurs obtenues par la loi de Titius-Bode et les distances réelles des objets au Soleil s'arrête à Uranus. En effet, les valeurs pour Neptune et Pluton sont trop éloignées pour rendre la loi de Titius-Bode valable à

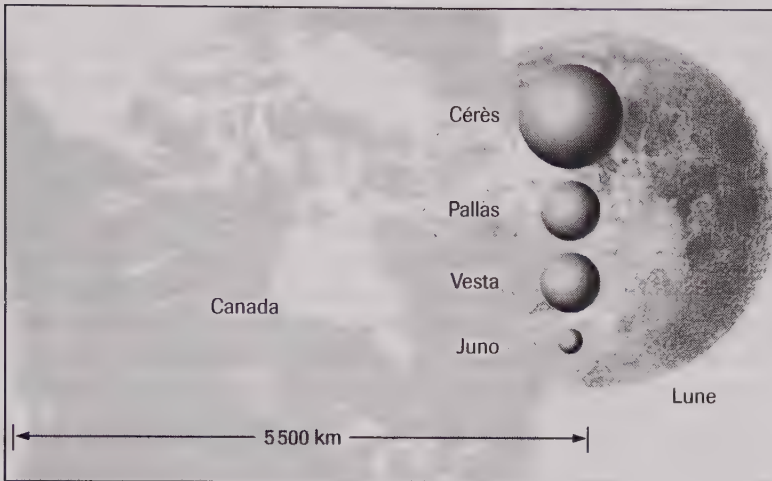


FIGURE 6.1

Les quatre plus gros astéroïdes de la ceinture principale sont en réalité bien petits par rapport à la Lune, dont la taille est ici comparée à celle du Canada. De ces quatre astéroïdes, seul Cérès a réellement une forme nettement sphérique.

TABLEAU 6.2

Principaux astéroïdes de la ceinture principale

Nom	Diamètre (en km)	Distance au Soleil (en UA)	Période orbitale (en années)	Période de rotation (en heures)	Albédo (en %)	Inclinaison de l'orbite (en degrés)	Excentricité	Type
Cérès	933	2,77	4,60	9,1	10	10,6	0,08	C
Pallas	608	2,77	4,62	7,8	14	34,8	0,23	C
Vesta	538	2,36	3,63	5,3	38	7,1	0,09	S
Hygiea	450	3,14	5,55	18,0	8	3,8	0,12	C
Euphrosyne	370	3,15	5,58	5,5	7	26,3	0,23	C
Interamnia	350	3,06	5,36	8,7	6	17,3	0,15	U
Davida	323	3,17	5,64	5,1	5	15,9	0,18	C
Cybèle	309	3,44	6,37	6,1	6	3,5	0,10	C
Europa	289	3,10	5,46	5,6	6	7,5	0,10	C
Patientia	276	3,06	5,36	9,7	6	15,2	0,08	C
Eunomia	272	2,64	4,30	6,1	19	11,7	0,19	S
Psyché	250	2,92	4,99	4,2	10	3,1	0,14	M
Juno	247	2,67	4,36	7,2	22	13	0,26	S

l'échelle du Système solaire. C'est pourquoi cette loi est aujourd'hui surtout présentée pour son intérêt historique.

Notons que les satellites principaux de Jupiter, de Saturne et d'Uranus obéissent également à la loi de Titius-Bode, par rapport à leur planète respective.

Mais comment expliquer que l'espace entre Mars et Jupiter soit occupé non pas par une planète, mais plutôt par des milliers de petits objets? Les astronomes ont déjà émis l'hypothèse



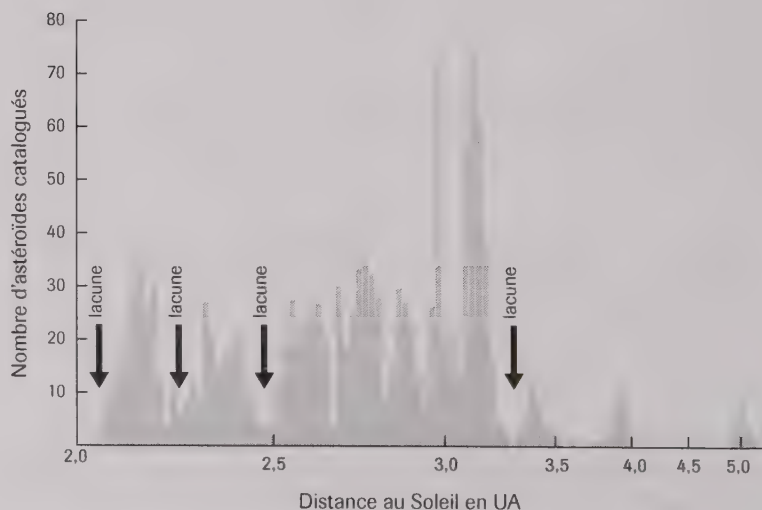
que la ceinture d'astéroïdes était constituée des débris d'une planète qui aurait explosé à la suite d'une violente collision. Cependant, il est beaucoup plus plausible que l'absence d'une planète à cet endroit soit attribuable aux forts effets gravitationnels de Jupiter qui auraient mené à l'éjection d'une partie importante de la matière qui était présente dans l'entourage de la géante à l'origine de la formation du Système solaire.

La masse restante, trop faible pour s'agglutiner en une seule grosse planète, est plutôt restée sous la forme des astéroïdes que l'on connaît aujourd'hui. D'ailleurs, on estime que la masse totale de tous les astéroïdes ne dépasserait pas 10 % de la masse de la Lune.

La présence de Jupiter aux abords de la ceinture d'astéroïdes se fait sentir d'une autre façon : elle crée des résonances gravitationnelles à l'intérieur de la ceinture qui repoussent à l'extérieur de certaines zones les astéroïdes qui s'y aventurent. C'est l'astronome américain Daniel Kirkwood (1814–1895) qui, en 1867, remarqua que la distribution des astéroïdes entre Mars et Jupiter n'était pas uniforme (figure 6.2). À sa mémoire, les bandes étroites où circulent peu d'astéroïdes sont appelées **lacunes de Kirkwood**. Les principales régions vides d'astéroïdes sont situées à 2,06 UA, 2,50 UA, 2,82 UA et 3,28 UA du Soleil; elles correspondent respectivement à des résonances de $1/4$, $1/3$, $2/5$ et $1/2$. Cela signifie, par exemple, qu'un astéroïde gravitant à 2,50 UA du Soleil aurait une période orbitale exactement du tiers de celle de Jupiter. Cependant, cette orbite n'est pas stable en raison des interactions gravitationnelles avec la planète géante, ce qui se traduit par un déplacement des astéroïdes des lacunes de Kirkwood vers d'autres orbites.

FIGURE 6.2

Le graphique du nombre d'astéroïdes catalogués en fonction de la distance au Soleil montre bien les zones où la densité d'astéroïdes est plus faible, c'est-à-dire les lacunes de Kirkwood. Il existe d'autres lacunes de Kirkwood que la précision du graphique ne permet pas d'illustrer ici.





On peut classer les astéroïdes de diverses façons : par exemple en fonction de leur composition chimique et de leur albédo, ou en fonction de leur position dans le Système solaire.

Dans la classification des astéroïdes selon leurs caractéristiques chimiques, on distingue trois grandes catégories (ou types) auxquelles s'ajoutent une douzaine d'autres plus rares. L'information sur la composition chimique des astéroïdes est obtenue en étudiant leur spectre. Les spectres qui ne correspondent à aucun type répertorié sont jugés « non classés » ou de type U, de l'anglais *Unclassified*. Le tableau 6.3 présente les trois principaux types d'astéroïdes, leur quantité relative par rapport à l'ensemble des astéroïdes connus, de même que leur composition et leur brillance. Il faut noter que les pourcentages indiqués peuvent ne pas être entièrement représentatifs de la réelle distribution des astéroïdes, surtout en raison du fait que les objets de type C sont plus difficiles à voir.

TABLEAU 6.3

Principaux types d'astéroïdes

Type	Quantité (%)	Composition	Brillance
C	75	Composés carbonés	Très foncé Albédo $\approx$ 5%
S	17	Composés contenant des silicates	Plus brillant que C Albédo de 10% à 22%
M	5	Riches en métaux (fer et nickel)	Brillant Albédo de 10% à 18%

Si l'on effectue la classification des astéroïdes en fonction de leur position par rapport au Soleil, on obtient trois catégories principales : les astéroïdes de la ceinture principale, qui regroupe environ 96 % des corps, les astéroïdes qui orbitent dans les environs de l'orbite terrestre et les astéroïdes troyens qui se trouvent sur la même orbite que Jupiter. On trouve également des astéroïdes au-delà de Jupiter et dans la ceinture de Kuiper.

La ceinture principale s'étend environ de 2 à 4 UA du Soleil. En 1918, le Japonais Kiyotsugu Hirayama (1874–1943) observa certains paramètres communs, physiques et orbitaux, entre des membres de la jungle des astéroïdes de la ceinture principale. Croyant que le hasard à lui seul pouvait difficilement être à l'origine de telles ressemblances, Hirayama créa des groupes (ou familles) d'astéroïdes dont les membres sont fortement apparentés. On compte aujourd'hui 21 « familles de Hirayama » dans la ceinture principale, comportant de quelques

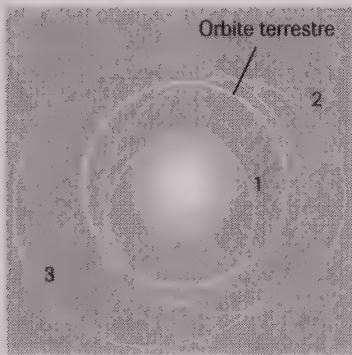


FIGURE 6.3

Les orbites des trois familles d'astéroïdes (Aten, Apollo et Amor) suivent des orbites excentriques qui les amènent au voisinage de la Terre. L'orbite des Aten et représentée par Ra-Shalom (1), celle des Apollo par Geographos (2) et celle des Amor par Éros (3).



FIGURE 6.4

L'astéroïde Éros

dizaines à quelques centaines de membres. Les familles ont été nommées à partir du nom de l'astéroïde principal du groupe : Flora, Maria, Eos, Koronis, Themis, etc. Les membres d'une même famille constituent vraisemblablement les débris résultant d'une collision ayant eu lieu dans le passé entre deux astéroïdes plus gros. Après l'impact, les morceaux continuent d'évoluer sur des trajectoires très semblables, d'où leur appartenance à une famille bien précise.

Les astéroïdes qui orbitent relativement près de l'environnement terrestre sont rassemblés en un groupe particulier ; ils portent le nom de **NEA** (pour Near-Earth Asteroid) ou **géocroiseurs**. Théoriquement, les géocroiseurs pourront un jour croiser l'orbite de la Terre. Pour mériter le titre de géocroiseur ou de NEA, un astéroïde doit évoluer sur une orbite qui l'amène à au plus 1,3 UA du Soleil. D'ailleurs, en 1972, l'un d'eux, tout petit, passa à 58 kilomètres au-dessus des États-Unis. Il pesait 5 000 tonnes, avait un diamètre d'environ 50 mètres et, malgré cette relative petite taille, aurait pu faire des dégâts considérables s'il était tombé sur une ville. (Il aurait pu creuser un cratère de 1,5 km de diamètre).

Les géocroiseurs sont divisés en trois catégories, en fonction de leur trajectoire (figure 6.3) sur leur orbite elliptique et de leur distance au périhélie (point de la trajectoire le plus rapproché du Soleil) ou à l'aphélie (point de la trajectoire le plus éloigné du Soleil) :

- les Aten (demi-grand axe² inférieur à 1 UA et distance à l'aphélie plus grande que 0,983 UA) ;
- les Apollo (demi-grand axe supérieur ou égal à 1 UA et distance au périhélie de moins de 1,017 UA) ;
- les Amor (distance au périhélie entre 1,017 et 1,3 UA).

L'astéroïde Éros (figure 6.4), de la catégorie des Amor, a été, en 1898, le premier géocroiseur à avoir été découvert. Aujourd'hui, environ 1 500 géocroiseurs ont été répertoriés, probablement une fraction du nombre total existant. Les géocroiseurs sont en général plus petits que les astéroïdes de la ceinture principale ; le plus imposant a un diamètre de 40 kilomètres.

De tous les géocroiseurs, seuls quelques-uns présentent un danger potentiel pour la Terre. De nombreux programmes de surveillance sont instaurés afin de scruter le ciel à la recherche des astéroïdes dont la trajectoire les ferait trop s'approcher de la Terre. Ce sont bien entendu les Aten et les Apollo qui retiennent le plus d'attention, malgré que, à la suite de perturbations

2. La notion de demi-grand axe est présentée au chapitre 1, dans la section consacrée à Kepler.

planétaires, les Amor pourraient un jour entrer à l'intérieur de l'orbite terrestre et, par le fait même, devenir plus menaçants. Depuis des millions d'années, un certain nombre d'astéroïdes ont frappé la Terre et il est très probable que cela se produise à nouveau, même si, à court terme, cette probabilité est très faible. On estime à 0,1 % les chances que la Terre soit frappée par un astéroïde de plus de 1 kilomètre de diamètre au cours du présent siècle.

On a découvert, au début du XX^e siècle, quelques astéroïdes qui partageaient leur orbite autour du Soleil avec Jupiter. On en connaît aujourd'hui plusieurs centaines et on estime qu'y gravitent quelque 2 000 astéroïdes de plus de 15 kilomètres de diamètre. Ceux-ci constituent la famille très particulière des **astéroïdes troyens**. La figure 6.5 illustre la répartition des astéroïdes sur l'orbite de Jupiter. Ils sont concentrés en deux zones situées à 60° de part et d'autre de la planète. Ces zones sont appelées des **points de Lagrange**, en hommage au mathématicien Joseph Louis, comte de Lagrange (1736–1813) qui, en 1770, avait calculé mathématiquement les points d'équilibre gravitationnel pour un système composé de trois corps. Ces points d'équilibre correspondent à des zones de stabilité gravitationnelle et sont, pour Jupiter, situés à 60° devant et derrière la planète, sur son orbite.

Les autres astéroïdes du Système solaire sont tous situés très loin en-dehors de la ceinture principale. Parmi les plus célèbres, mentionnons Chiron, découvert en 1977 par l'astronome Charles Kowal. Cet astéroïde « égaré » gravite quelque part entre les orbites de Saturne et d'Uranus, et a un diamètre de 300 kilomètres. Par la suite, de nouvelles découvertes montrèrent que Chiron n'est pas seul dans la région; on y trouve également Hidalgo, d'un diamètre de 50 kilomètres et dont l'orbite ne dépasse pas celle de Saturne, et Pholus, dont l'orbite dépasse celle de Pluton. Varuna, Ixion et Quaoar, dont nous avons parlé au début du chapitre 4, en sont d'autres. On désigne ces astéroïdes sous plusieurs noms: centaures, objets trans-neptuniens, plutinos, etc. Les astronomes trouveront probablement de nombreux autres objets dans les environs de 30 UA à 100 UA, correspondant à la ceinture de Kuiper qu'on croit comprendre plusieurs millions de petits corps de quelques kilomètres de diamètre, astéroïdes ou comètes. Il reste encore beaucoup de travail d'observation et de détection à faire dans les régions éloignées du Système solaire. Les petits objets qui s'y trouvent sont très difficiles à détecter en raison de leur petite taille et de leur faible albédo.

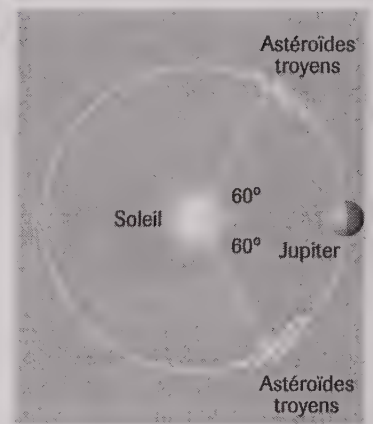


FIGURE 6.5

Les astéroïdes troyens gravitent sur la même orbite que Jupiter autour du Soleil. Ils se trouvent à 60° devant et derrière la position de la planète sur l'orbite.

MATIÈRE À RÉFLEXION

Les journaux et les magazines scientifiques annoncent de plus en plus fréquemment l'éventuel «frôlement» de la Terre par un astéroïde géocroiseur. On nous donne sa taille, le moment auquel il se rapprochera le plus de nous et la distance estimée à laquelle il se rapprochera. On nous fournit également une estimation des chances que se produise une collision entre l'objet et la Terre. L'expression «frôler la Terre» est souvent employée dans les articles qu'on nous présente, alors que les distances annoncées sont de l'ordre de centaines de milliers de kilomètres. Sensationnalisme ou information ?

Dans la mesure où nous savons que les chances qu'un géocroiseur entre en collision avec la Terre et cause des dommages importants sont très minces, com-



ment réagissez-vous à ce genre d'information ? Croyez-vous qu'on doive annoncer au public tout astéroïde qui passera «près» de la Terre, disons dans un rayon équivalent à la distance Terre-Lune, soit 384 000 kilomètres ? Devrions-nous n'annoncer que les géocroiseurs les plus potentiellement dangereux ? Dans le cas fort peu probable où les chances que la trajectoire d'un objet croise celle de la Terre étaient significativement plus élevées qu'à l'habitude, quelle devrait être la réaction des autorités pour, d'une part, informer et rassurer la population et, d'autre part, établir un plan d'action visant, par exemple, à tenter de dévier l'objet de sa trajectoire ?

Discutez de l'ensemble de ces questions en petits groupes, en classe ou dans un court texte.

Quelques astéroïdes intéressants

Les astéroïdes les mieux connus sont ceux qui ont été survolés de près par des sondes depuis les années 90 ou qui sont passés suffisamment près de la Terre pour qu'on ait pu bien les observer. La combinaison des connaissances ainsi obtenues pourra nous permettre de mieux comprendre l'origine des astéroïdes et leur importance dans l'évolution du Système solaire.

Le 29 octobre 1991, la sonde américaine Galileo, en route vers Jupiter, passait dans le voisinage de l'astéroïde Gaspra (figure 6.6) qui orbite au-delà de Mars. La sonde s'est approchée à environ 1 600 kilomètres, ce qui lui a permis de capter des images exceptionnelles du premier astéroïde jamais visité par une sonde. Gaspra, de forme

très irrégulière, ressemble vaguement à une tête de requin et mesure $19 \times 12 \times 11$ km. Il semble que sa surface soit assez jeune, soit environ 200 millions d'années, car elle est parsemée de petits cratères d'impact.

En décembre 1992, profitant de son passage à proximité de la Terre, soit 3,6 millions de kilomètres à peine (c'est très peu à l'échelle interplanétaire !), les astronomes ont observé l'astéroïde Toutatis à l'aide de deux grands radiotélescopes : celui d'Arecibo (300 m), à Porto Rico, et celui de Goldstone (74 m), en Californie. D'après les données recueillies, cet astéroïde est formé de deux parties ; il serait en quelque sorte un astre double dont le diamètre de chaque partie est de 4,0 km et de 2,6 km respectivement.

En 1993, Galileo, poursuivant sa route, photographia Ida (figure 6.7), astéroïde trois fois plus gros que Gaspra et dont la forme laisserait croire qu'il est, à l'instar de Toutatis, composé de deux morceaux accolés. Ida mesure 52 kilomètres sur 30 et

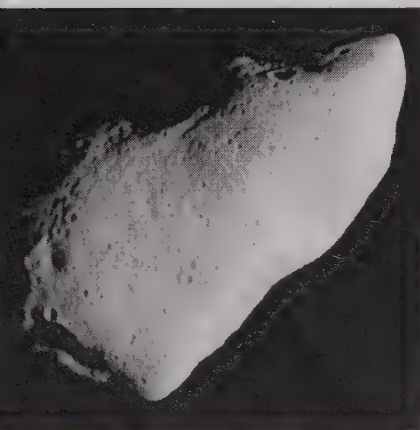


FIGURE 6.6

L'astéroïde Gaspra



possède une petite lune, Dactyl, de 1 kilomètre et demi de diamètre et gravitant à une centaine de kilomètres de l'astéroïde.

En 1994, c'est au tour de Kleopatra d'être étudié par l'antenne du radiotélescope d'Arecibo. Les astronomes ont découvert un drôle d'astéroïde ayant la forme d'un os géant de 220 kilomètres de longueur.

À son lancement en 1996, la sonde américaine NEAR (Near-Earth Asteroid Rendezvous) est devenue la première sonde dont la mission est l'étude des astéroïdes. Son premier objectif était l'astéroïde Mathilde (figure 6.8), qu'elle a survolé à 1 200 kilomètres.

C'est toutefois en 2000 et en 2001 que NEAR a réalisé pleinement sa mission. Elle s'est d'abord placée en orbite autour de l'astéroïde Éros (33 km × 13 km). Quelques mois plus tard, le 16 février 2001, la sonde se posa en douceur à la surface. Pendant sa descente, NEAR a transmis, en plus d'une grande quantité d'information, 69 images à haute résolution de la surface de l'astéroïde. Elle a continué d'émettre des signaux télémétriques vers la Terre jusqu'au 28 février 2001.

L'astéroïde 3753 Cruithne, d'abord découvert en 1986, est devenu, en 1997, une curiosité dans l'environnement terrestre : son orbite, qui le fait passer assez près de la Terre, est telle qu'on peut considérer l'astéroïde comme un satellite de notre planète, soit une deuxième lune ! En réalité, Cruithne n'a rien de notre Lune : il ne fait que 5 kilomètres de diamètre et son point le plus proche de la Terre est à 15 millions de kilomètres, soit près de 40 fois la distance Terre-Lune. L'orbite de Cruithne a une forme très bizarre (figure 6.9) et, bien qu'elle soit très stable, elle exécute des mouvements complexes.

Le premier mouvement (figure 6.9a) suit une orbite en forme de haricot que Cruithne parcourt en un an. L'astéroïde s'approche de la Terre lentement, puis repart en sens inverse lorsqu'il passe trop près. Les deux extrémités du mouvement se situent sur l'orbite de la Terre. Ce mouvement en forme de haricot dérive peu à peu chaque année en effectuant une sorte de rotation autour du Soleil, sur une période de 385 ans.

Le second mouvement de Cruithne (figure 6.9b) est le résultat de la superposition de 385 mouvements en forme de haricot. Cela engendre un mouvement en forme de fer à cheval, sur la même orbite que la Terre.

En raison de son orbite très inclinée (figure 6.9c), Cruithne ne peut pas entrer en collision avec la Terre. En effet, lorsqu'il croise la Terre sur l'orbite terrestre, l'astéroïde passe en fait à des millions de kilomètres sous le pôle Sud. Les astronomes

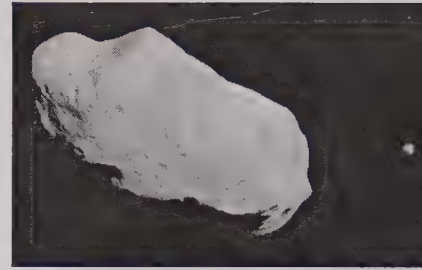


FIGURE 6.7

L'astéroïde Ida et sa lune Dactyl

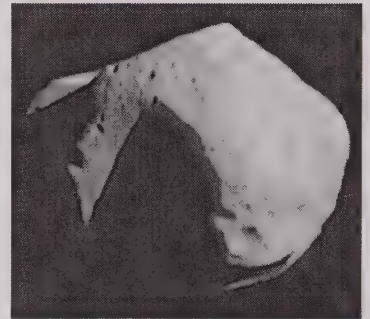


FIGURE 6.8

L'astéroïde Mathilde

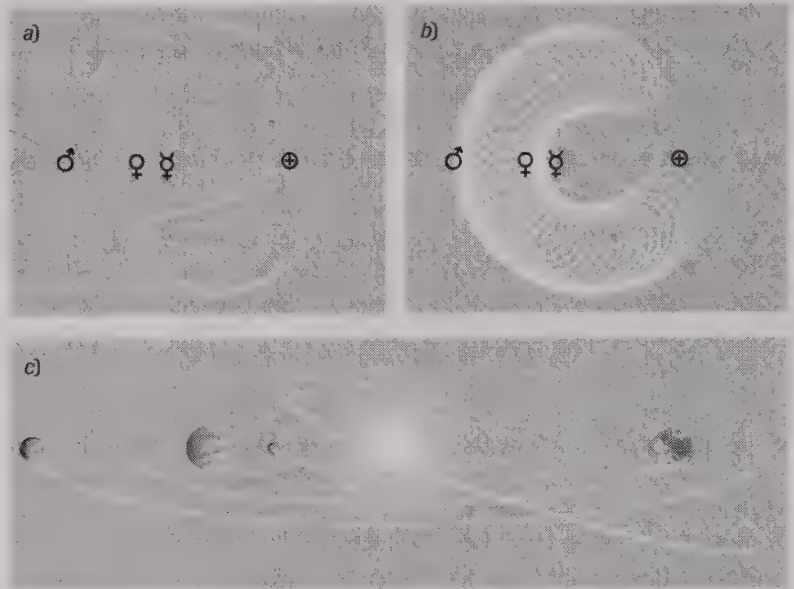


FIGURE 6.9

a) Le mouvement annuel de Cruithne est en forme de haricot. L'astéroïde passe au-dessus ou au-dessous de l'orbite de la Terre aux extrémités de sa trajectoire. b) Le mouvement de Cruithne sur plusieurs années se traduit par un mouvement global en fer à cheval. c) Cruithne et la Terre ne peuvent entrer en collision, car leurs orbites ne se croisent pas. Celle de Cruithne est par ailleurs très inclinée.

évaluent que Cruithne continuera d'être ainsi le deuxième compagnon de la Terre durant encore au moins 5 000 ans. Trois autres astéroïdes de l'environnement terrestre auraient un comportement semblable et sont aujourd'hui à l'étude, et Vénus serait également entourée de tels compagnons.

Parmi les missions futures vers des astéroïdes, mentionnons la mission Muses-C, dont le lancement est prévu pour mai 2003 et qui doit rapporter, en 2007, un échantillon de l'astéroïde 1998SF36, et la mission Dawn, qui doit débuter en 2006 pour survoler Vesta en 2010 et Cérès en 2014.

6.2 Comètes

Les comètes sont parmi les objets les plus spectaculaires du Système solaire. Depuis les temps anciens et jusqu'à tout récemment, elles ont semé effroi et terreur et ont été synonymes de mauvais présages. Le passage de nombre de comètes a été mentionné par les Babyloniens, les Grecs, les Chinois et les Égyptiens qui voyaient chez elles le signe ou la cause de tous les maux, de toutes les catastrophes et de toutes les guerres. Aujourd'hui, les comètes frappent toujours l'imagination populaire, mais sans faire peur, les découvertes scientifiques liées à l'origine et au mouvement de ces astres ayant fait tomber les fausses croyances et les craintes. Une comète visible à l'œil nu ou à la lunette offre un spectacle couru et impressionnant, et constitue une source d'émerveillement. Le passage de la célèbre comète de Halley (figure 6.10) près du Soleil, en 1986, par exemple, avait provoqué une augmentation sensible des ventes de télescopes et un engouement de la part des astronomes amateurs. Toutefois, les comètes sont rarement très brillantes et elles ne sont souvent visibles qu'à l'aide d'un télescope.

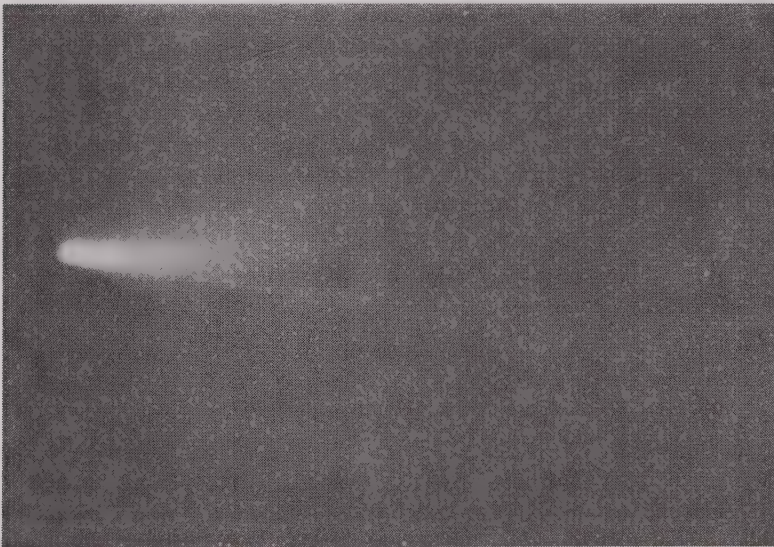


FIGURE 6.10

La comète de Halley

De nos jours, brillantes ou pas, les comètes qui s'aventurent dans l'environnement du Soleil sont l'objet d'un intérêt marqué de la part des agences spatiales du monde entier. Plusieurs ont reçu ou recevront la visite de sondes dont les observations nous permettront de mieux connaître leur composition, leur



mouvement et leur origine. Comme les comètes sont des objets datant des débuts du Système solaire, tout ce que l'on obtiendra comme information nous donnera un peu plus d'indices sur la formation de celui-ci.

Les premiers pas scientifiques vers la compréhension de ce que sont les comètes ont été effectués au XVI^e siècle. Tout d'abord, en 1531, l'Allemand Peter Apian (1495–1552) observa que la queue des comètes était toujours opposée au Soleil ; il y avait donc une relation entre le Soleil et les comètes. Puis, Tycho Brahé, en 1577, montra que les comètes évoluaient à des distances nettement supérieures à celle qui sépare la Lune de la Terre. Cela mit fin à la croyance qui voulait que les comètes étaient des phénomènes atmosphériques. On considéra dès lors celles-ci comme des astres se déplaçant de façon désordonnée dans le Système solaire. Un peu plus d'un siècle plus tard, les Anglais Edmund Halley (1656–1742) et Isaac Newton proposèrent une méthode permettant de déterminer l'orbite des comètes à partir de la loi de la gravitation universelle. Ils indiquèrent que les comètes suivent des trajectoires elliptiques très allongées (dont l'excentricité est de près de 1) qui les font passer relativement près du Soleil à l'une des deux extrémités de l'ellipse.

En 1705, Halley émit l'hypothèse que trois comètes dont le passage avait été observé et décrit en 1531, 1607 et 1682 étaient probablement une seule et même comète dont la trajectoire la ramenait près du Soleil tous les 76 ans environ. Il prédit le retour de la comète (qui porte aujourd'hui son nom) pour la fin 1758-début 1759 et calcula sa trajectoire, incluant les perturbations gravitationnelles que lui ferait subir Jupiter. Ses prédictions furent confirmées et firent le triomphe de la loi de la gravitation de Newton qui pouvait s'appliquer désormais à tous les objets de l'Univers.

Aujourd'hui, les astronomes ont catalogué et calculé approximativement l'orbite de près de 1 000 comètes, même si leur nombre total réel est beaucoup plus élevé. Le tableau 6.4 présente quelques comètes ayant suscité de l'intérêt dans les cinquante dernières années. Malgré les différences dans leurs tailles et leurs orbites, les comètes peuvent toutes être associées à des boules de glace sales. Elles sont principalement composées de poussières, de dioxyde de carbone, d'ammoniac, de cyanogène, de méthane et d'eau. Lorsqu'elles s'approchent du Soleil sur leur longue orbite, elles se réchauffent et les gaz et les poussières, sous l'action de la pression de radiation, sont libérés pour former ce qu'on appelle la **queue** de la comète. C'est ce qui rend les comètes si belles à observer. Plus une comète passe près du Soleil, plus sa queue est longue.

TABLEAU 6.4

Quelques comètes intéressantes des cinquante dernières années

Nom	Remarque	Année de découverte	Période (en ans)
Kohoutek	Dernier passage près du Soleil en 2001	1973	6,67
Hale-Bopp	Observation au printemps 1997.	1995	2 400
Hyakutake	Passage près de la Terre en 1996.	1996	9 000
Halley	Observation pendant l'hiver 1986. Prochain passage près de la Terre et du Soleil en 2061.	Probablement en l'an 240 av. J.-C.	76
West		1973	254 000
White-Ortiz-Bolelli		1970	?
Bennett		1970	?
Ikeya-Seki	Il est possible que ce soit la même comète qui était visible de jour en Europe en 1106.	1965	880
Seki-Lines		1962	?
Wilson-Hubbard		1961	?
Mrkos		1957	?
Arend-Roland		1956	?

Au cours de leur vie, certaines comètes passeront plusieurs fois près du Soleil. Cela leur fait perdre à chaque passage environ 0,1 % de leur masse totale. Au bout de 500 à 1 000 orbites, la comète perd tout son gaz et devient aussi sombre qu'un astéroïde. Une comète peut également subir un sort plus dramatique et se désagréger lorsqu'elle passe trop près d'une grosse planète ou du Soleil. Elle peut même s'écraser sur le Soleil ou une planète, comme cela fut le cas de la comète Shoemaker-Levy 9, qui s'écrasa sur Jupiter en 1994 (voir plus loin).

Lorsqu'elles sont actives et proches du Soleil, les comètes sont constituées de cinq parties distinctes : le noyau, la chevelure (ou coma ou tête nébuleuse), un nuage d'hydrogène et deux queues (la queue de poussières et la queue de gaz ionisé). La figure 6.11 illustre toutes ces parties, sauf le nuage d'hydrogène, trop grand pour être représenté, et le noyau, trop petit.

Le **noyau** de la comète a un diamètre de 1 à 100 kilomètres. Il est principalement composé de glace et de gaz mélangés à de la roche et des poussières. Il est plutôt solide et stable.

La **chevelure** de la comète, également appelée **coma** ou **tête nébuleuse**, constitue en quelque sorte l'atmosphère de la



FIGURE 6.11

À l'approche du Soleil, deux queues se forment à partir de la tête : la queue de gaz ionisé, directement opposée au Soleil, et la queue de poussières, également opposée au Soleil, mais courbée vers l'arrière.



comète qui prend de l'expansion au fur et à mesure qu'elle se rapproche du Soleil. C'est un nuage très dense, composé d'eau, de gaz carbonique et de gaz neutres qui provient de la sublimation (passage de l'état solide à l'état gazeux) du noyau à son approche du Soleil. Le diamètre de la chevelure peut atteindre 100 000 kilomètres, ce qui est comparable au diamètre des plus grosses planètes du Système solaire.

Le **nuage d'hydrogène** est une immense enveloppe d'hydrogène neutre qui entoure la tête nébuleuse. Il peut atteindre des millions de kilomètres de diamètre, mais est extrêmement ténu.

La **queue de poussières** est composée de grains de poussières de la grosseur de particules de fumée qui sont entraînés hors du noyau par les gaz qui s'en échappent. La vitesse à laquelle les particules sont éjectées du noyau est assez basse pour que la queue soit incurvée par le mouvement de la comète. Avec le noyau, c'est la partie de la comète la plus visible à l'œil nu. Elle peut atteindre 10 millions de kilomètres de longueur.

La **queue de gaz ionisé** est composée de gaz d'ions (atomes ayant perdu ou gagné au moins un électron). Emportée à grande vitesse par les particules du vent solaire, la queue de gaz est dirigée complètement à l'opposé du Soleil. Elle n'est que très faiblement incurvée. Sa longueur peut atteindre plusieurs centaines de millions de kilomètres.

Tout au long du passage de la comète dans les environs du Soleil, tant la queue de poussières que la queue de gaz sont toujours dirigées dans la direction opposée au Soleil (figure 6.12). Cela est attribuable à ce qu'on appelle la **pression de radiation** qui est exercée par le Soleil sur les poussières et sur les gaz de la comète. Les queues de comète ont une très faible densité. D'ailleurs, en 1910, la Terre avait passé sans dommages dans la queue de la comète de Halley.

Les orbites des comètes sont la plupart du temps des ellipses très excentriques ou très allongées. Elles forment parfois des hyperboles ou des paraboles (figure 6.13). Dans ces deux cas, la comète ne reviendra dans l'environnement du Soleil que si des perturbations gravitationnelles la ramènent sur une trajectoire elliptique. La trajectoire de certaines comètes les emporte presque à mi-chemin entre les plus proches étoiles et le Soleil.

On peut classer les comètes en deux grandes catégories, selon leur période : les comètes de courte période et les comètes de longue période.

Les comètes de **courte période** ont une période inférieure à 200 ans. La plus courte période connue pour une comète

est celle de la comète Encke, de 3,3 ans. Dans le groupe des comètes de courte période, mentionnons les comètes Neujmin 1 (18,2 ans), Temple-Tuttle (33,2 ans), Herschel-Rigolet (155 ans) et la fameuse comète de Halley (76 ans). Les astronomes pensent que ces comètes proviendraient surtout de la ceinture de Kuiper.

Les comètes de **longue période** ont des périodes allant de 200 ans à 4 millions d'années, et même plus. Toutes ces comètes de longue période semblent venir du nuage de Oort, cette région très lointaine de notre Système solaire qu'on croit être un immense réservoir de comètes entourant notre Système à 50 000 UA, à l'extrême limite de l'influence gravitationnelle du Soleil. Ce nuage contiendrait un million de millions de comètes potentielles. Il serait le vestige de la nébuleuse à partir de laquelle se sont formés le Soleil et les planètes.

L'étude des comètes est donc une façon pour les astronomes d'en apprendre davantage sur l'origine du Système solaire. Toutefois, on ne dispose toujours pas de preuve établissant de façon satisfaisante que le nuage de Oort existe vraiment, surtout parce que les objets qui le composeraient sont trop petits et trop sombres pour pouvoir être détectés à une telle distance. Si ce nuage existait, il pourrait contenir une fraction importante de la masse totale du Système solaire. Pour le moment, la majorité des astronomes se servent du nuage de Oort comme hypothèse de travail.

Quelques comètes intéressantes

Le retour de la comète de Halley en 1986, après 76 ans d'absence, était un moment fort attendu. L'évolution spectaculaire des techniques d'observation spatiale et de l'exploration planétaire a permis aux astronomes de ne pas laisser passer cette chance unique d'étudier de près ce visiteur de l'espace : ils lui ont préparé un « comité d'accueil » de six sondes spatiales (deux sondes soviétiques, deux sondes japonaises, une sonde européenne et une sonde américaine). La sonde européenne Giotto s'est approchée à près de 600 kilomètres du noyau de la comète ; les scientifiques ont pu observer que celui-ci est en forme de cacahuète mesurant $16 \times 8 \times 7$ km. Comme Halley était à ce moment assez proche du Soleil pour atteindre une température de l'ordre de 100°C , Giotto a pu y voir deux gros geysers de gaz (figure 6.14) qui alimentaient la chevelure et la queue. Au dernier passage de Halley, on a également pu déterminer que son noyau est très sombre, avec un albédo d'environ 3 % (plus sombre que le charbon), ce qui en fait l'un des objets célestes les plus foncés que l'on connaisse. La prochaine visite de la comète de Halley est prévue pour 2061.



FIGURE 6.12

La queue d'une comète commence à apparaître lorsqu'elle est à environ 3 UA du Soleil, auquel elle est toujours opposée.

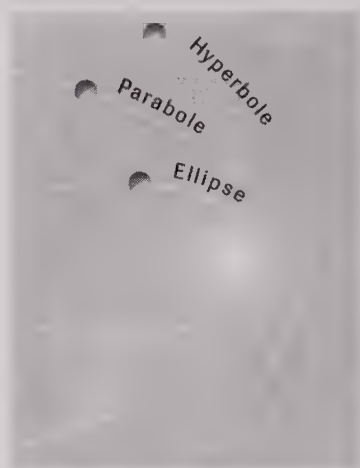
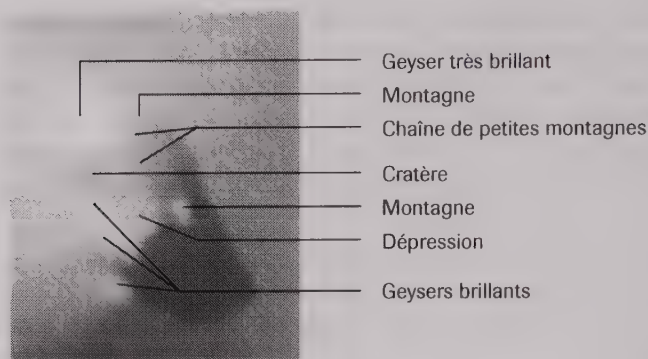


FIGURE 6.13

La trajectoire des comètes peut être une ellipse, une parabole ou une hyperbole.

FIGURE 6.14

Le noyau de la comète de Halley présente plusieurs caractéristiques, les plus spectaculaires étant les geysers très brillants sur la face qu'elle montre au Soleil.



Depuis, d'autres sondes ont visité des comètes. Par exemple, en septembre 2001, la sonde américaine Deep Space 1 est passée à 2 200 kilomètres de la comète Borelly, au noyau long de 10 kilomètres. L'étude de sa surface a permis de déterminer qu'elle est plus complexe que ce que les astronomes imaginaient, avec des terrains accidentés, des plaines aux lignes douces et des failles profondes. Tout comme la comète de Halley, la comète Borelly est elle aussi composée d'une matière très sombre.

Plusieurs autres sondes ont été lancées ou seront lancées vers des comètes dans les prochaines années. En voici quelques-unes :

- Stardust, lancée en février 1999, doit rapporter sur Terre un échantillon de la comète Wild 2 ;
- Rosetta, lancée au début de 2003, doit étudier la comète Wirtanen et y laisser tomber une sonde secondaire après 2011 ;
- Deep Impact, lancée en 2004, doit étudier l'intérieur de la comète Temple 1, en la faisant entrer en collision avec un projectile de 350 kilos, ce qui causera un trou grand comme un terrain de football et profond comme un édifice de sept étages.

Les comètes Encke et Schwassmann-Wachmann-3 devaient être visitées (respectivement en 2003 et 2006) par la mission CONTOUR, qui a débuté en août 2002. Malheureusement, quelques minutes après le lancement, on a perdu tout contact avec la sonde.

Au printemps 1997, la comète Hale-Bopp (figure 6.15) a offert un spectacle mémorable aux habitants de l'hémisphère Nord qui ont pu, durant quelques semaines, l'observer à l'œil nu. Elle s'est approchée à 1,3 UA de la Terre et a été l'un des objets les plus brillants du ciel pendant suffisamment de jours pour qu'il soit très facile pour quiconque de la reconnaître.



FIGURE 6.15

La comète Hale-Bopp



En juillet 1994, les astronomes ont pu assister, en direct, à l'écrasement de la comète Shoemaker-Levy 9 (figure 6.16) sur la planète Jupiter, phénomène extrêmement rare, il va sans dire. Lorsqu'elle avait été découverte, un an plus tôt, on n'avait pas tardé à calculer que sa trajectoire l'amenait tout droit vers Jupiter ou, du moins, très près de celle-ci. Avant de frapper la planète géante, à son passage à l'intérieur de la limite de Roche, la comète s'était brisée en plus de 20 morceaux distincts qui ont formé une très longue chaîne le long de l'orbite de la comète. Tous ces fragments ont tour à tour atteint la haute atmosphère de Jupiter du 16 au 22 juillet 1994. Les impacts ont produit d'immenses nuages sombres et des boules de feu brillantes. Des taches sombres ont été perceptibles encore des mois après les collisions.

Cette collision en direct entre un objet céleste important et une planète a rappelé à la communauté scientifique que même si les risques qu'un tel événement se produise sont extrêmement faibles, ils existent néanmoins. La question n'est pas de savoir si la Terre sera un jour frappée par un objet céleste assez gros pour causer des dommages importants, mais quand cela se produira.

À ce propos, la destruction, en 1908, de plus de 2 000 kilomètres carrés d'une forêt de Tunguska, dans l'Est de la Sibérie, aurait justement été causée par l'explosion d'un fragment de comète à 10 kilomètres d'altitude. Le bolide de 30 mètres de diamètre qui se vaporisa en quelques secondes avant de heurter la Terre causa la libération d'une énergie de 10 mégatonnes de TNT, soit 1 000 fois plus que l'explosion nucléaire d'Hiroshima en 1945. Une reconstitution de son orbite permet de supposer que c'était peut-être un fragment de la comète Encke; la Terre croisait justement son orbite à cette période. Il se pourrait également que l'incident soit attribuable à un astéroïde.

L'impact de Sibérie était important, sans toutefois causer d'extinction massive d'espèces vivantes. Aujourd'hui, nous sommes en mesure de retracer quelques-uns des plus importants cataclysmes causés par des comètes (ou des astéroïdes). Le plus récent a eu lieu il y a 65 millions d'années, entraînant l'extinction des grands dinosaures et de plusieurs autres espèces vivantes. Les paléontologues ont longtemps cherché la cause de cette extinction massive. Plusieurs théories ont été avancées, mais aucune ne réussissait à rallier la communauté scientifique.

En 1979, l'Américain Walter Alvarez (fils de Luis Alvarez, Prix Nobel de physique en 1968) observa une mince couche d'argile contenant une concentration anormalement élevée d'iridium



FIGURE 6.16

La comète Shoemaker-Levy fragmentée à son approche de Jupiter



dans des roches sédimentaires du centre de l'Italie. Des analyses ont permis de découvrir que cette section de roches était vieille de 65 millions d'années. Puisque les comètes (et les météorites; voir la section 6.3) contiennent des concentrations élevées d'iridium, Alvarez et son équipe ont suggéré qu'une comète s'était écrasée sur la Terre à cette époque.

La collision aurait produit un gigantesque nuage de poussières riches en iridium qui se dispersèrent dans l'atmosphère durant de nombreuses années avant de se déposer au sol. Ces poussières auraient causé l'obscurcissement de l'atmosphère, entraînant la mort de grandes quantités de végétaux qui ont besoin de lumière pour survivre. Depuis la découverte d'Alvarez, on a trouvé sur la planète plus de 100 sites contenant des roches riches en iridium et vieilles de 65 millions d'années.

Les grands dinosaures herbivores devaient ingérer des quantités phénoménales de plantes pour survivre et la disparition de leur nourriture aurait causé leur extinction. Les grands dinosaures carnivores qui se nourrissaient d'herbivores se seraient alors trouvés eux aussi sans nourriture et auraient également disparu. Seuls les animaux de petite taille et à l'alimentation variée, comme les rats, les oiseaux, les petits lézards et les insectes auraient pu trouver assez de nourriture pour survivre. Les animaux et les plantes qui ont survécu à ces longues années de noirceur auraient repeuplé la planète lorsque les poussières se sont déposées.

Les astronomes croient aujourd'hui savoir où se serait écrasé le « tueur des dinosaures ». Le cratère de Chicxulub, de 170 kilomètres de diamètre, dans la péninsule du Yucatán, au Mexique (figure 6.17), est l'endroit officiellement reconnu.

Même si cette théorie a d'abord été accueillie avec scepticisme, elle rallie maintenant de plus en plus de scientifiques. Plusieurs autres extinctions massives d'espèces vivantes ont pu être reliées à des collisions de gros astéroïdes ou de comètes avec la Terre.

Il existe une hypothèse plus ou moins sérieuse selon laquelle ce phénomène d'extinction de masse pourrait être cyclique et engendré par un corps étranger au Système solaire, mais lié à celui-ci. Ce corps, Nemesis, serait une étoile éteinte et très sombre (donc très difficile à détecter) dont la trajectoire le ferait passer dans le nuage de Oort, entraînant ainsi avec lui à chacun de ses passages un cortège de comètes puisées dans le nuage. Nemesis graviterait sur une orbite très elliptique l'amenant de 20 000 UA à 90 000 UA du Soleil sur une période d'environ 26 millions d'années. À ce jour, la recherche de cette compagne du Soleil (à l'aide de détecteurs infrarouges) n'a

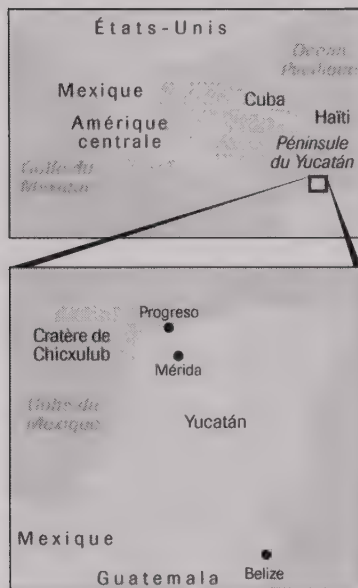


FIGURE 6.17

Le cratère de Chicxulub est à cheval sur la péninsule du Yucatán, au Mexique, et le golfe du Mexique. Il ne peut être réellement perçu que par gravimétrie, technique permettant de déceler les anomalies de gravité.



donné aucun résultat, et les chances de la trouver sont très minces. L'attention qu'apportent les astronomes à l'hypothèse de l'existence de Nemesis est à peu près nulle.

6.3 Météores et météorites

Un météore est un fragment d'astéroïde, un débris de comète ou toute autre particule de matière cosmique qui pénètre dans l'atmosphère terrestre. L'échauffement du météore, attribuable à sa grande vitesse et au frottement de l'air, le fait se consumer en une brève mais spectaculaire traînée de lumière. Les plus petits météores se vaporisent en moins d'une seconde et n'atteignent jamais le sol. Ce qu'on en voit, c'est une traînée de gaz ionisé laissée derrière, qu'on appelle également **étoile filante**. Les plus gros météores, qui portent également le nom de **bolides**, ne pourront être entièrement consumés dans l'atmosphère et atteindront le sol : ce sont les météorites.

L'analyse de la composition des météorites trouvées à la surface de la Terre est très importante pour notre compréhension du Système solaire. Outre les roches lunaires collectées dans les années 70 et les échantillons de divers objets célestes qui seront rapportés sur Terre dans les prochaines décennies par les sondes, les météorites sont les seuls morceaux « extra-terrestres » dont on dispose. Les météorites trouvées jusqu'à maintenant présentent des compositions variées qui nous permettent de les classer en trois catégories :

- les **météorites pierreuses** comptent pour environ 92 % des chutes. Elles contiennent des silicates et du carbone. Leur ressemblance avec certaines roches terrestres les rend assez difficiles à repérer ;
- les **météorites ferreuses** ou **métalliques** comptent pour près de 6 % des chutes. Elles sont constituées d'un alliage de fer et de nickel, et sont magnétiques ;
- les **météorites pierro-ferreuses** comptent pour un peu plus de 1 % des chutes. Elles sont formées d'un mélange des deux autres types de météorites.

Dans la catégorie des météorites pierreuses, on trouve une variété rare de météorites, les **chondrites carbonées**, qui sont constituées surtout de serpentine, minéral qu'on trouve sur Terre. Les chondrites carbonées sont riches en matière organique extraterrestre. Étant donné la grande ressemblance de leur composition chimique avec celles du Soleil et des planètes, elles proviennent probablement de la même matière nébulaire que



celle qui forma le Système solaire. On se demande si ces chondrites particulières ont apporté sur la Terre des éléments organiques qui auraient contribué à l'apparition de la vie.

D'autres météorites trouvées sont des fragments de la Lune, de Mars (voir la section 5.3) et probablement d'autres objets du Système solaire. Ces météorites, comme toutes les autres, sont extrêmement précieuses pour notre compréhension des origines du Système solaire. Elles constituent de véritables témoins de ses premiers instants. Bien sûr, comme toutes les météorites frappant le sol terrestre ne sont pas découvertes, plusieurs éléments d'information nous échappent. Les astronomes estiment à 3 300 tonnes par jour la masse météorique rencontrée par la Terre, mais seulement 6 tonnes parviennent au sol. Si cela paraît beaucoup, sachez qu'il faudrait 2 milliards d'années pour recouvrir le sol d'une couche de 6 centimètres d'épaisseur de météorites. La masse des météorites connues varie de moins de 1 gramme à 60 tonnes.

C'est dire comment certains bolides peuvent atteindre des grosseurs impressionnantes. Par exemple, la météorite Ahn-

ghito, découverte au Groenland en 1894 par le navigateur et explorateur américain Robert Peary (1856–1920), pèse 36,5 tonnes. Elle est exposée au musée du planétarium Hayden de New York. La météorite la plus lourde connue à ce jour pèse 60 tonnes et a été trouvée en 1920 à Hoba, en Afrique du Sud. Mesurant 3 mètres de côté sur 1 mètre de haut, cet énorme bloc de fer n'a jamais été déplacé de son point de chute.

La vitesse d'une météorite est d'environ 45 km/s ; celle de la Terre est d'environ 30 km/s. Si la particule cosmique et la Terre vont à l'encontre l'une de l'autre, la vitesse résultante est de 75 km/s (45 + 30). Dans le cas contraire, elle n'est que de 15 km/s (45 – 30). Dans les deux cas, la vitesse d'entrée dans l'atmosphère

Le ciel me tombera-t-il sur la tête ?

Cette question est ce qui nous vient à l'esprit lorsqu'on prend conscience du nombre de météorites qui atteignent la surface terrestre chaque année. Il n'y a pourtant pas matière à s'inquiéter : on n'a rapporté aucun décès d'un être humain à la suite de la chute d'une météorite. La seule blessure grave connue attribuable à une météorite a été infligée à une dame de l'Alabama, en 1954. L'objet rocheux pesait 3,5 kg. Un chien a été moins chanceux en 1911, près d'Alexandrie, en Égypte : il serait mort à la suite d'une pluie de météorites rocheuses.

C'est la très vaste étendue de la Terre qui rend si faibles les risques d'être un jour frappé par une météorite, même si le nombre de météorites qui tombent sur le sol chaque année est assez élevé. Tous les ans, en moyenne, il tombe 190 météorites de plus de 10 kilos, 2 300 de plus de 500 grammes et 14 000 de plus de 100 grammes. Toutefois, la plupart de ces morceaux du ciel tombent dans des océans ou dans des endroits inhabités.

Les effets d'une chute de météorite augmentent bien entendu avec la taille de celle-ci. Un corps d'au moins 400 mètres de diamètre qui tomberait dans l'océan Atlantique provoquerait un raz-de-marée de plus de 100 mètres de hauteur, dévastateur pour les deux rives de l'océan. Cela peut se produire tous les quelques milliers d'années. Un corps de 1 kilomètre de diamètre tombant sur un continent creuserait un cratère de plus de 50 kilomètres, mais les effets resteraient locaux. Ce dernier scénario peut se produire tous les 300 000 ans. Avec un corps de plus de 5 kilomètres de diamètre, l'impact soulèverait des poussières qui entoureraient la Terre d'un voile opaque. Cela provoquerait un hiver de quelques centaines d'années, marquant peut-être ainsi la fin de la civilisation humaine. C'est le genre d'impact qui a causé l'extinction des grands dinosaures, il y a 65 millions d'années. Statistiquement, il y a des chances que cela se produise tous les 10 ou 100 millions d'années.



est suffisante pour que l'on voie une trace lumineuse dans le ciel.

Chaque année, environ aux mêmes dates, on peut observer des pluies d'étoiles filantes dans le ciel. Ces spectacles magnifiques sont attribuables aux comètes qui, à chaque passage, laissent une traînée de débris derrière elles qui s'apparente à un anneau de poussière. À certaines périodes de l'année, la Terre traverse l'un ou l'autre des anneaux de poussières qui se consomment en passant dans notre atmosphère. C'est une pluie de météores ou une pluie d'étoiles filantes. Chaque pluie d'étoiles filantes semble provenir d'un endroit précis dans le ciel appelé **radiant** ; c'est la direction vers laquelle fonce la Terre quand elle pénètre dans ces anneaux de particules. Habituellement, leur nom est dérivé du nom de la constellation d'où les étoiles filantes semblent venir.

Normalement, en dehors d'une période associée à une pluie d'étoiles filantes, un observateur à un endroit donné sur la Terre peut voir jusqu'à six étoiles filantes à l'heure, dans de bonnes conditions d'observation (ciel dégagé, pollution lumineuse assez faible, etc.). Le tableau 6.5 donne, pour les pluies les plus connues, le nombre moyen d'étoiles filantes à l'heure, la durée de la pluie et l'origine probable.

TABLEAU 6.5

Principales pluies d'étoiles filantes

Nom	Date du maximum	Nombre à l'heure	Période de visibilité	Comète d'origine
Quadrantides	3-4 janvier	40	Du 28/12 au 07/01	?
Lyrides	21-22 avril	15	Du 16/04 au 25/04	Thatcher
Eta Aquarides	4-5 mai	20	Du 30/04 au 12/05	Halley
Delta Aquarides	28-29 juillet	20	Du 14/07 au 18/08	?
Perséides	11-12 août	50	Du 25/07 au 17/08	Swift-Tuttle
Orionides	20-21 octobre	25	Du 15/10 au 29/10	Halley
Taurides	3 novembre	15	Du 6/11 au 10/11	Encke
Léonides	17-18 novembre	15	Du 14/11 au 20/11	Temple-Tuttle
Géminides	13-14 décembre	50	Du 6/12 au 19/12	Astéroïde Phaéton
Ursides	21-22 décembre	15	Du 17/12 au 24/12	Tuttle

L'année 2001 a vu se produire l'une des pluies d'étoiles filantes les plus attendues du début du nouveau millénaire : celle des Léonides. Tous les 33 ans environ, les Léonides sont le siège de vraies tempêtes d'étoiles filantes. On peut alors en compter jusqu'à plus de 20 000 à l'heure, ce qui est vraiment exceptionnel. Ce fut le cas en 1933 et en 1966, et les astronomes



s'attendaient à un spectacle similaire pour au moins une des années proches de 1999. La plupart des pluies d'étoiles filantes ont des pics de quelques heures très supérieurs à la valeur moyenne du tableau 6.5. Si vous êtes chanceux, vous tomberez peut-être un jour sur un de ces feux d'artifice que nous offre gratuitement le cosmos.

La Terre porte en plusieurs endroits la cicatrice laissée par l'impact de grosses météorites. Plus de 1 300 cratères d'impact ont été répertoriés sur la Terre à ce jour. Les tableaux 6.6 et 6.7 en présentent les principaux dans le monde entier et au Québec. Le cratère de Chicxulub, dans la péninsule du Yucatán au Mexique, dont nous avons déjà parlé, est un exemple de cratère exceptionnellement gros. Il est estimé que le corps qui a causé un cratère aussi grand doit mesurer 10 kilomètres de diamètre. Selon les évaluations des spécialistes, la Terre a des chances de recevoir un bolide de cette taille une fois par 100 millions d'années. À une échelle plus petite, le Meteor Crater, en Arizona (figure 6.18), est un cratère d'impact de 1 200 mètres de diamètre et de 150 mètres de profondeur. Il est le résultat de la chute d'une météorite de 30 mètres de diamètre il y a 50 000 ans.

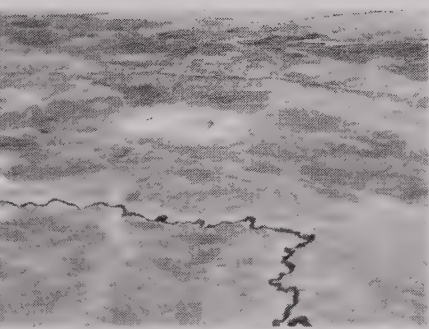


FIGURE 6.18

Meteor Crater, en Arizona

TABLEAU 6.6

Principaux cratères d'impact terrestres

Note: Certains de ces cratères ne sont pas visibles à la surface terrestre.

Nom du cratère	Lieu	Diamètre (en km)	Âge (en Ma)
Vredefort	Afrique du Sud	300	2020
Sudbury	Ontario, Canada	250	1850
Chicxulub	Yucatán, Mexique	170	65
Popigai	Russie	100	35
Manicouagan	Québec, Canada	100	215
Acraman	Australie du Sud	90	590
Baie de Chesapeake	Virginie, États-Unis	90	35
Puchezh-Katunki	Russie	80	165
Morokweng	Afrique du Sud	70	145
Kara	Russie	65	70
Beaverhead	Montana, États-Unis	60	600
Tookoonooka	Queensland, Australie	55	130
Charlevoix	Québec, Canada	54	340
Siljan	Suède	52	368
Kara-Kul	Tadjikistan	52	Moins de 5

Source: Planetary and Space Science Centre, Université du Nouveau-Brunswick.

TABLEAU 6.7

Principaux cratères d'impact du Québec

Nom du cratère	Diamètre (en km)	Âge (en Ma)
Manicouagan	100	215
Charlevoix	54	340
Lac à l'Eau-Claire Ouest	36	290
Lac à l'Eau-Claire Est	26	290
Presqu'île	24	Moins de 500
Lac de la Moinerie	8	400
Lac Couture	8	430
Île Rouleau	4	Moins de 300
Nouveau-Québec	3,4	1,4

Source : Planetary and Space Science Centre, Université du Nouveau-Brunswick.

Sur le plan des cratères d'impact, le Québec n'est pas en reste (voir le tableau 6.7 et la figure 6.20). Le réservoir de la Mani-

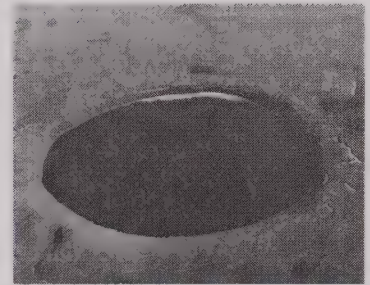


FIGURE 6.19

Cratère du Nouveau-Québec

FIGURE 6.20

Localisation des principaux cratères d'impact du Québec.



FIGURE 6.21

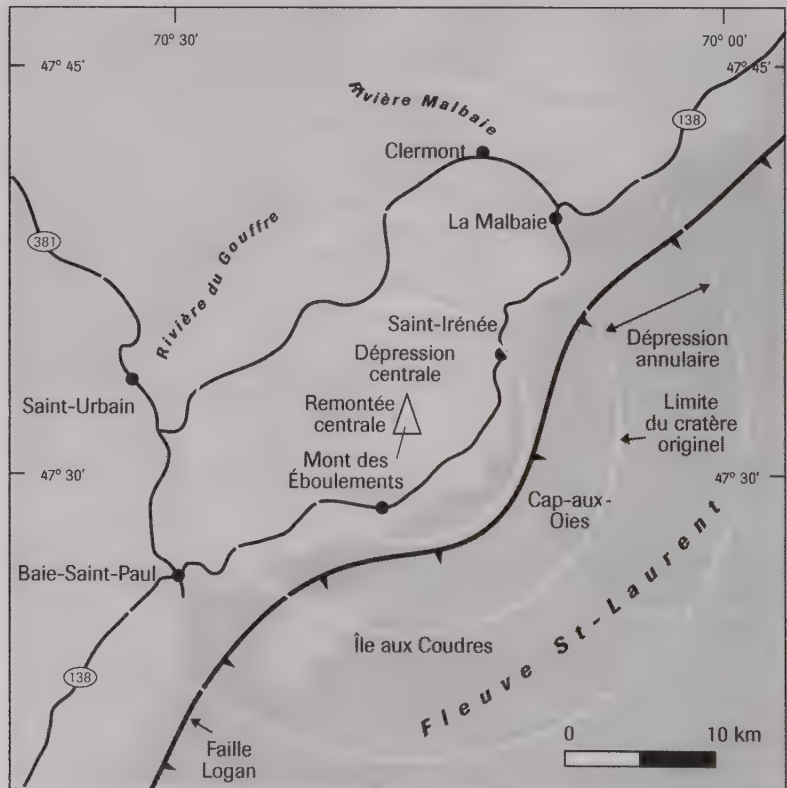
Cratère de la Manicouagan, au Québec

couagan (figure 6.21), par exemple, fait 100 kilomètres de diamètre et est le vestige d'un impact majeur qui a eu lieu il y a 215 millions d'années. À lui seul, un tel impact pourrait aujourd'hui effacer la moitié de la population du globe et dévaster une région grande comme l'Europe au complet. Le mont des Éboulements, dans la région de Charlevoix, est le pic central d'un cratère (aussi appelé **astroblème**) de 54 kilomètres de diamètre (figure 6.22). L'impact se serait produit il y a 340 millions d'années par une météorite de 2 kilomètres de diamètre. La faiblesse de la croûte terrestre, fracturée par le choc, explique en partie la fréquence élevée des tremblements de terre dans ce coin du Québec.

La quantité d'impacts météoriques répertoriés sur la Terre est beaucoup moindre que la quantité réelle d'impacts ayant eu lieu depuis sa formation. Les mouvements de la croûte terrestre et l'érosion ont effacé la grande majorité des traces laissées par les collisions de météorites. Sans quoi, la Terre serait tout autant criblée que la Lune ou Mercure.

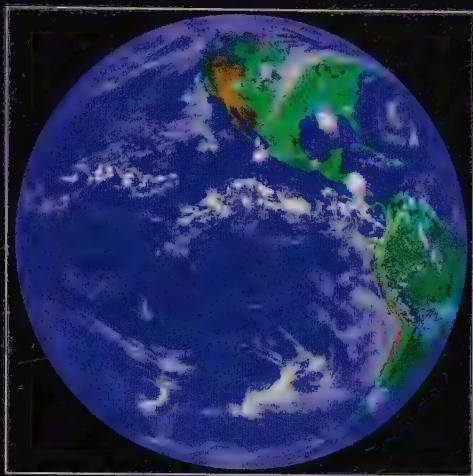
FIGURE 6.22

Autour du mont des Éboulements, résultat du soulèvement spontané de la croûte à la suite de l'impact météorique, on remarque une zone de dépression dans laquelle se sont formées les rivières Malbaie et du Gouffre. Tout autour de cette zone de dépression se découpent les montagnes de Charlevoix, qui ne font plus partie du cratère.

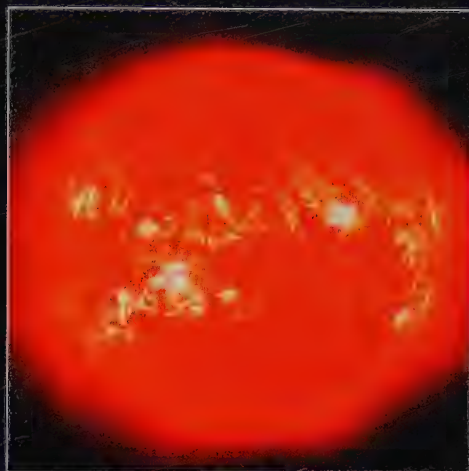


Questions de révision

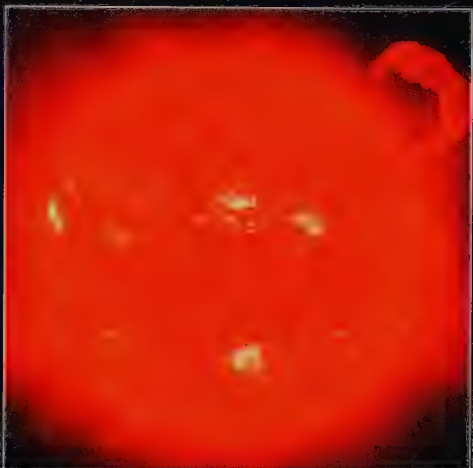
1. Qu'est-ce qu'une étoile filante ?
2. D'où viennent les comètes ?
3. La ceinture d'astéroïdes est située entre quelles planètes ? Pourquoi ?
4. Dans quelle direction pointe toujours la queue de gaz d'une comète ? Pourquoi ?
5. Quelle est actuellement la cause la plus probable de la disparition des dinosaures, il y a 65 millions d'années ? Quelle observation faite par Alvarez vient appuyer cette hypothèse ?
6. Pourquoi y a-t-il des pluies d'étoiles filantes tous les ans aux mêmes dates ?
7. Comment a-t-on découvert le premier astéroïde ?
8. Nommez les trois types de météorites et donnez leur composition.
9. Qu'est-ce que le radiant ? Quelle en est l'explication ?
10. Qu'entendons-nous par **lacunes de Kirkwood** ?
11. Qu'ont de particulier les astéroïdes troyens ?
12. Qu'est-ce qui caractérise les astéroïdes géocroiseurs ?
13. Nommez les trois catégories d'astéroïdes géocroiseurs.
14. Quel astéroïde est considéré comme une deuxième lune de la Terre ? Décrivez son mouvement.
15. Nommez le premier astéroïde visité par une sonde spatiale.
16. Décrivez les principales composantes d'une comète.
17. De quelle comète la sonde européenne Giotto s'est-elle approchée à près de 600 kilomètres du noyau, en 1986 ?
18. Vrai ou faux ? Le noyau de la comète de Halley est très brillant.
19. Qu'est-ce qui rend si difficile la détection des astéroïdes, surtout ceux de type C ?
20. Nommez les trois principales catégories d'astéroïdes en fonction de leur composition.
21. Se peut-il qu'un astéroïde possède une lune ? Si oui, pouvez-vous en nommer un exemple ?
22. Comment s'est terminée l'existence de la comète Shomaker-Levy 9 ?
23. Quel est le cratère d'impact le plus important du Québec ?
24. Qu'est-ce qui caractérise les membres d'une même famille de Hirayama ?



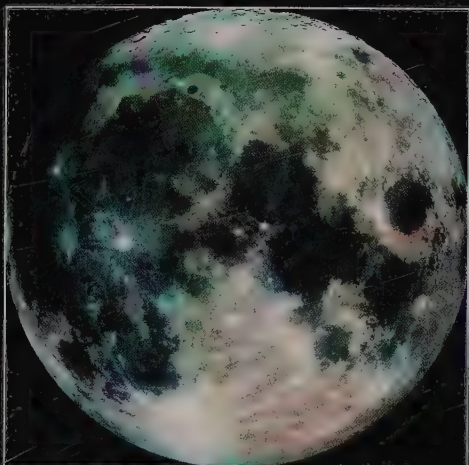
SECTION 3.1 • La Terre



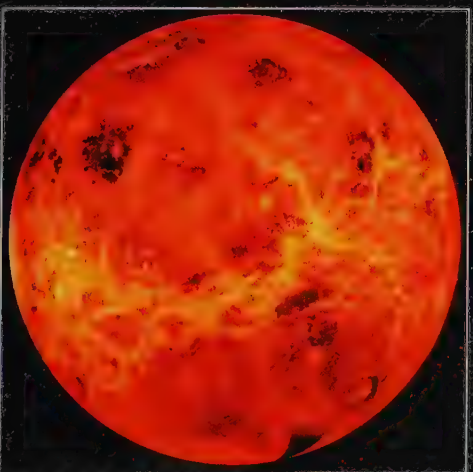
SECTION 4.3 • Le Soleil



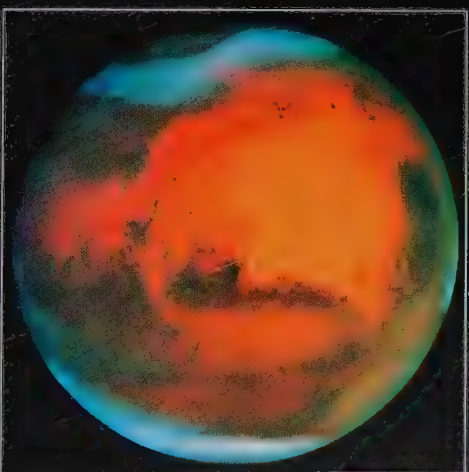
**FIGURE 4.12 • Le Soleil
avec des protubérances**



SECTION 4.4 • La Lune



SECTION 5.2 • Vénus



SECTION 5.3 • Mars

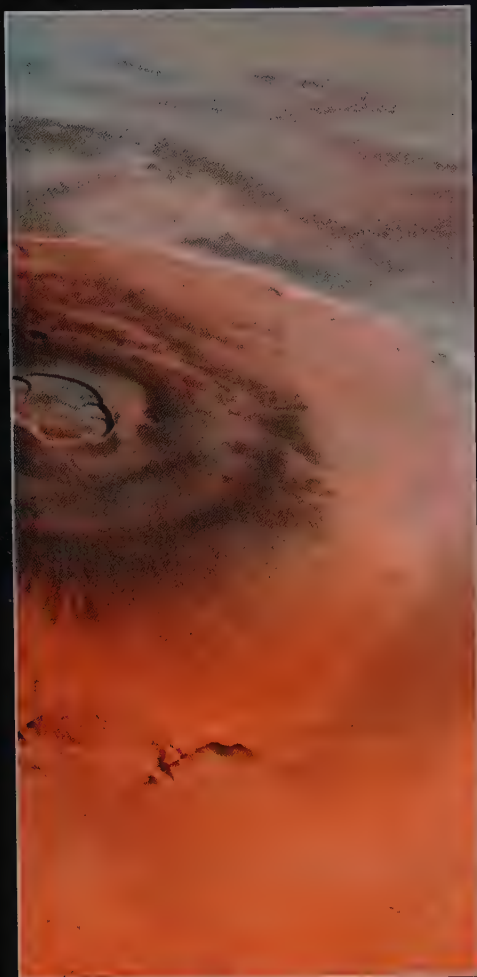
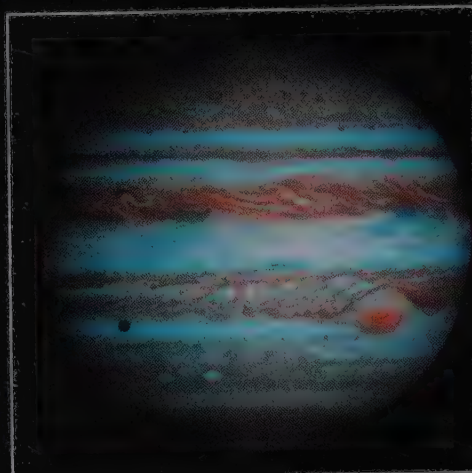


FIGURE 5.11 • Le Mont Olympe (Mars)



SECTION 5.4 • Jupiter

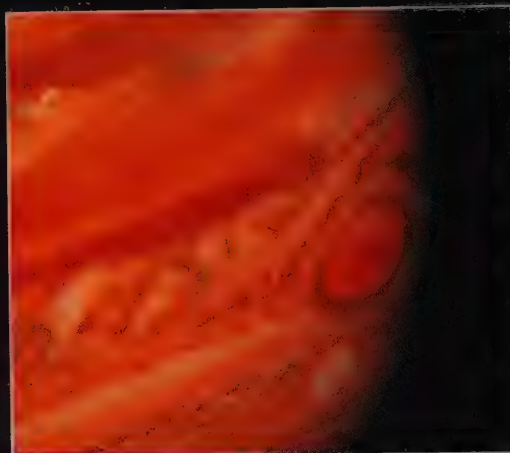


FIGURE 5.18 • Grande Tache rouge de Jupiter
(au centre, légèrement à droite)

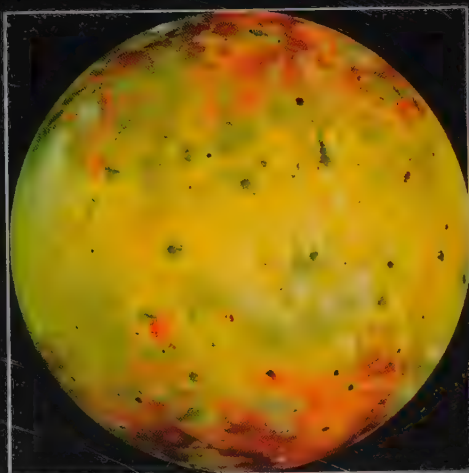


TABLEAU 5.7 • Io, satellite galiléen

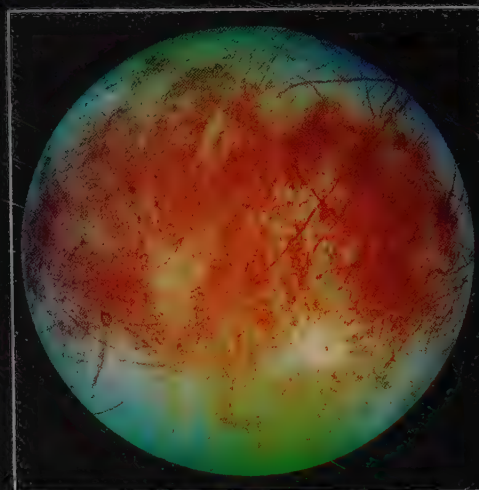
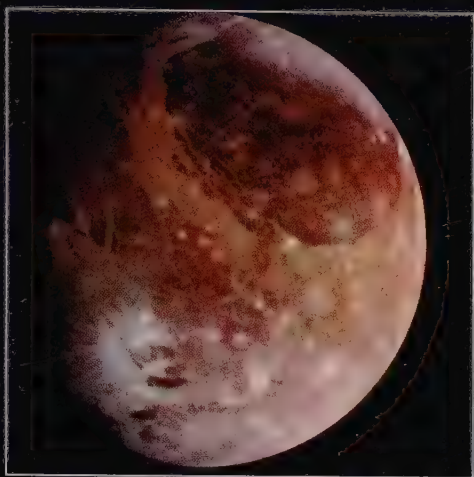
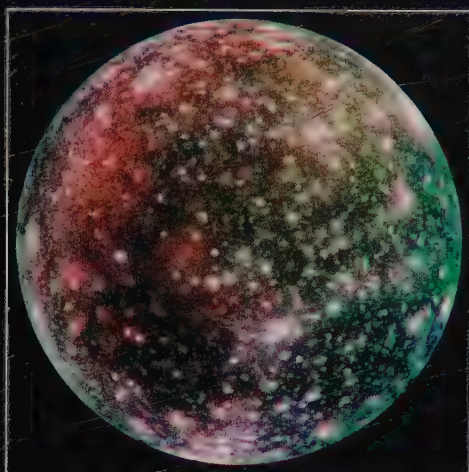


TABLEAU 5.8 • Europe, satellite galiléen



TABEAU 5.9 • Ganymède, satellite galiléen



TABEAU 5.10 • Callisto, satellite galiléen

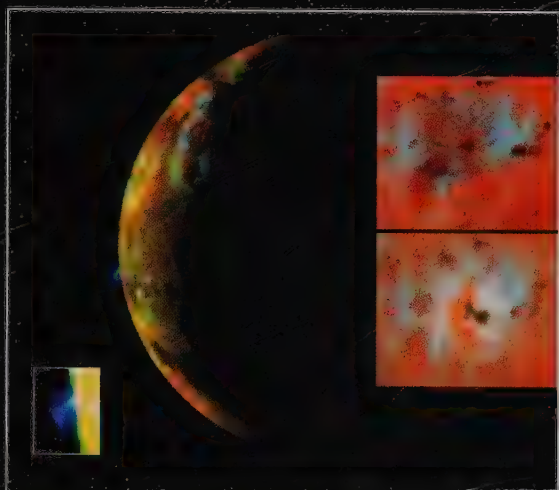


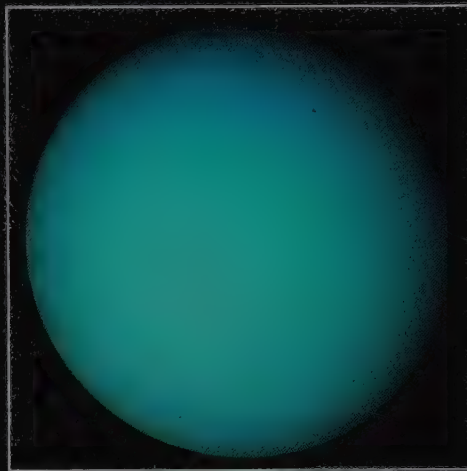
FIGURE 5.22 • Éruption volcanique sur Io



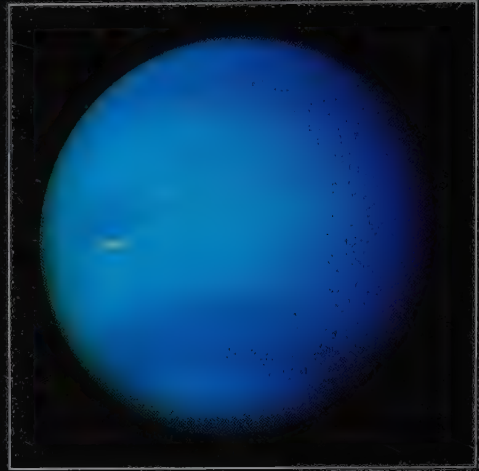
FIGURE 5.29 • Anneaux de Saturne



SECTION 5.5 • Saturne



SECTION 5.6 • Uranus



SECTION 5.7 • Neptune

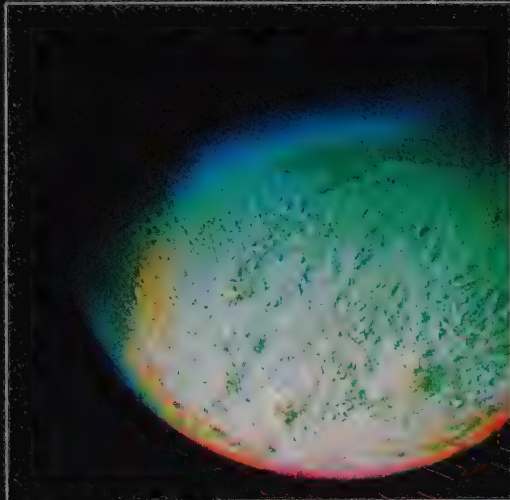


FIGURE 5.44 • Triton,
le plus gros
satellite
de Neptune

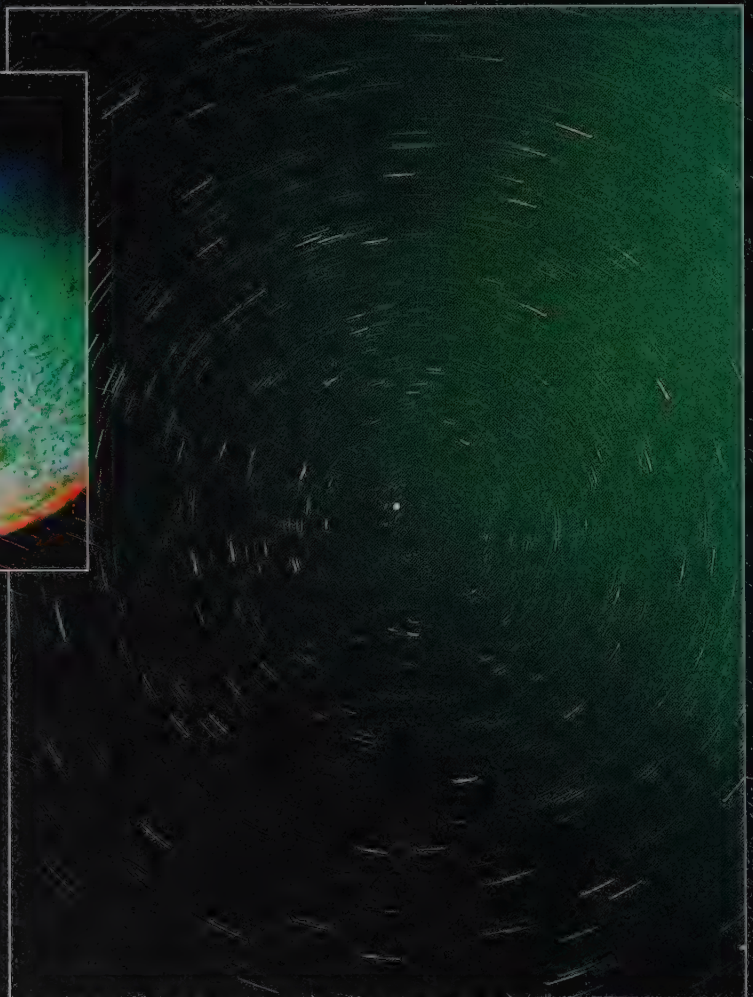


FIGURE 7.2 • Région autour de l'étoile Polaire.
Durée de l'exposition : 20 minutes.

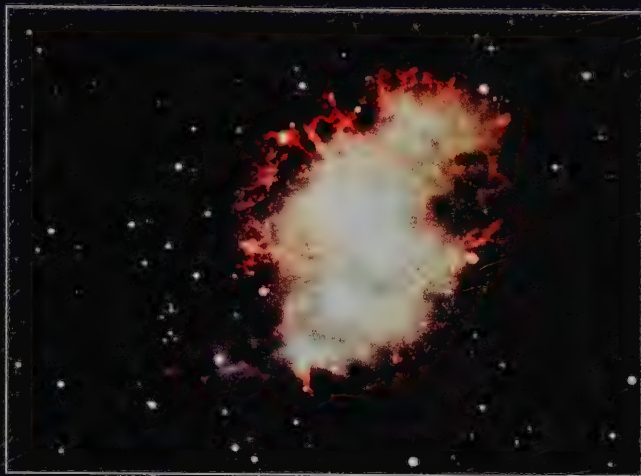


FIGURE 7.16 • Nébuleuse du Crabe (M1)

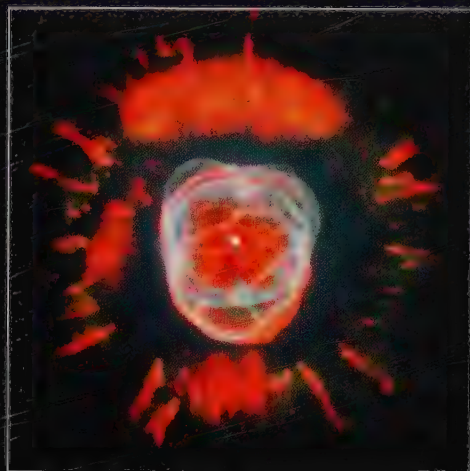


FIGURE 7.18 • Nébuleuse planétaire de l'Eskimo (NGC 2392)

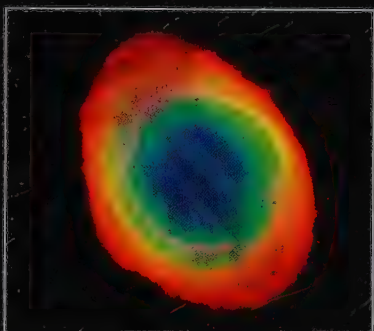


FIGURE 7.19 • Nébuleuse planétaire de l'Anneau (M57)



FIGURE 8.2 • Galaxie d'Andromède (M31)

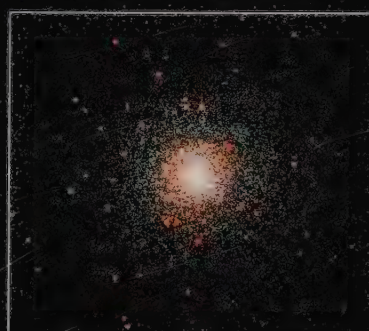


FIGURE 8.3 • Amas globulaire M13



FIGURE 8.4 • Amas ouvert des Pléiades (M45)

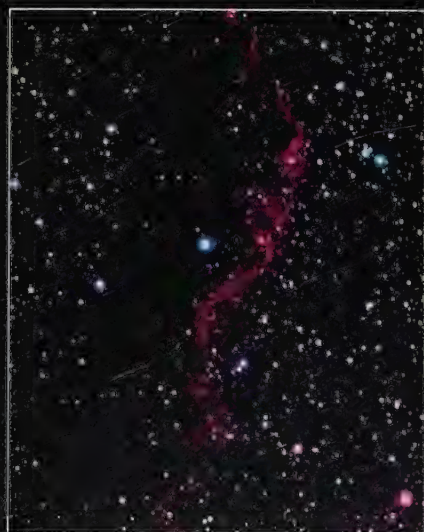


FIGURE 8.6 • Nébuleuse lumineuse de l'Amérique du Nord (NGC 7000)



FIGURE 8.7 • **Nébuleuse lumineuse Rosette** (NGC 2237-9,46)

FIGURE 8.8 • **Nébuleuse lumineuse Trifide** (M20)



FIGURE 8.10 • **Nébuleuse obscure Tête de Cheval**

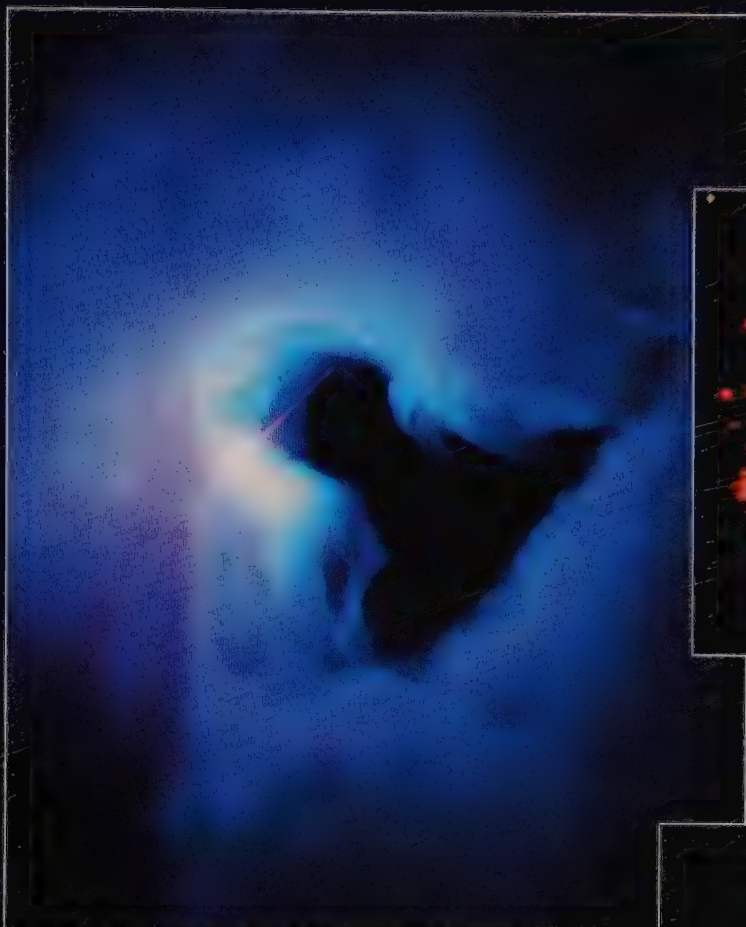


FIGURE 8.11 • Nébuleuse obscure NGC 1999

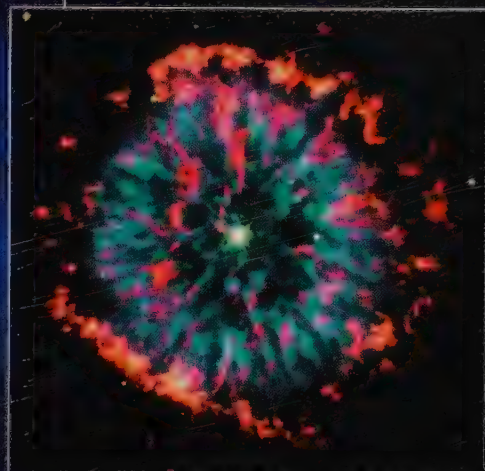


FIGURE 8.13 • La nébuleuse planétaire de l'Œil rayonnant (NGC 6751)



FIGURE 8.14 • Nébuleuse planétaire de l'Haltère (M27)

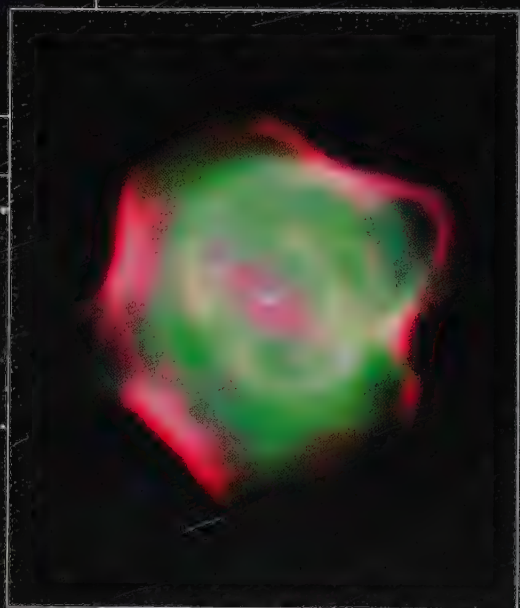


FIGURE 8.15 • La nébuleuse planétaire Hen 1357

**FIGURE 8.16 • Nébuleuse
planétaire
de l'Hélice**



**FIGURE 8.21 • Galaxie
elliptique
M110**

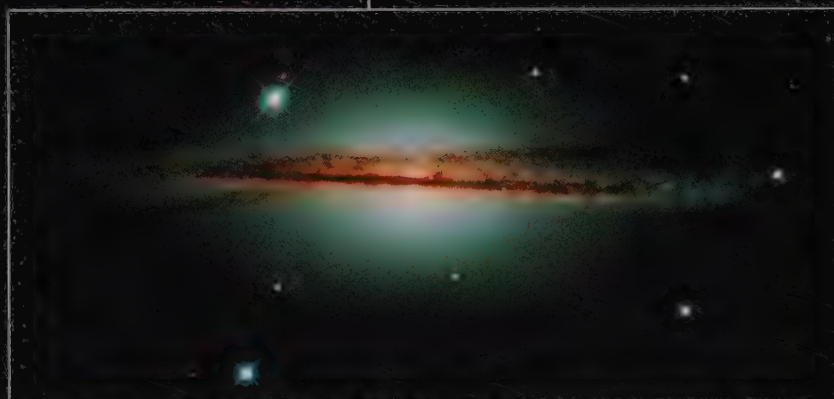


FIGURE 8.22 • Galaxie spirale ESO 510-G13

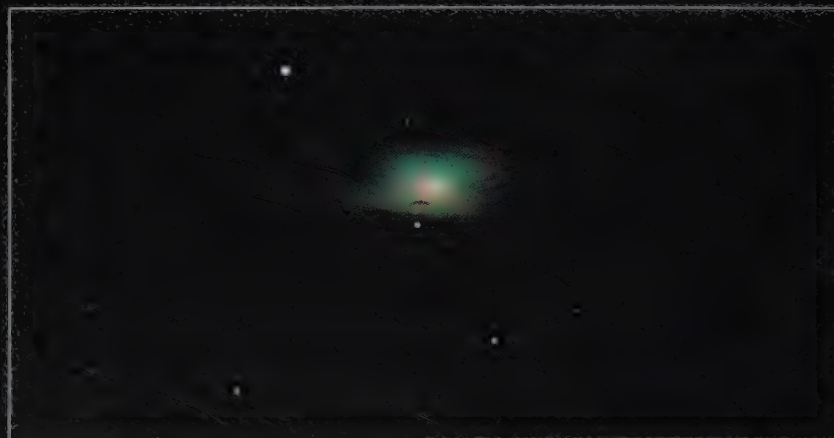


FIGURE 8.23 • Galaxie spirale M65

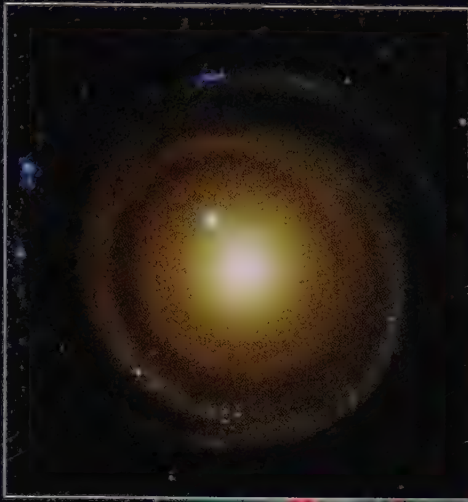


FIGURE 8.24 • Galaxie spirale
NGC 4622



FIGURE 8.25 • Galaxie spirale du Tourbillon (M51)



FIGURE 8.27 • Galaxie spirale
barrée M91

FIGURE 8.28 • Galaxie
spirale barrée
NGC 1073

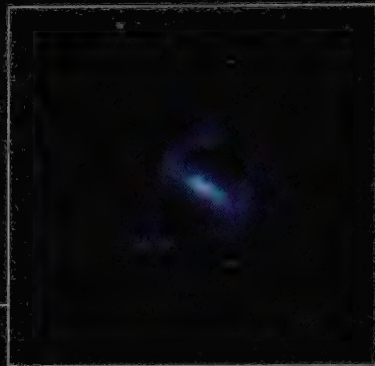


FIGURE 8.29 • Grand Nuage de Magellan, galaxie irrégulière

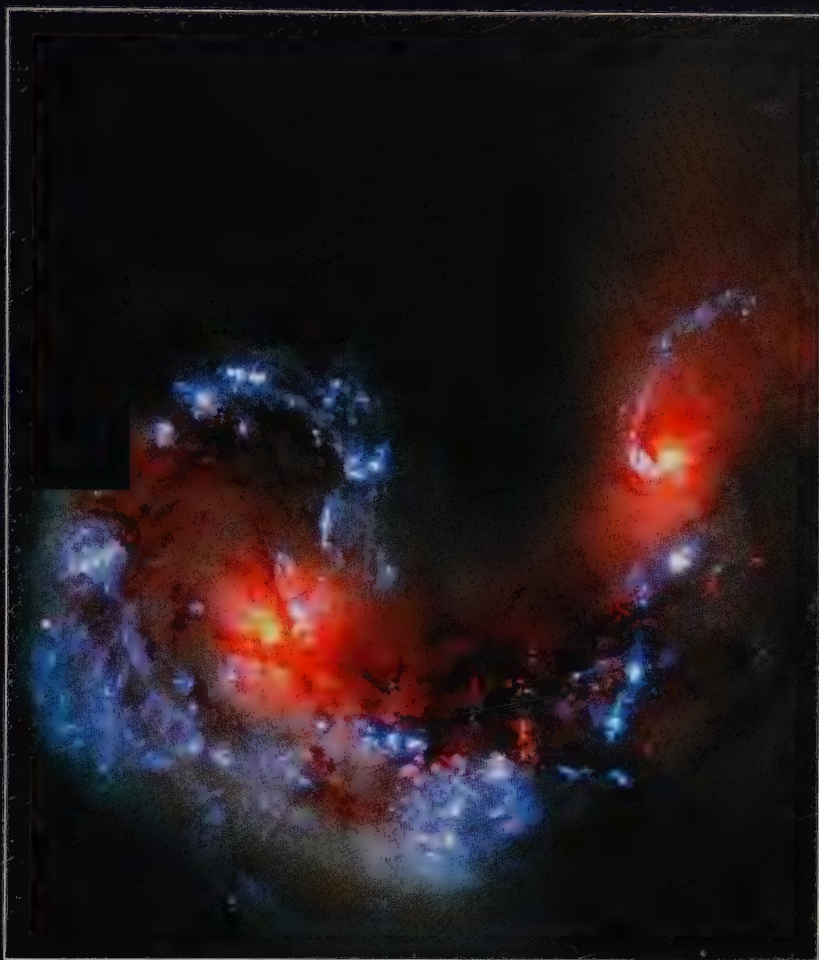


FIGURE 8.30 • Les Antennes (galaxies NGC 4038 et 4039 en interaction)

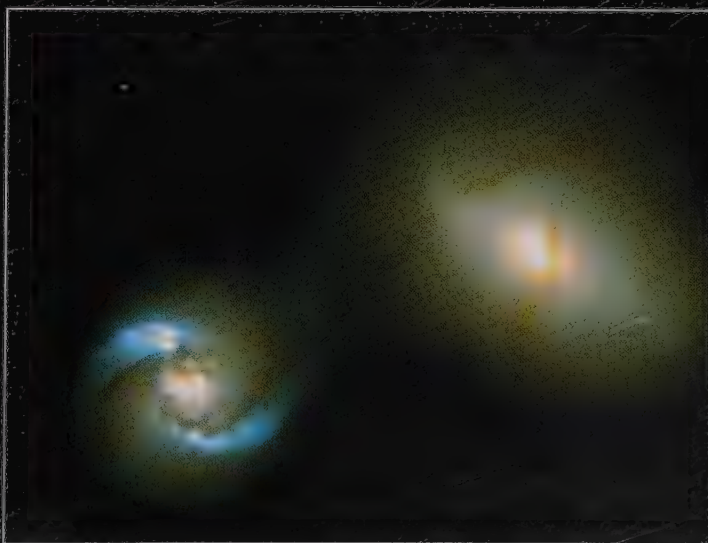


FIGURE 8.31 • Les galaxies NGC 1409 et 1410 en interaction



FIGURE 8.32 • Les galaxies NGC 2207 et IC 2163 en interaction

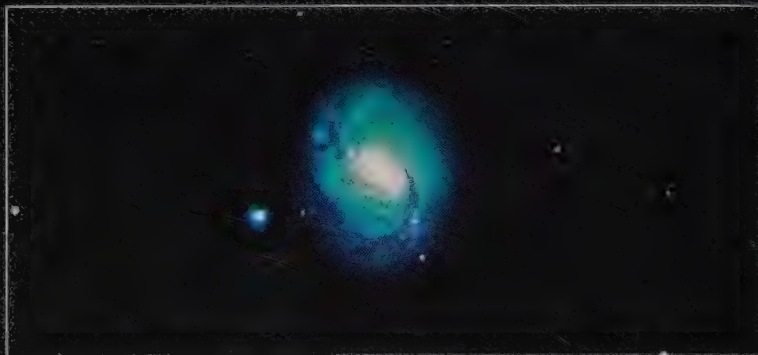


FIGURE 8.33 • Galaxie M77

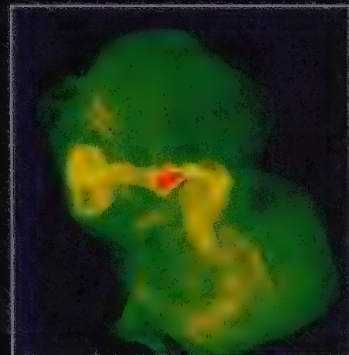


FIGURE 8.34 • Galaxie M87



Les étoiles

Soleils lointains

Nous quittons maintenant notre Système solaire et nous rendons explorer les étoiles, ces autres soleils. Nous verrons d'abord comment les astronomes classent les étoiles, mesurent la distance qui les sépare de nous et déterminent leur masse et leur luminosité.

Ainsi, nous apprendrons que les étoiles qui nous semblent petites et peu brillantes dans le ciel nocturne ont parfois des dimensions et une luminosité incroyables. Saviez-vous qu'il existe des étoiles naines, des étoiles géantes, des étoiles bleues et des étoiles rouges ? Certaines ressemblent à notre Soleil, et d'autres ont des propriétés fort surprenantes. Nous terminerons notre visite des étoiles en étudiant leur évolution depuis leur naissance jusqu'à leur mort.

**DANS LES PAGES
QUI SUIVENT,
VOUS APPRENDREZ À :**

- Reconnaître les principales constellations de l'hémisphère Nord.
- Expliquer les diverses manières de mesurer les distances des étoiles.
- Définir la parallaxe.
- Distinguer la magnitude apparente de la magnitude absolue.
- Décrire la façon de mesurer la température d'une étoile en fonction du rayonnement du corps noir.
- Nommer et définir les classes spectrales et les classes de luminosité des étoiles.
- Décrire et expliquer le diagramme H-R.
- Nommer et décrire les types d'étoiles binaires et d'étoiles variables.
- Décrire les étapes de l'évolution d'une étoile, selon sa masse initiale.



7.1 Constellations

Figures imaginaires se détachant sur le fond noir du ciel, les constellations nous permettent de nous retrouver dans le fouillis d'étoiles de la sphère céleste. Certaines sont facilement reconnaissables : la Grande Ourse, Orion, Cassiopée... D'autres sont moins connues et plus difficiles à voir, en raison de la faible luminosité des étoiles qui les composent. Cela fait plus de 4 000 ans que les observateurs du ciel tracent des lignes fictives entre les étoiles, souvent dans un but de repérage et d'orientation. Les premiers à le faire furent les Mésopotamiens qui nous légèrent notamment le zodiaque, cette bande étoilée dans laquelle semblent évoluer le Soleil, les planètes et la Lune tout au long de l'année, qu'ils divisèrent en douze constellations. Aujourd'hui, ce qu'on appelle les **signes du zodiaque** sont tout simplement les constellations comprises dans cette bande. Par la suite, le ciel mésopotamien, après un passage par l'Égypte, fut transformé par les Grecs qui donnèrent des noms de dieux et de déesses aux étoiles et aux constellations déjà définies. Ptolémée, dans son *Almageste*, donna la position de plus de 1 000 étoiles réparties entre 48 constellations. Cette œuvre fut enrichie par les astronomes arabes au Moyen Âge ; on leur doit d'ailleurs plusieurs noms d'étoiles comme Bételgeuse, Aldébaran, Algol, etc.

Bien que bon nombre d'étoiles portent un nom qui est associé à la mythologie d'une ou de l'autre des civilisations mésopotamienne, égyptienne ou grecque, plusieurs ont été nommées selon une méthode imaginée en 1603 par l'Allemand Jean Bayer et qui repose sur l'alphabet grec. Ainsi, l'étoile la plus brillante d'une constellation est appelée **alpha** (première lettre de l'alphabet grec), la deuxième étoile la plus brillante **bêta**, etc. Par exemple, l'étoile la plus brillante de la constellation de la Lyre s'appelle à la fois **Véga** et **alpha de la Lyre**. Avec l'invention de la lunette astronomique, le nombre d'étoiles visibles depuis la Terre augmenta considérablement et donna lieu à la création de nouvelles constellations dont la plupart ne sont aujourd'hui plus mentionnées. Depuis 1928, par souci d'uniformité, les astronomes s'entendent sur une division du ciel en 88 constellations couvrant la totalité de la sphère céleste. Ces constellations ont été choisies de telle sorte que les 48 constellations de Ptolémée soient respectées et qu'elles englobent le mieux possible les figures traditionnelles.

Un observateur situé à des latitudes comparables à celles de Montréal et de Québec (un peu plus de 45°) peut voir, tout au



Pour réussir sa première soirée d'observation astronomique

Ça y est ! Vous vous préparez enfin à effectuer votre première soirée (ou nuit !) d'observation astronomique. Vous vous êtes assuré que le ciel sera sans nuages et avez fait l'achat d'un cherche-étoiles dans une librairie ou dans une boutique spécialisée en astronomie. Vous avez peut-être même acheté un guide sur l'observation du ciel. Voici tout de même quelques trucs qui feront de cette sortie un succès.

Pour observer avec des jumelles ou un petit télescope

- Si vous souhaitez **observer la Lune** aux jumelles ou au petit télescope, renseignez-vous sur la phase de la Lune et ses heures de lever et de coucher pour la date de votre sortie. Certains quotidiens fournissent cette information. Ainsi, vous saurez si c'est un soir de nouvelle Lune ou un soir de pleine Lune.
- Si vous souhaitez **observer des planètes, des amas d'étoiles, des nébuleuses et d'autres objets stellaires intéressants**, il serait à votre avantage de choisir un soir qui se situe dans la semaine avant ou après une nouvelle Lune. Ainsi, sa brillance ne gênera pas vos observations d'objets plus difficiles à voir.
- Consultez votre **cherche-étoiles** ! Observez les constellations visibles en fonction du jour et de l'heure de votre sortie. Repérez des étoiles ou des objets qui vous serviront de guide ou de point de départ pour ensuite trouver d'autres objets moins visibles.
- Déterminez votre **lieu d'observation**. Choisissez un lieu relativement loin des lumières de la ville et plutôt dégagé, c'est-à-dire qui ne comporte pas trop d'arbres ou de bâtiments.
- Pour votre confort, n'oubliez pas d'**apporter des vêtements chauds** (même l'été, les nuits peuvent être fraîches), des couvertures, des chaises longues ou des matelas gonflables (on est mieux couché). N'oubliez surtout pas votre cherche-étoiles, vos jumelles et votre télescope et, s'il y a lieu, pensez de porter vos lentilles ou vos verres correcteurs.
- Apportez avec vous une **lampe de poche** pour consulter votre cherche-étoiles. Notez que la lumière blan-

che de la lampe de poche est plutôt aveuglante et qu'il existe un truc bien simple pour éviter de devoir réadapter votre œil après chaque emploi de la lampe. Il s'agit de fixer, au bout de la lampe de poche, quelques épaisseurs de feuilles de plastique transparent rouge.

Si vous souhaitez photographier le ciel

Prendre des photos de certaines régions du ciel nocturne permet parfois à l'astronome amateur de découvrir des objets aux couleurs et aux détails étonnants. Voici ce qu'il vous faut pour réaliser vous-même vos propres photographies astronomiques, et ce, de la façon la plus simple qui soit.

- Procurez-vous un appareil photo dont on peut ajuster le temps d'exposition et qui offre la possibilité de laisser ouvert l'obturateur (position B) pendant un temps indéterminé. Cela vous permettra de prendre des photos à longue exposition. Vous capterez ainsi plus de lumière et les objets peu lumineux tels que certaines nébuleuses ou la galaxie d'Andromède prendront un aspect beaucoup plus intéressant sur vos clichés.
- Si vous prenez des photos avec des expositions plus longues, vous devrez vous servir d'un trépied afin que la caméra ne se déplace pas. Procurez-vous également un déclencheur à distance souple. C'est un cordon dont l'une des deux extrémités s'attache au déclencheur de l'appareil (le bouton sur lequel on appuie pour prendre une photo) et dont l'autre extrémité présente un bouton qui peut être maintenu enfoncé. Lorsque l'obturateur de l'appareil est en position B, c'est-à-dire lorsqu'il est ouvert, l'enfoncement du bouton du déclencheur vous permet de maintenir l'obturateur ouvert tant et aussi longtemps que vous le désirez.
- Achetez de la pellicule très sensible à la lumière (ISO 400 ou plus). Plus le chiffre est élevé, plus la pellicule est sensible.
- Assurez-vous, avant de quitter pour votre soirée, que l'appareil photo est en bon état de marche, surtout si vous l'avez emprunté ou s'il n'a pas servi depuis longtemps.

Bonne soirée d'observation !

long de l'année, près des trois quarts des 88 constellations ; les autres ne sont visibles que depuis l'hémisphère Sud. En fait, seuls les habitants situés le long de l'équateur peuvent observer toutes les constellations du ciel, en voyant avec plus de difficulté celles qui sont près des pôles, car elles se trouvent dans le bas horizon de ces observateurs. À nos latitudes, la plupart des constellations de l'hémisphère Nord sont visibles

toute l'année. Toutefois, certaines ne peuvent être observées que l'été (Scorpion) ou l'hiver (Orion). La figure 7.1 illustre les principales constellations visibles depuis nos latitudes.

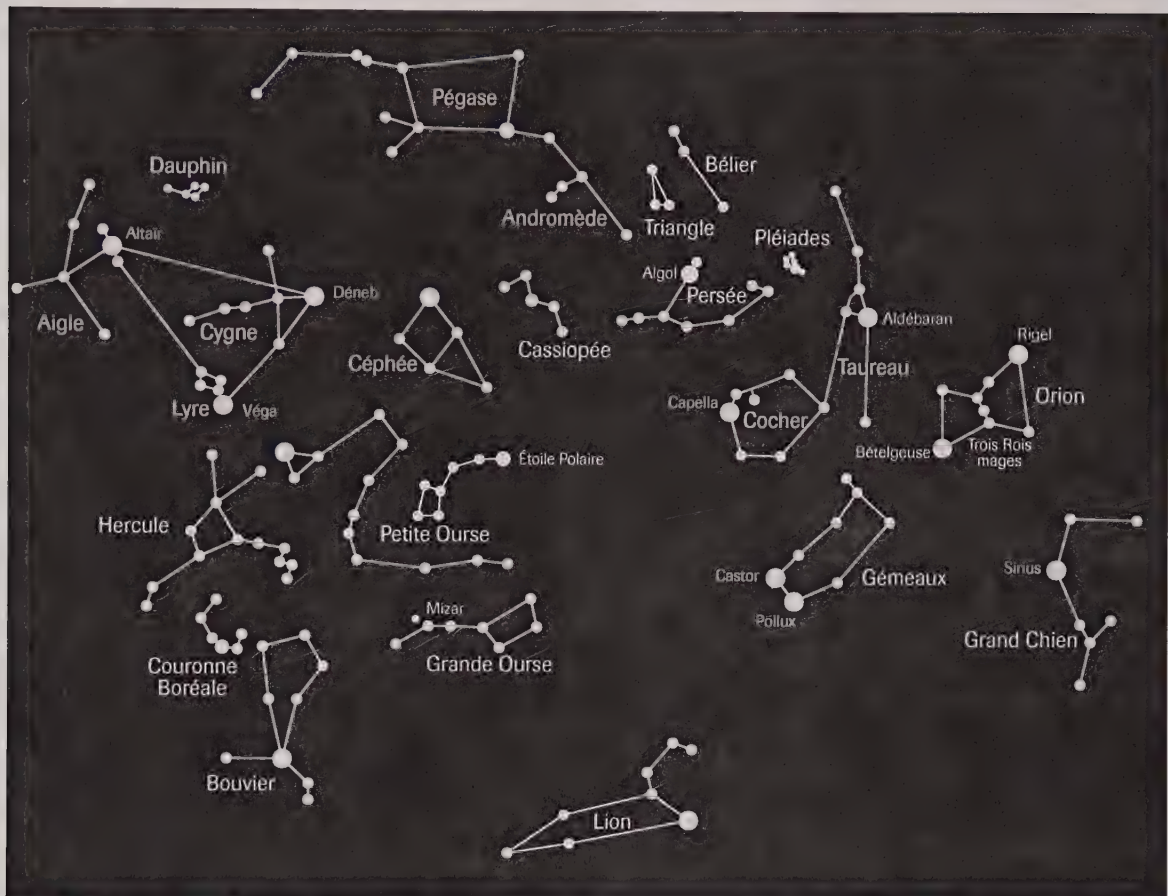


FIGURE 7.1

Principales constellations et étoiles visibles à nos latitudes

Environ 7 000 étoiles sont visibles à l'œil nu dans les deux hémisphères. En pratique, on ne peut voir en même temps qu'un maximum de 2 600 étoiles. On appelle **cherche-étoiles** l'instrument qui sert à observer et à reconnaître les principales étoiles (et d'autres objets célestes tels que certaines galaxies et nébuleuses) et les constellations. Divers modèles existent, certains plus détaillés que d'autres, mais tous sont très utiles pendant une soirée d'observation.

Les étoiles dans le ciel se déplacent de la même façon que les autres astres : elles se lèvent à l'est et se couchent à l'ouest.

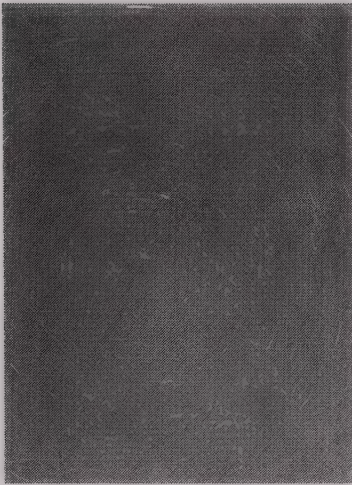


FIGURE 7.2

Photographie de la région autour de l'étoile Polaire. Durée de l'exposition : 20 minutes.

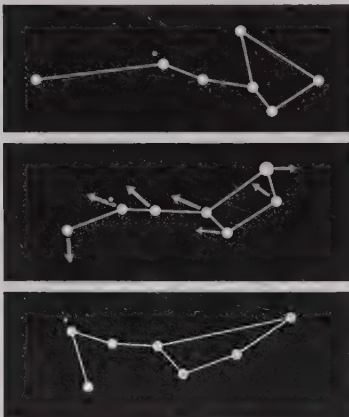


FIGURE 7.3

L'apparence de la Grande Ourse est modifiée au fil du temps par le mouvement propre des étoiles qui la forment. Les astronomes ont, à partir du mouvement actuel des étoiles qui la composent (figure du centre), extrapolé l'aspect qu'avait la constellation il y a 100 000 ans (figure du haut) et celle qu'elle aura dans 100 000 ans (figure du bas).

Toutefois, leur mouvement se fait autour d'un point imaginaire qui correspond au prolongement de l'axe de rotation de la Terre et qui est situé directement au-dessus du pôle. Dans l'hémisphère Nord, l'étoile la plus proche de ce point imaginaire est l'étoile Polaire. La figure 7.2 présente le résultat d'une photographie à longue exposition de l'étoile Polaire et de la région environnante. Ainsi, de notre point de vue, ce sont les étoiles qui tournent autour du prolongement de l'axe de rotation, alors qu'en réalité elles sont fixes et que c'est la Terre qui tourne. Viendra un jour où ce ne sera plus l'étoile Polaire qui servira de point de repère pour situer le nord. Nous avons étudié, au chapitre 3, le mouvement de précession de l'axe de la Terre, qui fait se déplacer la direction de l'axe de rotation de celle-ci par rapport à la sphère céleste sur un cycle de 26 000 ans. Ainsi, il y a près de 3 000 ans, c'était une étoile de la constellation du Dragon qui indiquait le nord, et non l'étoile Polaire comme aujourd'hui.

On appelle **constellations circumpolaires** («qui est ou qui se fait autour d'un pôle») les constellations qui peuvent être vues toute l'année et dont les étoiles ne passent jamais sous l'horizon. On pourrait également dire de ces constellations qu'elles ne se couchent jamais. Leur nombre varie selon la latitude du lieu où se trouve l'observateur sur la Terre. Par exemple, si vous êtes à Trois-Rivières, à 46° de latitude nord, les constellations circumpolaires sont toutes celles qui se trouvent à l'intérieur d'un rayon de 46° autour de l'étoile Polaire¹.

Dans une explication précédente, nous avons dit que les étoiles sont fixes sur la sphère céleste. En effet, d'une année à l'autre, la forme des constellations et la position relative des étoiles entre elles ne semblent pas changer. Mais il en irait autrement d'une observation qui s'étendrait sur une période de plusieurs milliers d'années. C'est que malgré l'impression d'immobilité des étoiles dans le ciel, celles-ci se déplacent bel et bien les unes par rapport aux autres. Ce mouvement, très lent mais bien réel, est le **mouvement propre** des étoiles. Le Soleil est lui aussi doté de ce mouvement propre. Il parcourt 4 UA par année (cela correspond à une vitesse de 20 km/s) dans une direction qu'on appelle **apex**. Ainsi, la forme des constellations est modifiée constamment, sur de très longues périodes. La figure 7.3 présente l'évolution de la forme des étoiles composant la Grande Ourse sur une période de 200 000 ans.

Lorsqu'on fait l'observation des étoiles, il ne faut pas oublier que les constellations ne sont que le résultat d'un effet de perspective et le fruit de l'imaginaire humain. En effet, notre œil

1. Rappel: le ciel, d'un horizon à l'autre, correspond à 180°.



étant incapable d'évaluer les distances célestes réelles, nous avons l'impression que les étoiles qui forment les constellations sont près les unes des autres et ont un certain lien de voisinage. Cela explique pourquoi les Anciens croyaient que les étoiles étaient toutes situées sur la « sphère céleste », à égale distance de la Terre. Toutefois, les étoiles des constellations sont toutes à des distances très différentes de la Terre et ne correspondent à aucun groupement particulier dans le ciel. La figure 7.4 présente à titre d'exemple la position des étoiles formant la Grande Ourse.

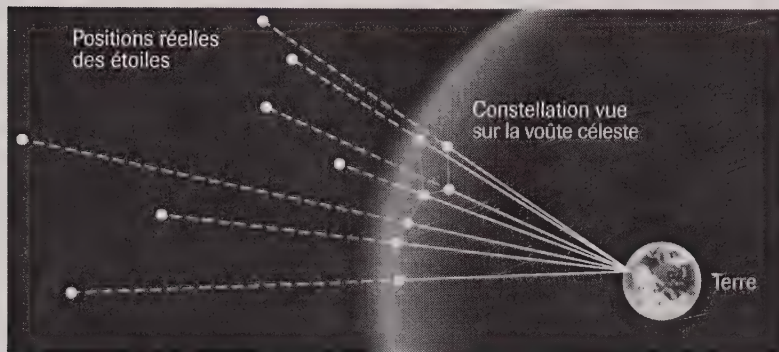


FIGURE 7.4

Les constellations sont des illusions stellaires. Les étoiles qui forment la Grande Ourse, par exemple, sont toutes à des distances différentes de nous et paraissent près les unes des autres par simple effet de perspective.

7.2 Distance des étoiles

Unités de distance

La détermination précise des distances est fondamentale en astronomie pour l'étude et la compréhension de notre Univers. Au fil des progrès scientifiques, les astronomes des diverses civilisations ont lentement pris conscience de l'étendue inimaginable de notre Système solaire, tout d'abord, de notre Galaxie par la suite, puis de l'Univers lui-même. Nous verrons plus loin comment l'évaluation des distances nous aide, notamment, à établir l'âge de l'Univers. Les astronomes accordent donc beaucoup d'importance à la mesure des distances entre les objets célestes et consacrent beaucoup d'efforts pour en accroître sans cesse la précision.

Les unités de mesure dont nous nous sommes servis jusqu'à maintenant deviennent vite inutilisables lorsqu'il s'agit d'explorer les étoiles autres que le Soleil et les objets situés à l'extérieur de notre Galaxie. Ainsi, nous avons déjà, au chapitre 5, laissé de côté le kilomètre au profit de l'**unité astronomique** (UA) pour décrire les distances entre les planètes et le Soleil.



Rappelons que l'unité astronomique est la distance moyenne de la Terre au Soleil, c'est-à-dire que :

$$1 \text{ UA} = 1,5 \times 10^8 \text{ km} = 150\,000\,000 \text{ km}$$

Cette unité est donc largement employée dans l'étude des phénomènes se produisant à l'intérieur du Système solaire. Par contre, dès qu'il est question des étoiles et d'autres objets lointains, elle est inadéquate, car trop petite. Par exemple, l'étoile la plus proche du Soleil, Proxima du Centaure (*Proxima Centauri* en latin), est située à 268 138 UA du Soleil et le diamètre de la Galaxie est d'environ 6 000 000 000 UA. Et ce n'est que le début de l'Univers qui nous entoure !

L'unité de mesure la plus usuelle pour les très grandes distances célestes est sans doute l'**année-lumière (al)**, qui correspond à la distance que parcourt la lumière en une année. Comme la lumière voyage à près de 300 000 km/s et qu'il y a 31 536 000 s dans une année², une année-lumière est égale à :

$$1 \text{ al} = 3,0 \times 10^5 \text{ km/s} \times 31,536 \times 10^6 \text{ s} = 9,46 \times 10^{12} \text{ km}$$

La correspondance entre l'année-lumière et l'UA est :

$$1 \text{ al} = 63\,240 \text{ UA}$$

L'année-lumière est une unité simple à utiliser et permet de représenter des distances très grandes à l'aide de nombres plus petits. Par exemple, Proxima du Centaure est à 4,2 al de la Terre et notre Galaxie a un diamètre de 100 000 al. On peut voir qu'il est beaucoup plus commode de travailler avec ce genre de nombres qu'avec des millions de millions de kilomètres.

TABLEAU 7.1

Équivalence des unités de distance

1 UA	150 000 000 km ou $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$
1 al	$9,46 \times 10^{15} \text{ m}$ 63 240 UA 0,307 pc
1 pc	$3,08 \times 10^{16} \text{ m}$ 206 162 UA 3,26 al

Les astronomes emploient également le **parsec (pc)** dont l'ordre de grandeur se rapproche de l'année-lumière. Un parsec est égal à 3,26 al. Exprimés dans cette unité, la distance de Proxima du Centaure est de 1,3 pc et le diamètre de notre galaxie de 30 000 pc (ou 30 kpc). Le parsec est souvent accompagné de préfixes tels que le **k** pour kilo ($\times 1\,000$) ou **M** pour méga ($\times 1\,000\,000$). Ainsi, on rencontre assez fréquemment des kpc ou des Mpc lorsqu'on exprime de très grandes distances dans l'Univers.

Parallaxe

Le nom **parsec** vient de la combinaison de l'abréviation de deux mots, **parallaxe** et **seconde**, qui entrent dans la définition scientifique de l'unité de distance qu'est le parsec. La notion

2. Nombre de secondes dans une année :

$365 \text{ jours/an} \times 24 \text{ h/jour} \times 60 \text{ min/h} \times 60 \text{ s/min} = 31\,536\,000 \text{ secondes par année.}$

de parallaxe tire son origine dans le fait que, au cours du mouvement de la Terre autour du Soleil, les étoiles « proches » semblent se déplacer par rapport à l'arrière-plan des étoiles lointaines (figure 7.5). La parallaxe désigne ce déplacement angulaire apparent et on la mesure en secondes d'arc. Plus un objet est éloigné de la Terre, plus la parallaxe mesurée sera petite. Ainsi, la distance de 1 parsec a été définie comme la distance correspondant à une parallaxe de 1 seconde d'arc.

La distance D en parsecs est donnée par la relation :

$$D = 1/p$$

où p est l'angle en secondes d'arc (") formé par la Terre, l'étoile et le Soleil.

La méthode de la parallaxe permet de mesurer la distance des étoiles situées jusqu'à quelques centaines de parsecs. Les mesures directes et traditionnelles de parallaxe ont permis de connaître la distance d'environ 8 000 étoiles. Plus récemment, soit entre 1989 et 1993, le satellite d'astrométrie européen Hipparcos a mesuré la parallaxe d'environ 100 000 étoiles (situées jusqu'à 1 000 pc) avec une précision de 1 millième de degré d'arc. Pour mesurer des distances encore plus grandes, comme la distance d'autres galaxies que la nôtre, on doit faire appel à des **indicateurs de distance**. La technique des indicateurs de distance consiste à repérer dans l'espace lointain des astres lumineux dont on connaît certaines caractéristiques (par exemple l'éclat intrinsèque) par recoupement avec des objets du même type, plus proches (indicateurs de distance). Une relation mathématique décrit, pour chaque type d'astre, le lien entre l'intensité lumineuse intrinsèque, la brillance apparente et la distance de l'objet. Parmi les objets stellaires les plus souvent employés comme indicateurs de distance, mentionnons les étoiles variables (voir la section 7.7, p. 268) dont la luminosité varie avec la période de pulsation. Une catégorie d'étoiles variables, les céphéides, sont très faciles à repérer dans les galaxies voisines de la nôtre et permettent de calculer des distances allant jusqu'à quelques mégaparsecs. D'autres indicateurs de distance comprennent les novæ, étoiles dont la luminosité s'accroît brusquement et qui permettent de mesurer des distances allant jusqu'à 4 Mpc, les amas globulaires, amas très concentrés de plusieurs centaines de milliers d'étoiles qui affichent des distances allant jusqu'à 15 Mpc, et les supernovæ de type Ia, explosions d'étoiles se produisant au sein de systèmes d'étoiles binaires, qui donnent des distances de l'ordre de 300 Mpc.

Le tableau 7.2 présente quelques distances et dimensions de notre Univers, en plusieurs unités. La plupart des mesures sont

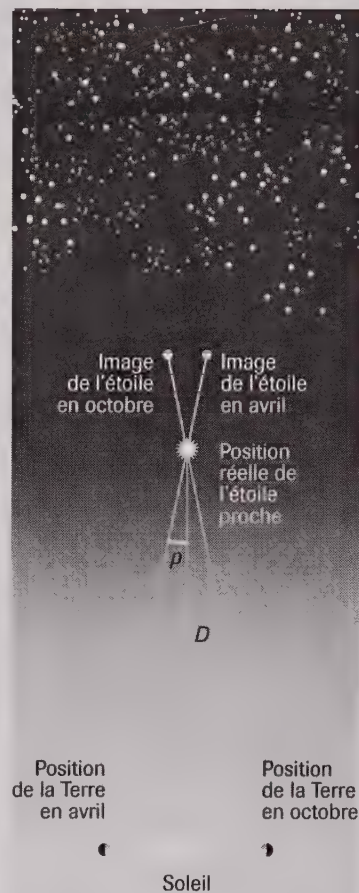


FIGURE 7.5

La méthode de la parallaxe consiste à mesurer le déplacement apparent d'une étoile sur le fond du ciel sur un intervalle de six mois.



TABLEAU 7.2

Distances et dimensions dans l'Univers³

		Kilomètres	Unités astronomiques	Années-lumière	Parsecs
Distance	Terre-Lune	384 000	0,002 56	$4,1 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$
Distance	Soleil-Pluton	6×10^9	40	$6,3 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$
Distance	Du Soleil à l'étoile la plus proche (Proxima du Centaure)	$4,0 \times 10^{13}$	266 000	4,2	1,3
Diamètre	Notre Galaxie (Voie lactée)	$9,5 \times 10^{17}$	$6,3 \times 10^9$	100 000	30 000
Distance	Voie lactée – galaxie la plus proche (Grand Nuage de Magellan)	$1,6 \times 10^{18}$	$1,1 \times 10^{10}$	170 000	52 000
Distance	Voie lactée – Galaxie d'Andromède (plus grande galaxie du groupe local)	$2,1 \times 10^{19}$	$1,4 \times 10^{11}$	2 200 000	675 000
Taille	Groupe local	$1,9 \times 10^{20}$	$1,3 \times 10^{12}$	5 000 000	1 500 000
Taille	Superamas local	$9,5 \times 10^{20}$	$6,3 \times 10^{12}$	75 000 000	23 000 000
Distance	Galaxie la plus lointaine	$7,6 \times 10^{22}$	$5,1 \times 10^{14}$	8 000 000 000	$2,5 \times 10^9$
Taille	Univers	$1,4 \times 10^{23}$	$9,5 \times 10^{14}$	15 000 000 000 ⁴	$4,6 \times 10^9$

fortement arrondies et constituent souvent des évaluations sur lesquelles tous les astronomes ne s'entendent pas.

7.3 Brillance des étoiles

Les étoiles de la sphère céleste ne présentent pas toutes le même éclat, la même brillance. Certaines sont à peine visibles alors que d'autres sont très lumineuses, même en pleine ville. On peut définir la brillance des étoiles de diverses manières. La **magnitude** est la plus connue et la plus utilisée.

Magnitude

L'intérêt de la magnitude vient en partie du fait qu'elle tire son origine de systèmes de mesure de brillance imaginés au cours de l'histoire. Au II^e siècle av. J.-C., l'astronome grec Hipparque

3. Inspiré d'un tableau présenté dans le site d'Astrovision (astro.vision.free.fr).

4. Cette valeur ne tient pas compte de l'expansion de l'espace prévue par la théorie de la relativité d'Albert Einstein. C'est toutefois la valeur que nous emploierons tout au long du présent ouvrage.



classa les étoiles observables en fonction de leur brillance selon six degrés (ou « grandeurs ») d'éclat apparent, allant des plus brillantes aux moins brillantes, tout juste perceptibles à l'œil nu. Son plus grand catalogue comprenait un peu plus de 1 000 étoiles. Hipparque classa vingt étoiles comme des étoiles de « première grandeur », le reste se répartissant sur les cinq autres degrés, jusqu'aux étoiles les plus faibles, celles de « sixième grandeur ».

L'invention de la lunette et le perfectionnement des méthodes d'observation du ciel ont conduit les astronomes à inventer une septième grandeur (aussi appelée **magnitude**), puis une huitième, etc. À des fins de précision, le besoin se fit un jour sentir d'établir des échelons basés sur autre chose que la simple perception de l'œil humain. C'est ainsi que, en 1856, l'astronome anglais Norman Pogson proposa de considérer qu'une différence de 5 magnitudes était équivalente à une différence d'éclat de 100 fois. Cela revient à dire qu'en passant d'une magnitude à l'autre l'éclat de l'étoile diminue (ou augmente) d'un facteur 2,512.

Ainsi, une étoile de magnitude 1 (« première grandeur ») est environ 2,5 fois plus brillante qu'une étoile de magnitude 2, et elle est 100 fois ($\approx 2,5^5$) plus brillante qu'une étoile de magnitude 6. On appelle **échelle logarithmique** une échelle de mesure de ce type⁵.

Plus la magnitude est élevée, moins l'étoile est brillante. Cela est directement attribuable au système des « grandeurs » de Hipparque. D'ailleurs, ce dernier ne faisait aucune distinction entre les étoiles du groupe des plus brillantes. Pourtant, il est facile d'observer que Sirius est plus brillante que Véga. On a

Quelques astres à l'échelle humaine

Lorsqu'il est question de distances astronomiques, l'être humain se sent vite dépassé par des nombres difficiles à se représenter. Il ne suffit pas de savoir combien on compte de kilomètres dans une unité astronomique ou dans une année-lumière pour se faire une idée. Bien qu'à force de les manipuler fréquemment ces nombres très élevés arrivent à avoir un sens pour qui les emploie, il est néanmoins possible de représenter les distances de certains astres sur une échelle dif-

férente. Par exemple, les distances présentées dans le tableau qui suit sont indiquées avec des unités courantes : centimètre, mètre et kilomètre. Pour ce faire, il a fallu diviser chaque distance réelle par 100 milliards. Le tableau montre facilement que l'orbite de Pluton est plusieurs fois plus grande que celle de la Terre. De la même façon, il nous indique à quel point l'étoile la plus proche de notre Système solaire est en réalité très éloignée de celui-ci.

Les astres les plus proches représentés sur une échelle de 1/100 milliards

Nom de l'astre ou du lieu céleste	Dimension approximative
Diamètre du Soleil	1,4 cm
Orbite de la Terre	1,5 m
Orbite de Jupiter	8 m
Orbite de Pluton	60 m
Proxima du Centaure	400 km
Étoile de Barnard	560 km
Sirius A	820 km

5. L'échelle logarithmique sans doute la plus connue est l'échelle de Richter qui mesure l'intensité ou la magnitude des séismes. Les échelons vont de 1 à 9 et l'augmentation d'une unité sur l'échelle de Richter représente une amplitude 10 fois plus grande.



donc dû, surtout avec le raffinement des techniques d'observation, accorder des magnitudes plus petites que 1, voire négatives, à certaines étoiles particulièrement brillantes dans le groupe des étoiles de « première grandeur ». Le Soleil, l'astre le plus brillant de notre ciel, a, dans cette échelle, une magnitude de $-26,8$!

Magnitude apparente et magnitude absolue

Le système de magnitude que nous venons de définir se rapporte à la magnitude **apparente**, laquelle ne tient compte que de l'éclat apparent des astres, c'est-à-dire qu'elle ne donne qu'une indication de leur éclat tel qu'on le perçoit sur Terre. Toutefois, comme nous l'avons expliqué plus tôt, les étoiles qui composent la sphère céleste sont toutes à des distances bien différentes de la Terre. Ainsi, une étoile qui nous apparaît très pâle est peut-être simplement plus éloignée de la Terre qu'une autre étoile qui nous semble plus brillante. Nous établirons donc la différence entre la magnitude apparente d'un astre et sa magnitude **absolue**.

Pour ce qui est de la magnitude apparente, les astronomes se servent aujourd'hui d'une relation mathématique pour l'établir. La magnitude apparente (m) est donc la mesure de la brillance d'une étoile liée à une échelle logarithmique. On peut connaître sa valeur à l'aide de l'équation suivante :

$$m = -2,5 \log(E/E_0)$$

où E est l'éclat de l'étoile (mesuré en lux) et E_0 l'éclat de Véga. Cette étoile, de la constellation de la Lyre, est l'étoile étalon, car sa magnitude est égale à 0.

Comme nous l'avons déjà mentionné, dans les meilleures conditions d'observation, nous pouvons voir à l'œil nu des étoiles dont la magnitude va jusqu'à 6. Avec le télescope de 5 mètres de l'observatoire du mont Palomar, en Californie, on peut atteindre la magnitude 24, soit la magnitude d'une étoile 15 millions de fois moins brillante qu'une autre de magnitude 6. Le télescope spatial Hubble, les télescopes géants Keck 1 et 2 des Américains et le VLT des Européens peuvent maintenant photographier des astres de magnitude apparente 30.

La magnitude absolue, quant à elle, informe sur la brillance intrinsèque de l'astre et élimine le facteur distance. Cela fait en sorte que nous pouvons vraiment comparer les étoiles entre elles, ce que ne permet pas la magnitude apparente. Les astronomes ont ainsi défini la magnitude absolue (M) comme la magnitude apparente qu'aurait une étoile si elle était placée à une distance de 10 parsecs de la Terre. C'est comme si nous



avons la possibilité de déplacer tous les astres sur une sphère céleste située à 10 parsecs de la Terre (figure 7.6). Le Soleil, par exemple, éloigné de cette façon à 10 parsecs de la Terre, aurait une magnitude de 4,8 (et non plus de $-26,8$).

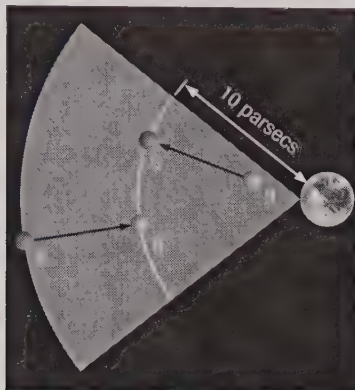


FIGURE 7.6

En plaçant les étoiles à une distance standard de 10 parsecs, nous obtenons une mesure de leur brillance intrinsèque. Ainsi, une étoile qui semblait moins brillante qu'une autre (magnitude apparente de 6 contre magnitude apparente de 3) se révélera en réalité plus brillante lorsqu'elles seront toutes les deux ramenées à 10 parsecs (magnitude absolue de 5 contre magnitude absolue de 6).

Il existe une relation mathématique entre la magnitude apparente (m), la magnitude absolue (M) et la distance d'une étoile (d) à la Terre. Cette relation peut servir pour mesurer certaines distances stellaires :

$$M = m + 5 - 5 \log d, \text{ où } d \text{ est exprimée en pc}$$

Le tableau 7.3 présente les magnitudes apparente et absolue des principaux objets du ciel et de certaines étoiles plus connues, et indique leur distance en parsecs et en années-lumière.

Les tableaux 7.6 et 7.7 des pages 262 et 263 comportent les magnitudes apparente et absolue des étoiles les plus proches de nous et des étoiles les plus brillantes de notre ciel.

La notion de magnitude n'est pas seulement liée aux longueurs du domaine visible des ondes électromagnétiques. Les astronomes évaluent la magnitude des astres à des longueurs d'onde couvrant tout le spectre électromagnétique. Certains astres peuvent donc être très brillants à une longueur d'onde en particulier mais faiblement brillants à une autre, et posséder ainsi plusieurs magnitudes distinctes. Parmi les magnitudes les plus courantes, mentionnons la magnitude ultraviolette, la



TABLEAU 7.3

Magnitude et distance de quelques astres

Astres	<i>m</i>	<i>M</i>	<i>d</i> (pc)	<i>d</i> (al)
Soleil	-26,8	4,8		
Pleine Lune	-12			
Vénus	Entre -3 et -4			
Sirius	-1,4	1,5	2,7	9
Arcturus	-0,1	-0,3	11	36
Véga	0	0,6	7,7	25
Bételgeuse	0,4	-5,1	132	430
Rigel	0,2	-6,7	236	770
Capella	0,1	-0,5	13	42
Polaris (étoile Polaire)	2,0	-3,6	132	430
Pluton	14			

magnitude infrarouge et la magnitude bolométrique, qui tient compte de l'ensemble de la puissance lumineuse émise par l'objet à toutes les longueurs d'onde.

7.4 Température et couleur des étoiles

Observez bien la figure 7.2 reproduite dans l'encart couleur. C'est une photo prise par un appareil photo pointé vers l'étoile Polaire, avec une durée d'exposition de 20 minutes. Sur une photo de ce genre, les étoiles apparaissent comme des traces lumineuses plutôt que comme des points en raison du déplacement apparent de la sphère céleste autour de l'axe de rotation de la Terre. Remarquez les couleurs des traces lumineuses des étoiles : certaines sont blanches, d'autres plutôt orangées, d'autres un peu plus bleutées... Ces couleurs, quoique peu prononcées, viennent du rayonnement émis par l'étoile et nous informent sur la température à la surface. En effet, les corps chauds émettent de la lumière dont la couleur (ou la longueur d'onde) varie avec la température. Cette lumière (ou ce rayonnement) n'est pas nécessairement visible. Ainsi, notre propre corps, qui a une température moyenne de 37 °C (ou 310 K), émet de la lumière infrarouge invisible. Le même type de rayonnement est produit par tous les objets qui nous entourent et qui sont à la température ambiante. Ce n'est qu'à partir d'une certaine température que les objets commencent à émettre de la lumière visible, en commençant par le rouge pour des températures de plusieurs centaines ou de quelques milliers de kelvins (pensons



à l'élément très chaud de la cuisinière ou à du métal en fusion), puis allant vers l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, etc., pour des températures de plusieurs milliers de kelvins.

Lorsqu'une étoile paraît bleutée ou orangée, cela ne signifie pas qu'elle n'émet que du rayonnement dont la longueur d'onde correspond au bleu ou à l'orangé. En fait, la couleur perçue résulte plutôt de l'addition de toutes les longueurs d'onde émises par l'étoile, allant du rouge au bleu, incluant le vert et le jaune. Alors, si un certain nombre de longueurs d'onde sont émises à la fois, comment fait-on pour mesurer avec précision la température d'une étoile ? Pour répondre à cette question, il faut connaître ce qu'on appelle le **rayonnement du corps noir**. Pour les physiciens, un corps noir est synonyme de radiateur parfait, soit un objet qui absorbe toute la lumière qui lui parvient et qui ne la réfléchit pas (d'où le nom de **corps noir**) ; il émet l'énergie ainsi emmagasinée sous forme d'un spectre continu. La seule lumière qu'un corps noir produit vient donc du corps noir lui-même. Elle ne dépend alors que de la température du corps noir. Paradoxalement, un corps noir peut être extrêmement brillant. Une étoile peut donc être considérée comme un corps noir très chaud, et les astronomes font cette approximation pour la plupart des astres qu'ils étudient.

Le graphique de la figure 7.7 illustre de quelle manière, pour trois températures de corps noir, l'intensité du rayonnement varie en fonction de la longueur d'onde. On peut y voir que le rayonnement s'étend autour d'une longueur d'onde émise avec plus d'intensité que les autres. C'est le pic d'émissivité. La couleur associée à la longueur d'onde du pic d'émissivité est celle qui contribuera le plus à la teinte de l'étoile. On peut observer sur la figure que, plus la température augmente, plus l'intensité augmente et plus le pic d'émissivité se déplace vers les courtes longueurs d'onde (vers le bleu). Les étoiles les plus chaudes sont donc bleues ; les plus froides sont rouges. Le Soleil, quant à lui, avec une température de surface de 5 800 K, est une étoile dont le pic d'émissivité est situé dans le vert (500 nm). Toutefois, il nous paraît blanc, car il émet avec suffisamment d'intensité toutes les autres couleurs. Notre œil perçoit ainsi de la lumière blanche⁶.

Il existe une relation entre la longueur d'onde (la couleur) du pic d'émissivité (λ_{pic}) et la température du corps noir. C'est la

6. Précisons que la lumière que nous recevons des étoiles « colorées », si elles étaient à la même distance que nous du Soleil, nous paraîtrait également blanche. Pour toutes les étoiles, l'intensité de chaque longueur d'onde émise est tellement élevée que l'étoile serait blanche à nos yeux. En d'autres mots, une étoile orangée sur la figure 7.2 de l'encart couleur ne créerait pas une lumière du jour orangée si cette étoile était notre Soleil.

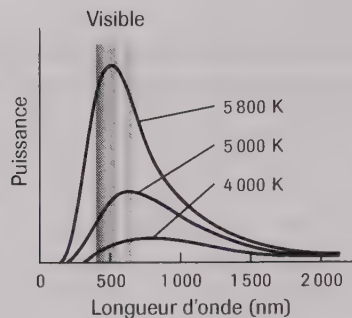


FIGURE 7.7

Le spectre de rayonnement du corps noir varie selon sa température. Plus celle-ci est élevée, plus le pic d'émissivité, qui représente le rayonnement le plus abondant, se déplace vers les courtes longueurs d'onde (vers le bleu).

loi de Wien, nommée en l'honneur du physicien allemand Wilhelm Wien (1864–1928) qui l'établit en 1893 :

$$\lambda_{\text{pic}} = 2,9 \times 10^{-3}/T$$

où λ_{pic} est en mètres et T en kelvins. Si l'on connaît λ_{pic} , on peut facilement calculer la température correspondante. Par exemple, si $\lambda_{\text{pic}} = 580 \text{ nm}$, alors $T = 2,9 \times 10^{-3}/580 \times 10^{-9} = 5\,000 \text{ K}$.

7.5 Classification des étoiles et diagramme H-R

L'observation d'un nombre de plus en plus grand d'étoiles a amené les astronomes à établir des classes ou des catégories d'étoiles en fonction de leurs caractéristiques communes. C'est ainsi que, de nos jours, les étoiles sont classées selon divers paramètres tels que la taille, la masse, la composition chimique, la température de surface ou la luminosité.

Classes spectrales

L'étude des spectres d'absorption des étoiles a donné naissance, à la fin du XIX^e siècle, à une façon de classer les étoiles en fonction de l'intensité des raies sur chacun des spectres. Chaque classe était désignée par une lettre majuscule. L'approfondissement des connaissances sur la relation entre le type de lumière émise par une étoile, sa température et l'intensité de ses raies spectrales a mené à l'adoption d'un système de **classes spectrales** (également connues sous le nom de **types**



spectraux) qui est encore largement utilisé aujourd'hui. Le tableau 7.4 présente les classes spectrales les plus connues. À chacune correspondent une température, des caractéristiques spectrales et une couleur particulières de l'étoile.

Les sept premières classes spectrales, aussi appelées **classes principales**, contiennent 99 % des étoiles et sont désignées par les lettres O, B, A, F, G, K et M. On peut mémoriser cette séquence ainsi : « Oh, Be A Fine Girl (Guy), Kiss Me ! ».

TABLEAU 7.4

Classes spectrales

Classe	Température (K)	Couleur	Raies spectrales les plus intenses
O	28 000–50 000	Bleu	Hélium ionisé, oxygène et azote.
B	10 000–28 000	Bleu-blanc	Hélium neutre, azote, oxygène et hydrogène.
A	7 500–10 000	Blanc	Hydrogène, calcium et traces de métaux.
F	6 000–7 500	Jaune-blanc	Calcium ionisé, hydrogène et traces de métaux.
G	5 000–6 000	Jaune	Calcium, hydrogène en baisse et métaux.
K	3 500–5 000	Orangé	Diminution du calcium et de l'hydrogène et intensification des raies métalliques.
M	2 000–3 500	Rouge	Présence de molécules non dissociées et oxyde métallique dont l'oxyde de titane (TiO).
C	1 900–5 400	Rouge-orangé	Carbone et cyanogène.
S	2 000–3 500	Rouge	Oxyde de carbone et de zirconium.

Il existe d'autres classes plus secondaires dont C (anciennes classes R et N groupées) et S, présentées dans le tableau. Notons que les intervalles de température pour ces deux types d'étoiles chevauchent ceux des classes K et M. C'est la composition chimique inhabituelle des étoiles de type C et S qui les distingue des types K et M.

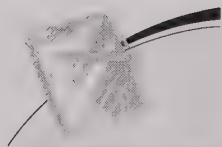
Les étoiles Wolf-Rayet (W) forment une autre classe spectrale très particulière. Elles ont été nommées en l'honneur des astronomes français qui les ont étudiées les premiers : Charles Wolf (1827–1918) et Georges Rayet (1839–1906). Ces étoiles sont extrêmement chaudes, massives et lumineuses, et elles sont entourées d'une enveloppe gazeuse en expansion rapide. Ce sont des étoiles très rares, tout comme les étoiles C et S.

Assez récemment, les astronomes ont ajouté à la liste des classes spectrales les classes L et T pour tenir compte d'une série de découvertes d'objets stellaires relativement froids dont la température ne dépasse pas 1 500 K. Ces objets sont également appelés **naines brunes** par les astronomes. Ce sont en quelque sorte des boules d'hydrogène de masse très faible, plutôt



difficiles à observer, car elles sont sombres. Elles sont considérées comme des étoiles ratées, car elles ne sont pas assez chaudes et massives pour être le siège de fusions nucléaires.

Dans le but d'affiner la précision de la température des étoiles d'une classe spectrale donnée, on a attribué dix divisions supplémentaires à chaque classe. Ces divisions sont notées de 0 à 9, la valeur 0 correspondant aux étoiles les plus chaudes, et 9 aux moins chaudes. Par exemple, le Soleil, qui est une étoile de classe spectrale G, est, de façon plus précise, une G2. Cela signifie qu'elle est un peu plus froide qu'une G1 et un peu plus chaude qu'une G3. Le type spectral suivant une G9 est une K0, et une étoile M0 vient immédiatement après une K9.



Le diagramme H-R

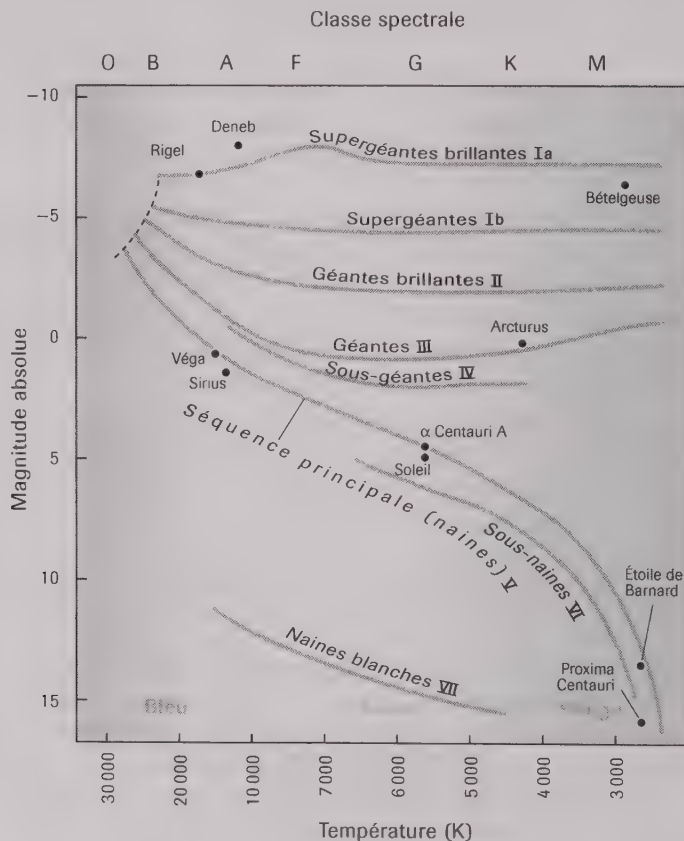
(voir page 286)

Diagramme H-R

Au début des années 1900, le Danois Ejnar Hertzsprung (1873–1967) et l'Américain Henry Norris Russell (1877–1957) ont indépendamment eu l'idée de mettre en relation la température de surface de nombreuses étoiles avec leur luminosité. Ils établirent un diagramme (figure 7.8), dit de **Hertzsprung-**

FIGURE 7.8

Sur le diagramme H-R, chaque étoile est placée selon sa magnitude absolue et sa classe spectrale (donc sa température et sa couleur). Les régions correspondant aux classes de luminosité sont définies par des lignes.





Russell ou **diagramme H-R**, où la classe spectrale (ou l'une ou l'autre information qui lui est liée, comme la température ou la couleur) est représentée sur l'axe vertical et où la luminosité, souvent représentée par la magnitude absolue, est figurée sur l'axe horizontal.

Le diagramme H-R est rapidement devenu un instrument très puissant pour la compréhension de l'évolution des étoiles, voire celle des amas d'étoiles et des galaxies. L'aspect le plus étonnant de ce diagramme est le fait que les étoiles n'y sont pas dispersées de façon aléatoire. La plupart des étoiles (c'est le cas du Soleil) se trouvent dans une zone bien délimitée appelée **séquence principale**. Dans cette zone, les étoiles de grande taille sont plus chaudes et plus lumineuses et celles de petite taille, plus froides et plus pâles. En-dehors de la séquence principale, c'est la superficie des étoiles (et donc leur taille) qui conditionne leur luminosité. Les géantes rouges, par exemple, sont deux fois moins chaudes que le Soleil, mais peuvent être entre cent et dix mille fois plus lumineuses. On les trouve au-dessus de la séquence principale. Les naines blanches, quant à elles, bien qu'elles soient très pâles, sont beaucoup plus chaudes que le Soleil, alors que leur taille ne dépasse guère celle d'une planète.

Le système de classes spectrales que nous avons étudié plus tôt ne permet pas de rendre compte des différences de luminosité (et donc de taille) entre les étoiles. Aussi les étoiles sont-elles groupées en huit classes de luminosité, désignées par des chiffres romains (que l'on a d'ailleurs pu remarquer dans le diagramme H-R de la figure 7.8) et présentées dans le tableau 7.5. Les étoiles de la séquence principale (souvent appelées **naines de la séquence principale**, à ne pas confondre avec les naines blanches, une autre classe d'étoiles) sont rangées dans la classe de luminosité V. Pour classer une étoile, on inscrit ce chiffre tout de suite après sa classe spectrale. Selon cette nomenclature, le Soleil est une étoile G2V.

Avant que les astronomes arrivent à mesurer directement le diamètre de quelques étoiles, c'est en étudiant leur luminosité qu'ils ont fait la distinction entre les géantes et les naines. Prenons, par exemple, le cas de Capella, dans la constellation du Cocher, qui est une étoile G2, c'est-à-dire une étoile de même température de surface que le Soleil. Chacune de ces étoiles émet donc la même quantité de lumière par centimètre carré de surface. Toutefois, Capella est plus lumineuse que le Soleil, et cette différence ne peut être expliquée que par le fait que sa surface (donc son volume) est beaucoup plus grande que celle du Soleil. En réalité, le rayon de Capella est 11,5 fois celui du Soleil, et l'étoile est classée G2III.

TABLEAU 7.5

Classes de luminosité

Classe de luminosité	Type d'étoile
Ia	Supergéantes brillantes
Ib	Supergéantes
II	Géantes brillantes
III	Géantes
IV	Sous-géantes
V	Naines de la séquence principale
VI	Sous-naines
VII	Naines blanches



Les tableaux 7.6, 7.7 et 7.8 comportent certaines caractéristiques des étoiles les plus proches du Soleil, des étoiles les plus brillantes depuis la Terre et des principales étoiles géantes et supergéantes de notre ciel. Plusieurs de ces étoiles peuvent être repérées à l'aide d'un cherche-étoiles.

TABLEAU 7.6

Principales étoiles les plus proches de nous

Nom	<i>m</i>	<i>M</i>	Type	Distance (en al)	Constellation
Soleil	-26,8	4,8	G2 V		
Proxima du Centaure	11,0	15,5	M5 V	4,22	Centaure
Alpha du Centaure A	0,0	4,3	G2 V	4,40	Centaure
Alpha du Centaure B	1,4	5,7	K1 V	4,40	Centaure
Étoile de Barnard	9,3	13,2	M5 V	5,94	Serpentaire
Wolf 359	13,5	16,6	M6 V	7,79	Lion
Lalande 21185	7,5	10,5	M2 V	8,31	Grande Ourse
Sirius A	-1,4	1,5	A1 V	8,60	Grand Chien
Luyten 726-8A	12,6	15,4	M6 V	8,70	Baleine
Luyten 726-8B	13,0	15,8	M6 V	8,70	Baleine
Ross 154	10,4	13	M4 V	9,70	Sagittaire
Ross 248	12,3	14,8	M6 V	10,30	Andromède
Epsilon Eridani	3,7	6,2	K2 V	10,50	Éridan
Ross 128	11,1	13,5	M5 V	10,89	Vierge
Luyten 789-6	12,3	14,6	M6 V	11,20	Verseau
61 Cygni A	5,2	7,5	K5 V	11,36	Cygne
61 Cygni B	6,0	8,3	K7 V	11,43	Cygne

Source : Catalogue Hipparcos et *Observer's Handbook* 2002.

7.6 Étoiles binaires (ou doubles)

Il arrive, en regardant une étoile attentivement à l'œil nu ou à l'aide d'un télescope, qu'on s'aperçoive qu'il y a, en réalité, deux étoiles ou plus. On appelle **étoiles multiples** les systèmes composés de plus de deux étoiles et **étoiles doubles** ou **étoiles binaires** les systèmes comportant deux étoiles. Les étoiles multiples sont assez rares, ce qui n'est pas le cas avec les systèmes binaires, qui sont très communs. Au total, plus de la moitié des étoiles que l'on voit dans le ciel sont en fait des étoiles binaires ou multiples. Les astronomes estiment que près des deux tiers de toutes les étoiles font partie d'un système binaire ou multiple. Le Soleil, qui compte parmi les étoiles seules, est donc un cas plutôt rare.



TABLEAU 7.7

Principales étoiles les plus brillantes du ciel

Nom	<i>m</i>	<i>M</i>	Type	Distance (en al)	Constellation
Soleil	-26,8	4,8	G2 V		
Sirius	-1,4	1,5	A1 V	9	Grand Chien
Canopus	-0,6	-5,5	F0 Ib	310	Carène
Arcturus	-0,1	-0,3	K2 III	36	Bouvier
Alpha du Centaure A	0	4,3	G2 V	4,4	Centaure
Véga	0	0,6	A0 V	25	Lyre
Capella	0,1	-0,5	G2 III	42	Cocher
Rigel	0,2	-6,7	B8 Ia	770	Orion
Procyon	0,4	2,7	F5 IV-V	11	Petit Chien
Bételgeuse	0,4	-5,1	M2 Ia	430	Orion
Achernar	0,5	-3,0	B3 V	144	Éridan
Hadar	0,6	-5,4	B1 III	530	Centaure
Altaïr	0,8	2,2	A7 V	17	Aigle
Acrux	0,8	-4,2	B1 IV	320	Croix du Sud
Aldébaran	0,9	-0,6	K5 III	65	Taureau
Spica (Épi)	1,0	-3,6	B1 V	260	Vierge
Antarès	1,1	-5,3	M1 Ib	600	Scorpion
Pollux	1,2	1,1	K0 III	34	Gémeaux
Fomalhaut	1,2	1,7	A3 V	25	Poisson austral
Mimosa	1,25	-3,9	B0,5 III	350	Croix du Sud
Deneb	1,3	-8,7	A2 Ia	3 000	Cygne
Régulus	1,4	-0,5	B7 V	78	Lion
Adhara	1,5	-4,1	B2 II	430	Grand Chien
Castor	1,6	0,6	A1V	52	Gémeaux
Gacrux	1,6	-0,6	M3,5 III	88	Croix du Sud
Shaula	1,6	-5,1	B2 IV	700	Scorpion
Bellatrix	1,6	-2,7	B2 III	240	Orion
Elnath	1,7	-1,4	B7 III	130	Taureau
Miaplacidus	1,7	-1,0	A2 III	111	Carène
Alnilam	1,7	-6,4	B0 Ia	1 300	Orion

Source : Catalogue Hipparcos et *Observer's Handbook 2002*.

Qu'entend-on par **étoile binaire** ? Une étoile binaire (ou système binaire) est composée de deux étoiles qui sont liées par leurs forces d'attraction gravitationnelle et qui évoluent sur des orbites elliptiques ou circulaires autour de leur centre de gravité orbital commun. Dans le ciel, il faut faire attention de ne pas confondre les étoiles binaires avec des couples optiques (ou étoiles doubles optiques), lesquels sont formés de deux



TABLEAU 78

Principales étoiles géantes et supergéantes

Nom	<i>m</i>	<i>M</i>	Type	Distance (en al)	Rayon (Soleil = 1)	Constellation
Arcturus	-0,1	-0,3	K2 III	36	23	Bouvier
Capella	0,1	-0,5	G2 III	42	12	Cocher
Bételgeuse	0,4	-5,1	M2 Ia	430	650	Orion
Aldébaran	0,9	-0,6	K5 III	65	34	Taureau
Antarès	1,1	-5,3	M1 Ib	600	700	Scorpion

Source : Catalogue Hipparcos et *Observer's Handbook* 2002.

étoiles qui semblent être très rapprochées l'une de l'autre, mais qui, en réalité, sont très éloignées. Les composantes d'une étoile double optique ont des mouvements complètement indépendants. Leur proximité apparente est plus le résultat d'une illusion d'optique attribuable au hasard. Par exemple, Mizar et Alcor, dans la « queue » de la Grande Ourse, sont considérées comme un couple optique. Elles sont séparées par un angle de 11,8', ce qui en fait un excellent test d'acuité visuelle. En effet, si vous pouvez distinguer ces deux étoiles à l'œil nu, vous avez de bons yeux !

Les systèmes d'étoiles multiples, quant à eux, peuvent être composés de trois, de quatre et même de plus d'étoiles liées entre elles par leur attraction gravitationnelle.

Les astronomes classent les étoiles binaires en plusieurs catégories. Celles-ci peuvent être définies de deux façons, soit en fonction du degré de séparation des deux étoiles formant un système binaire ou d'après la méthode d'observation qui a permis d'établir leur binarité. Souvent, un système binaire donné peut entrer dans plus d'une catégorie à la fois selon ce qu'il est possible d'observer. La liste des catégories que nous présentons n'est pas exhaustive, mais elle montre le genre de techniques dont se servent les astronomes pour bien reconnaître et comprendre les étoiles binaires. D'ailleurs, de nouvelles catégories de binaires sont introduites dans la classification au même rythme que les techniques d'observation se raffinent. L'étude des étoiles binaires est importante pour les astronomes, notamment sur le plan de la détermination de la masse des étoiles (voir l'encadré p. 266).

Binaires visuelles

Si, à l'aide d'un grand télescope, on peut distinguer les deux étoiles d'un système binaire, on considère alors que ce sont



des étoiles binaires visuelles (aussi appelées **étoiles doubles**). En général, ces étoiles sont séparées par de grandes distances et tournent très lentement l'une autour de l'autre. Il faut beaucoup de patience pour étudier leur mouvement, car leurs périodes de rotation sont grandes. Les périodes caractéristiques de ces systèmes binaires peuvent aller jusqu'à plusieurs siècles et même beaucoup plus, selon la masse de leurs deux composantes et leur séparation.

Mizar, qui forme un couple optique avec Alcor, est elle-même une étoile multiple. Elle a longtemps été considérée comme une étoile binaire dont les deux composantes principales sont seulement perceptibles aux jumelles puissantes ou au petit télescope. Celles-ci ne sont séparées que par 14 secondes d'arc. Sur le plan historique, Mizar a une certaine importance : c'est la première étoile binaire réelle à avoir été observée, en 1650. Sa découverte est attribuée à l'Italien Giovanni Riccioli (1598–1671), quoiqu'il se puisse qu'elle ait été observée quelques années plus tôt. Depuis, les astronomes ont découvert que ce système est beaucoup plus complexe qu'il n'y paraît de prime abord, les deux composantes de Mizar étant elles-mêmes des étoiles binaires. Mizar est donc un système multiple de quatre étoiles. Le tableau 7.9 présente quelques binaires visuelles brillantes.

TABLEAU 7.9

Binaires visuelles intéressantes à observer avec des jumelles ou un télescope

Nom	<i>m</i> (A)	<i>m</i> (B)	Séparation angulaire	Constellation	Remarque
α Cen	0	1,3	12"	Centaure	
β Cyg (Albireo)	3,1	5,1	34,3"	Cygne	Très jolie ; bleue et or
α Sco (Antarès)	1	5,4	2,6"	Scorpion	Rouge et verte
Alcor et Mizar	2,2	3,9	11,8'	Grande Ourse	Double ; visible à l'œil nu
ζ Uma (Mizar)	2,2	3,9	14,4"	Grande Ourse	
α Leo (Régulus)	1,3	7,6	177"	Lion	
β Ori (Rigel)	0,2	7	9,5"	Orion	
γ And	2,1	4,8	9,8"	Andromède	Très jolie ; orange et bleue
γ Leo	2,6	3,8	4,4"	Lion	Jolie

Source : Catalogue Hipparcos et *Observer's handbook* 2002.

Binaires à éclipses

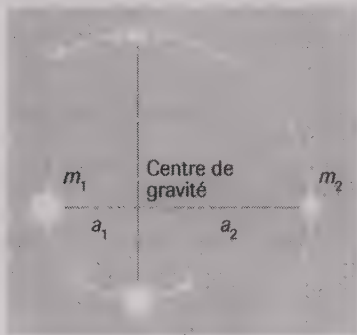
Les binaires à éclipses sont des systèmes dont le plan de l'orbite se trouve dans la direction de la Terre et dont l'une des composantes passe devant l'autre de façon périodique. Cette



Les binaires au service du calcul des masses

Lorsque nous étudierons plus loin les étapes de la vie des étoiles (p. 274), nous apprendrons comment la masse initiale d'une étoile détermine son destin. En fait, on ne peut vraiment comprendre la structure et l'évolution d'une étoile que si l'on en connaît la masse. La meilleure façon de connaître la masse d'un objet est de mesurer son influence gravitationnelle sur un autre objet.

C'est ce qui a permis, dans le Système solaire, de mesurer la masse des planètes et de leurs lunes, et même de découvrir de nouvelles étoiles, le fait que tant d'entre elles fassent partie d'un système binaire constitue une véritable chance pour les astronomes qui, en étudiant leur mouvement, peuvent mesurer les effets gravitationnels de l'une sur l'autre et ainsi calculer leur masse.



Le calcul de la masse des deux étoiles du système s'effectue en utilisant

la troisième loi de Kepler généralisée :

$$T^2 = K \frac{a^3}{M}$$

où T est la période de révolution des étoiles autour de leur centre de gravité commun, mesurée par observation ;

K est une constante ;

a est la distance entre les deux étoiles, équivalant à la séparation des étoiles ;

M est la masse du système, que l'on cherche.

Puisqu'on peut mesurer a (égale à la somme des demi-grands axes des orbites des étoiles autour du centre de gravité) et T , on isole M dans l'équation de Kepler pour obtenir la relation $M = K \frac{a^3}{T^2}$ qui nous donne

directement la masse totale des deux étoiles.

La détermination des masses individuelles de chaque étoile est possible, sachant que la masse d'une étoile est inversement proportionnelle à sa distance du centre de gravité. En d'autres mots, la plus massive des deux étoiles est celle qui évolue le plus près du centre de gravité.

Le même genre de calcul peut être effectué pour tout système double, que ce soit un système comportant des étoiles, des planètes ou des astéroïdes.

Le spectre global du système, les raies caractéristiques propres à chaque étoile. Dans d'autres cas, l'analyse spectroscopique révèle la vitesse radiale des étoiles, c'est-à-dire qu'elle nous permet de savoir à quel rythme une étoile s'éloigne et se rapproche de nous. Cela fait en sorte que l'on peut déterminer les éléments de l'orbite des composantes du système.

La première binaire à avoir été découverte par la spectroscopie est Mizar, en 1890. La période des binaires spectroscopiques est beaucoup plus petite que la période des binaires visuelles, en raison de la distance plus courte entre les étoiles du système. Ainsi, leur période moyenne est inférieure à 10 jours.

occultation engendre des variations de brillance du système dont la fréquence et l'intensité donnent de l'information sur les étoiles qui composent le système. La figure 7.10 (p. 270) montre l'allure typique de la courbe de lumière observée pour une binaire à éclipses. L'étoile Algol, dans la constellation de Persée, passe ainsi de la magnitude 2 à 3 sur une période de 2,9 jours. Celle-ci, comme toutes les binaires à éclipses, est également considérée comme une étoile dite **variable à éclipses**, que nous étudierons plus loin dans ce chapitre.

Binaires spectroscopiques

Les étoiles binaires spectroscopiques sont des systèmes dont les étoiles sont trop rapprochées (ou serrées) pour être séparées visuellement. On a alors recours à la spectroscopie, qui consiste à faire l'analyse du spectre du système d'étoiles. Étant donné que deux étoiles ne sont jamais tout à fait identiques, on peut discerner, dans le



Notons que certaines binaires visuelles et toutes les binaires à éclipses sont également des binaires spectroscopiques.

Binaires serrées

L'appellation **binaires serrées** renvoie aux étoiles binaires dont la séparation est inférieure à 1 UA, donc lorsque leur période orbitale est comprise entre quelques heures et quelques années. Les étoiles qui constituent ces systèmes doubles sont souvent suffisamment rapprochées pour qu'il y ait transfert de masse d'une étoile à l'autre. Lorsque cela se produit, c'est l'étoile la plus massive qui attire la matière de l'autre, surtout si cette dernière est moins dense.

Ce phénomène peut être décrit brièvement ainsi : lorsque les deux étoiles sont très proches l'une de l'autre, les effets de marée les déforment ; elles ressemblent alors à une poire. L'allongement est plus ou moins marqué selon la densité des étoiles et la répartition des masses entre les deux composantes du système. Pour des étoiles serrées séparées par quelque 5 millions de kilomètres, par exemple, la déformation est telle que le rapport du plus grand diamètre de l'étoile au plus petit peut atteindre 10/6. La déformation des étoiles fournit des renseignements sur la répartition des masses en profondeur dans l'étoile.

La catégorie des étoiles serrées comprend quelques sous-catégories établies selon le degré d'interaction gravitationnelle entre les deux étoiles de la binaire : les étoiles détachées, semi-détachées ou en contact. La classification de ces étoiles serrées repose sur les propriétés d'une surface imaginaire autour de chaque étoile qui représente la zone dans laquelle la gravitation de chacune des deux étoiles domine (figure 7.9). Ces surfaces portent le nom de **lobes de Roche**, et le point de contact entre les deux lobes constitue le **point de Lagrange**. Au point de Lagrange, l'attraction gravitationnelle exercée par l'une des deux étoiles est exactement égale à l'attraction gravitationnelle exercée par l'autre. Selon que l'une ou l'autre des étoiles, ou les deux, remplit entièrement le lobe de Roche⁷, on est en présence d'étoiles détachées, semi-détachées ou en contact.

La plupart des binaires serrées évoluent sur des orbites synchrones et presque circulaires très stables. L'étude de l'évolution de ces étoiles est très importante pour notre compréhension des étoiles variables explosives, des novæ et des supernovæ, dont il est question dans la section 7.7.

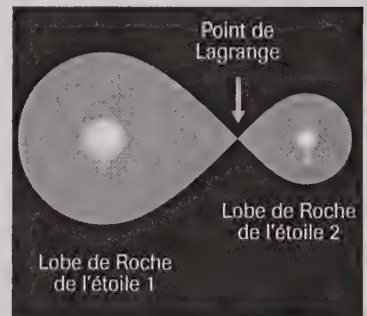


FIGURE 7.9

La zone dans laquelle la gravitation de chacune des deux étoiles domine s'appelle lobe de Roche. Les deux lobes de Roche se touchent en un endroit que l'on nomme point de Lagrange.

7. Une étoile peut remplir son lobe de Roche pendant son passage au stade d'étoile géante vers la fin de son évolution. Les étapes de la vie d'une étoile font l'objet de la section 7.8.



Le tableau 7.10 illustre de façon très schématique l'aspect des différents types d'étoiles serrées. Un exemple d'étoile connue présentant cette configuration est donné pour chaque schéma.

TABLEAU 7.10

Types d'étoiles serrées

Étoile détachée

Période de 0,6 à 4,1 jours

Exemple : β Aurigae



Étoile semi-détachée

Période de 1,4 à 8,8 jours

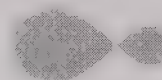
Exemple : Algol



Étoile en contact

Période de 4 à 13 jours

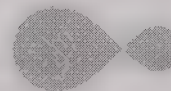
Exemple : β Lyrae



Étoile en contact

Période de 0,6 à 6,8 jours

Exemple : W Ursae Majoris



7.7 Étoiles variables

La catégorie des étoiles variables comprend toute étoile dont l'éclat varie avec le temps, de façon périodique ou non. En réalité, on pourrait dire que toute étoile est variable puisque sa luminosité subit de grands changements au cours de son évolution. Toutefois, on restreint le qualificatif de **variable** aux étoiles dont l'éclat varie sur des périodes relativement courtes, c'est-à-dire allant de la seconde à quelques années. Ces variations d'éclat vont du millième de magnitude à vingt magnitudes. L'étude des étoiles variables est très importante, car elle fournit aux astronomes de l'information sur certaines caractéristiques stellaires dont la masse, la taille, la luminosité, la température, la structure interne et externe, la composition, etc. Elle contribue également à notre compréhension de l'évolution d'une étoile dans le diagramme H-R.

Au cours des dernières décennies, la liste des étoiles variables connues a considérablement augmenté. À ce jour, plus de 30 000 étoiles variables sont cataloguées, et des milliers d'autres sont en voie de l'être. L'apport des astronomes amateurs



est particulièrement utile lorsqu'il s'agit d'identifier des étoiles variables et de mesurer leur période. En effet, l'American Association of Variable Star Observer (AAVSO) invite officiellement les astronomes amateurs à leur faire parvenir les résultats de leurs observations d'étoiles variables. Cela permet aux scientifiques de consacrer leur temps d'observation à des phénomènes pour lesquels de petits télescopes conviennent moins.

L'accumulation de données sur différents types d'étoiles variables et la compréhension toujours meilleure des mécanismes derrière le phénomène de variabilité a entraîné les astronomes à changer plusieurs fois leur façon de classer les étoiles découvertes. La liste complète des étoiles variables de même que leur classification figurent dans le *General Catalogue of Variable Stars* (GCVS). Dans cette classification, on trouve les catégories suivantes :

- variables par rotation,
- variables à éclipses,
- variables pulsantes,
- variables éruptives,
- variables cataclysmiques.

Les deux premières catégories sont des variables extrinsèques et les trois autres des variables intrinsèques. Dans ce dernier cas, le changement de luminosité est attribuable à des mécanismes physiques à l'intérieur de l'étoile, ce qui n'est pas le cas des variables extrinsèques. Voyons chaque type d'étoiles variables de façon plus détaillée.

Variables par rotation

Les variables par rotation sont des étoiles dont la forme n'est pas tout à fait sphérique, mais plutôt ellipsoïdale, ou dont la luminosité de surface n'est pas uniforme, en raison de la présence de taches plus sombres ou plus claires sur leur photosphère. Leur éclat varie donc en fonction de la rotation de l'étoile par rapport à l'observateur. Les variables par rotation sont souvent des systèmes binaires.

Variables à éclipses

Une variable à éclipses, également appelée **binaire à éclipses**, est une étoile dont les variations de luminosité sont causées par la révolution sur une orbite commune d'une étoile sœur qui l'éclipse périodiquement. La façon de montrer qu'une étoile variable est une variable à éclipses est de tracer sa courbe de lumière. Les figures 7.10 et 7.11 en sont des exemples. L'analyse de ces courbes permet d'obtenir des renseignements sur

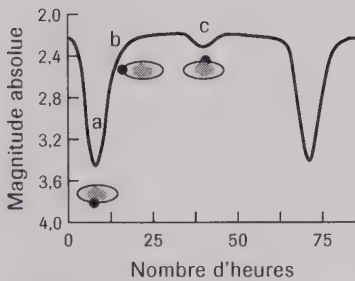


FIGURE 7.10

Courbe de lumière d'une variable à éclipses du type Algol

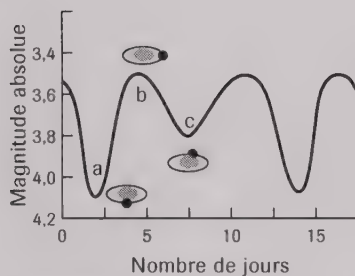


FIGURE 7.11

Courbe de lumière d'une variable à éclipses du type β de la Lyre

chacune des composantes du système telles que la forme de leur orbite et leur taille respective. Selon que l'étoile la plus grosse est la plus brillante ou non, les courbes de lumière prendront des formes différentes. Les astronomes ont ainsi défini des sous-groupes d'étoiles variables à éclipses dont le type Algol et le type β de la Lyre, du nom de deux étoiles présentant des courbes de lumière caractéristiques.

Type Algol (étoile β de Persée)

Les variables du type Algol sont des étoiles dont la courbe de lumière est caractérisée par un minimum de luminosité bien marqué (voir en a dans la figure 7.10) et un affaiblissement secondaire (voir en c). La plupart du temps, les deux étoiles sont suffisamment éloignées l'une de l'autre pour qu'on les voie toutes les deux (b). L'éclat du système est alors égal à la somme de l'éclat des deux étoiles. La variation d'éclat de ce type d'étoiles variables suit une période de 1 à 10 jours environ.

Type β de la Lyre

Les variables du type β de la Lyre sont des étoiles qui sont séparées par une distance de l'ordre de leur rayon. Elles sont donc très rapprochées l'une de l'autre et les étoiles de cette catégorie ont une forme ellipsoïdale attribuable à la forte attraction gravitationnelle réciproque. Leur période est de quelques jours. Un cycle présente deux maximums égaux intercalés d'un petit et d'un grand minimum (figure 7.11).

Variables pulsantes

Les variables pulsantes sont des étoiles dont les couches extérieures se contractent ou enflent de façon périodique, ce qui se traduit par une variation cyclique de leur luminosité. Le processus à l'origine de cette « pulsation » est lié aux phénomènes se produisant dans les étoiles. Tout au long de la vie d'une étoile, la force gravitationnelle tend à la contracter, engendrant ainsi une augmentation de la pression et de la température au cœur de l'étoile. Cela enclenche (ou entretient) la réaction de fusion nucléaire à l'origine de l'énergie qu'émet l'étoile. La puissance de ces réactions a tendance à faire gonfler les couches externes de l'étoile. Les gaz constituant les couches externes en expansion se refroidissent et se contractent à nouveau, ce qui fait recommencer le processus qui peut ainsi se répéter plusieurs fois. Tant qu'il n'y a pas d'équilibre entre les deux phénomènes, on observera des oscillations dans l'éclat de l'étoile.



Le groupe des variables pulsantes comprend une douzaine de sous-catégories. Cependant, le plus souvent, ce groupe est divisé en pulsantes à courte période et en pulsantes à longue période. Les étoiles variables pulsantes à longue période ont un cycle qui peut aller de 100 à 1 000 jours. Elles sont généralement des géantes rouges de classe spectrale M, C ou S. Par exemple, Mira, dans la constellation de la Baleine, est une étoile de ce type. Sa période est en moyenne de 330 jours et sa magnitude apparente peut passer de 2 à 10, ce qui fait qu'elle disparaît de façon cyclique du ciel visible à l'œil nu. Elle a probablement été la première étoile pulsante à avoir été découverte, ses variations d'éclat ayant été observées en 1596. Mira a donné son nom au groupe d'étoiles variables pulsantes possédant les plus longues périodes et les plus grands écarts de magnitude. Ce sont les étoiles de type Mira.

La figure 7.12 illustre la courbe de lumière typique d'une variable pulsante à longue période.

Les variables pulsantes à courte période présentent des variations de luminosité assez rapides, avec des périodes de 1 à 100 jours environ. C'est dans cette catégorie qu'on classe les céphéides, bien connues en raison du rôle important qu'elles jouent dans la détermination de distances d'objets lointains (voir la section 7.1). Elles ont des périodes allant de 2 à 70 jours et présentent des variations de brillance qui vont de 0,4 à 1,8 magnitude.

Ces étoiles sont en général des supergéantes brillantes (Ia) ou supergéantes (Ib) de classe spectrale F5 à G5. Leur température de surface est donc proche de celle du Soleil, mais étant donné leur très grande taille, elles sont plusieurs fois plus lumineuses que ce dernier : on peut ainsi les observer à des distances extragalactiques. Les astronomes reconnaissent les céphéides de loin en raison de leur relation période-luminosité très caractéristique. Cette relation, établie en 1912 par Henrietta Leavitt (1868–1921), indique que la luminosité absolue de ces étoiles augmente avec leur période. Ainsi, les étoiles les plus lentes sont également les plus lumineuses.

La figure 7.13 montre la courbe de lumière typique d'une céphéide à courte période.

Variables éruptives

Les étoiles variables éruptives sont des étoiles dont l'éclat varie de façon tout à fait imprévisible en raison de mécanismes très violents dans leur chromosphère et leur couronne. Les variations d'éclat importantes sont souvent accompagnées d'éjections

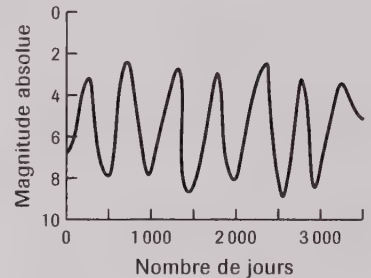


FIGURE 7.12

Courbe de lumière d'une variable pulsante à longue période

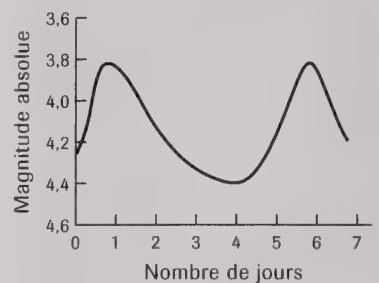


FIGURE 7.13

Courbe de lumière d'une céphéide variable



massives de matière et de gaz sous forme de vent stellaire. On trouve également dans cette catégorie de nombreuses étoiles variables irrégulières.

Variables cataclysmiques

Les variables cataclysmiques comprennent toutes les étoiles qui deviennent subitement très lumineuses à la suite d'explosions attribuables à des réactions thermonucléaires dans leurs couches superficielles (c'est le cas des novæ) ou dans leurs couches profondes (c'est le cas des supernovæ). La variation de leur luminosité peut atteindre 20 magnitudes ; cela signifie qu'elles peuvent devenir un milliard de fois plus brillantes que le Soleil. Dans le ciel nocturne, ces étoiles apparaissent parfois comme de nouvelles étoiles ou des étoiles explosives.

Novæ

Le processus donnant naissance à une nova se produit à l'intérieur d'un système d'étoiles binaires serrées en contact de courte période (quelques heures). Dans une galaxie de taille moyenne, il se produit probablement environ 25 novæ par année. La distance entre les deux astres du système est de l'ordre de un rayon stellaire. L'une des deux étoiles est une naine blanche et l'autre une étoile de la séquence principale en passe de devenir une géante rouge. À un certain point de son expansion, l'étoile massive remplit complètement son lobe de Roche et le processus de transfert de matière vers le lobe de la plus petite étoile s'amorce (figure 7.14). La géante perd une partie de sa masse par l'intermédiaire du point de Lagrange au profit de la naine blanche. Cette matière forme un anneau (ou disque d'accrétion) autour de la naine avant de tomber en spirale sur la surface de l'étoile. En s'accumulant ainsi à la surface, la nouvelle matière provoque une augmentation considérable de la température de surface qui peut atteindre 20 millions de kelvins, température suffisante pour déclencher des réactions thermonucléaires très intenses qui provoqueront l'explosion

FIGURE 7.14

Dans certains systèmes binaires, on peut assister à un transfert de matière d'une étoile en fin d'évolution vers une naine blanche.





des couches externes de l'étoile. À la suite de l'expulsion d'une partie des gaz du système, les réactions thermonucléaires cessent. Dans de nombreux cas, le processus entier peut recommencer ainsi un certain nombre de fois, au fur et à mesure que l'étoile géante fournit du « combustible » à la naine. Cela crée une nova que l'on dit **récurrente**.

La figure 7.15 présente la variation typique de l'éclat d'une nova.

Supernovæ

Une supernova est un événement aussi spectaculaire qu'il est rare. On estime qu'il se produit une ou deux supernovæ par siècle dans une galaxie de taille moyenne. Dans notre Galaxie, un nombre important de novæ et de supernovæ ne sont pas observées, en raison de l'absorption de leur lumière par la poussière interstellaire. Toutefois, le nombre de supernovæ qui sont découvertes dans d'autres galaxies dépasse la centaine par année. On estime qu'une supernova par seconde explose dans l'Univers observable. La nébuleuse du Crabe (figure 7.16) est le reste d'une supernova que les Chinois ont consignée dans leurs annales en 1054. Tycho Brahé en a observé une autre en 1572, dans la constellation de Cassiopée. Elle atteignit -4 de magnitude, ce qui la rendait aussi brillante que Vénus dans le ciel. Même Kepler en a découvert une, en 1604, dans la constellation du Serpentaire. Elle avait atteint $-2,5$ de magnitude et fut visible durant 14 mois dans le ciel.

Dans la nuit du 23 au 24 février 1987, Ian Shelton, Canadien travaillant à l'observatoire de l'Université de Toronto, situé à Las Campanas, au Chili, photographia accidentellement une supernova (figure 7.17). Celle-ci est apparue dans le Grand Nuage de Magellan, petite galaxie irrégulière visible de l'hémisphère Sud et gravitant autour de notre Galaxie à environ 170 000 al. On a nommé la supernova **SN 1987A**, le **A** signifiant que c'était la première supernova de l'année. Cette découverte a été fort remarquée parce que c'était la première supernova visible à l'œil nu depuis celle qui avait été étudiée par Kepler en 1604.

Les astronomes classent les supernovæ en catégories de type Ia, Ib et Ic, et de type II. Nous limitons ici notre étude aux supernovæ de type Ia et II. Les supernovæ de type Ia sont les plus lumineuses des supernovæ. Elles sont causées par un processus semblable à celui qui produit une nova, mais beaucoup plus violent, puisqu'il fait exploser les couches profondes de la naine blanche, ce qui entraîne sa destruction. Les supernovæ de type II se produisent pendant la phase explosive d'étoiles au

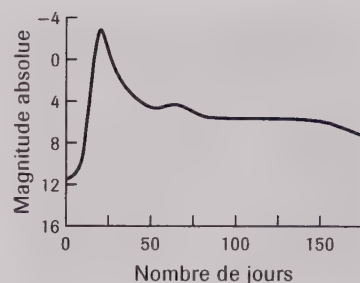


FIGURE 7.15

Courbe de lumière d'une nova



FIGURE 7.16

La nébuleuse du Crabe constitue ce qui reste d'une supernova que les Chinois ont remarquée il y a près de 1 000 ans. 📷

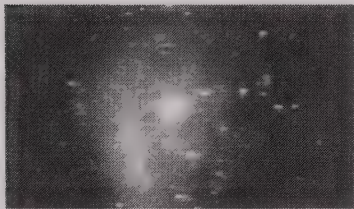
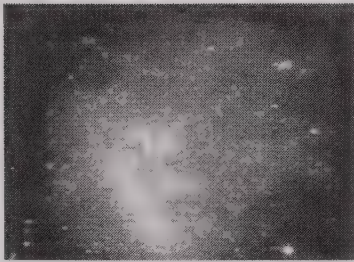


FIGURE 7.17

La supernova SN 1987A est la tache très lumineuse sur la photo du bas.

terme de leur évolution. Cette étape de la vie d'une étoile est décrite dans la section suivante. Contrairement aux supernovæ de type Ia, l'explosion se produit même si l'étoile n'a pas de compagnon. Dans les deux cas, toutefois, ces étoiles éjectent en explosant une énorme quantité de matière qui se dilate rapidement dans l'espace environnant. C'est ce qui leur donne l'aspect filamenteux observable sur la photo de la nébuleuse du Crabe.

7.8 Naissance, vie et mort d'une étoile

Quand le Soleil aura-t-il terminé de brûler son hydrogène ? Que lui arrivera-t-il ensuite ? Deviendra-t-il un trou noir ? Comment s'est-il formé au départ ? En quoi son destin est-il similaire ou non à celui des étoiles de son voisinage dans notre Galaxie ? Comment un objet stellaire en formation devient-il une étoile ratée ? Les questions liées à la vie des étoiles sont nombreuses, mais le portrait général de leur évolution est relativement clair. En effet, on arrive aujourd'hui à décrire avec assez de certitude les étapes de l'évolution d'une étoile, de sa naissance jusqu'à sa mort.

Naissance d'une étoile

Les premiers instants d'une étoile se produisent d'abord dans un nuage de gaz interstellaire composé principalement d'hydrogène. Ces nuages sont la plupart du temps énormes et un seul d'entre eux peut donner naissance à plusieurs étoiles. Sous l'effet de l'attraction gravitationnelle, des sections de ces nuages interstellaires ont tendance à se condenser dans des régions appelées **globules de Bok**, du nom du Hollandais Bart Bok (1906–1983) qui découvrit ces régions. Chacun de ces globules, toujours par la force gravitationnelle, s'effondre à son tour pour donner naissance à une **protoétoile**. La contraction gravitationnelle produisant beaucoup d'énergie, la protoétoile devient de plus en plus chaude et intensément lumineuse durant quelques milliers d'années. Une étoile de la masse du Soleil atteindra 500 fois la luminosité solaire actuelle pendant cette étape.

Si la masse de la nouvelle étoile est inférieure à 8 % de la masse du Soleil ($0,08 M_{\odot}$), elle deviendra une naine brune, soit une étoile ratée qui ne sera jamais assez chaude pour que soient déclenchées les réactions de fusion nucléaire nécessaires à la rendre lumineuse. À une masse de $0,01 M_{\odot}$, on ne peut même plus parler d'étoile : c'est plutôt une planète géante gazeuse qui est formée.



Dans les nouvelles étoiles dont la masse est supérieure à $0,08 M_{\odot}$, la température interne augmente suffisamment pour que la fusion nucléaire puisse avoir lieu en son cœur. À cette étape, sur le diagramme H-R, l'étoile naissante se place sur la séquence principale et y demeure une grande partie de sa vie. Le temps qu'une étoile passera dans la séquence principale dépend de sa masse.

Vie d'une étoile

La vie d'une étoile de la séquence principale correspond à la période pendant laquelle elle consomme son hydrogène en le transformant en hélium, par fusion nucléaire. Plus la masse de l'étoile est élevée, plus cette transformation se produit rapidement et plus l'évolution de l'étoile dans la séquence principale est rapide. Pour la majorité des étoiles, cette période dure des milliards d'années. On pourrait être tenté de croire qu'une étoile plus massive prendrait plus de temps à brûler son carburant (qu'elle possède en plus grande quantité) et vivrait ainsi plus longtemps. Mais c'est plutôt l'inverse qui se produit, et ce sont les étoiles les plus grosses qui passent le moins de temps dans la séquence principale. En effet, plus une jeune étoile est grosse, plus le rythme auquel elle transforme son hydrogène en hélium est rapide et plus elle est lumineuse. Ainsi, alors que le Soleil aura, à la fin de sa vie, passé 10 milliards d'années dans la séquence principale, une étoile géante de $35 M_{\odot}$ n'y passera que 3 millions d'années.

Si la masse d'une étoile est juste au-dessus de la limite minimale en deçà de laquelle une étoile ne peut exister ($0,1 M_{\odot}$), celle-ci mettra 2 milliards d'années à prendre place sur la séquence principale et y restera des dizaines de milliards d'années. On suppose que, à la fin de cette très longue vie, l'étoile se refroidira lentement et finira comme un astre mort dense et froid à haute teneur en hélium. Toutefois, puisque l'Univers n'a que 15 milliards d'années, il n'existe pas encore d'étoiles parvenues à ce stade d'évolution.

La stabilité et la longévité des étoiles sur la séquence principale sont attribuables au maintien de l'équilibre entre deux forces intérieures : la force de gravitation qui pousse l'étoile à se contracter et la force exercée vers l'extérieur par l'énergie produite dans le cœur de l'étoile. À la suite des années passées sur la séquence principale, une fois l'hydrogène épuisé, cet équilibre est perturbé et les étoiles subissent une série de transformations majeures. Le processus décrivant le passage d'une étoile de la séquence principale à une autre région du diagramme H-R est très complexe. En résumé, pendant la fusion

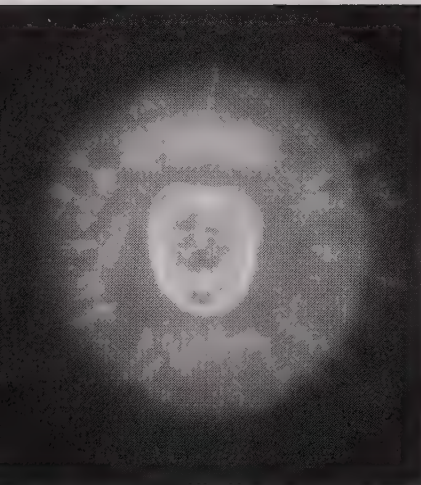


FIGURE 7.18

La nébuleuse planétaire de l'Eskimo est située à plus de 4 000 années-lumière de nous. L'étoile résiduelle au centre de la nébuleuse est particulièrement brillante. 

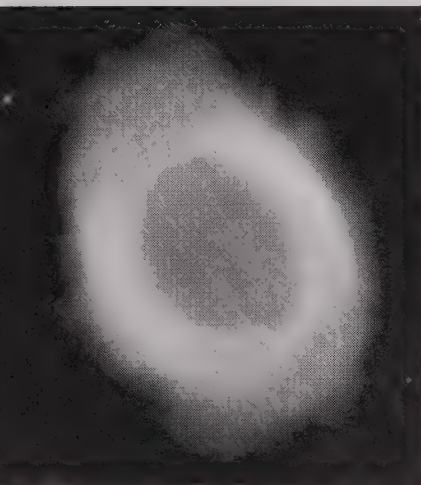


FIGURE 7.19

La nébuleuse planétaire de l'Anneau, située à plus de 2 000 années-lumière du Système solaire, est l'une des plus connues. 

de l'hydrogène, l'accumulation graduelle de l'hélium issu de cette fusion au sein du noyau fait se contracter ce dernier, entraînant une augmentation de la température et une accélération de la fusion de l'hydrogène. Au plus fort de la contraction du cœur d'hélium, la température du noyau atteint 100 millions de kelvins. C'est la température qui permet le déclenchement de la fusion de l'hélium en carbone. Si l'étoile est de faible masse (moins de $6 M_{\odot}$), la fusion de l'hélium se produit très rapidement. On appelle ce phénomène le **flash de l'hélium**. Toute cette activité au sein de l'étoile occasionne une augmentation importante de la pression interne et provoque le gonflement de ses couches superficielles. Au terme du processus, l'étoile aura passé par le stade de géante rouge, atteignant ainsi une luminosité de 10 000 fois celle du Soleil. Toute cette agitation et la migration dans la région des géantes rouges du diagramme H-R durera environ un milliard d'années.

À la fin de la phase de géante rouge, les couches externes deviennent très peu denses et la pression exercée par la lumière provenant du centre les rend instables au point où elles sont expulsées de l'étoile en formant une sphère de gaz lumineux. Cette sphère porte le nom de **nébuleuse planétaire** (figures 7.18 et 7.19). La durée de vie d'une nébuleuse planétaire est de quelques dizaines de milliers d'années, ce qui représente très peu dans la vie d'une étoile.

Ce qui reste de l'étoile, en raison de sa faible masse, n'arrive plus à continuer les réactions de fusion nucléaire et, en l'absence de forces qui empêchent la contraction gravitationnelle, le cœur se contracte et devient une naine blanche. La fin de l'étoile est annoncée.

Dans 5 milliards d'années, notre Soleil, étoile de masse faible, subira toutes les épreuves que nous avons décrites. Au moment où il sera devenu une géante rouge, ses couches superficielles engloberont l'orbite de la Terre, qui se trouvera alors carrément à l'intérieur. Toute une canicule !

Dans les étoiles plus massives (plus de $6 M_{\odot}$), la fusion de l'hélium ne se produit pas en flash, mais de façon plus lente. Les conditions de pression et de température dans le cœur d'une étoile de masse plus élevée permettent la fusion du carbone dont les produits sont de l'oxygène, du néon ou du magnésium, qui eux-mêmes produiront par la suite du silicium et du phosphore. Au-delà de 3 milliards de kelvins, c'est au tour du silicium de fusionner avec de l'hélium pour donner du fer. À la fin du processus de fusion, le fer prédomine au cœur de l'étoile et, étant le plus stable des noyaux atomiques, il ne permet plus aucune réaction de fusion. C'est le début de la



mort de l'étoile. Comme plus aucune force ne vient gêner la contraction gravitationnelle du cœur, ce dernier se comprime de façon dramatique jusqu'à la transformation du fer en matière dite **neutronique**. À ce stade, l'étoile présente une structure en oignon, illustrée à la figure 7.20.

C'est à l'intérieur des étoiles, aux différentes étapes de fusion nucléaire, que sont formés une partie importante des éléments chimiques que

l'on trouve dans le tableau périodique. Ce processus de formation des divers atomes au sein des étoiles s'appelle la **nucléosynthèse**.

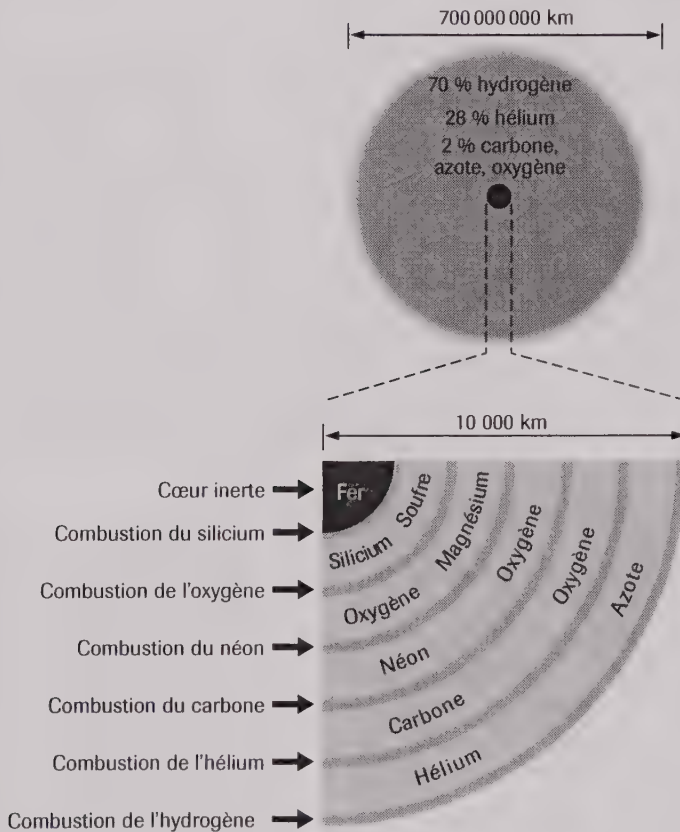


FIGURE 7.20

Juste avant de passer aux étapes finales de sa vie, une étoile massive présente une structure en oignon.

Mort d'une étoile

En général, trois sorts sont réservés aux étoiles qui arrivent à la fin de leur vie. C'est la masse de ce qui reste après toutes les étapes décrites plus haut qui détermine celui que l'étoile connaîtra : naine blanche, étoile à neutrons ou trou noir.



Naine blanche

La majorité des étoiles de notre galaxie (environ 97 %) termineront leur vie en naine blanche. En fait, toutes les étoiles dont la masse résiduelle à la fin de leur vie est inférieure à $1,4 M_{\odot}$ deviendront des naines blanches. C'est ce qu'on appelle la **limite de Chandrasekhar**, du nom de l'astrophysicien américain d'origine indienne Subrahmanyan Chandrasekhar (1910–1995) dont les recherches sur l'équilibre des naines blanches lui valurent le prix Nobel de physique en 1983. Les étoiles dont la masse résiduelle est supérieure à cette limite connaîtront un destin plus fracassant.

Une fois les couches externes éjectées et la combustion nucléaire interne terminée, une étoile dont la masse restante est inférieure à la limite de Chandrasekhar (c'est le cas du Soleil) se contractera jusqu'à ce qu'elle devienne une naine blanche. Une telle étoile est composée de matière dite **dégénérée** : les électrons ne sont plus associés aux noyaux des atomes. La taille de la naine blanche sera réduite à une taille proche de celle de la Terre et sa densité atteindra 10^6 g/cm^3 , soit un million de fois la densité de l'eau. Un dé à jouer composé de cette matière pèserait une tonne (1 000 kg)! Notons que le nom de **naine blanche** vient de sa température de surface (environ 10 000 K) qui lui donne une couleur blanche bleutée. La figure 7.21 illustre dans le diagramme H-R le chemin parcouru par le Soleil tout au long de sa vie.

Après quelques dizaines de milliards d'années, une naine blanche n'émet plus de lumière visible et peut devenir ce qu'on appelle une **naine noire**. Cette « cendre » d'étoile n'est alors plus vraiment visible. Aucune naine noire n'a encore été observée ou détectée jusqu'à maintenant. En réalité, il est fort possible que les naines noires n'existent pas encore, l'Univers n'étant pas encore assez vieux pour qu'une étoile ait eu le temps d'atteindre ce stade.

Étoile à neutrons ou pulsar

Les étoiles dont le résidu a une masse de $1,4$ à $3 M_{\odot}$ atteignent, en s'effondrant sur elles-mêmes, des températures et des pressions si élevées que l'équilibre qui existait dans une naine blanche entre la pression des électrons et la force de gravitation ne peut être maintenu. Le cœur de l'étoile se contracte plutôt jusqu'à ce que les électrons libres se combinent aux protons des noyaux pour former une étoile dite **à neutrons**. Le diamètre d'une étoile à neutrons est en moyenne de 25 kilomètres, mais sa densité atteint celle de la matière nucléaire, soit

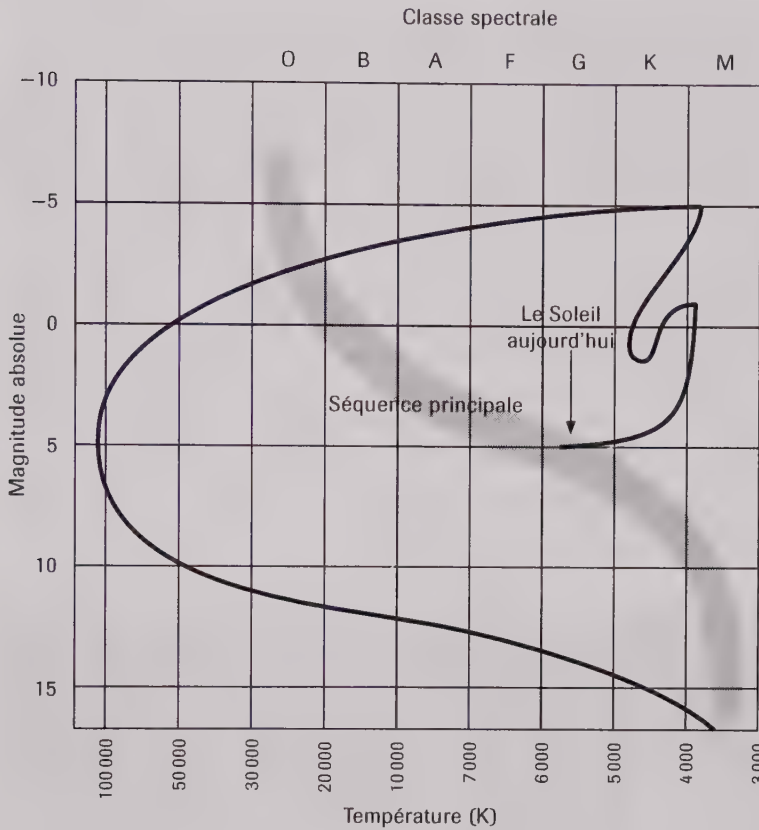


FIGURE 7.21

De sa naissance à sa mort, le Soleil aura parcouru presque toutes les régions du diagramme H-R.

10^{13} g/cm^3 . Notre dé à jouer composé de ce matériau pèserait 10 millions de tonnes (10 milliards de kg).

La gravité est tellement forte à la surface d'une étoile à neutrons qu'il ne peut y avoir de structures de plus de quelques centimètres de hauteur; la vitesse de libération y est proche de la vitesse de la lumière. Théoriquement, une étoile à neutrons serait constituée d'une croûte de noyaux ferreux baignant dans une mer d'électrons dégénérés. À l'intérieur, on trouverait un manteau cristallin d'environ 4 kilomètres d'épaisseur au-dessous duquel il y aurait un noyau liquide neutronique superfluide (état fluide presque sans frottement) d'une dizaine de kilomètres de rayon.

Avant de devenir une étoile à neutrons proprement dite, l'étoile vit une dernière étape plutôt violente. L'enveloppe gazeuse, en s'effondrant à grande vitesse vers le cœur de l'étoile, rebondit violemment sur le noyau de matière neutronique et produit la formidable explosion de toutes les couches externes de l'étoile. C'est à ce moment qu'elle devient une supernova de type II

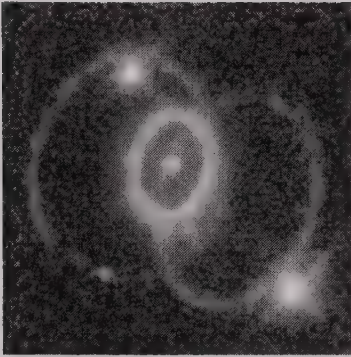


FIGURE 7.22

Les restes de la supernova SN 1987A sont en expansion depuis 1987. Voici ce à quoi ils ressemblaient en 1994, alors que le télescope spatial Hubble a capté cette image.

(figure 7.22), comme celle qu'a observée le Canadien Ian Shelton en 1987 qu'on a nommée SN 1987A.

Les étoiles à neutrons sont donc les restes de cette violente explosion et constituent de véritables cadavres stellaires. Elles n'auraient jamais pu être détectées si une bonne partie d'entre elles n'émettaient pas un certain type de rayonnement bien particulier. On appelle **pulsars** (contraction de *puls[ating] [st]ar*) les étoiles à neutrons dont nous recevons le flux de radiations très intense et périodique, également appelé **rayonnement synchrotron** (du nom de puissants accélérateurs de particules) (figure 7.23). Ce rayonnement peut être capté par les antennes des radiotélescopes et reçu comme des pulsations périodiques aussi précises qu'une horloge atomique. La période de pulsation des pulsars peut être aussi petite qu'un millième de seconde.

C'est Jocelyn Bell (née en 1943), étudiante en astronomie à Cambridge, qui découvrit accidentellement le premier pulsar,

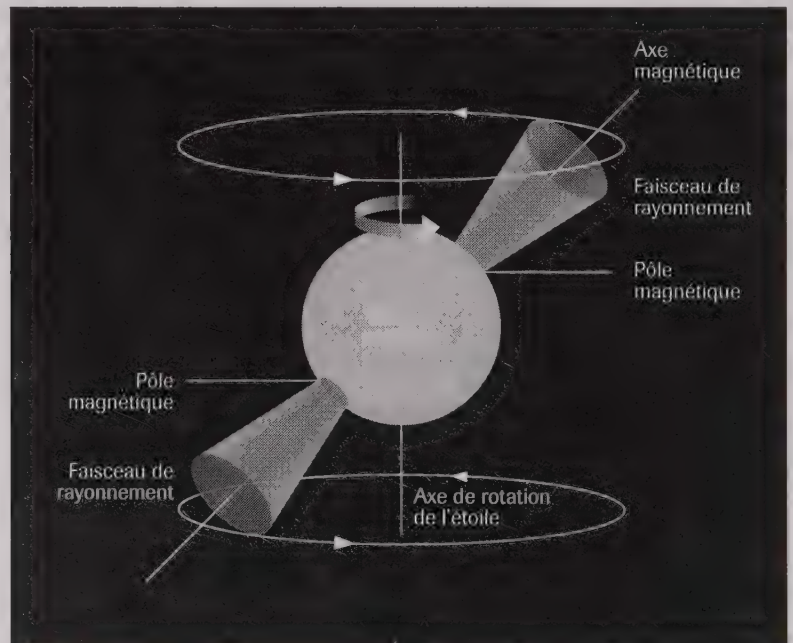


FIGURE 7.23

Une étoile à neutrons émet de puissants faisceaux de rayonnement par ses pôles magnétiques. L'étoile étant en rotation, ces faisceaux se présentent à nous sous forme de pulsations périodiques. Le modèle le plus fréquemment employé pour expliquer les pulsars est appelé **modèle du phare**. Ce nom fait référence aux faisceaux de rayonnement qui sont captés périodiquement par les instruments terrestres, un peu comme un capitaine de navire voit la lumière d'un phare à intervalles réguliers.



en 1967. Celui-ci avait une période de 1,337 011 seconde, ni plus ni moins. Depuis, d'autres pulsars ont été découverts dont celui dans les restes de la nébuleuse du Crabe, par ailleurs beaucoup plus rapide que celui de Bell : il tourne avec une période de 0,0316 seconde. Les astronomes ont mis relativement peu de temps à faire le lien entre les étoiles à neutrons et ces objets pulsants : un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide.

L'explication à l'incroyable vitesse de rotation des pulsars relève d'un principe de physique peu connu sur le plan théorique, mais dont on peut voir des manifestations au quotidien : la conservation du moment angulaire. Ce principe est responsable du fait qu'une patineuse de fantasia arrive, en ramenant ses bras le long de son corps, à augmenter considérablement sa vitesse de rotation sans aide extérieure. De la même façon, l'étoile qui termine sa vie en se contractant voit sa vitesse de rotation augmenter au fur et à mesure que toute sa masse se comprime près de son axe de rotation.

Les pulsars ralentissent peu à peu avec le temps et leur période augmente de quelques millièmes de seconde par année, pour finalement s'arrêter après plusieurs millions d'années. Sur le plan de la science-fiction, on peut se permettre d'imaginer que, dans un futur lointain, les pulsars seront peut-être considérés comme d'essentielles balises de navigation pour s'orienter dans d'éventuels voyages interstellaires.

Trou noir ou collapsar

Une étoile termine dramatiquement sa vie en trou noir lorsque son cœur résiduel a une masse de plus de $3 M_{\odot}$. Une telle étoile est suffisamment massive pour que, pendant son effondrement final, rien ne puisse résister, pas même les neutrons, à la force de gravitation qui tend à contracter l'étoile. Toute la masse de l'étoile se trouve ainsi concentrée au centre du trou noir dans ce que les physiciens appellent une **singularité** (figure 7.24). Le trou noir lui-même est une zone de quelques kilomètres de rayon entourant la singularité. Si l'on réussissait à comprimer le Soleil jusqu'à ce qu'il atteigne la densité d'un trou noir, il aurait un rayon de 3 kilomètres. L'espace entre la frontière extérieure du trou noir (appelée **horizon**) et les limites de la singularité est une zone de non-retour d'où rien ne peut s'échapper, ni même la lumière, d'où le nom de **trou noir**.

On doit à Karl Schwarzschild (1873–1916) le calcul du rayon de l'horizon du trou noir. Le physicien allemand s'est servi de l'équation qui donne la vitesse de libération v_{lib} pour un objet de masse M et de rayon R :

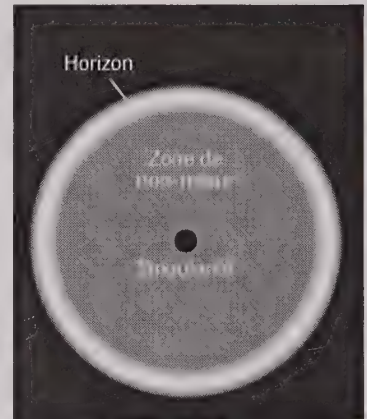


FIGURE 7.24

Un trou noir comporte une zone de non-retour, délimitée par l'horizon, et une singularité au centre. Rien, pas même la lumière, ne peut s'échapper de la zone de non-retour.



$$v_{\text{lib}} = 2\sqrt{GM/R} \quad \text{où } G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$$

Plutôt que de calculer la vitesse de libération, il fixa sa valeur égale à la vitesse de la lumière c et trouva le rayon $R_{\text{trou noir}}$ correspondant :

$$R_{\text{trou noir}} = \frac{2GM}{c^2}$$

Le rayon obtenu à l'aide de cette équation est le **rayon de Schwarzschild**. Notons que l'horizon du trou noir n'est pas une structure solide, mais seulement une zone d'où rien ne peut sortir.

Étant donné sa nature, un trou noir est en quelque sorte impossible à observer directement. Toutefois, on peut détecter sa présence par l'influence gravitationnelle intense qu'il exerce sur les étoiles voisines, en particulier dans les systèmes binaires. Les astronomes soupçonnent que le compagnon de Cygnus X1, la puissante source de rayons X de la constellation du Cygne, soit un trou noir, la théorie voulant justement que, lorsque la matière de l'étoile cannibalisée tombe dans le trou noir, elle émette un intense rayonnement X (figure 7.25). Tout semble indiquer que ce compagnon est bel et bien un trou noir, car sa masse est telle qu'il devrait être visible, ce qui n'est pas le cas. Pour être assurés que c'est un trou noir, les astronomes auraient besoin d'avoir à leur disposition un nouveau genre d'instrument : un détecteur d'ondes gravitationnelles. En effet, le calcul des physiciens prévoit l'existence de ce genre d'ondes lorsqu'un objet très massif tourne autour d'un autre. On a bien assisté à quelques tentatives en ce sens, mais les résultats obtenus sont loin d'être ceux qui avaient été escomptés. Il reste encore beaucoup à faire avant de tout éclaircir ce qui concerne les trous noirs.

Par exemple, les astronomes tentent toujours de confirmer une hypothèse de plus en plus acceptée selon laquelle il y aurait, tapi au cœur de nombreuses galaxies, un énorme trou noir de plusieurs millions de masses solaires.

Plusieurs autres hypothèses plus ou moins curieuses circulent au sujet des trous noirs. Certains croient, par exemple, que la matière s'y engloùtirait pour ressortir ailleurs dans l'Univers sous la forme d'un trou blanc (figure 7.26). Des trous noirs en rotation, appelés **trous noirs de Kerr**, pourraient créer, en déformant le tissu de l'espace-temps, des trous de ver, sortes de raccourcis séparés par de très grandes distances qui nous permettraient de nous déplacer en quelques secondes d'un endroit à l'autre de l'Univers, dépassant ainsi, en apparence, la vitesse de la lumière. Le Britannique Roger Penrose a même

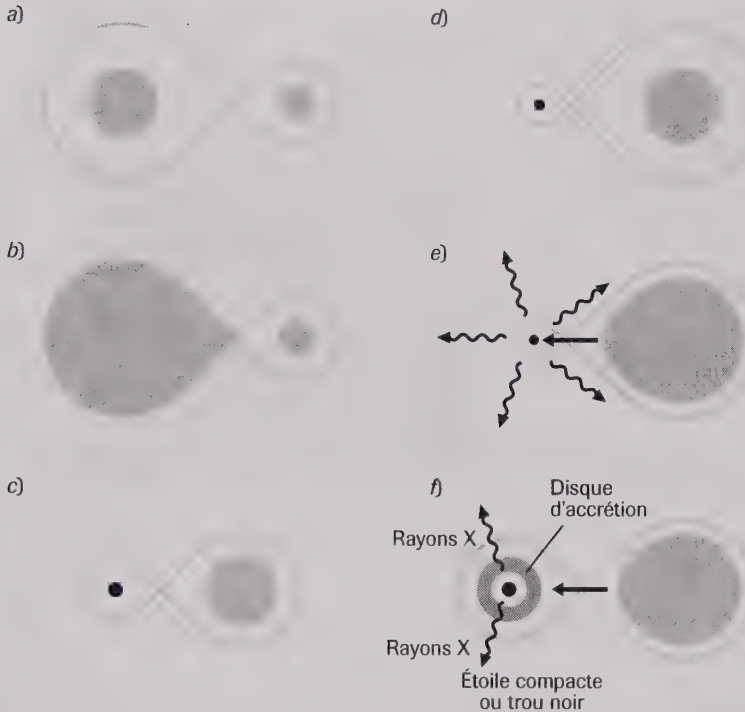


FIGURE 7.25

Après la formation d'un système binaire (a), l'étoile la plus massive atteint plus tôt le stade de géante et remplit son lobe de Roche (b). On assiste au début du transfert de matière. À la fin du transfert (c), l'étoile massive est réduite à son cœur d'hélium. L'étoile devient une étoile à neutrons ou un trou noir (d) après avoir explosé en supernova. Pendant ce temps, la deuxième étoile approche les limites de son lobe de Roche, déclenchant de nouveau le transfert de matière (e). Cette matière passe dans l'environnement de l'étoile compacte et se rassemble en un disque d'accrétion qui émet du rayonnement X (f).

proposé d'utiliser leur formidable énergie de rotation comme source d'énergie à peu près inépuisable dans un futur lointain.

Les physiciens disposent d'un arsenal impressionnant de théories mathématiquement très complexes pour venir à bout des trous noirs : la relativité générale d'Einstein, la mécanique quantique relativiste et la toute dernière, la théorie des cordes. Pour les physiciens, l'un des aspects les plus intéressants des trous noirs se trouve dans les conditions extrêmes qui y règnent. Impossibles à reproduire en laboratoire, les trous noirs constituent les meilleurs bancs d'essai pour confirmer ou rejeter une théorie poussée dans ses derniers retranchements.

La figure 7.27 illustre une comparaison des tailles d'étoiles à divers stades.

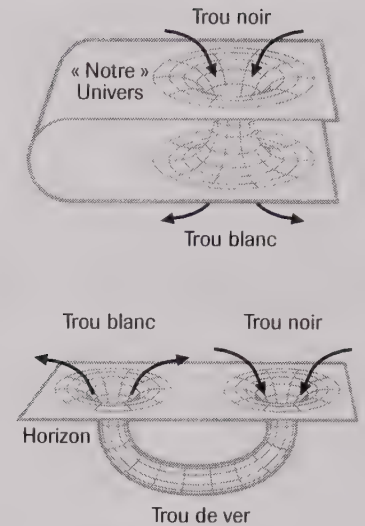


FIGURE 7.26

Deux représentations d'un hypothétique trou blanc, selon le modèle d'Univers adopté

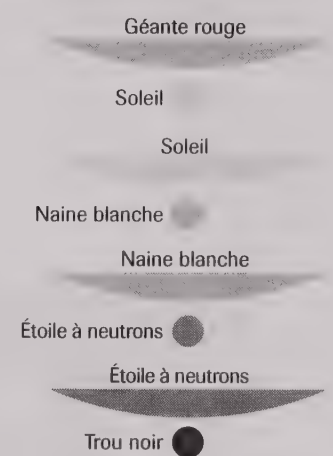


FIGURE 7.27

Comparaison de la taille d'une étoile selon les stades stellaires possibles

Questions de révision

1. Vrai ou faux ?

- Toutes les étoiles brillantes sont proches de nous.
- Une étoile de magnitude 5 est plus brillante qu'une étoile de magnitude 3.
- Nous pouvons voir jusqu'à la magnitude 6 à l'œil nu.
- L'étoile Polaire est l'étoile la plus brillante du ciel.
- Les étoiles variables à éclipses sont en réalité des étoiles doubles.
- Un trou noir est une crevasse profonde et noire à la surface d'une planète.

2. Donnez le nom des constellations suivantes :

a)



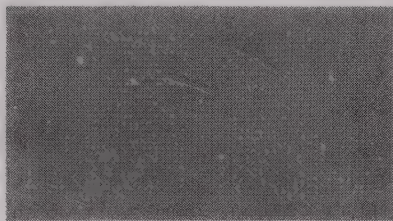
b)



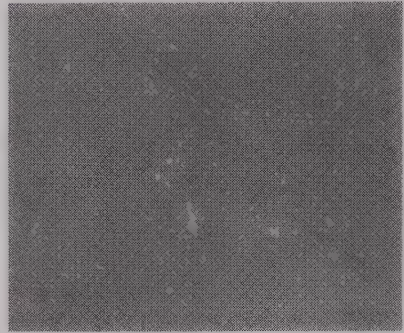
c)



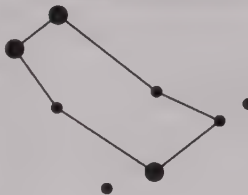
d)



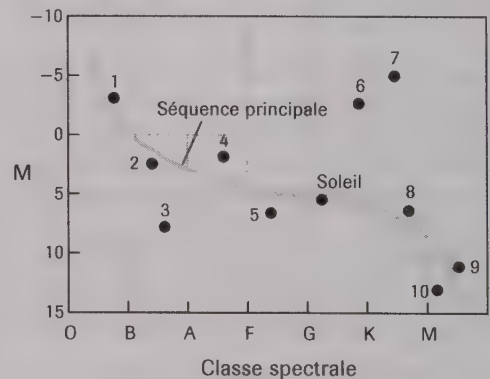
e)



f)



- Capella est une étoile G2, comme le Soleil ; pourquoi est-elle alors beaucoup plus lumineuse ?
- Sur le diagramme H-R, que représentent l'axe vertical et l'axe horizontal ?
- Une étoile est de la classe spectrale B5 et une autre, de la classe spectrale K3. Laquelle est la plus chaude ?
- Les étoiles du diagramme H-R suivant sont numérotées de 1 à 10.



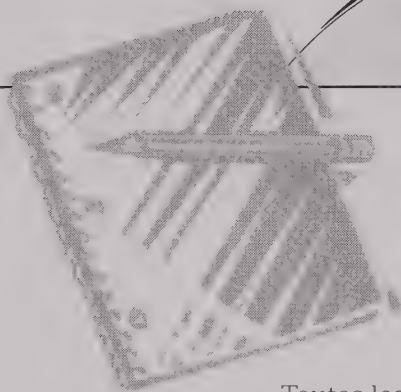


- a) Laquelle est la plus lumineuse?
 - b) Laquelle est la plus chaude?
 - c) Laquelle est la plus froide?
 - d) Laquelle est la plus grosse?
 - e) Laquelle est la moins lumineuse?
7. Qu'est-ce qu'une supernova? Décrivez les supernovæ de types Ia et II.
 8. Combien de temps prend la lumière d'une étoile située à cinq années-lumière pour parvenir jusqu'à la Terre?
 9. Parmi les paires d'étoiles suivantes, indiquez l'étoile la plus brillante en apparence dans chaque cas et expliquez pourquoi.
 - a) Une étoile de magnitude (m) 6 et une étoile de magnitude (m) 18.
 - b) Une étoile de magnitude absolue (M) 5 située à 100 parsecs et une étoile de magnitude absolue (M) 5 située à 10 parsecs.
 10. Quel type d'étoiles variables est utilisé pour mesurer des distances, grâce à la relation période-luminosité?
 11. Qu'arrivera-t-il au Soleil lorsqu'il aura fini de brûler son hydrogène, jusqu'à sa mort?
 12. Que représente la magnitude absolue d'une étoile?
 13. Énumérez les trois fins possibles d'une étoile.
 14. Quelle est la couleur d'une étoile M2?
 15. Quelle est la couleur d'une étoile B3?
 16. Pourquoi appelons-nous une étoile à neutrons un **pulsar**?
 17. Est-il possible de voir directement un trou noir? Comment les astronomes peuvent-ils détecter leur présence?
 18. Quel est le rayon moyen d'un trou noir?
 19. Qu'arrivera-t-il à la Terre quand le Soleil deviendra une géante rouge?
 20. Où avons-nous le plus de chances de trouver une étoile à neutrons?
 21. Quel est le processus à l'origine de la si grande quantité de neutrons dans une étoile à neutrons?
 22. Comment fait-on pour mesurer la température d'une étoile?
 23. Quelle serait la couleur d'une étoile qui aurait 2 000 K de température de surface?
 24. Calculez la température d'une étoile dont la longueur d'onde du pic de rayonnement est de 580 nm.
 25. Décrivez l'étoile qui est du type G2 V.
 26. Décrivez l'étoile qui est du type M5 III.
 27. Vrai ou faux? Les étoiles doubles ou multiples sont rares dans l'Univers. Expliquez.
 28. Quelle serait la distance (en parsecs et en années-lumière) d'une étoile qui aurait une parallaxe de 0,023" d'arc?
 29. Qu'est-ce qu'une étoile binaire visuelle? En quoi se distingue-t-elle des autres types d'étoiles binaires?
 30. À quelle distance de nous se trouve une étoile dont la magnitude absolue et la magnitude apparente sont égales?



ACTIVITÉ

Diagramme H-R



Dans la présente activité, nous vous proposons d'explorer les relations entre les divers types d'étoiles en construisant un diagramme H-R. Ce dernier est présenté à la section 7.5. Il nous permet de faire des liens entre les étoiles, sur plusieurs plans, dont la luminosité, la température, la taille, etc.

① Étoiles de la séquence principale

Toutes les étoiles du tableau 1 sont des étoiles de la séquence principale. On appelle ainsi ce groupe d'étoiles parce que la majorité se trouvent dans cet ensemble. Sur le diagramme 1 de la magnitude en fonction de la classe spectrale, placez chaque étoile du tableau 1. Pour éviter de surcharger le diagramme, ne tracez qu'un petit cercle (○) pour chaque étoile.

Rappelons que, dans le but d'affiner la précision de la température des étoiles d'une classe spectrale donnée, on a attribué à chaque classe dix divisions supplémentaires, de 0 à 9. Lorsque vous aurez tracé tous les cercles, délimitez la région du diagramme correspondant à la séquence principale par un ovale.

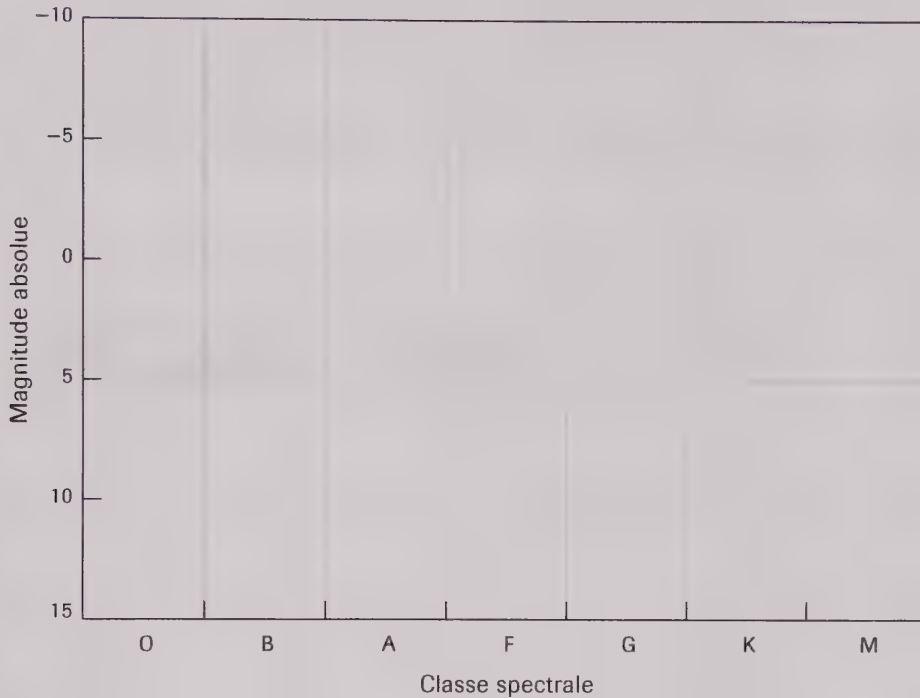
TABLEAU 1

Étoiles de la séquence principale

Étoile	Classe spectrale	Magnitude absolue (M)
σ Per A	B0	-3,7
Spica	B1	-3,6
α Hyi	K3	-1,7
α Gru	B7	-0,7
Régulus	B7	-0,5
Véga	A0	+0,6
γ Cet	A2	+2,0
Procyon A	F5	+2,7
Soleil	G2	+4,8
τ Cet	G8	+5,7
61 Cyg A	K5	+7,5
Étoile de Kapteyn	M1	+10,9
Kruger 60B	M4	+13,3



Diagramme 1



2 Étoiles géantes

Ajoutez au diagramme 1, en traçant des petits triangles (Δ), les étoiles du tableau 2. Tracez un ovale autour de la région du diagramme qui contient les quatre étoiles du tableau 2.

Question

Pourquoi ces étoiles ne sont-elles pas sur la séquence principale ?

TABEAU 2

Les géantes

Étoile	Classe spectrale	Magnitude absolue (M)
Arcturus	K2	-0,3
Capella	G2	-0,5
Aldebaran	K5	-0,6
Pollux	K0	+1,1



3 Les étoiles les plus brillantes du ciel

Le tableau 3 présente les étoiles les plus brillantes du ciel terrestre, sauf le Soleil. Placez les étoiles du tableau sur le diagramme 2. Employez cette fois-ci des petits carrés et une autre couleur d'encre si possible. Une fois cette étape terminée, reportez sur le diagramme 2 les deux tracés ovales réalisés aux numéros 1 et 2.

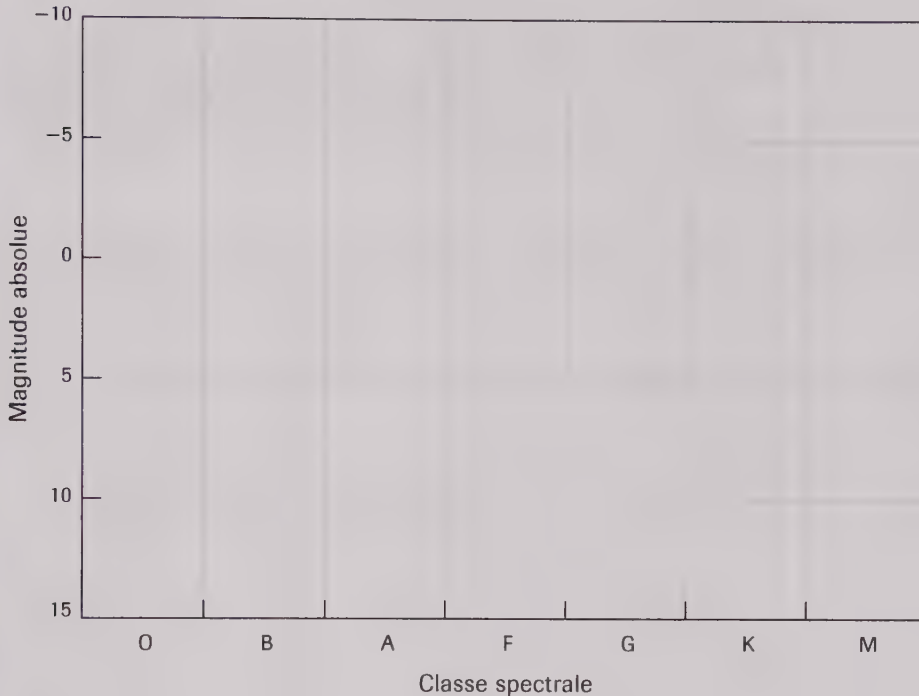
TABLEAU 3

Étoiles les plus brillantes

Étoile	Magnitude apparente (m)	Magnitude absolue (M)	Classe spectrale
Sirius	-1,4	1,5	A1 V
Canopus	-0,6	-5,5	F0 Ib
Arcturus	-0,1	-0,3	K2 III
Alpha du Centaure A	0	4,3	G2 V
Véga	0	0,6	A0 V
Capella	0,1	-0,5	G2 III
Rigel	0,2	-6,7	B8 Ia
Procyon	0,4	2,7	F5 IV-V
Bételgeuse	0,4	-5,1	M2 Ia
Achernar	0,5	-3,0	B3 V
Hadar	0,6	-5,4	B1 III
Altaïr	0,8	2,2	A7 V
Acrux	0,8	-4,2	B1 IV
Aldébaran	0,9	-0,6	K5 III
Spica (Épi)	1,0	-3,6	B1 V
Antarès	1,1	-5,3	M1 Ib
Pollux	1,2	1,1	K0 III
Fomalhaut	1,2	1,7	A3 V
Mimosa	1,25	-3,9	B0,5 III
Deneb	1,3	-8,7	A2 Ia
Régulus	1,4	-0,5	B7 V
Adhara	1,5	-4,1	B2 II
Castor	1,6	0,6	A1V
Gacrux	1,6	-0,6	M3,5 III
Shaula	1,6	-5,1	B2 IV
Bellatrix	1,6	-2,7	B2 III
Elnath	1,7	-1,4	B7 III
Miaplacidus	1,7	-1,0	A2 III
Alnilam	1,7	-6,4	B0 Ia



Diagramme 2



Questions

- Dans quelle classe spectrale se trouvent en majorité les étoiles brillantes (en apparence) du ciel ?
- Ces étoiles sont-elles chaudes ou froides ? Quelle est la température moyenne approximative de la majorité de ces étoiles ?
- Quelle est la magnitude apparente moyenne des étoiles du tableau 3 ?

4 Les étoiles les plus proches

Le tableau 4 présente les étoiles les plus proches de la Terre, incluant le Soleil. Placez toutes les étoiles du tableau 4 sur le diagramme 3. Si l'on suppose que le Soleil est situé dans une zone relativement ordinaire de notre Galaxie, nous pouvons présumer que les étoiles environnantes sont communes et que ce sont des étoiles plutôt ordinaires également.



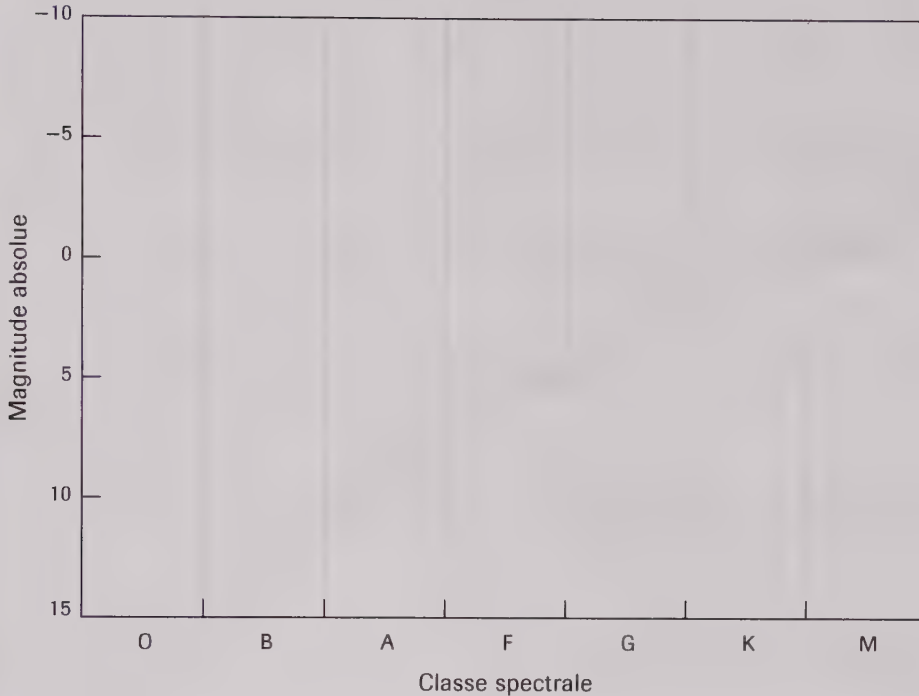
TABLEAU 4

Étoiles les plus proches de la Terre

Étoile	Magnitude apparente (m)	Magnitude absolue (M)	Type spectral
Soleil	-26,8	4,8	G2V
Alpha Centauri C (Proxima Centauri)	10,7	15,5	M5V
Alpha Centauri A	0,0	4,3	G2V
Alpha Centauri B	1,4	5,7	K5V
Étoile de Barnard	9,3	13,2	M5V
Wolf 359	13,5	16,6	M6V
Lalande 21185	7,5	10,5	M2V
Sirius A	-1,4	1,5	A1V
Sirius B	8,4	11,3	A2VII
Luyten 726-8A	12,6	15,4	M6V
Luyten 726-8B	13,0	15,8	M6V
Ross 154	10,4	13,0	M5V
Epsilon Eridani	3,7	6,2	K4V
Luyten 789-6	12,3	14,6	M6V
Ross 128	11,1	13,5	M5V
61 Cygni A	5,2	7,5	K5V
61 Cygni B	6,0	8,3	K7V
Epsilon Indi	4,7	7,0	K4V
Procyon A	0,4	2,7	F5V
Cincinnati 2456A	8,9	11,2	M4V
Cincinnati 2456B	9,7	12,0	M4V
Groombridge 34A	8,1	10,4	M1V
Groombridge 34B	11,0	13,3	M6V
Lacaille 9352	7,4	9,6	M2V
Tau Ceti	3,5	5,7	G8V
Étoile de Luyten	9,8	11,9	M4V
Lacaille 8760	6,7	8,8	M0V
Étoile de Kapteyn	8,8	10,9	M1V
Kruger 60A	9,7	11,7	M4V
Kruger 60B	11,2	13,3	M4V

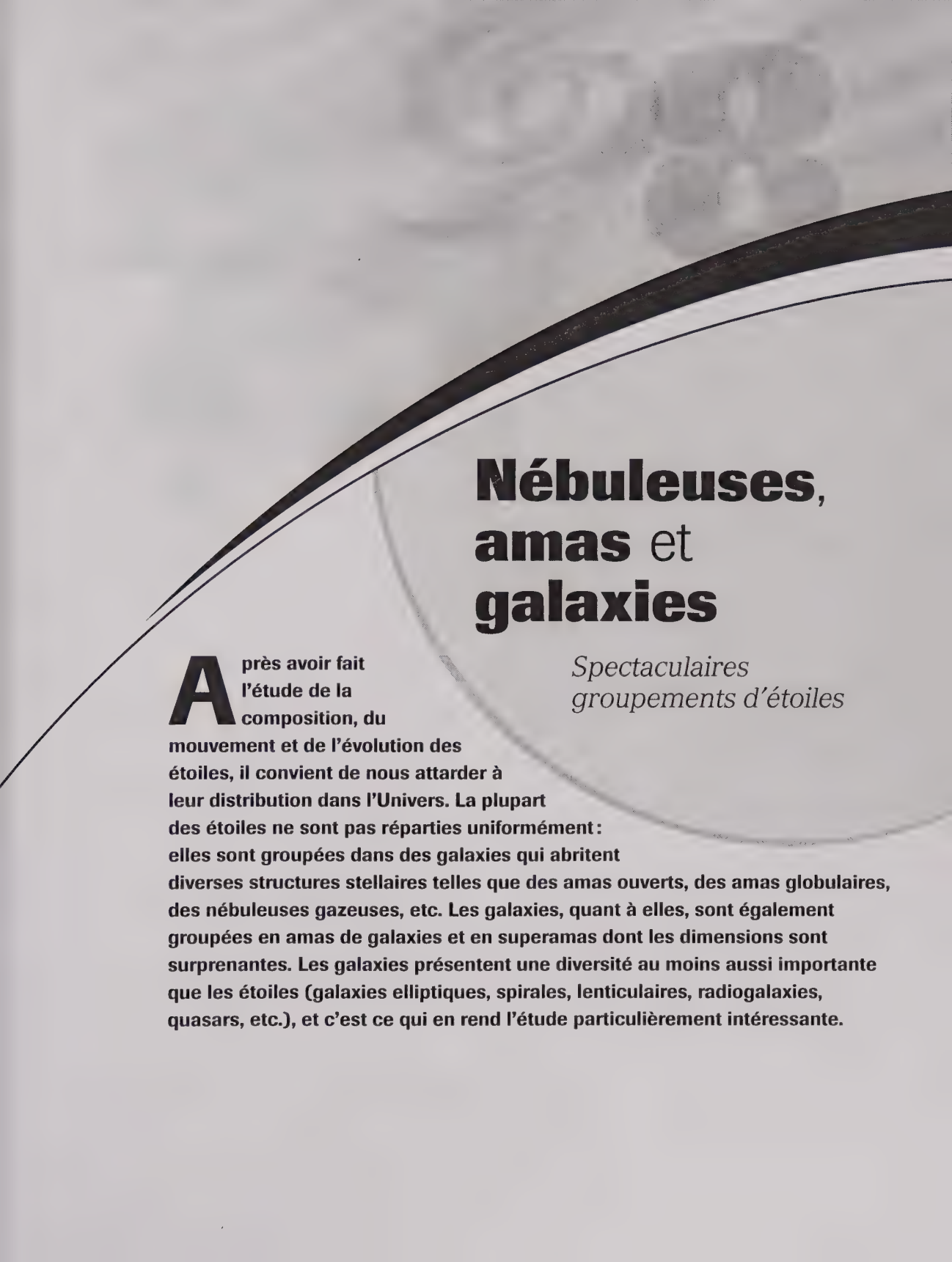


Diagramme 3



Questions

- La majorité des étoiles proches du Soleil sont-elles chaudes ou froides ?
- Lorsque vous regardez une étoile proche, quelle est la classe spectrale la plus probable de cette étoile ?
- Quelle est la température moyenne approximative des étoiles les plus proches de la Terre ?
- Évaluez la magnitude apparente moyenne de ces étoiles (sauf le Soleil).
- Comparez les quatre réponses précédentes aux réponses des questions de l'exercice 3, et établissez les différences principales entre les étoiles les plus proches de la Terre et les étoiles les plus brillantes du ciel nocturne.
- Que deviendrait le ciel nocturne si toutes les étoiles de notre Galaxie avaient la même magnitude absolue que le Soleil (répondez en pensant à ce qui arriverait aux étoiles les plus brillantes et aux étoiles les plus proches) ?



Nébuleuses, amas et galaxies

*Spectaculaires
groupements d'étoiles*

Après avoir fait l'étude de la composition, du mouvement et de l'évolution des étoiles, il convient de nous attarder à leur distribution dans l'Univers. La plupart des étoiles ne sont pas réparties uniformément : elles sont groupées dans des galaxies qui abritent diverses structures stellaires telles que des amas ouverts, des amas globulaires, des nébuleuses gazeuses, etc. Les galaxies, quant à elles, sont également groupées en amas de galaxies et en superamas dont les dimensions sont surprenantes. Les galaxies présentent une diversité au moins aussi importante que les étoiles (galaxies elliptiques, spirales, lenticulaires, radiogalaxies, quasars, etc.), et c'est ce qui en rend l'étude particulièrement intéressante.

**DANS LES PAGES QUI SUIVENT,
VOUS APPRENDREZ À :**

- Décrire les principales composantes de notre Galaxie, la Voie lactée.
- Explorer les étapes qui ont conduit à la compréhension actuelle de notre Galaxie.
- Définir les types de populations stellaires.
- Nommer et caractériser les sortes d'amas d'étoiles.
- Nommer et décrire les sortes de nébuleuses.
- Établir et expliquer la classification des galaxies.
- Définir les principales caractéristiques des amas de galaxies.
- Décrire les processus d'interaction ou de collision entre les galaxies.
- Distinguer les types de galaxies actives et décrire les mécanismes responsables de leur étonnante activité.
- Expliquer le phénomène de lentille gravitationnelle.



8.1 La Galaxie ou Voie lactée

Même si les philosophes de l'Antiquité grecque avaient déjà eu l'intuition que la grande bande lumineuse d'aspect laiteux qui traverse le ciel nocturne était constituée d'étoiles, ce n'est que lorsque Galilée pointa sa lunette vers une région particulièrement dense de la Voie lactée qu'on en obtint la confirmation. Il fallut par la suite attendre encore plus de 150 ans avant qu'un astronome anglais, Thomas Wright (1711–1786), propose que ce ruban blanchâtre est en fait ce que nous voyons du plan d'un disque d'étoiles à l'intérieur duquel se trouve le Soleil. Un peu plus tard, en 1780, William Herschel et sa sœur Caroline furent les premiers à cartographier approximativement la Voie lactée, dans le but d'en établir la forme. La méthode de mesure de la parallaxe n'ayant pas encore été imaginée à ce moment, le calcul des distances des étoiles et des dimensions de la Galaxie (du grec *galaktos*, qui signifie « lait ») n'a vraiment été réalisé pour la première fois qu'au tournant du XX^e siècle. À ce moment, on croyait toujours que le Soleil se trouvait au centre de la Galaxie, et on en sous-estimait encore la taille réelle.

C'est en 1917 que Harlow Shapley (1885–1972) trouva la place du Soleil au sein de la Galaxie et mesura avec une certaine précision les dimensions de celle-ci. Pour ce faire, il se servit d'étoiles variables pulsantes (dont on peut facilement mesurer l'éloignement) présentes dans les amas globulaires (groupements sphériques d'étoiles) qui gravitent autour de la Galaxie. C'est donc ainsi que l'astronome américain mit fin aux espoirs de ceux qui souhaitaient que la Terre ou, du moins, le Soleil, soit au centre de quelque chose : nous sommes à plus de 28 000 années-lumière du centre galactique !

Cela veut donc dire que, lorsque nous regardons la Voie lactée dans le ciel, nous sommes tout simplement en train d'observer notre Galaxie par la tranche. Si l'on pouvait se déplacer à l'extérieur de la Galaxie, elle apparaîtrait comme un immense disque d'étoiles présentant un renflement central plus dense, le bulbe, le tout entouré d'un grand halo sphérique contenant plusieurs amas globulaires (figure 8.1).

La Galaxie héberge environ 200 milliards d'étoiles réparties non uniformément dans le halo, le bulbe et le disque. Son diamètre, qui correspond au diamètre du disque, est d'environ 100 000 années-lumière. Son épaisseur varie de quelques années-lumière sur les bords à environ 10 000 années-lumière au centre du bulbe. Elle présente quatre bras spiraux qui, vus de l'exté-

FIGURE 8.1

Dimensions et principaux éléments de la Voie lactée, représentée de face et de profil.

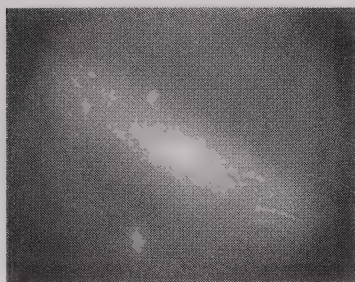
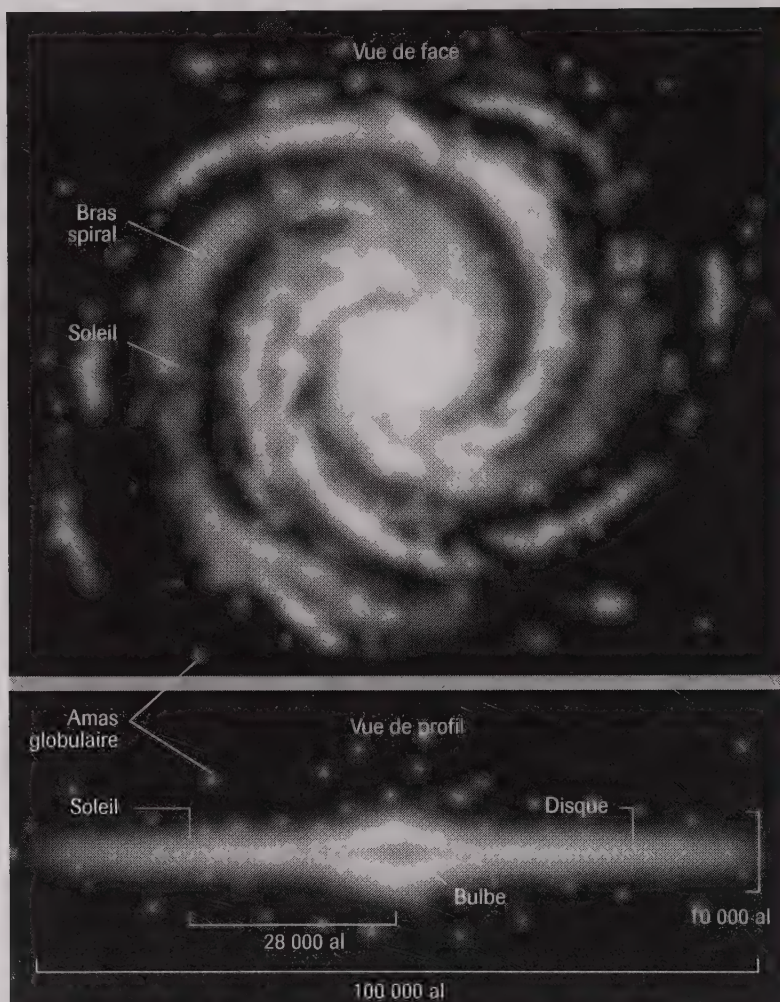


FIGURE 8.2

Notre plus proche voisine, la galaxie d'Andromède. 📷

rieur, doivent la faire ressembler à notre plus grosse voisine, la galaxie d'Andromède (figure 8.2).

Le Soleil se trouve au bord d'un de ces bras, légèrement au-dessus du plan moyen du disque galactique. Comme nous l'avons souligné plus tôt, il n'est pas du tout situé au centre de la Galaxie, mais plutôt dans la « banlieue », à environ 28 000 années-lumière du centre. La Galaxie tourne lentement sur elle-même, le Soleil accomplissant une révolution complète autour du centre en 220 millions d'années. Cela veut dire que le Soleil voyage dans la Galaxie à une vitesse d'au moins 220 km/s. Ainsi, on estime que, depuis sa naissance, le Soleil a fait une vingtaine de tours dans la Galaxie. On pourrait dire qu'il a une vingtaine d'années galactiques !



Avant que soient raffinées les techniques d'observation des fréquences radio (après 1945) et infrarouge (après 1970), le noyau de la Galaxie, au centre du bulbe, nous était complètement invisible. Cela est attribuable à l'absorption du rayonnement visible par les poussières du disque galactique qui a rendu difficile le dévoilement de la structure de la Galaxie et de son centre, plus particulièrement. Les rayonnements radio et infrarouge traversent aisément les zones poussiéreuses. Pour «voir» le centre de la Galaxie, il faut regarder dans la direction de la constellation du Sagittaire. L'observation du centre galactique, qui fait environ 500 années-lumière de rayon, dans les rayonnements radio, infrarouge, gamma et X, a révélé des phénomènes de haute énergie. La puissance du rayonnement émis et la densité très élevée de cette région sont deux indices parmi d'autres de la très probable présence d'un trou noir massif et compact. On estime que sa masse serait de quelques millions de $M_{\odot}$ et qu'il aurait la taille de l'orbite de Jupiter, soit environ 10 unités astronomiques de rayon.

La concentration d'étoiles dans la Galaxie varie selon les régions, le bulbe étant celle où l'on trouve la plus grande densité stellaire. À titre d'exemple, dans le voisinage du Soleil, on trouve une étoile par parsec cube alors que, au cœur du bulbe de la Galaxie, on trouve un million d'étoiles par parsec cube.

Outre les variations de densité d'étoiles, on observe également dans la Galaxie une variation du type d'étoiles rencontrées selon les régions. Les bras spiraux sont, par exemple, caractérisés par la présence importante d'étoiles dites de population I, c'est-à-dire d'étoiles plutôt jeunes et comportant une concentration assez importante (de 2 à 3 %) d'éléments lourds. Les étoiles les plus brillantes de cette population sont des géantes bleutées ou blanches. Les étoiles de population I se distinguent de celles de population II qui sont quant à elles des étoiles plus vieilles et très évoluées. La concentration en éléments lourds de ces étoiles est en général inférieure à 1 %. Les étoiles les plus brillantes de cette population sont des géantes rouges. Les étoiles de population II se trouvent surtout dans le bulbe et dans le halo.

On définit également une population III pour désigner une étoile qui ne comporterait aucun élément lourd. Ce type d'étoile a probablement dominé l'Univers dans ses tout premiers débuts, alors que les seuls éléments chimiques présents étaient l'hydrogène et l'hélium. Les étoiles de population II se sont probablement formées à partir des résidus laissés derrière par les étoiles de population III, de même que les étoiles de population I sont composées des résidus laissés par les étoiles de population II. À chaque étape, la proportion d'éléments autres

que l'hydrogène et l'hélium a augmenté. Pour le moment, aucune étoile ne contenant aucun élément lourd n'a été observée.

Les astronomes évaluent l'âge de notre Galaxie à environ 10 milliards d'années.

8.2 Amas d'étoiles

Dans la Galaxie, les étoiles ne sont pas distribuées de façon uniforme. Nous avons déjà vu que les bras spiraux, par exemple, présentent une densité moyenne d'étoiles plus élevée que dans les régions entre les bras ou que dans le halo. Toutefois, on trouve à plusieurs endroits dans la Galaxie des concentrations d'étoiles liées par la gravité. De tels groupements d'étoiles sont appelés **amas globulaires** s'ils contiennent de plusieurs milliers à quelques millions d'étoiles. Ils portent le nom d'**amas ouverts** s'ils comportent de quelques dizaines à quelques milliers de membres. Les amas d'étoiles sont très importants dans le raffinement des théories sur l'évolution stellaire, car ils comprennent des étoiles qui ont été formées à la même époque. La masse initiale des étoiles de l'amas est

le seul paramètre qui déterminera son évolution.

Les catalogues astronomiques

Entre 1758 et 1784, l'astronome français Charles Messier (1730–1817) recensa dans le ciel une centaine de taches lumineuses floues susceptibles d'être confondues avec des comètes. À cette époque où beaucoup se faisaient chasseurs de comètes ; le travail de Messier visait à leur éviter de faire des erreurs et échapper ainsi au ridicule d'une fausse alerte. Le catalogue Messier compte 110 objets dont certains n'apparaissaient pas dans la liste originale, ceux-ci ayant été ajoutés à la suite de la découverte de documents appartenant à l'astronome Pierre Méchain (1744–1804) qui donnaient la position d'autres objets.

Parmi les objets du catalogue, on trouve des galaxies, des nébuleuses et des amas d'étoiles, qui sont aujourd'hui désignés par la lettre M suivie du numéro dans la liste de Messier. La liste complète des 110 objets du catalogue Messier figure en fin d'ouvrage, en p. 357.

Plusieurs autres catalogues, parus depuis, comptent un nombre toujours plus élevé d'objets célestes. Parmi les plus connus, mentionnons le *New General Catalog (NGC)*, publié en 1888 et dont la première édition recensait plus de 8 000 objets. Vingt ans plus tard, l'*Index Catalog (IC)* répertoriait plus de 13 000 objets. Plus récemment, en 1997, l'Agence spatiale européenne a publié des catalogues rassemblant plus de 2 500 000 étoiles et objets astronomiques. Les données du catalogue ont été enregistrées entre 1989 et 1993 par le satellite Hipparcos, destiné à l'astrométrie. Il est déjà prévu qu'un satellite du même genre, mais encore beaucoup plus performant, soit de nouveau mis en orbite dans quelques années, dans le but d'augmenter le nombre d'objets répertoriés et de préciser les mesures obtenues la première fois.

Les **amas globulaires** sont de vieilles agglomérations de centaines de milliers d'étoiles en moyenne dont la taille varie de 20 à quelques centaines d'années-lumière. La forme des amas globulaires est la plupart du temps sphérique ou très légèrement ellipsoïdale. La concentration d'étoiles augmente vers le centre de l'amas pour atteindre une densité d'étoiles d'environ 500 fois celle que l'on trouve dans l'environnement solaire. Les étoiles d'un amas globulaire en particulier sont si rapprochées les unes des autres, à l'échelle galactique, que l'on considère qu'elles sont toutes à la même distance de nous.



Bien que les amas globulaires diffèrent les uns des autres par leur taille, leur masse, leur luminosité et leur composition chimique, ils sont tous formés d'étoiles très âgées. Un grand nombre d'étoiles dans les amas globulaires appartiennent en effet au groupe des géantes rouges. La luminosité moyenne des amas globulaires situés dans les galaxies elliptiques proches varie assez peu d'une galaxie à l'autre. Elle est donc souvent employée comme indicateur de distances.

Les quelque 150 amas globulaires de notre Galaxie connus à ce jour sont tous situés dans le halo. On les trouve en plus grande concentration dans le voisinage des pôles galactiques, c'est-à-dire qu'il y a peu d'amas globulaires près du plan de la Galaxie. La plupart se déplacent sur des orbites très fortement excentriques autour du centre de la Galaxie, ce qui les amène parfois à 100 000 années-lumière du disque. Le nombre total d'amas globulaires dans notre Galaxie se situe probablement entre 180 et 200.

L'un des amas globulaires les plus remarquables est sans doute M13, dans la constellation d'Hercule (figure 8.3). C'est un des plus gros amas globulaires du ciel de l'hémisphère Nord, avec près d'un million d'étoiles. Il est facile de l'observer avec une bonne paire de jumelles.

Les **amas ouverts** sont également des agglomérations d'étoiles de forme irrégulière, beaucoup moins compactes et beaucoup moins riches que les amas globulaires. Ils contiennent en moyenne quelques centaines d'étoiles souvent très jeunes (entre quelques millions et 100 millions d'années) et plutôt semblables sur le plan de la composition chimique et de l'âge. Comme il a été mentionné, seule la masse distingue une étoile d'une autre au sein d'un amas, et comme les étoiles de l'amas ouvert sont toutes à la même distance de nous, la comparaison de leur luminosité absolue est aisée. L'étude des étoiles composant un amas ouvert est donc importante pour la vérification des théories stellaires.

Bien que plus de 1 000 amas ouverts aient été répertoriés à ce jour dans la Galaxie, ce nombre ne représente qu'une fraction du total en raison du fait que la plupart, cachés par le disque galactique, ne peuvent être observés. Les amas ouverts sont surtout situés dans les bras spiraux, là où la concentration de gaz est plus élevée.

Parmi les amas ouverts les plus connus et les plus beaux, notons les Pléiades (M45) et les Hyades, tous deux dans la constellation du Taureau (figures 8.4 et 8.5), et Præsepe (M44), également nommé amas de la Ruche, dans la constellation du Cancer. Les Pléiades, en particulier, constituent un véritable



FIGURE 8.3

Le spectaculaire amas globulaire M13, dans la constellation d'Hercule. ☿

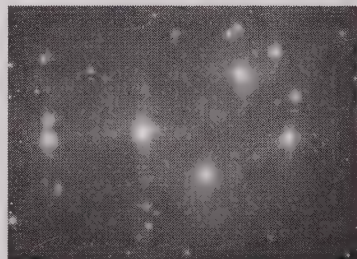


FIGURE 8.4

L'amas ouvert des Pléiades est l'un des éléments célestes connus depuis le plus longtemps. ☿

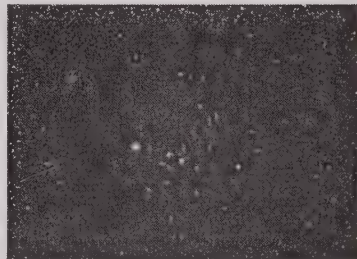


FIGURE 8.5

L'amas ouvert des Hyades, dans la constellation du Taureau

test d'acuité : dans de bonnes conditions d'observation, on devrait distinguer les six à huit étoiles les plus brillantes de l'amas. À l'aide de jumelles, on devrait pouvoir en distinguer une trentaine. En réalité, l'amas des Pléiades compte plus de 100 étoiles.

8.3 Nébuleuses

Le mot **nébuleuse**, tel qu'il est employé ici, désigne des objets célestes gazeux. Cependant, pour des raisons historiques, il est fréquent qu'il désigne tout objet céleste dont les contours ne sont pas nets et qu'on ne peut résoudre qu'à l'aide d'un assez bon télescope. Après l'invention de la lunette astronomique, tout objet qui n'était pas une étoile était appelé une **nébuleuse**. Le catalogue Messier, qui comprend des galaxies, des amas d'étoiles et des nébuleuses, présentait ces objets comme appartenant à une seule classe. C'est d'ailleurs pourquoi, par exemple, on appelle encore souvent la galaxie d'Andromède (M31) la **nébuleuse d'Andromède**.

Ce qui aujourd'hui porte le nom de **nébuleuse** comprend trois types d'objets : les nébuleuses lumineuses, les nébuleuses obscures et les nébuleuses planétaires.

Les **nébuleuses lumineuses** sont des nuages de poussières et de gaz interstellaires lumineux principalement composés d'hydrogène ionisé. Ces nuages contiennent également des éléments et des molécules issus de restes d'étoiles tels que de l'hélium, de l'oxygène, de l'eau, etc. Si la concentration et la quantité de matière dans le nuage est assez grande, ces nébuleuses sont souvent le siège de la formation d'étoiles, engendrant ainsi des groupes ou des amas d'étoiles. On appelle parfois ces nébuleuses des **berceaux** ou des **pouponnières** d'étoiles.

Une nébuleuse lumineuse peut être dite en **émission** ou en **réflexion**, selon le phénomène qui est à l'origine de la luminosité. Si les étoiles qui naissent au sein de la nébuleuse sont plutôt massives et chaudes (c'est-à-dire de type O ou B), leur radiation pourra être suffisamment intense pour exciter le gaz environnant, qui à son tour émettra du rayonnement (nébuleuse en émission). Si les nouvelles étoiles ne sont pas tout à fait assez massives et chaudes, leur rayonnement ne fera que se réfléchir sur les poussières de la nébuleuse. Elles illuminent ainsi la nébuleuse par leur présence (nébuleuse en réflexion). La luminosité des nébuleuses en émission, qui contiennent



également des poussières, est en partie attribuable au phénomène de réflexion.

Les figures 8.6 à 8.9 montrent quatre des nébuleuses lumineuses les plus connues. Notez, sur les figures reprises dans l'encart couleur, la teinte rouge du gaz, attribuable à l'hydrogène excité.

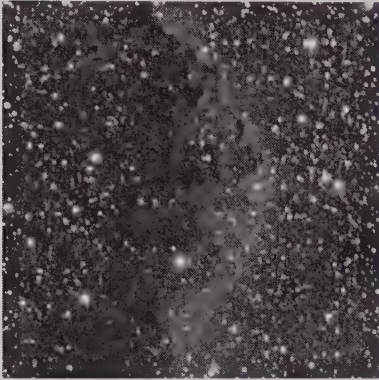


FIGURE 8.6

La nébuleuse lumineuse de l'Amérique du Nord (NGC 7000)

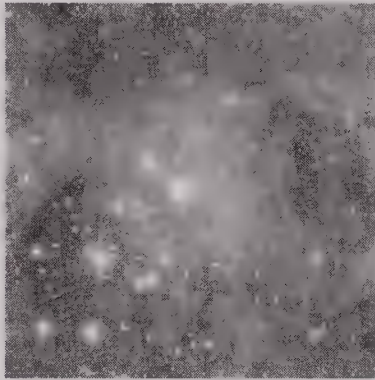


FIGURE 8.7

La nébuleuse lumineuse Rosette (NGC 2237-9,46)

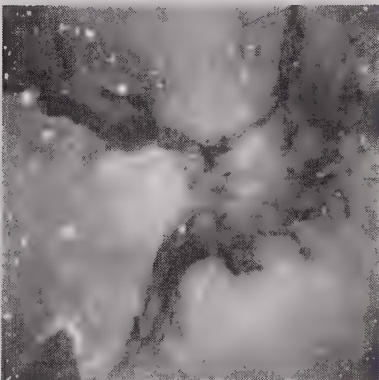


FIGURE 8.8

La nébuleuse lumineuse Trifide (M20)

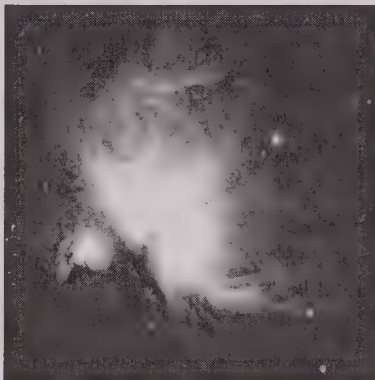


FIGURE 8.9

La nébuleuse lumineuse d'Orion (M42)

Sur le fond brillant de certaines nébuleuses lumineuses se profilent parfois des nuages sombres qu'on ne distingue que grâce au contraste avec leur environnement. Ce sont les **nébuleuses obscures**, constituées surtout d'hydrogène neutre et plus denses que les nébuleuses lumineuses. Ces objets sont visibles lorsqu'ils obscurcissent une partie de la lumière

provenant d'une nébuleuse lumineuse située en arrière-plan. La Tête de Cheval et NGC 1999, dans la constellation d'Orion, comptent parmi les nébuleuses obscures les plus connues et les plus impressionnantes (figures 8.10 et 8.11).

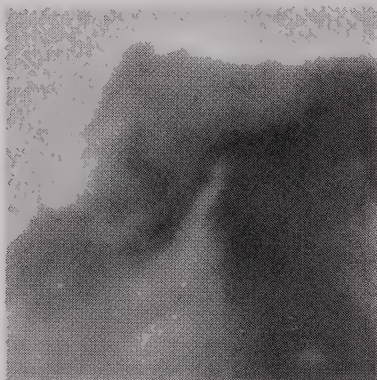


FIGURE 8.10

La nébuleuse obscure Tête de Cheval, dans la constellation d'Orion. 📷

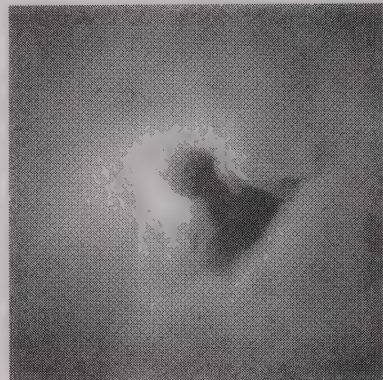


FIGURE 8.11

La nébuleuse obscure NGC 1999, dans la constellation d'Orion. 📷

Les nébuleuses planétaires sont des nuages de gaz excités par des étoiles qui ont atteint la fin de leur vie adulte. Il a déjà été question, à la section 7.8, de cette étape tardive de l'évolution d'une étoile pendant laquelle elle expulse ses couches gazeuses dans l'espace. Ce que l'on appelle **nébuleuse planétaire** désigne donc le nuage de gaz légèrement elliptique qui est irradié par l'étoile centrale et qui s'illumine selon le même phénomène qui donne lieu à une nébuleuse lumineuse en émission. Le nom de **nébuleuse planétaire** trouverait son origine dans le fait que les astronomes du XIX^e siècle pensaient que ces nébuleuses ressemblaient à des planètes telles que Neptune ou Uranus. La phase de nébuleuse planétaire d'une étoile peut durer environ quelques dizaines de milliers d'années. Au-delà de cette période, la matière éjectée se disperse dans le milieu interstellaire.

Parmi les nébuleuses planétaires les plus connues, notons la nébuleuse de la Fourmi (Mz3), l'Œil rayonnant (NGC 6751) dans l'Aigle, l'Haltère, dans le Petit Renard (M27), la nébuleuse Hen 1357, dans l'Autel, la nébuleuse de l'Hélice, dans le Verseau, et la nébuleuse du Spirographe, dans le Lièvre (figures 8.12 à 8.17). Les figures 7.18 et 7.19 (p. 276) montrent également des nébuleuses planétaires.

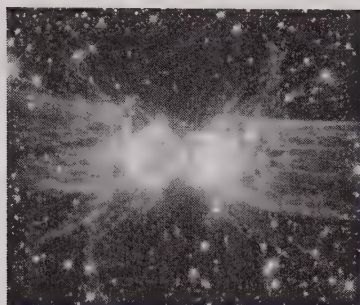


FIGURE 8.12

La nébuleuse planétaire de la Fourmi (Mz3), ainsi nommée en raison des deux bulbes de gaz qui pourraient faire penser à la tête et au thorax d'un insecte.

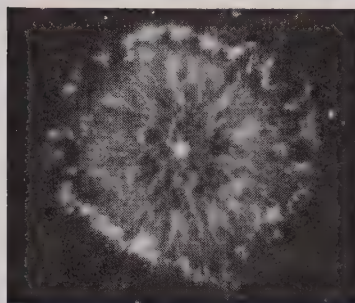


FIGURE 8.13

La nébuleuse planétaire de l'Œil rayonnant (NGC 6751) dans la constellation de l'Aigle. 📷

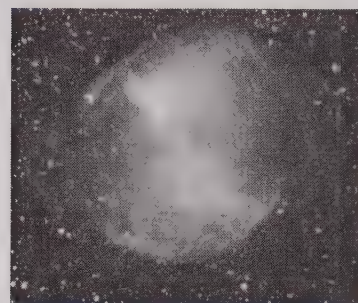


FIGURE 8.14

La nébuleuse planétaire de l'Haltère (M27), dans la constellation du Petit Renard. 📷

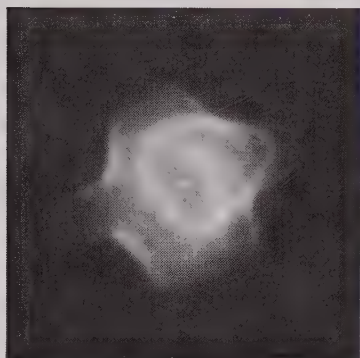


FIGURE 8.15

La très jeune nébuleuse planétaire Hen 1357, dans la constellation de l'Autel. 📷

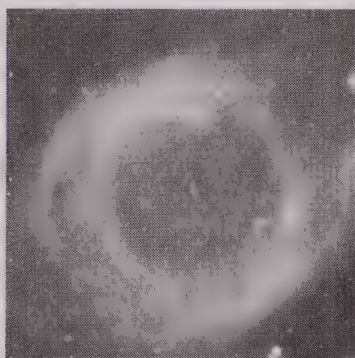


FIGURE 8.16

La nébuleuse de l'Hélice, dans le Verseau, est, à 450 années-lumière, l'une des plus rapprochées de nous. 📷

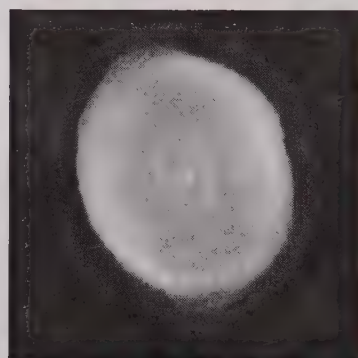


FIGURE 8.17

La nébuleuse planétaire du Spirographe (IC 418), dans la constellation du Lièvre.

8.4 Classification des galaxies

Au début du siècle dernier régnait une controverse sur la nature de certaines nébuleuses. Deux camps s'opposaient : ceux qui croyaient que toutes les nébuleuses faisaient partie de notre Galaxie et ceux qui soupçonnaient que certaines nébuleuses pouvaient être de nature extragalactique. C'est Edwin P. Hubble (1889–1953) qui, en 1925, fit une découverte qui lui permit de départager les deux camps. L'astronome américain repéra, dans les « nébuleuses » M31 de la constellation

d'Andromède et M33 de la constellation du Triangle, des étoiles céphéides, ces étoiles variables dont il est possible de déterminer la distance à partir de la période de variation de la luminosité. Il mesura ainsi que M31 était située à près de 1 million d'années-lumière, ce qui est bien plus grand que les dimensions de la Galaxie acceptées à cette époque. Même si, aujourd'hui, la distance à la galaxie d'Andromède est évaluée à plus de 2,2 millions d'années-lumière, les résultats de Hubble confirmaient que ces nébuleuses étaient situées à l'extérieur de la Voie lactée et qu'elles constituaient bel et bien des galaxies, et non des objets gazeux et diffus. Du même coup, l'Univers s'agrandissait de manière phénoménale.

Peu après cette découverte, alors que de nouvelles galaxies étaient reconnues, on remarquait que toutes n'avaient pas la même forme. Hubble a donc établi un système de classification, encore très utilisé aujourd'hui, qui divise les galaxies en cinq grandes catégories, selon leur aspect visuel : les galaxies elliptiques (E), les galaxies lenticulaires (S0), les galaxies spirales normales (S), les galaxies spirales barrées (SB) et les galaxies irrégulières (figure 8.18).

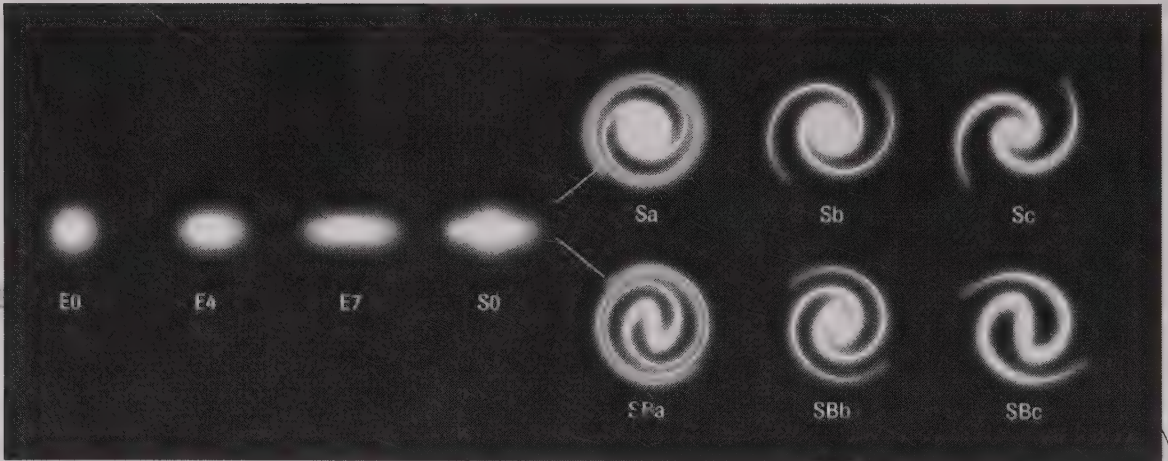


FIGURE 8.18

Classification des galaxies de Hubble. Sur ce schéma, les galaxies irrégulières ne sont pas représentées.

Contrairement à ce qu'on a déjà cru, la classification de Hubble ne représente pas la séquence d'évolution des galaxies dans le temps, du stade elliptique au stade spirale, notamment. Les galaxies ont fort probablement pris leur forme actuelle peu après leur création il y a environ dix milliards d'années ou à la suite d'une collision avec une autre galaxie.



Galaxies elliptiques (E)

Les galaxies elliptiques ont une forme allant de la sphère parfaite (E0) à des ellipsoïdes fortement excentriques (E7). Elles comportent une infime proportion d'étoiles massives, ce qui est le signe d'une vieille population stellaire (étoiles de population II). Elles sont également pauvres en gaz et en poussières, et leur rotation est assez lente. Sur le plan de la taille et de la masse, les galaxies elliptiques présentent des extrêmes. Les plus petites galaxies de l'Univers sont des galaxies elliptiques, aussi appelées **naines elliptiques**. Leur diamètre est de quelques kiloparsecs et leur masse n'est que de quelques millions de masses solaires. La galaxie d'Andromède possède des galaxies satellites qui sont des galaxies naines. De même, les plus gigantesques sont également des elliptiques. Leur taille peut aller jusqu'à 100 kiloparsecs et leur masse atteint parfois des millions de millions de masses solaires. Les figures 8.19 à 8.21 présentent trois galaxies elliptiques d'excentricité différente dont la très connue M87 dans la constellation de la Vierge, l'une des plus grosses galaxies connues de l'Univers.

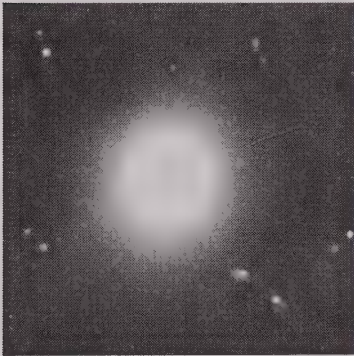


FIGURE 8.19

La galaxie elliptique M87, dans la constellation de la Vierge, est de type E1.

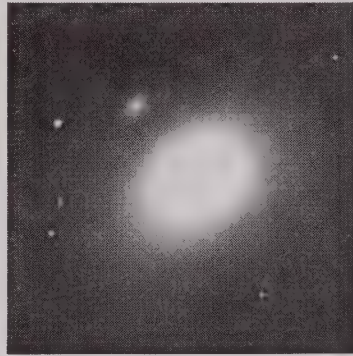


FIGURE 8.20

La galaxie elliptique M86, dans la constellation de la Vierge, est parfois classée de type E3. On la trouve également dans la classe des galaxies lenticulaires.

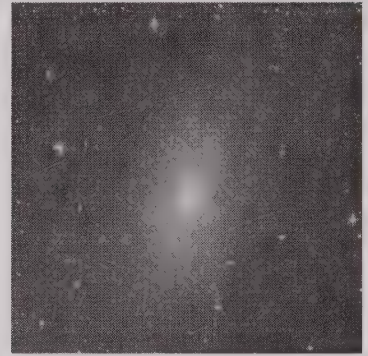


FIGURE 8.21

La galaxie elliptique M110 est de type E5 ou E6. Elle est un compagnon de M31, la galaxie d'Andromède. 

Galaxies lenticulaires (S0)

Les galaxies lenticulaires sont présentées, dans la classification de Hubble, comme une transition entre les galaxies elliptiques et les galaxies spirales. Au premier abord, par leur forme plutôt sphérique, elles pourraient être confondues avec des galaxies elliptiques E0. Toutefois, les S0 contiennent suffisamment de

gaz et de poussières pour qu'on ne puisse les inclure dans les galaxies elliptiques. Leur région centrale présente un bulbe prononcé et un renflement équatorial qui comporte un disque de gaz et de poussières, ce qui les rapproche plutôt des galaxies spirales, mais ne leur en confère pas toutes les propriétés.

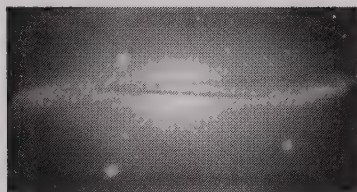


FIGURE 8.22

La galaxie spirale ESO 510-G13, dans la constellation de l'Hydre, se présente à nous par le côté.

Galaxies spirales (S ou SB)

Les galaxies spirales contiennent tant de gaz et de poussières qu'on peut déduire qu'une galaxie est une spirale même si elle se présente à nous par le côté (figure 8.22). Leur diamètre atteint souvent entre 20 et 60 kiloparsecs et leur masse se situe entre 10^7 et 10^{11} masses solaires.

Ces galaxies sont classées selon deux critères : le degré d'ouverture des bras spiraux et l'importance relative de la taille du renflement central ou bulbe. Selon cette classification, une faible ouverture des bras va de pair avec un bulbe important. Plus de la moitié des galaxies spirales rencontrées présentent une barre d'étoiles qui traverse le bulbe et dont les extrémités sont en quelque sorte des points de rattachement pour les bras spiraux. Il est alors question de **spirale barrée**. Malgré qu'on les trouve en plus faible nombre, les galaxies spirales qui ne possèdent pas de barre sont nommées **spirales normales** ou **ordinaires**. Des observations récentes ont montré que la Voie lactée, encore souvent classée comme une spirale ordinaire, présente elle aussi une structure centrale apparentée à une barre, ce qui nécessitera que son classement soit modifié. Le raffinement des techniques d'observation à travers les épais nuages de gaz et de poussières au centre des galaxies spirales a permis d'établir que la présence d'une barre est non seulement tout à fait normale, mais également un élément important dans l'évolution d'une galaxie.

Pour désigner les spirales normales, on emploie la majuscule **S**, suivie des lettres minuscules **a**, **b** et **c** dans l'ordre d'ouverture croissante des bras. À titre d'exemple, la galaxie d'Andromède (M31) est fort probablement une galaxie spirale Sb. Les figures 8.23 à 8.25 montrent des exemples de galaxies S, dont la très connue M51, dans la constellation des Chiens de Chasse, spirale Sc.

Les spirales barrées sont désignées par les lettres **SB** auxquelles on ajoute les trois mêmes catégories **a**, **b** et **c** selon la taille de leur bulbe et l'ouverture de leurs bras. Les figures 8.26 à 8.28 présentent des galaxies spirales barrées.

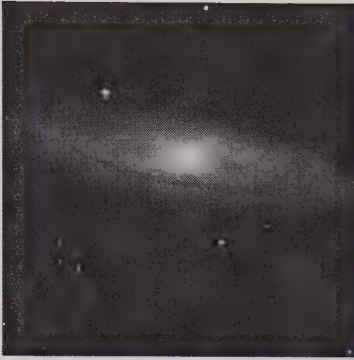


FIGURE 8.23

La galaxie spirale M65, dans la constellation du Lion, est de type Sa. 📷

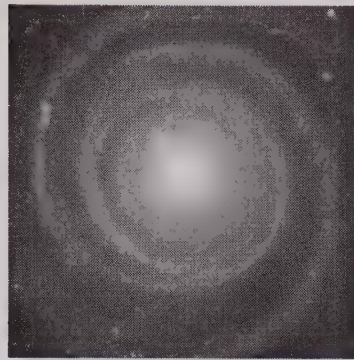


FIGURE 8.24

La galaxie spirale NGC 4622 est de type Sb. 📷

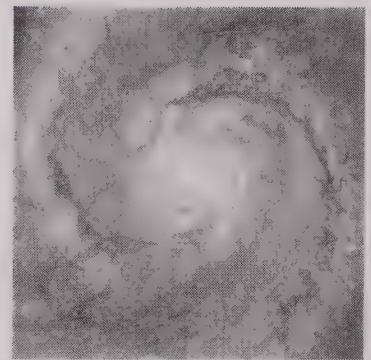


FIGURE 8.25

La galaxie spirale M51, dite du Tourbillon, dans la constellation des Chiens de Chasse, est de type Sc. 📷

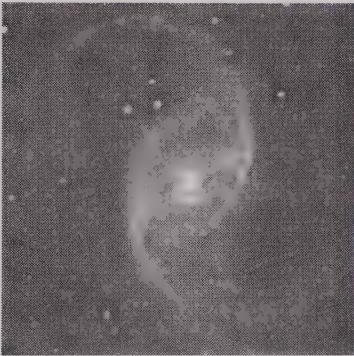


FIGURE 8.26

La galaxie spirale barrée NGC 1530, dans la constellation de la Girafe, est de type SBb.

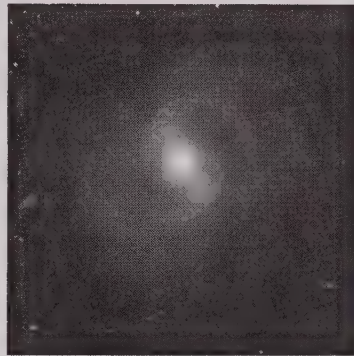


FIGURE 8.27

La galaxie spirale barrée M91, dans la constellation de la Chevelure de Bérénice, est de type SBb. 📷



FIGURE 8.28

La galaxie spirale barrée NGC 1073, dans la constellation de la Baleine, est de type SBc. 📷

Galaxies irrégulières

Les galaxies irrégulières ont une forme mal définie et plus ou moins chaotique. Elles constituent les galaxies dont le contenu de gaz et de poussières est le plus élevé. Les habitants de l'hémisphère Sud ont la chance de pouvoir observer, à l'œil nu, deux galaxies irrégulières qui sont les plus brillantes du ciel terrestre : le Grand Nuage de Magellan (figure 8.29), situé à 170 000 années-lumière, et le Petit Nuage de Magellan, situé à 200 000 années-lumière. Ce sont des galaxies naines irrégulières gravitant autour de notre Galaxie.

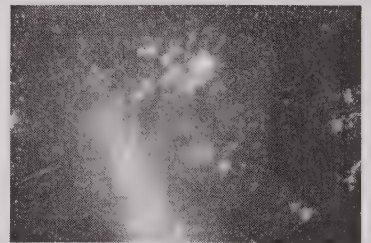


FIGURE 8.29

Le Grand Nuage de Magellan est une galaxie irrégulière. 📷

8.5 Amas de galaxies

Le nombre de galaxies connues ne cesse d'augmenter. Aujourd'hui, selon les observations effectuées par le télescope spatial Hubble, les astronomes évaluent à 75 milliards le nombre de galaxies accessibles à nos instruments ! Voilà de quoi occuper les astronomes pour les siècles à venir... Comme chacune renferme quelques centaines de milliards d'étoiles, on arrive rapidement à des nombres qui sont trop grands pour qu'il soit possible de s'imaginer l'ampleur de cet Univers ; ce sont littéralement des nombres astronomiques ! Rappelons-nous qu'à l'œil nu, dans l'hémisphère Nord, on ne voit qu'une seule galaxie et que quelques milliers d'étoiles.

Même si les galaxies sont séparées par de grandes distances, elles ne sont pas isolées pour autant. Ainsi, de la même façon que les étoiles sont réunies en galaxies, celles-ci tendent à se grouper en amas qui eux-mêmes se rassemblent en superamas de galaxies pouvant contenir des centaines, voire des milliers d'amas.

Il est intéressant de noter qu'à l'intérieur d'un amas les galaxies sont relativement plus proches entre elles que ne le sont les étoiles d'une même galaxie. En effet, la distance entre les galaxies d'un même amas est de l'ordre de 150 fois leur diamètre, alors que la distance entre deux étoiles d'une même galaxie est de l'ordre de 10 millions de fois leur diamètre.

Notre Galaxie fait partie d'un amas qui s'appelle le **Groupe local**. C'est un petit amas d'environ 4 millions d'années-lumière de diamètre qui comprend une trentaine d'individus dont les deux Nuages de Magellan et notre principale voisine, la galaxie d'Andromède. Les membres les plus massifs, par ordre décroissant, du Groupe local sont trois galaxies spirales, la galaxie d'Andromède, la Voie lactée, la galaxie M33 du Triangle, ainsi qu'une galaxie irrégulière, le Grand Nuage de Magellan. Les autres objets sont des galaxies peu massives, surtout des irrégulières ou des naines elliptiques. Les membres d'un même amas sont tous liés entre eux par gravité et leur mouvement au sein de l'amas est déterminé par leur position par rapport au centre de gravité commun.

Le Groupe local, avec sa trentaine de galaxies, fait figure de parent pauvre aux côtés d'un de ses amas voisins, l'énorme amas de la Vierge, qui compte 2 500 membres et qui est situé à plus de 50 millions d'années-lumière de nous. Plusieurs objets Messier font partie de cet amas, dont la galaxie elliptique



géante M87, située près du centre de gravité de l'amas. L'amas de la Vierge est si gros et si massif que l'ensemble du Groupe local (son centre de gravité) est en orbite autour de lui à une vitesse de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. On estime qu'à cette vitesse le Groupe local pourrait effectuer une révolution tous les 100 milliards d'années. L'Univers tel que nous le connaissons n'étant « âgé » que de 15 milliards d'années, il reste encore beaucoup de temps avant que nous ayons fait un seul tour de l'amas de la Vierge.

Le tableau 8.1 comprend la liste de certains amas de galaxies et, pour chaque amas, indique la distance moyenne de ses membres à la Voie lactée ainsi que sa vitesse radiale. La vitesse radiale désigne la vitesse avec laquelle un objet s'éloigne (ou se rapproche) de nous.

TABLEAU 8.1

Quelques amas de galaxies

Nom latin	Nom français	Distance (en Mpc)	Vitesse (en km/s)
Virgo I	Vierge I	15	960
Ursa Major S	Grande Ourse S	17	890
Ursa Major N	Grande Ourse N	18	1060
Fornax I	Fourneau I	18	1420
Eridanus	Éridan	21	1550
Puppis	Poupe du Navire	29	2100
Antlia	Machine pneumatique	40	2830
Telescopium	Télescope	40	2840
Centaurus A3526	Centaure A3526	43	2990
Hydra A1060	Hydre A1060	48	3360
Pavo	Paon	55	3820
Pegasus	Pégase	55	3840
Cancer	Cancer	61	4250

Remarquez-vous quelque chose de particulier ? Si vous êtes bon observateur, vous constaterez que plus un amas est situé loin de la Voie lactée, plus il s'en éloigne rapidement. C'est le même type d'observation qui a mené Hubble à établir une relation et une constante qui portent désormais son nom, et qui ont fortement contribué à la théorie selon laquelle l'Univers est en expansion. Nous étudierons plus en détail le travail de Hubble et le mouvement d'expansion de l'Univers au chapitre 9.

Tous les amas, le Groupe local compris, font partie de structures encore plus grandes, les **superamas**, dont la taille est de l'ordre d'une centaine de mégaparsecs. Notre **Super-**

Regarder dans le passé

Qu'observons-nous exactement en pointant un télescope sur un amas situé à 50 millions d'années-lumière? Voyons-nous cet objet tel qu'il est au moment de l'observation? Avant de répondre à ces questions, il faut se souvenir que la vitesse de la lumière est très élevée (300 000 km/s), mais pas infinie. Cela signifie que la lumière émise par un objet éloigné met un certain temps à atteindre notre rétine. Par exemple, la lumière du Soleil prend huit minutes et demie à arriver à la Terre. Cela signifie que si le Soleil s'éteignait d'un seul coup, nous ne le saurions que huit minutes et demie plus tard. Nous voyons donc toujours le Soleil tel qu'il était il y a plus de huit minutes.

De la même façon, un objet situé à quelques années-lumière de nous apparaît tel qu'il était lorsque la lumière que l'on en reçoit aujourd'hui a été émise. Par exemple, la galaxie d'Andromède, qui se trouve à 2,2 millions d'années-lumière (2×10^{13} km), se présente à nous dans son état d'il y a 2,2 millions d'années.

Ainsi, plus un objet est éloigné de nous, plus la lumière qu'on en reçoit a mis longtemps à nous atteindre et plus elle nous informe sur l'état de cet objet à une époque antérieure à la nôtre. Le fait que la vitesse de la lumière soit finie nous permet donc de regarder... vers le passé!

amas local, qui comprend le Groupe local, l'amas de la Vierge et plusieurs autres amas et galaxies isolées, a une taille d'environ 20 mégaparsecs.

Après la découverte des superamas dans les années 70, l'étude de leur distribution dans l'Univers a donné aux astronomes des indices supplémentaires relativement à leur formation et leur évolution. En effet, les amas et les superamas ne sont pas distribués uniformément dans l'Univers. Ils se trouvent plutôt à la surface d'immenses

bulles de quelques centaines de millions d'années-lumière. Ainsi, la morphologie de l'Univers est parfois comparée à une éponge ou à de la mousse de savon dont les parois présentent une forte densité de galaxies et dont les poches de vide ne comportent presque pas de galaxies. Cette structure implique qu'il y aurait eu, très tôt après la naissance de l'Univers, une répartition non uniforme de la matière.

8.6 Collisions et interactions entre galaxies

Nous avons déjà noté que les distances entre les galaxies sont relativement courtes par rapport aux dimensions de celles-ci. Cette proximité permet aux forces attractives entre certaines galaxies rapprochées de l'emporter sur le mouvement d'expansion de l'Univers qui tend à les faire s'éloigner les unes des autres. Ce mouvement entraîne alors l'inévitable: des collisions entre galaxies.

De toutes les galaxies observées, un nombre non négligeable sont en contact ou en forte interaction gravitationnelle avec au moins une autre galaxie, au point où elles arrivent à se déformer mutuellement (figures 8.30 à 8.32). Lorsqu'il est question d'interactions entre galaxies, l'emploi des termes **contact** ou **collision** est plutôt abusif, car ces phénomènes sont très lents et s'étendent sur des millions d'années, et la probabilité qu'ils provoquent de véritables collisions d'étoiles individuelles est négligeable, en raison des grandes distances les séparant les

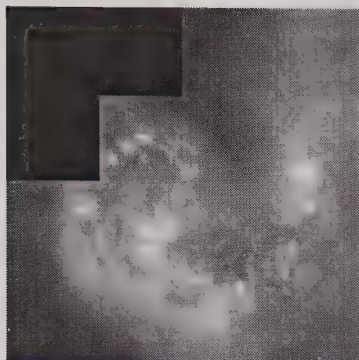


FIGURE 8.30

Les Antennes sont deux galaxies (NGC 4038 et 4039) en interaction. 📷

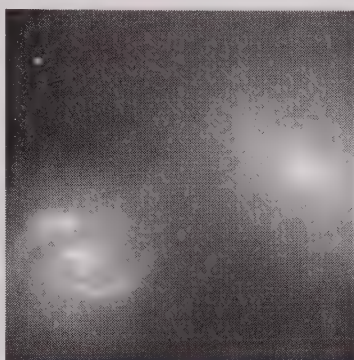


FIGURE 8.31

Les galaxies NGC 1409 et 1410 sont probablement entrées en collision il y a 100 millions d'années. 📷



FIGURE 8.32

La petite galaxie à droite (IC 2163) est déformée par la grosse galaxie NGC 2207, alors qu'elles sont rapprochées l'une de l'autre. 📷

unes des autres à l'intérieur des galaxies. Toutefois, les nuages de gaz interstellaires dans les galaxies en interaction subissent de fortes compressions qui peuvent donner lieu à de nouvelles pouponnières d'étoiles. De plus, certaines étoiles des galaxies en interaction peuvent être éjectées dans l'espace intergalactique. Dans l'amas de la Vierge, par exemple, ces étoiles expulsées pourraient former une bonne partie des 10 % à 30 % d'étoiles qui circulent librement entre les galaxies.

La lenteur extrême des rencontres entre galaxies rend impossibles l'observation et l'étude de ces événements en direct. À ce chapitre, les simulations réalisées par ordinateur ont permis aux astronomes de reconstituer les étapes de divers types de collision, selon les dimensions et les positions initiales des galaxies. On a remarqué que, dans plusieurs cas, ce genre de collisions engendrerait une grosse galaxie elliptique reconstituée à partir des matériaux des deux galaxies initiales.

Ces modèles sont en accord avec certaines observations dont celle qui veut que la majorité des galaxies elliptiques importantes se trouvent au cœur d'amas densément peuplés. Un exemple proche est celui de l'amas de la Vierge, qui abrite en son centre la galaxie elliptique supergéante M87 dont les dimensions sont 20 fois celles de notre Galaxie.

L'évolution des galaxies est aujourd'hui l'un des sujets les plus chauds en astronomie. Bien que l'on n'en comprenne pas encore tous les détails, il est clair que les interactions entre galaxies ont joué un rôle important dans leur processus évolutif. Par exemple, la Voie lactée a en partie été modifiée par la

capture de galaxies plus petites, et elle agit encore aujourd'hui comme une galaxie dite **cannibale** en ce sens que les astronomes ont récemment observé qu'une galaxie naine dans la constellation du Sagittaire est en train d'être absorbée par l'attraction gravitationnelle de notre Galaxie.

8.7 Galaxies actives

On observe dans notre Univers un certain nombre de galaxies dont l'émission de rayonnement électromagnétique est plus intense que celle des galaxies dites **normales**. Ce surpassement se manifeste dans toutes les longueurs d'onde, du domaine radio jusqu'aux rayons X. On appelle **galaxies actives** ces galaxies qui libèrent d'énormes quantités d'énergie.

Aujourd'hui, alors que plusieurs galaxies actives ont été observées et étudiées, on les classe selon leur type de rayonnement, la violence de leur émission d'énergie, etc. Plus loin, nous traitons de trois classes de galaxies actives : les radiogalaxies, les galaxies de Seyfert et les quasars. Bien que ces objets présentent des caractéristiques en apparence parfois fort différentes, les astrophysiciens travaillent à l'établissement de modèles plus généraux qui engloberaient la plupart des galaxies actives.

Il existe toutefois une caractéristique commune à toutes les galaxies actives, de plus en plus acceptée par la communauté scientifique : le moteur principal de la formidable source d'énergie de ces galaxies réside en leur cœur et consiste en un trou noir extrêmement massif. Selon le type de galaxie active, la masse du trou noir en son centre sera de plusieurs millions à plusieurs milliards de masses solaires. En attirant la matière environnante, le trou noir crée un important disque d'accrétion au sein duquel la température et la pression deviennent si élevées que s'en dégagent d'énormes quantités d'énergie et de puissants rayonnements. Les détails du processus sont très complexes et relèvent de l'astrophysique avancée.

Les premières galaxies actives à avoir été étudiées sont les galaxies de Seyfert, ainsi nommées en l'honneur de l'astronome américain Carl Seyfert (1911–1960) qui, en 1943, s'intéressa à des galaxies spirales au noyau central particulièrement brillant. Les galaxies de Seyfert ne composent qu'un petit pourcentage des galaxies spirales. Elles présentent un excès de rayonnement continu à toutes les longueurs d'onde. De plus, l'étude de spectres de ces galaxies révèle la présence d'énormes masses gazeuses en mouvement très rapide (plusieurs centaines de



kilomètres par seconde) au sein de la Galaxie. L'objet Messier M77, dans la constellation de la Baleine, est l'une des plus brillantes galaxies de ce type (figure 8.33).

À la fin des années 40, on détecta de puissants émetteurs d'ondes radio qui ont par la suite été associés à des galaxies elliptiques géantes. On appela ces objets des **radiogalaxies**, lesquelles comportent en leur centre une source radio très compacte. L'aspect le plus spectaculaire de ces galaxies consiste dans la présence de deux immenses lobes déployés de part et d'autre de la source centrale (figure 8.34). Ces lobes ne peuvent être vus qu'en lumière radio. Ils s'étendent sur des distances de l'ordre de quelques dizaines de fois le diamètre (mesuré en lumière visible) de la galaxie. Les lobes sont en quelque sorte la terminaison de jets de matières issus du centre de la source.

Le type de galaxie active le plus surprenant est sans doute le quasar. Le terme **quasar** est une contraction de l'expression anglaise *quasi stellar radiosource*, signifiant «source radio quasi-stellaire». Ce nom vient du fait que, lorsque les astronomes pointaient leurs instruments optiques vers ces sources radio très intenses, ils voyaient un objet lumineux semblable en apparence à une étoile. Toutefois, les observations ont montré que ces objets ont une luminosité et une masse qui s'apparentent beaucoup plus à des galaxies qu'à des étoiles.

En effet, la puissance des émissions d'un quasar peut être de 100 à 10 000 fois supérieure à celle d'une galaxie normale géante. Sa taille, bien que des milliers de fois plus petite que celle d'une galaxie normale, ne peut être comparée à celle d'une étoile. Les quasars sont plutôt le noyau de jeunes galaxies hyperactives.

L'aspect sans doute le plus étonnant des quasars est leur extraordinaire luminosité. Celle-ci permet aux astronomes d'observer les quasars en grand nombre malgré le fait qu'ils comptent parmi les objets connus les plus éloignés de nous. Le quasar le plus proche de nous est situé à deux milliards d'années-lumière et les plus lointains observés à ce jour se trouvent aux confins de l'Univers observable, à plus de 10 milliards d'années-lumière. À cette distance, l'expansion de l'Univers les fait filer à des vitesses pouvant atteindre 90 % de la vitesse de la lumière.

Les quasars, comme tous les objets lointains de l'Univers, se présentent donc à nous tels qu'ils étaient dans le passé. Leur place dans l'histoire a été précisée grâce au télescope Hubble qui dévoila les restes de galaxies qui les entourent, donnant ainsi des indices qu'ils sont bel et bien des noyaux actifs de jeunes galaxies. Les quasars, tout comme les radiogalaxies, émettent de puissants jets d'énergie. Certains modèles de groupements de galaxies actives traitent d'ailleurs les radiogalaxies

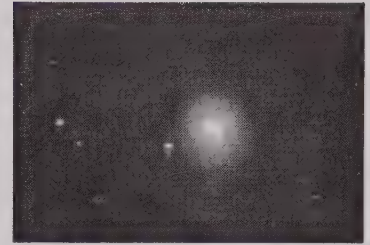


FIGURE 8.33

La galaxie M77, dans la constellation de la Baleine, est une galaxie de Seyfert. L'énergie phénoménale qui est émise par son centre est probablement l'œuvre d'un trou noir supermassif. 📷



FIGURE 8.34

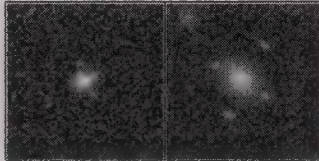
La galaxie M87, présentée à la figure 8.19, est une puissante source radio. 📷

et les quasars comme un seul et même objet qui se présenterait à nous avec un angle différent.

Parmi les autres types de galaxies actives, mentionnons les *quasi stellar objects* (QSO), semblables aux quasars à la différence près qu'ils émettent une moins forte proportion d'ondes radio. Notons également les blazars dont on croit qu'ils pourraient être associés aux quasars et aux radiogalaxies.

Lentille gravitationnelle

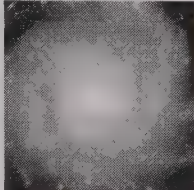
Selon certains principes de la théorie de la relativité générale d'Einstein, la lumière est déviée de sa trajectoire rectiligne lorsqu'elle passe près d'un astre massif. Cet effet, appelé **lentille gravitationnelle**, a été vérifié plusieurs fois alors que sur des clichés apparaissent plusieurs images d'un seul objet caché par un autre de très grande masse (voir la figure ci-contre). Ainsi, des amas, des trous noirs et des galaxies peuvent provoquer un changement de trajectoire du

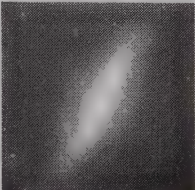


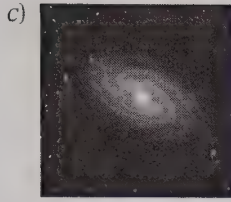
rayonnement d'un objet très éloigné. C'est ainsi que la lumière en provenance de certains quasars est déformée au point de produire des effets étonnants comme le dédoublement de l'image du quasar ou sa déformation en forme d'arc, d'anneau ou de croix. Les effets de lentille gravitationnelle sont donc la source de véritables mirages gravitationnels qui doivent être étudiés avec soin afin que nous ne nous méprenions pas sur la véritable nature de nos observations.

Questions de révision

- Vrai ou faux ?
 - Notre Galaxie est composée de quelques centaines de milliards d'étoiles.
 - Le Soleil est au centre de la Galaxie.
 - L'âge probable de la Galaxie est de 10 milliards d'années.
 - Le Soleil fait le tour de la Galaxie en 220 millions d'années.
 - La Galaxie est immobile dans l'Univers.
 - La séquence morphologique des galaxies de Hubble représente l'évolution d'une galaxie.
- Quel est le nom le plus souvent employé pour désigner notre Galaxie ? Pourquoi ?
- Quel est le diamètre approximatif de la Galaxie ?
- Pour un observateur terrestre, vis-à-vis de quelle constellation se trouve le noyau de la Galaxie ?
- Les amas globulaires sont-ils considérés comme jeunes ou vieux ? Pourquoi ?
- Où trouve-t-on surtout les amas globulaires ?
- À quelle catégorie de galaxies appartiennent les galaxies suivantes ?

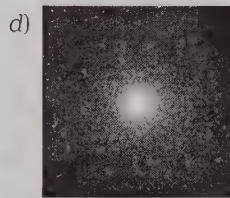
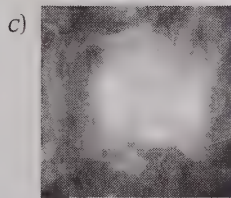
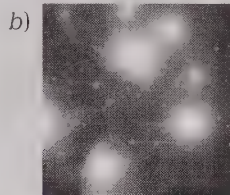
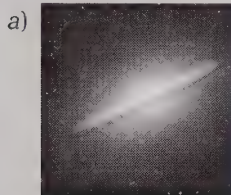
a) 

b) 



8. À quelle catégorie de galaxies appartient la Voie lactée?

9. Les photos suivantes représentent-elles une galaxie, un amas ouvert, un amas globulaire ou une nébuleuse?



10. Peut-on dire qu'un amas ouvert est la même chose qu'une constellation? Pourquoi?

11. Quelle est la source de l'énorme quantité d'énergie émise par les galaxies actives?

12. Qu'est-ce qui illumine les nébuleuses lumineuses?

13. Selon les modèles actuels, quel serait le résultat final probable d'une collision entre galaxies?

14. Quel type d'amas d'étoiles peut être un bon indicateur de distance? Pourquoi?

15. Qu'est-ce qu'une nébuleuse obscure? Comment arrive-t-on à la voir?

16. Qu'est-ce qu'une nébuleuse planétaire?

17. Dans le tableau 8.1, quelle relation peut-on observer entre la distance et la vitesse des amas de galaxies?

18. Que se passe-t-il lorsque deux galaxies entrent en collision? Ce phénomène est-il fréquent?

19. Qu'est-ce qu'une galaxie active?

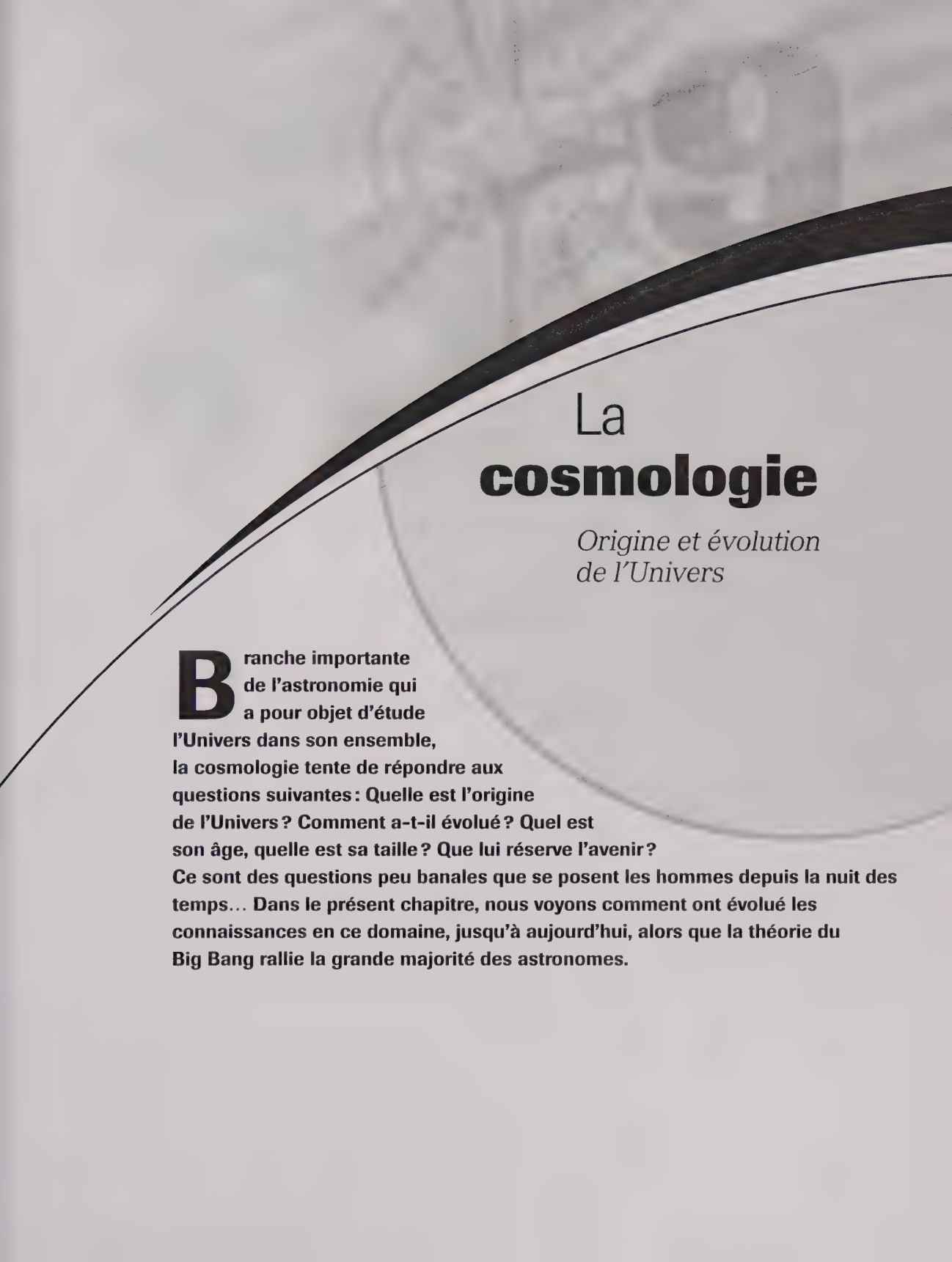
20. Nommez trois sortes de galaxies actives.

21. Qu'est-ce qu'une lentille gravitationnelle?

22. Qu'est-ce que le Groupe local? De quoi est-il composé?

23. Qu'est-ce qui distingue les étoiles de chacune des trois populations stellaires?

24. Quel type de galaxie présente une taille et une masse à la fois les plus petites et les plus grandes des galaxies connues?



La **cosmologie**

*Origine et évolution
de l'Univers*

Branche importante
de l'astronomie qui
a pour objet d'étude
l'Univers dans son ensemble,
la cosmologie tente de répondre aux
questions suivantes : Quelle est l'origine
de l'Univers ? Comment a-t-il évolué ? Quel est
son âge, quelle est sa taille ? Que lui réserve l'avenir ?

Ce sont des questions peu banales que se posent les hommes depuis la nuit des
temps... Dans le présent chapitre, nous voyons comment ont évolué les
connaissances en ce domaine, jusqu'à aujourd'hui, alors que la théorie du
Big Bang rallie la grande majorité des astronomes.

**DANS LES PAGES
QUI SUIVENT,
VOUS APPRENDREZ À :**

- Décrire et expliquer le paradoxe d'Olbers.
- Définir et expliquer l'effet Doppler-Fizeau.
- Énoncer et expliquer la loi de Hubble, et faire le lien entre celle-ci et l'expansion de l'Univers.
- Décrire les principales étapes de l'évolution de l'Univers, selon la théorie du Big Bang.
- Décrire des observations scientifiques qui appuient la théorie du Big Bang.
- Explorer les différentes hypothèses sur l'avenir de l'Univers.



9.1 Pourquoi fait-il noir la nuit ?

Cette question a d'abord été soulevée par certains scientifiques dont Kepler et Halley. Mais c'est l'astronome allemand Heinrich Olbers (1758–1840) qui, en 1826, reposa la question dans le but d'alimenter un débat important sur la taille de l'Univers : celui-ci est-il fini ou infini ? On renvoie aujourd'hui à ce problème par l'expression **paradoxe d'Olbers**.

Le raisonnement d'Olbers était le suivant : si, comme le croyaient la plupart des astronomes de son époque, l'Univers est infini et rempli d'étoiles, alors, peu importe où se porte le regard, celui-ci finira par rencontrer une étoile. Ainsi, le ciel devrait être aussi brillant que la surface du Soleil. Toutefois, nous savons tous que la nuit est bien noire. C'est là que réside le paradoxe. Plusieurs solutions furent proposées afin de le résoudre. Par exemple, on supposa que la lumière des étoiles, dans sa trajectoire vers la Terre, était absorbée par des gaz et des poussières interstellaires. Cependant, cette solution ne tient pas la route, car, selon le principe de conservation de l'énergie, l'absorption continue d'énergie par les gaz rendrait ceux-ci assez chauds pour qu'ils en viennent à émettre du rayonnement à leur tour. On revient ainsi à la case départ.

Aujourd'hui, il existe plusieurs réponses au paradoxe d'Olbers. L'une d'elles vient du fait que les étoiles ont une durée de vie finie, c'est-à-dire qu'elles n'émettent pas de lumière indéfiniment. Ainsi, peu importe le nombre total d'étoiles dans le ciel, si l'on regarde au-delà des plus lointaines (donc les plus jeunes), on voit ce qu'il y avait avant même que les étoiles soient formées et qu'elles commencent à briller. Il n'y a donc pas une infinité d'étoiles brillantes dans le ciel, et cela explique le paradoxe.

Plus loin, nous expliquerons le paradoxe d'Olbers en faisant intervenir l'expansion de l'Univers, dont nous n'avons eu les premiers indices qu'au début du XX^e siècle. Il est important de mentionner que toute la discussion sur la noirceur du ciel nocturne ne s'applique que lorsqu'on ne parle que de lumière visible. En effet, s'il fait noir la nuit pour l'œil humain, nous verrons plus loin que le ciel est continuellement lumineux dans d'autres longueurs d'onde et qu'une partie du rayonnement témoigne des débuts de l'Univers.



9.2 Mouvement des galaxies

On doit en grande partie à Albert Einstein (1879–1955) et à sa **théorie de la relativité générale**, publiée en 1916, le nouvel élan cosmologique du XX^e siècle. Le physicien allemand était arrivé à la conclusion, incroyable pour l'époque, que l'Univers devait être en contraction ou en expansion. Il refusa d'abord de croire en ses propres résultats, ce qu'il regretta quelques années plus tard lorsque des observations indiquèrent que l'Univers semblait bel et bien en expansion. En effet, dans les années 10 et 20, l'étude des raies spectrales de plusieurs nébuleuses distantes – dont Hubble avait découvert en 1925 qu'elles étaient des galaxies distinctes de la nôtre – montra qu'elles présentaient un **décalage vers le rouge**, ce qui impliquait que ces nébuleuses s'éloignaient de nous.

Décalage vers le rouge des raies spectrales

Le phénomène de décalage des raies spectrales pour un objet lumineux qui est en mouvement par rapport à un observateur est appelé **effet Doppler-Fizeau**. Découvert par le physicien autrichien Christian Doppler (1803–1853) en 1842 pour les ondes sonores, puis étendu aux ondes lumineuses par le physicien français Hippolyte Fizeau (1819–1896) en 1848, cet effet est à la source d'un phénomène qui peut être facilement vérifié : la variation de la longueur d'onde (et donc de la fréquence) d'un son produit par une sirène d'ambulance en mouvement. En effet, le son perçu par un observateur immobile est plus aigu lorsque l'ambulance s'en approche (ce qui correspond à une longueur d'onde plus faible, donc à une fréquence plus élevée) et plus grave lorsqu'elle s'en éloigne (longueur d'onde plus élevée, donc fréquence plus basse). Cette variation dans la longueur d'onde est attribuable à la compression des ondes à l'avant de la source sonore en mouvement, ou à la décompression des ondes à l'arrière (figure 9.1). L'effet Doppler-Fizeau est intégré dans les systèmes radars de la police pour mesurer la vitesse des véhicules, de même que dans les détecteurs de mouvement.

Un peu de la même façon que pour une source sonore, lorsqu'une source lumineuse s'approche d'un observateur, les longueurs d'onde perçues sont décalées vers des longueurs d'onde plus courtes (on dira **décalage vers le bleu**), alors que si la source s'en éloigne le décalage se fait vers des longueurs d'onde plus longues (on dira **décalage vers le rouge**). C'est ce décalage vers le rouge, également appelé **redshift**, qui a été observé

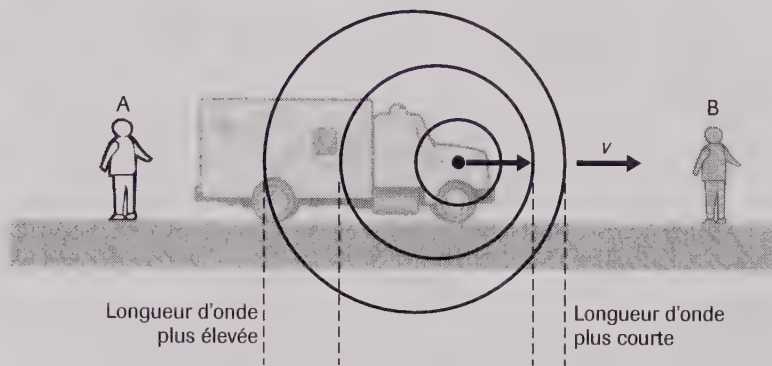


FIGURE 9.1

Illustration de l'effet Doppler-Fizeau. L'ambulance s'éloignant de l'observateur A, ce dernier reçoit un signal sonore dont la longueur d'onde est plus élevée que ce qu'émet le véhicule. À l'inverse, l'observateur B, qui voit l'ambulance s'approcher de lui, reçoit un signal dont la longueur d'onde est plus courte.

par certains astronomes, dont Hubble, et qu'on a interprété comme un élément de preuve essentiel de l'expansion de l'Univers.

Si l'on arrive à mesurer le décalage z d'une source lumineuse, on peut déterminer sa vitesse v à l'aide de l'équation suivante :

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{normale}}} = \frac{v}{c}$$

où λ_{normale} est la longueur d'onde normale réellement émise par la source, $\Delta\lambda$ la différence entre la longueur d'onde perçue et la longueur d'onde normale, et c la vitesse de la lumière.

Cette équation n'est valide que pour des vitesses de moins de 1 % de la vitesse de la lumière, soit moins de 30 000 km/s (ce qui est quand même beaucoup). Par exemple, à l'aide de cette expression, on peut mesurer la vitesse de rotation et la vitesse radiale de la plupart des étoiles et d'un certain nombre de galaxies.

À des vitesses plus grandes que 1 % de la vitesse de la lumière, les effets de la relativité (déformation de l'espace et du temps) deviennent trop importants pour qu'on n'en tienne pas compte et l'équation ci-dessus n'est plus valide sous cette forme. Il faut donc se servir de la version complète de l'équation, qui tient compte des effets relativistes. Ainsi, lorsqu'on mesure z pour des galaxies très éloignées dans l'Univers en expansion, on obtient des valeurs plus élevées que ce que donne l'équation simplifiée. En effet, selon cette dernière, z ne pourrait être supérieur à 1, car cela indiquerait une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière, ce que les lois de la physique n'admettent pas. Pourtant, on observe de nos jours des objets dont le décalage atteint 6, et le prochain télescope spatial sera conçu pour détecter des objets dont le décalage ira jusqu'à 30 ! En réalité, en tenant compte des effets relativistes, la valeur de z peut,



théoriquement, aller jusqu'à l'infini sans que cela signifie que l'objet se déplace à une vitesse plus élevée que celle de la lumière.

La question du paradoxe d'Olbers (« Pourquoi fait-il noir la nuit ? ») peut être abordée sous l'angle du décalage vers le rouge attribuable à l'expansion de l'Univers. En effet, imaginons une galaxie lointaine qui émet de la lumière visible. Cette lumière ne pourra être observée par l'œil humain si sa longueur d'onde, lorsqu'elle atteint la Terre, a été suffisamment décalée pour être maintenant dans l'infrarouge, par exemple. Cela contribue à la noirceur du ciel dans le domaine visible.

Loi de Hubble

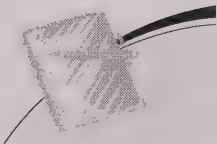
En 1929, quelques années après qu'on eut déterminé que toutes les galaxies lointaines présentaient un décalage vers le rouge, Hubble énonça une relation simple encore fort importante aujourd'hui. Appelée **loi de Hubble**, cette relation relie la vitesse v d'éloignement d'une galaxie et la distance d à laquelle elle se trouve :

$$v = Hd$$

où H , qui désigne la constante ou le paramètre de Hubble, est une constante de proportionnalité qui représente le **taux d'expansion de l'Univers**. On établit H en calculant sa valeur pour plusieurs galaxies dont on aura mesuré la vitesse v (à l'aide du décalage vers le rouge) et l'éloignement (par des méthodes d'indicateurs de distance). Pour chaque galaxie, peu importe la distance à laquelle elle se trouve, on trouvera sensiblement la même valeur de H . La plupart du temps exprimée en kilomètres par seconde par mégaparsec (km/s·Mpc), cette constante permet aux astronomes d'estimer l'âge de l'Univers, d'où l'importance de la loi de Hubble pour les cosmologistes.

Hubble avait d'abord obtenu une valeur de H de 500 km/s·Mpc, ce qui correspond à un âge de 2 milliards d'années. On a dû réviser cette valeur, car on avait déjà à cette époque mesuré que la Terre avait au moins 4 milliards d'années par la datation radioactive de roches terrestres. La Terre ne pouvait être plus vieille que l'Univers ! Par la suite, grâce à l'augmentation de la quantité de données, les valeurs admises de H se sont précisées. Elles ont oscillé entre 50 et 100 km/s·Mpc, ce qui correspond à un âge compris entre 10 et 20 milliards d'années. Actuellement, selon les données les plus récentes, l'âge de l'Univers se situerait entre 11 et 15 milliards d'années.

La figure 9.2 met en relation le décalage et le temps écoulé depuis le Big Bang, selon le modèle cosmologique standard.



Loi de Hubble et âge de l'Univers

(voir page 330)

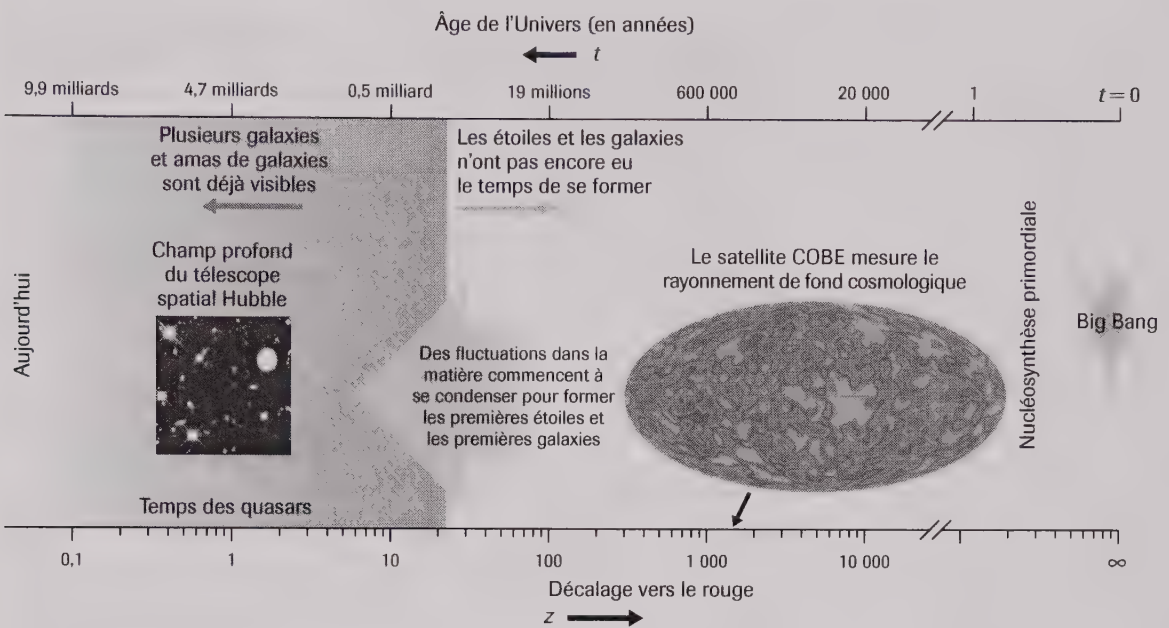


FIGURE 9.2

Principaux événements dans l'Univers depuis le Big Bang jusqu'à aujourd'hui

9.3 Théorie du Big Bang

Après avoir établi que l'Univers était en expansion, les astronomes et les physiciens ont fait le raisonnement suivant : si l'on observe aujourd'hui que l'Univers en entier est en expansion dans toutes les directions, c'est qu'il a d'abord été plus comprimé. Il doit donc y avoir eu un moment initial, un temps zéro, où toute la matière de l'Univers se trouvait en un seul point de densité infinie. Ce point de départ aura été le commencement de l'Univers, et on l'appelle aujourd'hui **Big Bang**. Le modèle cosmologique qui décrit l'expansion de l'Univers porte le nom de **théorie du Big Bang**.

Curieusement, l'expression a été inventée de façon ironique en 1950 par un partisan d'une autre théorie de l'évolution de l'Univers, Fred Hoyle (1915–2001). En effet, l'astronome et mathématicien britannique ne croyait pas qu'il puisse y avoir eu un instant initial de densité infinie, puis une dilatation soudaine de toute cette matière ultracomprimée. Il avait donc employé de façon dérisoire l'expression **Big Bang** pour montrer le peu de sérieux qu'il accordait à la théorie de ses concurrents. Hoyle était plutôt l'un de ceux qui proposaient une autre voie



d'explication de l'origine de l'Univers, la **théorie de l'état stationnaire**, qui visait entre autres choses à contourner la question « Mais qu'y avait-il donc *avant* l'Univers ? ».

Selon cette théorie, l'hydrogène présent dans l'Univers est continuellement créé dans les vides laissés par l'expansion. Sa densité serait constante et l'Univers n'aurait eu ni début ni fin, le processus de création se poursuivant éternellement. Pour plusieurs raisons, dont le fait qu'elle viole le principe physique fondamental de la conservation de l'énergie, on ne trouve aujourd'hui plus de défenseurs à la théorie de Hoyle.

Et l'expression **Big Bang** a été très rapidement adoptée par les partisans de la théorie à laquelle adhèrent aujourd'hui la vaste majorité des astronomes comme modèle standard d'explication de l'origine et de l'évolution de l'Univers.

L'idée d'un Univers initialement très petit et concentré a été proposée pour la première fois en 1927 par Georges Lemaître (1894–1966). Le chanoine et astrophysicien belge croyait que l'Univers s'était constitué à partir d'une seule entité qu'il appela **atome primitif**.

George Gamow (1904–1968), physicien américain d'origine russe, devint en 1948 l'un des plus ardents défenseurs de la théorie cosmologique du Big Bang, qu'il enrichit d'ailleurs de façon importante et qu'il contribua à faire accepter. Il émit notamment l'hypothèse d'une expansion très rapide de l'Univers dès ses tout premiers instants. Il fut également le premier à prédire l'existence d'un rayonnement thermique fossile de l'explosion initiale. Ce rayonnement fut détecté quelques années plus tard (voir plus loin). Gamow s'intéressa également à l'origine des éléments chimiques légers qui se sont formés dans les premières minutes suivant le Big Bang, dans des conditions de température et de pression suffisamment intenses pour permettre la fusion des particules subatomiques.

Depuis, plusieurs ont contribué à des versions plus raffinées et plus précises de la théorie du Big Bang. Même Hoyle, qui favorisait toujours sa théorie de l'Univers stationnaire, avec deux autres physiciens (Robert Wagoner et William Fowler), y a participé en montrant que la théorie du Big Bang prédit correctement les abondances de deutérium et de lithium dans l'Univers.

Évolution de l'Univers jusqu'à aujourd'hui

Selon la théorie du Big Bang, l'Univers serait né d'un point infiniment petit, infiniment dense, souvent qualifié de **singularité primordiale**. Pour le moment, la physique ne permet pas de décrire cet état, ni l'instant qui vient tout de suite après.



En réalité, notre compréhension de l'Univers commence à l'instant 10^{-43} seconde, appelé **instant de Planck**. Cette limite est fixée par la physique quantique et il faudrait disposer d'une nouvelle théorie pour reculer la limite jusqu'au temps zéro.

Au temps 10^{-43} seconde, l'Univers a 10^{-35} mètre de diamètre et une température de 10^{32} K. En-dehors de lui, rien n'existe, ni temps, ni espace. Tout l'Univers que l'on connaît est comprimé dans ce point. C'était il y a environ 15 milliards d'années. La suite est une série d'étapes qui ont mené à la construction de l'Univers tel qu'il est aujourd'hui. Il est important de garder à l'esprit que, pendant que l'Univers se dilate, il crée non seulement la matière que nous connaissons aujourd'hui, mais également le temps et l'espace. L'Univers ne fait pas son expansion *dans* l'espace et *dans* le temps, il les crée au fur et à mesure. Le tableau 9.1 présente les principales étapes de cette histoire inimaginable.

9.4 Des appuis majeurs à la théorie du Big Bang

La théorie du Big Bang est aujourd'hui confortée par un certain nombre d'observations et de découvertes ayant été réalisées dans les dernières décennies. Bien entendu, il existe encore plusieurs aspects de notre Univers qu'on n'arrive pas à expliquer entièrement à l'aide de cette théorie, tout comme certains éléments de la théorie du Big Bang restent mal compris ou inexpliqués. Toutefois, c'est le modèle cosmologique qui offre le plus de réponses aux astronomes et qui colle le plus aux observations. Examinons donc les deux grands appuis à la théorie du Big Bang.

Rayonnement fossile

En 1948, George Gamow prédit l'existence d'une trace résiduelle résultant du Big Bang, laquelle aurait imprégné l'Univers. On appelle ce témoin des débuts très chauds de l'Univers le **rayonnement de fond cosmologique** (RFC) ou **rayonnement fossile**. Des travaux réalisés dans les années 50 évaluaient la température associée à ce rayonnement à environ 2,5 K, ce qui est très proche du zéro absolu.

La découverte accidentelle du RFC, en 1965, a constitué une véritable consécration pour la théorie du Big Bang. Cela s'est produit alors que deux physiciens américains, Arno Penzias (né



TABLEAU 9.1

Principales étapes de l'évolution de l'Univers

Temps	Température	Événements
10^{-43} s	10^{32} K	Instant de Planck. Avant ce moment, les quatre interactions fondamentales de la physique sont unifiées ¹ . À l'instant de Planck, l'interaction gravitationnelle se désunit d'avec les autres interactions fondamentales. C'est là où commence notre compréhension, selon les connaissances actuelles. L'expansion débute à un rythme extrêmement rapide.
10^{-32} s	10^{26} K	Mélange très dense de photons et de particules élémentaires (quarks, électrons, neutrinos) et de leurs antiparticules.
10^{-5} s	10^{10} K	Fusion des quarks par groupes de trois, formant ainsi les protons et les neutrons.
3 min	10^6 K	Période appelée nucléosynthèse primordiale . Formation des éléments légers tels l'hydrogène, l'hélium, le deutérium et le lithium.
300 000 ans	3 000 K	Apparition des atomes neutres. Le ciel devient transparent. (À des températures plus chaudes, les atomes sont ionisés et les électrons circulent librement, ce qui se traduit par une opacité importante, qu'on appelle brume cosmologique .) Origine du fond de rayonnement cosmologique (ou rayonnement fossile).
1 Ga		Formation des premières étoiles et des protogalaxies.
3 Ga		Époque des quasars.
10 Ga		Formation du Système solaire.
15 Ga	2,7 K	Aujourd'hui.

1. Ces quatre interactions sont la gravitation, l'interaction électromagnétique, l'interaction nucléaire forte et l'interaction nucléaire faible. Les physiciens peuvent rendre compte de tous les phénomènes connus en faisant intervenir ces quatre interactions. Ils travaillent actuellement à l'élaboration d'une théorie dans laquelle chaque interaction n'est qu'une facette d'une seule et même interaction unifiée. Les conditions extrêmes qui ont régné dans les premiers instants après le Big Bang permettaient l'unification des interactions.

en 1933) et Robert Wilson (né en 1944), travaillant pour la compagnie Bell Telephone au New Jersey, cherchaient à trouver la source d'un bruit uniforme capté par le récepteur d'une antenne radio en construction. Le faible signal, qui correspond à un corps noir de 3,5 K (voir section 7.4), provenait de toutes les régions du ciel; Penzias et Wilson attribuèrent la source au cosmos lui-même. Ils venaient de réaliser l'une des plus importantes découvertes de l'astronomie moderne et donnaient un sérieux coup de pouce à la théorie du Big Bang.

La température du RFC est aujourd'hui évaluée à 2,7 K. Le rayonnement émis correspond surtout à des micro-ondes. Ainsi, si l'œil humain était en mesure de voir ces ondes, il percevrait une lumière venant de tout le ciel. De 1989 à 1993, le satellite



COBE (acronyme de COsmic Background Explorer) a mesuré avec une extraordinaire précision le RFC et a trouvé des variations infimes de température de l'ordre de 30 milliardièmes de kelvins (figure 9.3). Ces fluctuations indiqueraient qu'il y aurait eu, assez tôt après les premiers instants de l'Univers, des concentrations de matière qui ont peut-être donné lieu à la formation, par la suite, des premiers amas de galaxies.

Ce rayonnement est ce que nous pouvons détecter de plus vieux dans l'Univers. Il nous informe sur l'état de celui-ci 300 000 ans après le Big Bang.

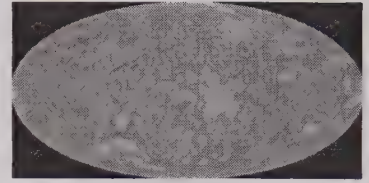


FIGURE 9.3

Carte du rayonnement de fond cosmologique enregistré par le satellite COBE

Abondance des éléments légers

Nous avons appris au chapitre 7 comment les étoiles brûlaient leur hydrogène pour le transformer en hélium. Ainsi, une certaine quantité de l'hélium présent dans l'Univers a été produite par la nucléosynthèse à l'intérieur des étoiles. Toutefois, on estime que l'hélium représente environ 23 % de la matière dans l'Univers, ce qui est beaucoup trop pour n'avoir été produit qu'à l'intérieur des étoiles depuis 15 milliards d'années. L'explication la plus plausible à ce que l'on qualifie de **surabondance** est l'existence, au début de l'Univers, d'une période où les conditions de température et de densité étaient favorables à la synthèse de l'hélium en grande quantité. C'est justement ce que prévoit la théorie du Big Bang. La mesure de l'abondance du deutérium dans l'Univers appuie également cette hypothèse puisque, outre le Big Bang, aucun autre mécanisme connu ne pourrait en rendre compte. Plus récemment, on s'est servi de mesures de l'abondance du lithium pour valider les théories portant sur les conditions des premiers instants de l'Univers.

9.5 Expansion de l'Univers

Lorsqu'il est question d'expansion de l'Univers, et qu'on explique que les galaxies lointaines s'éloignent toutes de nous, il est fréquent que l'on imagine notre Galaxie immobile au centre et le reste de l'Univers qui fuit autour de nous. Toutefois, cette représentation est trompeuse et ne tient pas compte de ceci : comme l'Univers entier est en expansion uniforme, où que l'on se trouve on verra tous les objets s'éloigner de nous et on aura toujours cette impression d'être au centre.

Pour mieux imaginer l'expansion de l'Univers, on peut se servir de l'analogie suivante. Comparons l'Univers à un ballon non

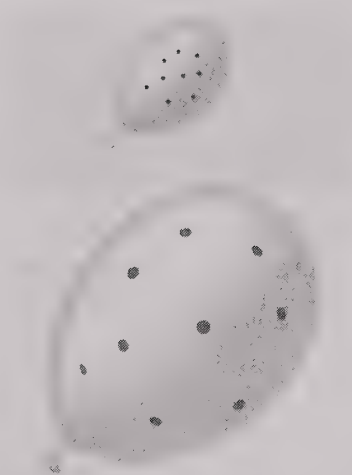


FIGURE 9.4

En raison de l'expansion de l'Univers, les galaxies s'éloignent les unes des autres, de même que le font des points dessinés sur un ballon que l'on gonfle.

gonflé sur lequel on a dessiné plusieurs petits points représentant les galaxies (figure 9.4). Lorsqu'on gonfle le ballon, les points s'éloignent tous les uns des autres. Si l'on ne considère que ce qui se produit depuis un point en particulier, tous les points s'en éloignent, donnant ainsi l'illusion que le mouvement de fuite se produit à partir de lui. Cependant, chacun sait qu'aucun point sur le ballon n'est au centre des autres. De la même façon, l'Univers n'a pas de centre défini.

Il est important de faire remarquer que l'expansion de l'Univers est un phénomène à grande échelle. Ainsi, la taille des objets n'est pas influencée par l'expansion de l'Univers, pas plus que le Système solaire, notre Galaxie ou les galaxies de son voisinage immédiat. En effet, à petite échelle, la gravitation et les forces de cohésion de la matière l'emportent sur l'expansion de l'Univers. Si ce n'était pas le cas, la Terre aurait doublé de volume depuis sa naissance.

9.6 Quel avenir pour l'Univers ?

Si l'on arrive plutôt bien à décrire comment l'Univers a évolué jusqu'à notre époque, il en va autrement pour prédire ce que l'avenir lui réserve. L'Univers poursuivra-t-il indéfiniment son mouvement d'expansion ? Laissera-t-il un jour place à un mouvement de contraction ? La question de l'avenir de l'Univers n'est pas encore tranchée, malgré que, pour le moment, rien n'indique que les conditions soient rassemblées pour qu'il se contracte un jour.

La discussion entourant l'avenir de l'Univers dépend d'une valeur très importante : sa masse volumique. La masse volumique est définie comme le rapport entre la masse d'un objet sur son volume. Alors que la masse volumique d'un liquide ou d'un métal est très facile à mesurer (par exemple celle de l'eau égale $1\,000\text{ kg/m}^3$ ou 1 g/cm^3), il en va autrement pour l'Univers dont on doit mesurer la masse volumique en protons par mètre cube. Selon que cette quantité est plus grande ou plus faible qu'une certaine valeur critique, l'Univers cessera ou poursuivra son expansion.

Malheureusement, la masse volumique de l'Univers (particulièrement la masse en tant que telle) est très difficile à mesurer avec la précision nécessaire à l'établissement de modèles fiables. Plusieurs indices nous laissent croire qu'une partie très importante de la masse de l'Univers est invisible ou inconnue. Cette masse cachée aurait la forme de poussières cosmiques,



de planètes, de trous noirs, d'étoiles peu lumineuses ou même de neutrinos massiques.

Pour le moment, la question de l'avenir de l'Univers est en suspens, à la suite de la découverte de supernovæ très lointaines et dont le taux d'éloignement laisse croire que l'expansion de l'Univers est en accélération. Ainsi, les scénarios traditionnels sur l'avenir de l'Univers ne tiennent pas compte de cette nouveauté qui constitue encore un véritable mystère. Voici tout de même la description des modèles d'avenir de l'Univers les plus connus.

Univers fermé ou Univers cyclique

Dans un Univers fermé, la masse volumique de l'Univers serait assez élevée pour qu'il y ait, un jour, arrêt de l'expansion suivi d'une contraction, nous ramenant ainsi aux conditions des débuts de l'Univers. Dans ce scénario, la contraction se termine par ce qu'on appelle parfois le **Big Crunch**. Selon certains, de ce Big Crunch naîtrait un nouveau Big Bang et on serait en présence d'un Univers cyclique, c'est-à-dire une suite infinie d'expansions et de contractions. Le modèle d'Univers fermé est de plus en plus improbable.

Univers ouvert

Dans un Univers ouvert, la masse volumique n'est pas assez élevée pour qu'un mouvement de contraction puisse s'amorcer. Selon ce scénario, l'Univers est en expansion continue. Il est destiné à la grande noirceur.

Univers marginalement ouvert

Dans un Univers marginalement ouvert, la masse volumique est tout juste égale à la valeur critique. Selon ce scénario, l'Univers est en expansion continue, mais le rythme diminue indéfiniment. Ainsi, le taux d'expansion s'approche de plus en plus de zéro, sans jamais l'atteindre.

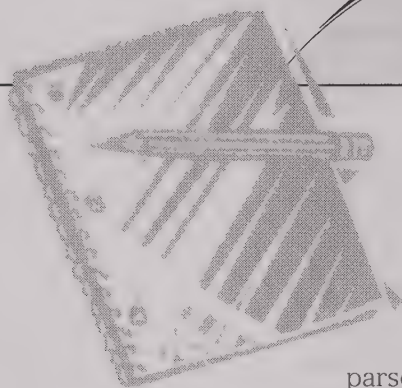
Aujourd'hui, les astronomes sont plutôt en faveur d'un Univers ouvert en expansion accélérée. Toutefois, personne ne sait depuis combien de temps dure cette accélération ni combien de temps elle persistera. Il reste donc bien des mystères à résoudre!



Questions de révision

1. Qu'est-ce que le paradoxe d'Olbers ? Donnez au moins une façon d'y répondre.
2. Comment savons-nous qu'une galaxie s'éloigne de nous ?
3. Comment a-t-on conclu que l'Univers était en expansion ?
4. Quelle relation Hubble a-t-il établie entre la vitesse d'éloignement et la distance à laquelle se trouvent les galaxies ?
5. Expliquez en quelques mots ce qu'est la théorie du Big Bang.
6. Comment les astronomes ont-ils construit la théorie du Big Bang ? Qui furent les premiers astronomes à avoir imaginé un scénario semblable pour expliquer l'origine de l'Univers ?
7. Décrivez deux observations importantes appuyant la théorie du Big Bang, mis à part l'expansion de l'Univers.
8. Qu'est-ce que la brume cosmologique ?
9. Selon la théorie du Big Bang, à quel moment l'Univers devient-il transparent ?
10. Quels sont les deux éléments les plus abondants de l'Univers ? À quel moment ont-ils été constitués ?
11. Quel est l'âge approximatif de l'Univers ?
12. Peut-on définir le centre de l'Univers ? Expliquez.
13. Quels sont les avenir possibles pour l'Univers, selon les connaissances actuelles ?

ACTIVITÉ



Loi de Hubble et âge de l'Univers

La loi de Hubble, énoncée en 1929 par Edwin Hubble, donne la relation entre la vitesse v d'éloignement d'une galaxie et la distance d à laquelle elle se trouve de nous :

$$v = Hd$$

La valeur H , appelée **constante de Hubble**, est évaluée en kilomètres par seconde par mégaparsec (km/s·Mpc). C'est une mesure du taux d'expansion de l'Univers.

Dans cette activité, vous êtes invités à calculer, tout comme l'avait fait Hubble, une valeur de H à partir des données du tableau 8.1 sur les amas de galaxies, reproduit ici.

4^e colonne5^e colonne6^e colonne

Nom français	Distance (en Mpc)	Vitesse (en km/s)			
Vierge I	15	960			
Grande Ourse S	17	890			
Grande Ourse N	18	1060			
Fourneau I	18	1420			
Éridan	21	1550			
Poupe du Navire	29	2100			
Machine pneumatique	40	2830			
Télescope	40	2840			
Centaure A3526	43	2990			
Hydre A1060	48	3360			
Paon	55	3820			
Pégase	55	3840			
Cancer	61	4250			

Voici ce que vous devez faire :

Tracé des points sur le graphique

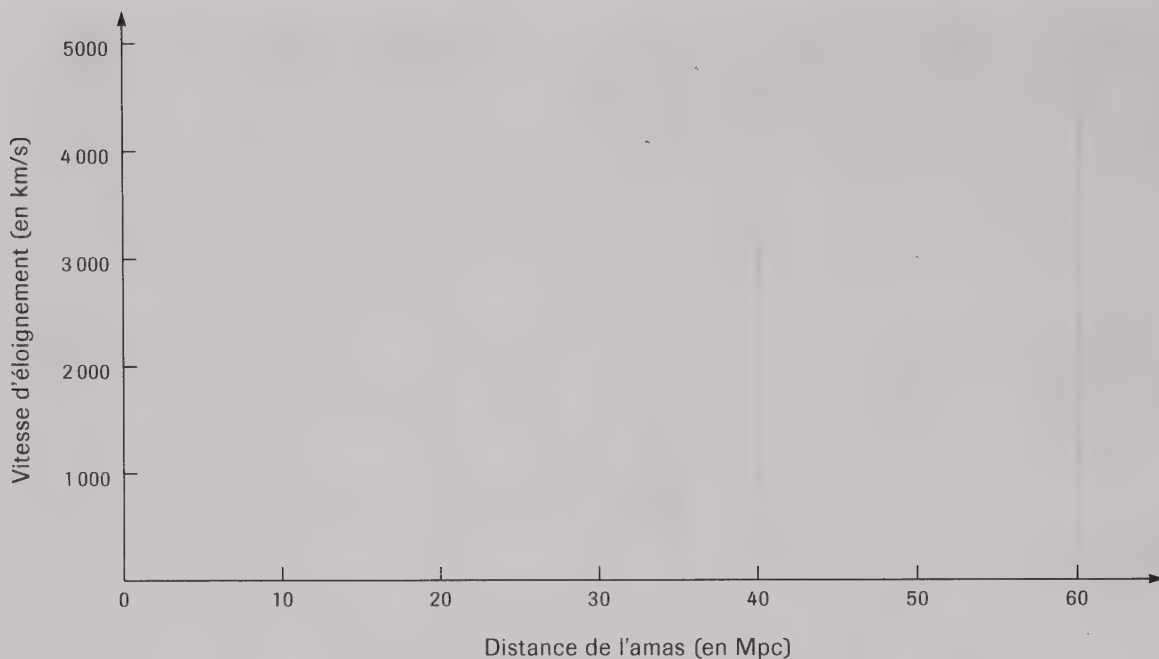
Pour chaque amas de galaxies, faites correspondre un point sur le graphique de la vitesse en fonction de la distance : Repérez sur l'axe horizontal la valeur de la distance du premier amas, puis, sur l'axe vertical, sa vitesse. Tracez le point sur le graphique à l'intersection des deux valeurs. Répétez cette opération pour tous les amas de galaxies du tableau.

Tracé de la droite

Mathématiquement, la loi de Hubble correspond à l'équation d'une droite de la forme $y = mx$, où y tient lieu de la vitesse v , x de la distance d , et m , la pente, représente la constante de Hubble H . Ainsi, en reliant les points du graphique, nous devrions obtenir une droite dont on pourrait calculer m qui nous donnerait la valeur de H . Mais comme les valeurs du tableau 8.1 comportent une incertitude assez importante, les points que vous avez tracés ne sont pas tous exactement situés le long d'une droite imaginaire. Vous devez donc tenter de tracer la droite qui correspond le plus possible à l'allure générale des points sur votre graphique. Votre droite doit être celle qui passe le plus près possible de la majorité des points.

Calcul de la pente et de la constante de Hubble

La pente m de la droite donne directement la constante de Hubble. À partir de maintenant, il ne faut plus tenir compte



des points qui ont servi à tracer la droite ; seule la droite en elle-même doit être considérée. Choisissez deux endroits sur la droite qui sont suffisamment éloignés l'un de l'autre. Tracez un nouveau point à chaque endroit sélectionné. Reportez la vitesse et la distance qui correspondent aux points dans le tableau ci-dessous.

Vitesse (en km/s)	Distance (en Mpc)
Point n° 1 (celui le plus en bas à gauche)	
Point n° 2 (celui le plus en haut à droite)	



Pour calculer la pente m de votre droite (et donc H) à l'aide des points 1 et 2, faites le calcul suivant :

$$m = H = \frac{\text{vitesse du point 2} - \text{vitesse du point 1}}{\text{distance du point 2} - \text{distance du point 1}}$$

Inscrivez votre résultat ici :

$$H = \text{_____ km/s} \cdot \text{Mpc}$$

C'est votre valeur de la constante de Hubble. Elle représente le nombre de kilomètres d'expansion qu'une distance de un million de parsecs dans l'Univers prend chaque seconde.

Calcul de l'âge de l'Univers

En supposant que la vitesse d'éloignement des galaxies est demeurée constante depuis leur formation, on peut estimer l'âge de l'Univers. En effet, si vous roulez en voiture à une vitesse de 80 km/h, vous franchissez chaque heure une distance de 80 km. Donc, si vous devez parcourir une distance de 400 km, il vous faudra 5 heures pour le faire à la vitesse de 80 km/h. Pour déterminer ce temps (5 heures), vous avez effectué la division de la distance de 400 km par la vitesse de 80 km/h. On peut écrire :

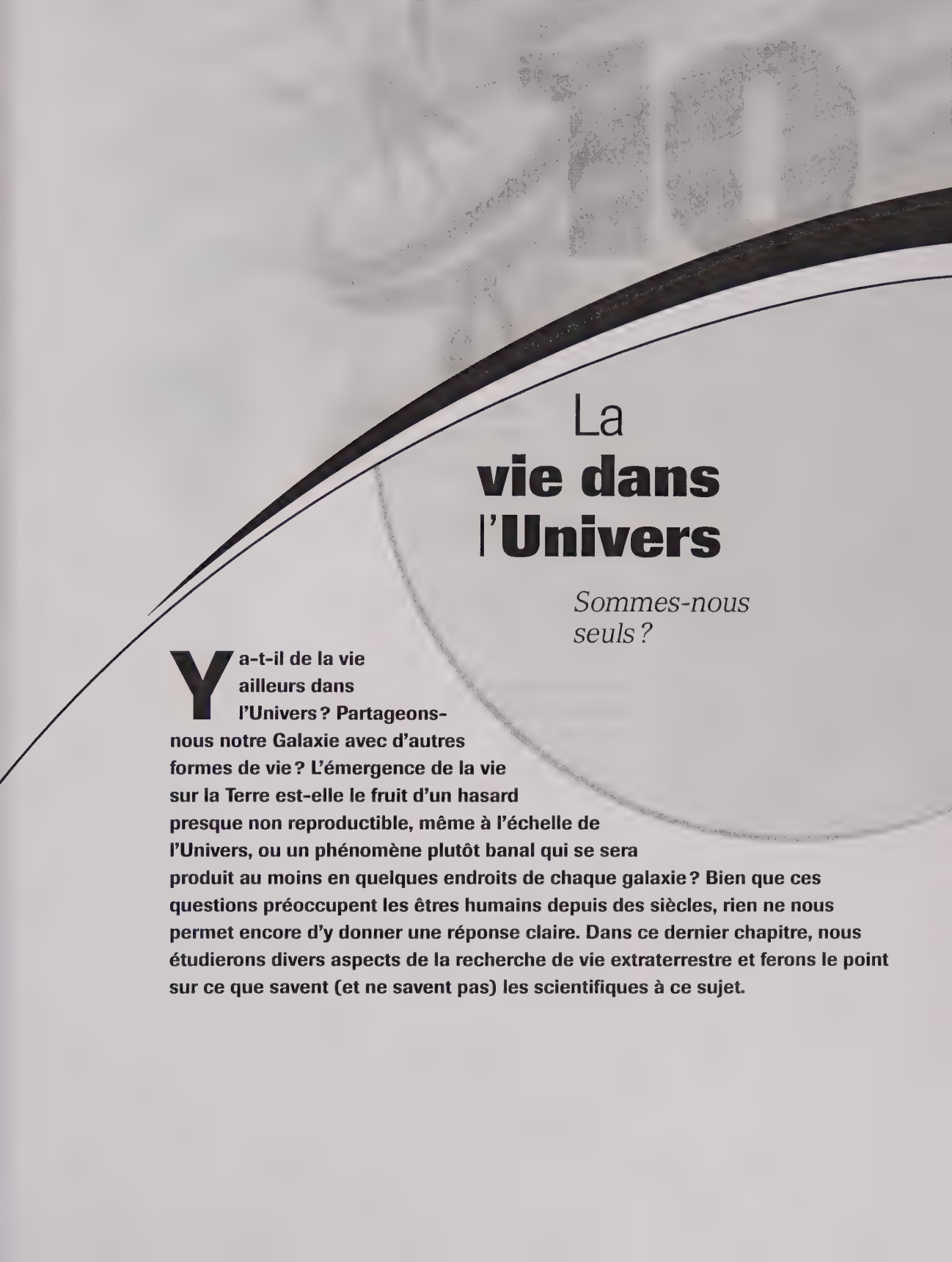
$$\text{Temps} = \text{distance/vitesse}$$

Si, dans le passé, au début de l'Univers, une galaxie se trouvait très près de la nôtre, et si l'on connaît la distance actuelle à laquelle elle se situe, de même que sa vitesse (supposée constante), on peut alors estimer le temps que cette galaxie a mis pour parcourir ce trajet. Il s'agit de faire l'opération distance/vitesse.

Ce temps t que l'on obtient représente une estimation de l'âge de l'Univers. Pour calculer t , il faut d'abord convertir la distance des galaxies en kilomètres. Puisque 1 Mpc vaut $3,08 \times 10^{19}$ km, on doit multiplier les distances du tableau 8.1 par ce nombre. Inscrivez les distances en kilomètres dans la 4^e colonne du tableau. Calculez maintenant les temps de trajet t de chaque amas de galaxies en divisant leur distance en kilomètres (celles que vous venez de calculer) par leur vitesse en km/s. Inscrivez vos valeurs dans la 5^e colonne du tableau. Ces temps sont exprimés en secondes et on peut les transformer en milliards d'années (Ga), en les divisant par $3,15 \times 10^{16}$ (il y a $3,15 \times 10^{16}$ secondes dans un milliard d'années). Inscrivez les temps en Ga dans la 6^e colonne. N'oubliez pas d'indiquer à quoi correspondent ces valeurs en tête du tableau, dans les rectangles prévus à cette fin.



Terminez en effectuant la moyenne des temps inscrits à la 6^e colonne. Le nombre obtenu vous donne un âge estimé de l'Univers. Votre valeur se trouve-t-elle entre 11 et 15 milliards d'années, ce qui correspond à l'intervalle de valeurs acceptées aujourd'hui ? En réalité, l'âge de l'Univers est sans doute un peu inférieur à la valeur que vous avez obtenue, car la vitesse d'éloignement des galaxies a diminué depuis le début de l'Univers en raison de l'attraction gravitationnelle des galaxies entre elles.



La vie dans l'Univers

*Sommes-nous
seuls ?*

Ya-t-il de la vie ailleurs dans l'Univers ? Partageons-nous notre Galaxie avec d'autres formes de vie ? L'émergence de la vie sur la Terre est-elle le fruit d'un hasard presque non reproductible, même à l'échelle de l'Univers, ou un phénomène plutôt banal qui se sera produit au moins en quelques endroits de chaque galaxie ? Bien que ces questions préoccupent les êtres humains depuis des siècles, rien ne nous permet encore d'y donner une réponse claire. Dans ce dernier chapitre, nous étudierons divers aspects de la recherche de vie extraterrestre et ferons le point sur ce que savent (et ne savent pas) les scientifiques à ce sujet.

**DANS LES PAGES
QUI SUIVENT,
VOUS APPRENDREZ À:**

- Décrire comment sont découvertes les exoplanètes.
- Expliquer comment s'est formé le Système solaire.
- Décrire les étapes ayant mené à l'apparition de la vie sur Terre.
- Expliquer comment est évalué le nombre possible de civilisations extraterrestres.
- Discuter des moyens employés pour tenter de communiquer avec d'éventuels extraterrestres.



10.1 Exoplanètes et systèmes planétaires

Depuis la découverte, en 1995, de la première exoplanète, 51 Pegasi B (ainsi nommée car elle tourne autour de l'étoile 51 Pegasi), la recherche de systèmes planétaires s'est intensifiée. Au moment d'aller sous presse, plus de cent exoplanètes avaient déjà été signalées. Ces découvertes sont importantes, car elles laissent croire aux astronomes que la présence d'un système planétaire autour d'une étoile serait chose commune, et leur permettent de préciser ou de revoir les modèles de formation de systèmes planétaires (voir plus loin la « Formation du Système solaire »).

Avis aux chercheurs de planètes semblables à la Terre : pour le moment, presque toutes les exoplanètes connues ont des masses allant de 0,5 à 7 fois celle de Jupiter¹, et se déplacent sur des orbites très rapprochées de leur étoile. Par exemple, 51 Pegasi B a une masse comparable à celle de Jupiter et fait le tour de son étoile hôte en quatre jours, à une distance d'environ 8 millions de kilomètres. À titre de comparaison, Mercure, la planète la plus rapprochée du Soleil, est environ 7 fois plus éloignée du Soleil et sa masse est plus de 5 000 fois plus faible que celle de Jupiter.

Le fait que nous ne trouvions que de très grosses planètes, très rapprochées de leur étoile, peut signifier deux choses : notre Système solaire, avec des petites planètes rocheuses près du Soleil et des grosses planètes gazeuses plus loin, n'est pas représentatif de l'ensemble des systèmes planétaires – ce qui est fort peu probable – ou, encore, les méthodes de détection employées ne permettent pour le moment que de découvrir de grosses planètes sur de petites orbites – ce qui est probablement le cas. Pour le moment, on arrive à détecter la présence d'une planète autour d'une étoile en étudiant la légère oscillation de cette dernière, causée par l'attraction gravitationnelle de la planète massive. Il est presque assuré que des exoplanètes de plus en plus petites seront découvertes au fur et à mesure que seront perfectionnées les techniques de détection.

Ainsi, ce n'est qu'une question de temps avant que nous puissions « débusquer » des exoplanètes comparables à la Terre, tant sur le plan de la taille que sur celui de la distance entre la planète et l'étoile. Une fois cette étape franchie, les astronomes vérifieront la présence d'une atmosphère autour de ces exoplanètes et, s'il y a lieu, en détermineront la composition. Ce sont

1. En 2000, deux planètes de la taille de Saturne ont été découvertes.



autant d'indices d'un milieu propice au développement de la vie sous la forme qu'on lui connaît.

Formation du Système solaire

Comme nous l'avons mentionné, notre compréhension de la façon dont se forme un système planétaire est basée en partie sur la connaissance que nous avons du nôtre. Cela explique que, quoique le processus de formation des étoiles et des planètes soit plutôt bien connu, il a été assez surprenant de trouver des planètes aussi grosses que 51 Pegasi B, aussi proches de leur étoile. Et cela n'empêche pas que le modèle de formation du Système solaire le plus accepté serve de modèle de base pour tous les autres systèmes.

Dans ce modèle (figure 10.1), notre Système solaire se serait constitué à partir d'un nuage interstellaire de gaz et de poussières en rotation, il y a environ 5 milliards d'années. La contraction gravitationnelle du nuage commence à la suite de son

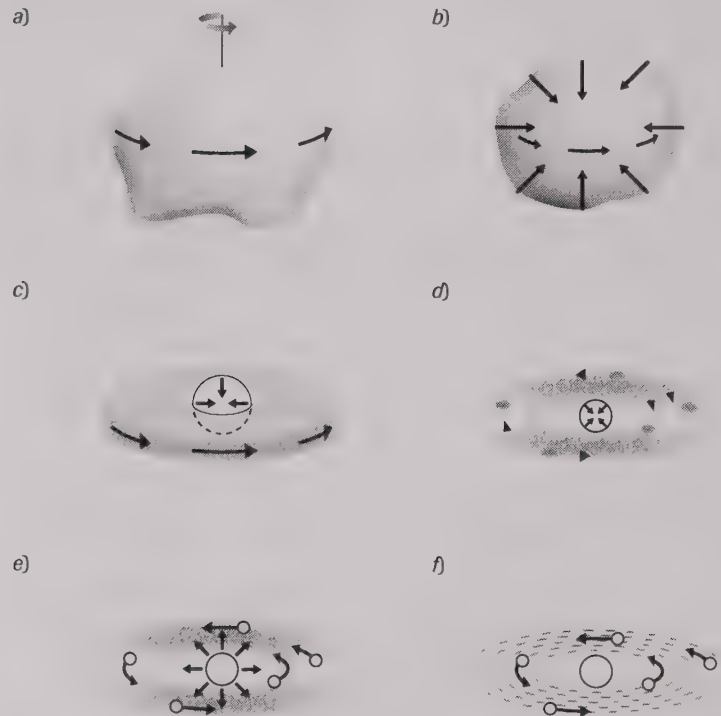


FIGURE 10.1

Formation du Système solaire selon le modèle d'accrétion



passage dans un bras spiral de la Galaxie ou à la suite de celui d'une onde de choc en provenance d'une supernova. En vertu d'un principe physique appelé **conservation du moment angulaire**, plus le nuage se contracte, plus sa rotation est rapide. Le mouvement de rotation devient alors assez rapide pour ralentir la contraction dans la direction perpendiculaire à l'axe de rotation. C'est le début de la formation du disque dans lequel se formeront les planètes. La partie centrale du nuage s'effondre plus rapidement et se réchauffe par compression, ce qui forme une protoétoile, qui deviendra le Soleil. En périphérie, les particules s'agglutinent à force de contacts et forment de petits morceaux qui, par gravité, s'accrochent les uns aux autres. C'est l'apparition d'embryons de planètes, les planétoïdes.

Tout ce qui vient d'être décrit porte le nom d'**accrétion**. Par la suite, les chocs deviennent plus importants, de telle sorte que certains planétoïdes grossissent aux dépens des autres au même moment que l'influence de leur champ gravitationnel augmente ; les planètes se forment. Les corps rocheux se développent plus près de la protoétoile, tandis qu'en périphérie les cristaux de glaces et de gaz solidifiés s'agglutinent pour former les planètes lointaines, moins denses.

Pendant ce temps, la protoétoile commence à émettre du rayonnement et engendre un important vent stellaire. Le Soleil est né, de même que le Système solaire ! Le vent solaire a pour effet de nettoyer ce dernier de ses débris. Dans ses débuts, puis sur une période de plusieurs centaines de millions d'années, le Système solaire a été le théâtre de nombreuses collisions, ce dont témoignent les nombreuses traces laissées sur les planètes sous la forme de cratères.

Cette théorie de la formation du Système solaire, la théorie de l'accrétion, est à ce jour la plus largement acceptée. Les observations venant à son appui sont nombreuses. Notons, par exemple, le fait que les axes de rotation et de révolution des astres principaux du Système solaire soient orientés sensiblement dans la même direction. Notons également la composition chimique assez similaire d'un astre à l'autre. Ainsi, plusieurs observations semblent donner raison à la théorie de l'accrétion qui est en faveur d'une origine commune et à peu près simultanée du Soleil et des planètes.

La découverte d'exoplanètes contribuera fort probablement à la construction d'une théorie plus complète pouvant expliquer, par exemple, la présence d'une très grosse planète très près de son étoile. Ces nouvelles connaissances s'ajoutent à celles qu'avait apportées aux astronomes la découverte, en 1983, d'un système planétaire en formation : un disque de matière autour

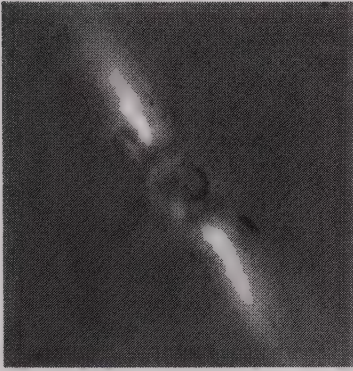


FIGURE 10.2

Système planétaire en formation autour de la jeune étoile Bêta Pictoris

d'une étoile jeune, Bêta Pictoris (figure 10.2). On croit que ce système ressemble à ce qu'était notre Système solaire à ses débuts. Ainsi, dans un avenir plutôt rapproché, Bêta Pictoris pourrait devenir un système planétaire similaire au nôtre.

Rappelons que notre Soleil compte à lui seul pour 99,8 % de la masse totale du Système solaire. Les planètes et leurs satellites, les astéroïdes, les comètes et autres poussières se partagent la fraction qui reste.

10.2 Origine de la vie sur Terre

La recherche de vie extraterrestre – c'est ainsi qu'on désigne toute vie hypothétique qui se trouverait ailleurs que sur la Terre – ne peut être menée sérieusement sans une bonne compréhension du processus qui a engendré la vie terrestre. De même, elle doit être menée en prenant conscience que la vie extraterrestre pourrait se présenter sous d'autres formes que celles que nous connaissons et que, de cette façon, il serait facile qu'elle nous échappe. Ainsi, lorsque les astronomes tenteront de déterminer la composition de l'atmosphère d'une exoplanète qui semblera habitable par sa taille et sa distance par rapport à son étoile, ils chercheront des gaz qui sont en lien direct avec la vie sur Terre : par exemple, des traces d'ozone et de méthane, deux gaz que l'on croit être la signature d'une atmosphère du type terrestre (beaucoup d'oxygène et d'azote).

Selon les recherches des dernières décennies, la vie aurait émergé sur Terre à la suite d'une série de réactions chimiques complexes. Les traces de vie les plus vieilles ayant été retrouvées (des fossiles de microorganismes) remontent à environ 1 milliard d'années après la formation de la Terre, alors que les conditions qui y régnaient étaient très différentes de celles que nous observons aujourd'hui. Cela indique que la vie se serait formée et organisée assez rapidement, il y a 3,6 milliards d'années.

Mais de quoi est-elle née ? On sait depuis le début du XX^e siècle que le milieu interstellaire contient du gaz et des poussières. Cependant, on croyait que seules les molécules simples pouvaient y être présentes : le méthane (CH_4), l'ammoniac (NH_3) et l'eau (H_2O). Depuis, la radioastronomie a permis de montrer la relative abondance dans l'espace de molécules organiques beaucoup plus complexes. Celles-ci sont littéralement des pierres de fondation de la matière vivante telle que nous la connaissons. Sur Terre, de telles molécules auraient trouvé des conditions de température et de pression adéquates pour



qu'elles s'associent en molécules encore plus complexes, telles que les acides aminés, essentiels à la constitution des protéines et, par la suite, à celle de l'ADN.

Selon les exobiologistes² les plus optimistes, si des molécules simples peuvent s'assembler en molécules plus complexes dans des conditions aussi hostiles que celles qui existaient sur Terre dans ses débuts ou dans l'espace interstellaire (ou règnent des rayons gamma, des rayons X, des rayons ultraviolets, des basses températures et une faible densité de matière), il semble raisonnable de penser que la vie a pu émerger ailleurs que sur Terre. Chez les pessimistes, on doute que le phénomène de la vie, qui résulte d'une incroyable succession de hasards, ait pu se produire en plusieurs lieux dans l'Univers.

Par ailleurs, les optimistes misent dorénavant sur certaines découvertes qui laissent croire que la vie est en mesure de se développer dans des lieux fort peu accueillants. Par exemple, des microbes ont été trouvés au bout d'une carotte longue de plus de 3 600 mètres, prélevée au cœur de l'Antarctique. Ces morceaux de glace ne reçoivent pourtant pas la lumière du Soleil et sont coupés de l'atmosphère depuis au moins un million d'années. On a également trouvé des microbes se nourrissant de fer, de manganèse et de soufre au fond d'une mine d'or en Afrique du Sud. Ils vivent ainsi, depuis 2 milliards d'années, à 3 kilomètres sous terre, où il fait 50 °C et où l'air est chargé de méthane et d'hydrogène. Enfin, le fond des océans, là où la pression est de l'ordre de 200 atmosphères (ou 200 bars), abrite des colonies de microbes qui se nourrissent du soufre rejeté par des sources hydrothermales. Selon certains exobiologistes, il existe bien au moins quelques endroits dans le Système solaire où l'environnement n'est pas moins inhospitalier que les lieux que l'on vient de décrire.

D'autres observations, effectuées notamment sur des météorites, tendent à montrer que les molécules assez complexes se trouvent en nombre non négligeable dans notre Système solaire. Par exemple, on a trouvé, en 1971, des acides aminés dans une météorite recueillie immédiatement après sa chute. Plus récemment, en 1996, les chercheurs de la NASA annonçaient avoir trouvé des fossiles de microorganismes dans la météorite ALH84001 venue de Mars et tombée en Antarctique (voir la section 5.3, p. 164). Quoique leur interprétation soit contestée, cette découverte alimente l'espoir de trouver un jour

2. On appelle **exobiologie** ou **astrobiologie** la science dont l'objet est l'étude des possibilités de vie sous des formes familières ou non familières, dans l'espace ou sur tout autre astre que la Terre.



des traces indiscutables d'une forme de vie extraterrestre, ne serait-ce que microscopique.

Il reste donc encore beaucoup à faire avant de vraiment bien comprendre comment est apparue la vie sur Terre et comment elle s'y est développée, et avant d'être en mesure de déterminer si la vie telle que nous la connaissons a pu se développer ailleurs.

Voici les principales étapes qui ont conduit à l'apparition de la civilisation technologique d'aujourd'hui :

- Big Bang
- Nucléosynthèse primordiale (hydrogène et hélium)
- Nucléosynthèse des autres éléments chimiques au cœur des étoiles
- Formation de la Terre
- Apparition des molécules complexes dont les acides aminés³
- Passage des acides aminés (non-vie) à des molécules auto-reproductrices (vie)
- Évolution biologique de la bactérie jusqu'à l'être humain
- Évolution de l'humanité
- Apparition de la civilisation technologique

10.3 Discussion sur les possibilités de la vie extraterrestre

Comme nous l'avons mentionné, nous ne connaissons actuellement aucune forme de vie biologique ou intelligente en dehors de notre planète. Certains prétendent avoir été les témoins d'apparitions d'ovnis, mais il n'a jamais été démontré qu'il s'agissait de manifestations de civilisations extraterrestres. Disons que les ovnis ne constituent absolument pas le principal objet des démarches des scientifiques qui travaillent à évaluer les chances que de la vie se soit développée ailleurs que sur la Terre. Par exemple, l'une des questions les plus fréquemment posées est la suivante : pourquoi serions-nous seuls, si dans notre seule Galaxie on compte environ 200 milliards d'étoiles ? Même si une infime partie de ces étoiles possédait une planète sur laquelle la vie pourrait émerger, il pourrait fort bien y avoir des centaines ou des milliers de mondes habités à l'échelle de l'Univers. Ce dernier étant âgé d'environ 15 milliards d'années, il se serait écoulé suffisamment de temps pour qu'éclore la vie en plusieurs lieux.

3. Cette étape s'est peut-être produite avant la formation de la Terre.



Mais la vie sous quelle forme ? Bien que, à première vue, rien ne fasse de l'origine de la vie telle qu'on la connaît un phénomène restreint et unique, il est probable que des formes de vie différentes de la nôtre soient apparues. Par contre, étant donné que les éléments chimiques dont sont constitués les organismes vivants figurent parmi les plus abondants de l'Univers (hydrogène, carbone, azote et oxygène), ces autres formes de vie seraient probablement constituées sur la base de ces mêmes éléments. Il arrive souvent, lorsqu'on discute de vie extraterrestre, que l'on se limite à des formes de vie semblables à la nôtre. On appelle **anthropomorphisme** cette tendance à attribuer des caractères humains à des objets naturels, des animaux ou des créations de l'homme.

Équation de Drake

Le problème de la possibilité de l'existence de civilisations extraterrestres techniquement avancées a été clairement posé, en 1961, par l'astronome américain Frank Drake (né en 1930) et son équipe, sous la forme d'une formule mathématique appelée **équation de Drake** :

$$N_{\text{civilisations}} = N_{\text{étoiles}} \times f_{\text{planètes}} \times N_{\text{terre}} \times f_{\text{vie}} \times f_{\text{int}} \times f_{\text{tech}} \times f_{\text{durée}}$$

où $N_{\text{civilisations}}$ est le nombre de civilisations extraterrestres techniquement avancées (capables de communication électromagnétique) dans notre Galaxie ;

$N_{\text{étoiles}}$ est le nombre d'étoiles dans notre Galaxie ;

$f_{\text{planètes}}$ est la probabilité qu'une de ces étoiles possède un système planétaire ;

N_{terre} est le nombre de planètes d'un de ces systèmes planétaires capables d'abriter la vie.

f_{vie} est la probabilité que la vie se développe effectivement sur ces planètes.

f_{int} est la probabilité que cette vie ait évolué jusqu'à l'apparition de l'intelligence ;

f_{tech} est la probabilité que cette vie intelligente se développe en une civilisation techniquement avancée qui désire communiquer avec d'autres civilisations.

$f_{\text{durée}}$ est le rapport entre la durée de la vie d'une civilisation technique pendant laquelle elle émet des signaux dans l'espace et l'âge de la Galaxie.

Dans cette équation, toutes les variables f peuvent prendre des valeurs entre 0 et 1, selon la probabilité qu'on leur accorde, et



$N_{\text{civilisations}}$ peut prendre des valeurs situées entre 0 pour les calculs les plus pessimistes et environ 1 milliard pour les calculs optimistes. La réponse se situe probablement quelque part entre les deux, quoique cela relève plus du souhait que de la connaissance.

Pour arriver à une valeur de 0, il faut être de ceux qui croient que les chances qu'une autre forme de vie ait atteint notre degré d'avancement technologique sont nulles. Une valeur de 0 doit ainsi être accordée au facteur f_{tech} et on obtient 0 pour $N_{\text{civilisations}}$. Pour arriver à une valeur de l'ordre du milliard, il faut avoir accordé des valeurs non négligeables à chacun des facteurs f . Ainsi, bien que les trois premiers paramètres soient relativement faciles à évaluer, les derniers comportent une grande incertitude et c'est ce qui rend difficile la détermination de $N_{\text{civilisations}}$. Par exemple, le paramètre $f_{\text{durée}}$ concernant la durée de vie d'une civilisation technique avancée peut faire l'objet de débats dont l'issue fera varier de façon importante le résultat. Dans la cas de $f_{\text{durée}}$, il n'est même pas possible de se servir de la valeur de notre civilisation comme référence puisque nous ne communiquons par ondes radio que depuis une centaine d'années seulement. Bien malin est celui qui pourrait dire combien de temps notre civilisation vivra encore.

L'équation de Drake ne sert donc pas à prouver l'existence de civilisations extraterrestres. Elle met plutôt en lumière tous les facteurs dont il faut tenir compte pour évaluer nos chances de trouver une autre civilisation avancée dans la Voie lactée. Frank Drake est aujourd'hui président du conseil de gestion de l'important institut Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI), dont la mission est d'explorer, de comprendre et d'expliquer l'origine, la nature, la fréquence et la distribution de la vie dans l'Univers.

Paradoxe de Fermi

Bien qu'il puisse sembler légèrement farfelu au premier abord, le paradoxe de Fermi est en réalité un sujet de discussion important chez toutes les personnes qui s'intéressent à la recherche de vie extraterrestre. Chez les pessimistes, le paradoxe sert plutôt à justifier que nous sommes seuls dans notre Galaxie et peut-être même dans l'Univers entier. Il a été énoncé non officiellement en 1950 par le physicien italien Enrico Fermi (1901–1954). Fermi est parfois présenté comme l'architecte de l'ère nucléaire et a reçu le prix Nobel en 1938 pour ses travaux sur l'énergie nucléaire.

Le paradoxe est le suivant. Imaginons une civilisation dotée d'une technologie lui permettant de coloniser, petit à petit, tous



les systèmes planétaires de la Galaxie. En tenant compte du nombre d'étoiles, cette colonisation pourrait être réalisée en au moins 10 millions d'années, ce qui est un temps très court à l'échelle de la Galaxie, qui a 10 000 millions d'années. Ainsi, les membres de cette civilisation devraient être partout autour de nous. Mais où sont-ils donc, se demanda Fermi ?

Remarquez qu'il est inutile de s'objecter à l'hypothèse de la colonisation en argumentant au sujet de la vitesse des vaisseaux employés, par exemple. Peu importe les moyens dont elle disposera, cette civilisation arrivera à coloniser la Galaxie en un temps beaucoup plus petit que l'âge de la Galaxie. De façon plus concrète, imaginons que les Galions, civilisation extraterrestre issue de la planète Galo, décident de coloniser la Galaxie. Supposons que les Galions sont capables de voyager à 1 % de la vitesse de la lumière (3 000 km/s). En 500 ans, ils atteignent les étoiles les plus proches. Ils s'y installent et y vivent 500 ans. Par la suite, une partie de leur population repart vers les autres étoiles avoisinant leurs nouvelles colonies, et il en va ainsi jusqu'à ce qu'ils colonisent la Galaxie entière. À cette vitesse, comme la Galaxie mesure 100 000 al de diamètre, les Galions l'occuperont en entier en 20 millions d'années environ.

Alors, pourquoi ne les voyons-nous pas ? La réponse des pessimistes à cette question est fort simple : parce qu'ils n'existent pas et que nous sommes seuls dans notre grande Galaxie. Pour les autres, le paradoxe de Fermi constitue une occasion intéressante de débattre de ces questions et de faire progresser la recherche de vie extraterrestre.

10.4 Tentatives de communication avec les extraterrestres

S'il existe d'autres civilisations ailleurs dans l'Univers, quelles sont les chances que nous arrivions un jour à entrer en contact avec elles ? Sur le plan physique, à l'échelle de l'Univers, même s'il se trouvait un million de ces civilisations réparties uniformément, la distance moyenne entre chacune d'elles serait telle (une centaine de parsecs) qu'il est difficilement envisageable qu'on puisse se déplacer d'une étoile à une autre, d'une civilisation à l'autre. Cependant, sur le plan des communications, il est beaucoup plus réaliste de croire que nous pourrions entrer en contact par la voie des ondes électromagnétiques. Pour le moment, ce sont les radiotélescopes qui ont été mis à profit dans cet objectif.



Des équipes de divers pays ont déjà fait plusieurs tentatives de détection de signaux d'origine artificielle provenant des étoiles proches de nous, semblables au Soleil en ce qui a trait à leur taille, leur âge et leur température. Ces recherches n'étant encore qu'à leurs débuts, il ne faut pas s'étonner que les résultats obtenus jusqu'à présent soient négatifs. Par exemple, comment pourrait-on savoir quelle fréquence nos concitoyens galactiques seraient en mesure d'émettre ? C'est là un sérieux problème, puisque les radiotélescopes et leurs récepteurs sont syntonisés sur une bande passante de fréquences très étroite dans le but de rendre optimale la qualité du signal reçu. De plus, comment savoir quelles étoiles écouter ? Et enfin, qu'est-ce qui nous dit que les signaux émis par d'autres civilisations seraient nécessairement des ondes radio ? À notre avis, ce type d'ondes présente beaucoup d'avantages pour ce qui est de la communication, mais qu'en serait-il pour eux ? Disons que, même si l'écoute continue, il se peut que cela prenne passablement de temps avant que les radioastronomes perçoivent un signal témoignant de la présence d'une autre civilisation. Ou peut-être avons-nous simplement été malchanceux !

Dans l'objectif de ne pas laisser dans l'attente et dans la solitude une supposée civilisation qui serait également à la recherche d'indices quant à la présence d'autre vie, on a émis, par le radiotélescope d'Arecibo, de Porto Rico, des signaux vers le centre de la Voie lactée. Ces signaux sont d'une puissance suffisante pour qu'une civilisation équipée du même radiotélescope puisse les détecter à l'autre bout de la Galaxie. La réponse, s'il y en a une, ne pourrait venir que dans 1 000, 10 000 ou 100 000 ans ! Ne vous y trompez pas : nous n'attendons pas vraiment de réponse à ce message, mais nous nous disons que si d'autres civilisations ont fait la même chose dans le passé, nous pourrions capter ces messages vieux de plusieurs milliers d'années, tout comme, dans plusieurs milliers d'années, une autre civilisation recevra peut-être nos messages d'aujourd'hui.

Toujours dans le but d'envoyer dès que possible des messages terrestres dans l'espace, les sondes spatiales Pioneer et Voyager ont emporté avec elles des messages destinés à d'autres civilisations. À l'instigation de l'astronome et vulgarisateur scientifique américain Carl Sagan, la NASA a accepté de fixer une plaque gravée aux sondes Pioneer 10 et 11 lancées au début des années 70. Chaque plaque contient un message (figure 10.3) destiné à d'éventuels extraterrestres qui les rencontreraient par hasard dans leur route hors du Système solaire, dans plusieurs milliers d'années. C'est un peu comme lancer une bouteille à la mer : les chances qu'elle soit retrouvée sont

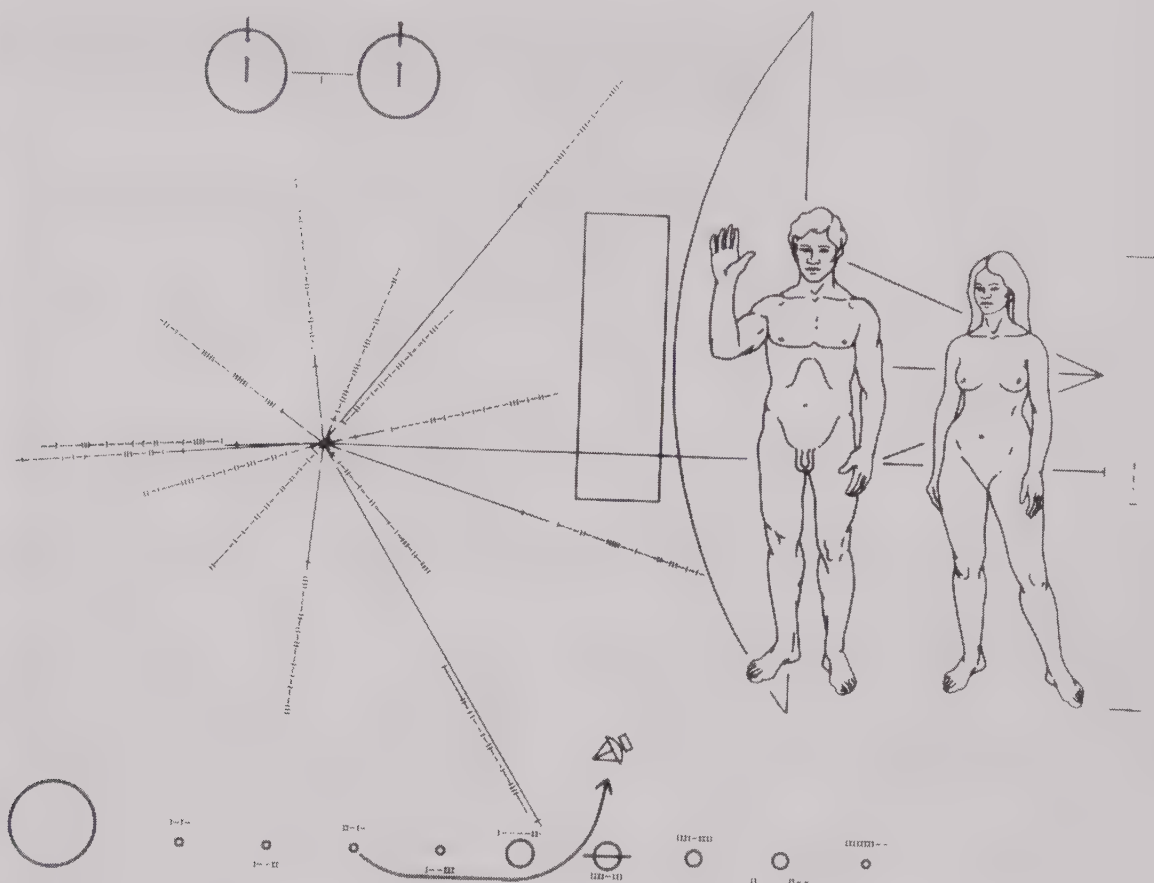


FIGURE 10.3

Reproduction du message fixé aux sondes Pioneer 10 et 11 destiné à d'éventuels extraterrestres

plutôt minces. On trouve un message similaire sur les sondes Voyager 1 et 2.

La plaque apposée aux sondes Pioneer a été gravée sur une plaque d'aluminium dorée par électrolyse, mesurant 152×229 mm, fixée à l'antenne de l'engin et protégée contre l'érosion causée par la poussière interstellaire. Les éléments gravés ont été choisis de telle sorte qu'ils donnent une image le plus juste possible de notre civilisation et de l'état de notre technologie. Ainsi, le long de la base sont réparties les planètes, disposées à partir du Soleil. On a tracé la trajectoire de l'engin spatial Pioneer quittant la Terre selon un arc, dépassant Mars et se rabattant vers Jupiter.



Les deux figures de droite sont proportionnées à la taille de la sonde spatiale dessinée en arrière-plan, et représentent le type de créatures qui l'ont construite. La main de l'homme est levée en geste de bienveillance.

Les lignes radiantés à gauche représentent les positions de 14 pulsars, disposées de façon à désigner notre Soleil comme étoile-foyer de la civilisation qui a lancé l'engin.

Les symboles « I – » aux extrémités des lignes sont des nombres binaires qui représentent les fréquences des pulsars au moment du lancement, par rapport à celles de l'atome d'hydrogène, présenté sous deux formes avec un « 1 » comme unité symbolique. La différence d'énergie entre ces deux états fournit la norme de temps la plus précise de la science. L'atome d'hydrogène, atome le plus abondant dans le cosmos, est ainsi utilisé comme « horloge universelle », et la décroissance régulière, dans les fréquences des pulsars, peut permettre à une autre civilisation de déterminer le temps qui s'est écoulé depuis le lancement.

On a estimé que les sondes Pioneer couvriraient une distance de 3 000 années-lumière en 100 millions d'années. Ce temps pourrait être nécessaire à leur découverte par une civilisation étrangère. Pour le moment, elles sont aux limites du Système solaire. Par exemple, Pioneer 10, avec laquelle nous sommes encore en contact régulier, est maintenant à plus de 80 unités astronomiques de la Terre, ce qui correspond à environ un millièrme d'année-lumière seulement.

Le fabuleux projet KEO

L'année 2003 est l'année du lancement du satellite KEO, aventure qui a été déclarée « projet du XXI^e siècle » par l'UNESCO. KEO consiste à mettre en orbite autour de la Terre un satellite contenant des milliers de messages rédigés par des enfants, des hommes et des femmes de toutes les cultures et de toutes les langues. Les humains du monde entier ont été invités à faire part de leurs témoignages, de leurs rêves, de leurs aspirations et de leurs espoirs. Ces messages sont destinés non pas à d'éventuels extraterrestres, mais plutôt à nos lointains petits-enfants qui ne pourront les lire que lorsque le satellite reviendra intact sur la Terre, dans 50 000 ans.

Le nom **KEO** a été retenu surtout en raison de son universalité. En effet, le mot n'a aucune signification et n'est que le groupement de trois lettres qui peuvent être facilement prononcées dans n'importe quelle langue. Les messages seront gravés sur des disques de verre qui nécessitent un lecteur particulier pour être lus. Ainsi, comme l'ajout d'un lecteur à la charge utile de KEO n'est pas possible pour des raisons d'espace et de fragilité, on travaille actuellement à la rédaction d'un mode d'emploi en termes symboliques simples expliquant comment construire un lecteur pour accéder au contenu des disques.

Avant de terminer, il est important de rappeler que notre Soleil est une étoile relativement jeune. Dans la Voie lactée, il existe des étoiles semblables qui sont beaucoup plus vieilles. Il est donc possible de croire (de rêver ?) qu'il pourrait exister, dans notre Galaxie, des planètes habitées par des civilisations qui auraient atteint notre degré de développement technologique il y a des millions d'années ! Malgré la rapidité avec laquelle notre technologie évolue, il nous est à peu près impossible de prévoir où nous serons ren-



des dans 100 ans et encore moins dans 1 000 ans. Est-il vraiment raisonnable de penser que nous puissions un jour entrer en contact avec des civilisations qui ont peut-être des millions d'années d'avance sur nous ? Peut-être serait-il plus facile à une fourmi de communiquer avec nous que nous avec eux ! Quoi qu'il en soit, et malgré qu'elle donne peu de résultats pour le moment, l'entreprise de la recherche de vie extra-terrestre est source de passion et de connaissance. Par elle, nous apprenons à mieux connaître notre Univers et, plus important encore, à mieux nous connaître nous-mêmes.

Questions de révision

1. Vrai ou faux ?
 - a) On a déjà découvert plusieurs exoplanètes.
 - b) Le Système solaire s'est formé à partir de la capture de planètes errantes par le Soleil.
 - c) Le Soleil compte pour 50 % de la masse totale du Système solaire.
 - d) Les astronomes ont découvert des civilisations extraterrestres.
 - e) Plusieurs astronomes professionnels s'intéressent aux communications avec d'éventuelles civilisations extraterrestres.
2. Comment les astronomes font-ils pour détecter la présence d'une exoplanète autour d'une étoile ?
3. Quel est le scénario le plus probable de l'origine de notre Système solaire ?
4. À quand remonte l'apparition de la vie sur la Terre, selon la plupart des estimations ?
5. En quoi consiste le paradoxe de Fermi ? Expliquez.
6. Que représente la plaque qui a été fixée sur les sondes Pioneer ? Dans quel but a-t-on envoyé cette plaque dans l'espace ?
7. En quoi consiste le projet KEO ?
8. Avec quel radiotélescope les astronomes ont-ils envoyé un message à l'autre bout de la Galaxie ? Dans quel but ?
9. Qu'a-t-il été découvert dans la matière inter-stellaire qui pourrait nous laisser croire que la vie pourrait se développer ailleurs que sur la Terre ?
10. Pour le moment, quel type d'ondes est employé pour tenter de communiquer avec des extraterrestres ?
11. Quelles sont les difficultés rencontrées par les astronomes dans l'écoute électronique de nos éventuels colocataires de la Galaxie ?
12. Que signifie l'équation de Drake ?
13. Estimez la valeur de chaque paramètre de l'équation de Drake et faites le calcul de $N_{\text{civilisations}}$. Vous classez-vous parmi les optimistes ou les pessimistes ?

Annexes

Système international d'unités (SI)

Le système d'unités le plus connu et le plus employé est le Système international ou SI. Les unités de ce système sont appelées **unités SI**.

Toutes les unités SI sont construites à partir de sept unités fondamentales : le mètre (m), le kilogramme (kg), la seconde (s), l'ampère (A), le kelvin (K), la mole (mol) et la candela (cd).

Le mètre (m)

Depuis 1983, le mètre est défini comme la distance parcourue par la lumière dans le vide en $\frac{1}{299\,792\,458}$ s.

Entre 1960 et 1983, il était égal à 1 650 763,73 fois la longueur d'onde de la radiation orange émise par le krypton 86.

Avant 1960, on se servait d'un mètre en platine iridié comme longueur étalon. Celui-ci était conservé au Bureau international des poids et mesures, en France, dans des conditions rigoureusement vérifiées. Il est devenu trop peu précis pour les besoins de la science et de la technologie modernes.

Le kilogramme (kg)

Depuis 1901, l'étalon de masse est un cylindre de platine iridié de 1 kilogramme, conservé au Bureau international des poids et mesures.

L'échelle atomique fournit aux scientifiques une unité plus précise : l'unité de masse atomique u. On la définit comme le 1/12 de la masse de l'atome de carbone 12. Et $1u = 1,660 \times 10^{-27}$ kg.

La seconde (s)

La seconde correspond de façon rigoureuse à l'intervalle de temps égal à 9 192 631 770 fois la période de transition des deux niveaux hyperfins de l'état fondamental du césium 133.

Le temps civil est encore établi à partir de l'étalon de temps qu'est le jour solaire moyen. Ainsi, 1 seconde vaut $\frac{1}{86\,400}$ jour. Dans la vie de tous les jours, cette définition est suffisante, ce qui n'est pas le cas pour la science et la technologie d'aujourd'hui.

L'ampère (A)

L'ampère est l'intensité du courant continu qui circule dans deux fils conducteurs minces, parallèles, rectilignes et de longueur infinie, distants de 1 mètre l'un de l'autre, placés dans le vide et produisant une force de 2×10^{-7} N/m.

Le kelvin (K)

Le kelvin est l'unité de température thermodynamique égale à la fraction $\frac{1}{273,16}$ de la température du point triple de l'eau. Selon cette définition, $0,01\,^{\circ}\text{C} = 273,16\text{ K}$.



La mole (mol)

Une mole est la quantité de matière d'un système qui contient autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone 12. Dans une mole, le nombre d'entités est égal au nombre d'Avogadro qui lui-même vaut $6,022\,045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

La candela (cd)

La candela est l'intensité d'une source lumineuse qui émet un rayonnement monochromatique de $5,40 \times 10^{12}$ hertz, dont l'intensité énergétique est de 1/683 watt par stéradian.

Préfixes des puissances de 10

Toutes les unités employées en physique peuvent être précédées d'un préfixe servant à remplacer les puissances de dix.

Exa	E	10^{18}	Déci	d	10^{-1}
Péta	P	10^{15}	Centi	c	10^{-2}
Téra	T	10^{12}	Milli	m	10^{-3}
Giga	G	10^9	Micro	μ	10^{-6}
Méga	M	10^6	Nano	n	10^{-9}
Kilo	k	10^3	Pico	p	10^{-12}
Hecto	h	10^2	Femto	f	10^{-15}
Déca	da	10^1	Atto	a	10^{-18}

Alphabet grec

Nom de la lettre	Majuscule	Minuscule	Nom de la lettre	Majuscule	Minuscule	Nom de la lettre	Majuscule	Minuscule
Alpha	A	α	Iota	I	ι	Rhô	P	ρ
Bêta	B	β	Kappa	K	κ	Sigma	Σ	σ
Gamma	Γ	γ	Lambda	Λ	λ	Tau	T	τ
Delta	Δ	δ	Mu	M	μ	Upsilon	Y	υ
Epsilon	E	ε	Nu	N	ν	Phi	Φ	ϕ
Zêta	Z	ζ	Xi	Ξ	ξ	Chi	X	χ
Êta	H	η	Omicron	O	o	Psi	Ψ	ψ
Thêta	Θ	θ	Pi	Π	π	Oméga	Ω	ω

Périmètre, aire, volume et masse volumique

Périmètre (P)

Carré de côté a

$$P = 4a$$

Rectangle de côtés a et b

$$P = 2a + 2b$$

Triangle de côtés a , b et c

$$P = a + b + c$$

Cercle de rayon R

$$P = \text{circonférence} = 2\pi R$$



Aire (A)

Carré de côté a

$$A = a^2$$

Rectangle de côtés a et b

$$A = ab$$

Triangle de base b et de hauteur h

$$A = bh/2$$

Cercle de rayon R

$$A = \pi R^2$$

Sphère de rayon R

$$A = 4\pi R^2$$

Cylindre droit de hauteur h

et de base de rayon R

$$A = 2\pi Rh$$

Volume (V)

Cube de côté a

$$V = a^3$$

Parallélépipède de côtés a , b et c

$$V = abc$$

Sphère de rayon R

$$V = 4\pi R^3/3$$

Cylindre droit de hauteur h

et de base de rayon R

$$V = \pi R^2 h$$

Note

1 litre = 1 000 millilitres (mL) = 1 dm³

1 millilitre (mL) = 1 cm³

Masse volumique (ρ)

La masse volumique est égale au rapport de la masse sur le volume. On écrira $\rho = \frac{m}{V}$.

L'unité la plus courante est le gramme par centimètre cube (g/cm³).

Quantités et constantes fondamentales

Masse de l'électron (m_e)

$$9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Masse du proton (m_p)

$$1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Masse du neutron (m_n)

$$1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Vitesse de la lumière (c)

$$3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Constante gravitationnelle (G)

$$6,67 \times 10^{-11} \text{ (m}^3\text{/s}^2\text{)} \cdot \text{kg}$$

Valeurs importantes en astronomie

Accélération gravitationnelle de la Terre (g)

$$9,8 \text{ m/s}^2$$

Accélération gravitationnelle de la Lune

$$1,63 \text{ m/s}^2$$

Accélération gravitationnelle du Soleil

$$274 \text{ m/s}^2$$

Masse de la Lune

$$7,36 \times 10^{22} \text{ kg}$$

Masse de la Terre

$$5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$$

Masse du Soleil

$$1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$$

Distance Terre-Soleil

$$1,496 \times 10^{11} \text{ m} = 1 \text{ UA}$$

Distance Terre-Lune

$$3,84 \times 10^8 \text{ m}$$

Rayon de la Terre

$$6,37 \times 10^6 \text{ m}$$

Rayon de la Lune

$$1,74 \times 10^6 \text{ m}$$

Rayon du Soleil

$$6,96 \times 10^8 \text{ m}$$

Unité astronomique (UA)

$$1,496 \times 10^{11} \text{ m}$$

Année-lumière (al)

$$63 \text{ 240 UA} = 9,46 \times 10^{12} \text{ km}$$

Parsec (pc)

$$3,26 \text{ al}$$



Données sur la Terre

Diamètre	12 756 km (à l'équateur) 12 714 km (aux pôles)
Volume	$1,09 \times 10^{21} \text{ m}^3$
Masse	$5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$
Densité moyenne	5,5 g/cm ³
Accélération gravitationnelle à la surface	9,8 m/s ²
Distance moyenne au Soleil	150 000 000 km
Excentricité	0,0167
Période de révolution (année sidérale)	365,26 jours
Période de rotation (jour sidéral)	23 h 56 min
Inclinaison de l'axe de rotation	23,5°
Albédo	37 %
Atmosphère	Azote (78 %) Oxygène (21 %) Argon (0,93 %) Traces de gaz carbonique, d'eau et de méthane
Pression à la surface	1 bar
Température moyenne	10 °C
Nombre de satellites	1

Caractéristiques orbitales des planètes du Système solaire

Planète	Distance moyenne au Soleil (en UA)	Distance moyenne au Soleil (en m)	Période de révolution sidérale (en années)	Période de révolution sidérale (en jours)	Excentricité	Inclinaison de l'orbite par rapport à l'orbite terrestre (en °)	Vitesse de révolution (en km/s)
Mercure	0,387	$57,9 \times 10^9$	0,2409	88	0,206	7,0	47,8
Vénus	0,723	$108,2 \times 10^9$	0,6152	224,7	0,0068	3,4	35,0
Terre	1	$149,6 \times 10^9$	1	365,26	0,0167		29,8
Mars	1,524	228×10^9	1,88	686,70	0,093	1,85	24,1
Jupiter	5,203	$778,4 \times 10^9$	11,86	4 332	0,048	1,3	13,1
Saturne	9,55	1429×10^9	29,46	10 760	0,056	2,5	9,7
Uranus	19,2	2872×10^9	84	30 685	0,046	0,77	6,8
Neptune	30,1	4503×10^9	164,8	60 190	0,011	1,77	5,4
Pluton	39,3	5879×10^9	247,8	90 500	0,25	17,2	4,7

Caractéristiques physiques des planètes du Système solaire et du Soleil

Astre	Diamètre (en milliers de km)	Masse (Terre = 1)	Densité (en g/cm ³)	Accélération gravitationnelle (Terre = 1)	Période de rotation sidérale (en jours)	Inclinaison (en °)	Albédo	Vitesse de libération (en km/s)	Magnitude apparente maximale
Soleil	1 392	332 946	1,41	2796	25-35			617,6	-27
Lune	3,476	0,0123	3,34	0,17	27,3217	6,68	0,12	2,4	-12,7
Mercure	4,878	0,0553	5,43	0,38	58,646	0,0	0,11	4,3	-2,1
Vénus	12,104	0,815	5,24	0,91	243,01R*	177,3	0,65	10,4	-4,3
Terre	12,756	1	5,52	1,00	0,99727	23,45	0,37	11,2	
Mars	6,794	0,1074	3,94	0,38	1,026	25,19	0,15	5,0	-1,4



Astre	Diamètre (en milliers de km)	Masse (Terre = 1)	Densité (en g/cm ³)	Accélération gravitationnelle (Terre = 1)	Période de rotation sidérale (en jours)	Inclinaison (en °)	Albédo	Vitesse de libération (en km/s)	Magnitude apparente maximale
Jupiter	142,980	317,83	1,33	2,53	0,41	3,12	0,52	59,5	-2,7
Saturne	120,540	95,16	0,70	1,07	0,44	26,7	0,47	35,6	0,0
Uranus	51,120	14,50	1,30	0,90	-0,72	97,9	0,51	21,2	5,6
Neptune	49,530	17,204	1,76	1,14	0,67	29,6	0,41	23,5	7,8
Pluton	2,300	0,0025	2,0	0,08	-6,387	123	0,30	1,3	13,7

* R indique un mouvement rétrograde.

Satellites du Système solaire (en 2002)

Planète	Nombre de satellites connus en 2002	Nom du satellite	Diamètre (en km)	Distance du satellite à sa planète (en milliers de km)	Période orbitale (en jours)	Année de la découverte
Terre	1	Lune		384,4	27,322	
Mars	2	Phobos	28 × 22 × 18	9,378	0,319	1877
		Deimos	16 × 12 × 10	23,459	1,262	1877
Jupiter	39	Métis	40	128	0,295	1979
		Adrastea	26 × 20 × 16	129	0,298	1979
		Amathée	232 × 146 × 134	181	0,498	1892
		Thébé	110 × 90	222	0,675	1979
		Io	3 643	422	1,769	1610
		Europe	3 122	671	3,551	1610
		Ganymède	5 262	1070	7,155	1610
		Callisto	4 820	1883	16,689	1610
		Léda	10	11094	238,7	1974
		Himalia	170	11480	250,6	1904
		Lysithée	24	11720	259,2	1938
		Elara	80	11737	259,7	1905
		Ananké	20	21200	610,5R	1951
		Carmé	30	22600	702,3R	1938
		Pasiphae	36	23330	708,0R	1908
		Sinopé	28	23700	724,5R	1914
	Satellites récemment découverts	S/1975 J1 (S/2000 J1)	8	7507	130,0	1975 (Confirmation en 2000)
		S/1999 J1	8	24 100	758,8R	1999
		S/2000 J2	5,2	23 750	750,8R	2000
		S/2000 J3	5,2	20 220	585,2R	2000
		S/2000 J4	3,2	23 170	723,0R	2000
		S/2000 J5	4,4	21 130	624,6R	2000
		S/2000 J6	3,8	23 080	718,7R	2000
		S/2000 J7	6,8	20 960	617,2R	2000
		S/2000 J8	5,4	23 910	758,1R	2000
		S/2000 J9	5	23 310	730,0R	2000
		S/2000 J10	3,8	23 390	733,7R	2000
		S/2000 J11	4	12 560	287,0	2000
		S/2001 J1	4	23 776	752,9R	2001
		S/2001 J2	4	20 841	614,7R	2001
		S/2001 J3	4	21 324	629,8R	2001



Planète	Nombre de satellites connus en 2002	Nom du satellite	Diamètre (en km)	Distance du satellite à sa planète (en milliers de km)	Période orbitale (en jours)	Année de la découverte	
Saturne	30	S/2001 J4		3	23 317	713,1R	2001
		S/2001 J5		2	23 515	732,3R	2001
		S/2001 J6		2	22 877	715,3R	2001
		S/2001 J7		3	20 997	621,5R	2001
		S/2001 J8		2	20 712	609,0R	2001
		S/2001 J9		2	20 816	616,7R	2001
		S/2001 J10		2	18 978	534,1R	2001
		S/2001 J11		3	23 401	735,5R	2001
		Pan		20	134	0,575	1990
		Atlas	37 × 34,4 × 27		138	0,602	1980
		Prométhée	148 × 100 × 68		140	0,613	1980
	Pandore	110 × 88 × 62		142	0,629	1980	
	Épiméthée	78 × 110 × 110		151	0,694	1966	
	Janus	194 × 190 × 154		151	0,695	1966	
	Mimas	418 × 392 × 382		186	0,942	1789	
	Encelade	512 × 494 × 490		238	1,370	1789	
	Téthys	1 072 × 1 056 × 1 052		295	1,888	1684	
	Telesto	30 × 25 × 15		295	1,888	1980	
	Calypso	30 × 16 × 16		295	1,888	1980	
	Dioné	1 120		377	2,737	1684	
	Hélène	36 × 32 × 30		377	2,737	1980	
	Rhéea	1 528		527	4,518	1672	
	Titan	5 150		1 222	15,945	1655	
	Hypérion	370 × 280 × 226		1 481	21,277	1848	
	Japet	1 436		3 561	79,330	1671	
	Phoebé	230 × 220 × 210		12 952	550,48R	1898	
	Satellites découverts récemment	S/2000 S1	~16	23 100	1 312R	2000	
S/2000 S2		~20	15 200	687	2000		
S/2000 S3		~32	18 160	893	2000		
S/2000 S4		~14	18 240	926	2000		
S/2000 S5		~14	11 370	449	2000		
S/2000 S6		~10	11 440	451	2000		
S/2000 S7		~6	20 470	1 089R	2000		
S/2000 S8		~6	15 650	729R	2000		
S/2000 S9		~6	18 710	951R	2000		
S/2000 S10		~8	17 610	871	2000		
S/2000 S11		~26	16 390	738	2000		
S/2000 S12	~6	19 470	1 017R	2000			
Uranus	22	Cordélia		40	50	0,335	1986
		Ophélie		42	54	0,376	1986
		Bianca		54	59	0,435	1986
		Cressida		80	62	0,464	1986
		Desdemona		32	63	0,474	1986
		Juliet		94	64	0,493	1986
		Portia		136	66	0,513	1986
		Rosalind		72	70	0,558	1986
		Belinda		80	75	0,624	1986
		Puck		162	86	0,762	1986
		Miranda	480 × 468,4 × 465,8		129	1,413	1948
		Ariel	1162,2 × 1155,8 × 1155,4		191	2,520	1851



Planète	Nombre de satellites connus en 2002	Nom du satellite	Diamètre (en km)	Distance du satellite à sa planète (en milliers de km)	Période orbitale (en jours)	Année de la découverte	
		Umbriel	1169,4	266	4,144	1851	
		Titania	1577,8	436	8,706	1787	
		Obéron	1522,8	584	13,463	1787	
		Caliban	96	7 230	579,5R	1997	
		Stephano	20	8 002	676,5R	1999	
		Sycorax	190	12 179	1283,4R	1997	
		Prospero	30	16 418	1992,8R	1999	
		Setebos	30	17 459	2202,3R	2000	
		Satellites récemment découverts ou en attente de certification	S/2001 U1	20	8 571	758,1R	2001
			S/1986 U10	40	75	0,62	
Neptune	8	Naiad	58	48,2	0,294	1989	
		Thalassa	80	50,1	0,311	1989	
		Despina	148	52,5	0,335	1989	
		Galatea	158	62,0	0,429	1989	
		Larissa	190	73,5	0,555	1989	
		Proteus	436 × 416 × 402	117,6	1,122	1989	
		Triton	2707	354,8	5,877R	1848	
		Néréïde	340	5 513,4	360,136	1949	
Pluton	1	Charon	1 186	19,6	6,387	1978	

Objets Messier

No	α	δ	NGC	Type*	m	Diamètre	Constellation	Autre nom
	h min	° '						
1	05 34,5	22 01+	1952	NL	8,4	6×4'	Taureau	Nébuleuse du Crabe
2	21 33,5	00 49-	7089	AG	6,5	12'	Verseau	
3	13 42,2	28 23+	5272	AG	6,4	19'	Chiens de Chasse	
4	16 23,6	26 32-	6121	AG	6	23'	Scorpion	
5	15 18,6	02 05+	5904	AG	6	20'	Serpent	
6	17 40,1	32 13-	6405	AO	5,3	26'	Scorpion	Amas Papillon
7	15 53,9	34 49-	6475	AO	4,1	50'	Scorpion	
8	18 03,8	24 23-	6523	NL	5,8	60×35'	Sagittaire	Nébuleuse de la Lagune
9	17 19,2	18 31-	6333	AG	7,9	3'	Serpentaire	
10	16 57,1	04 06-	6254	AG	6,6	12'	Serpentaire	
11	18 51,1	06 16-	6705	AO	6,3	13'	Écu de Sobieski	Amas du Canard sauvage
12	16 47,2	01 57-	6218	AG	6,9	12'	Serpentaire	
13	16 41,7	36 28+	6205	AG	5,9	23'	Hercule	Amas d'Hercule
14	17 37,6	03 15-	6402	AG	7,6	3'	Serpentaire	
15	21 30,0	12 10+	7078	AG	6,5	12'	Pégase	
16	18 18,8	13 47-	6611	NL/AO	6	35'	Serpent	Nébuleuse de l'Aigle
17	18 20,8	16 11-	6618	NL	7	30'	Sagittaire	Nébuleuse Oméga
18	18 19,9	17 08-	6613	AO	6,9	7'	Sagittaire	
19	17 02,6	26 16-	6273	AG	6,8	5'	Serpentaire	
20	18 02,6	23 02-	6514	NL/NO	6,9	25'	Sagittaire	Nébuleuse Trifide
21	18 04,6	22 30-	6531	AO	6,7	12'	Sagittaire	



No	α	δ	NGC	Type*	m	Diamètre	Constellation	Autre nom
22	18 36,4	23 54-	6656	AG	5,1	17'	Sagittaire	
23	17 56,8	19 01-	6494	AO	6,9	27'	Sagittaire	
24	18 16,9	18 29-		Autre	4,6	90'	Sagittaire	
25	18 31,6	19 15-		AO	6,5	35'	Sagittaire	
26	18 45,2	09 24-	6694	AO	9,3	9'	Écu de Sobieski	
27	19 59,6	22 43+	6853	NP	7,6	8×3'	Petit Renard	Nébuleuse de l'Haltère
28	18 24,5	24 52-	6628	AG	7	15'	Sagittaire	
29	20 23,9	38 32+	6913	AO	9,1	9'	Cygne	
30	21 40,4	23 11-	7099	AG	7,6	9'	Capricorne	
31	00 42,7	41 16+	224	GS	3,5	200×80'	Andromède	Galaxie d'Andromède
32	00 42,7	40 52+	221	GE	8,2	12×8'	Andromède	Compagnon de M31
33	01 33,9	30 39+	598	GS	5,8	83×53'	Triangle	Triangulum Pinweel
34	02 42,0	42 47+	1039	AO	6	30'	Persée	
35	06 08,9	24 20+	2168	AO	6	29'	Gémeau	
36	05 36,1	34 08+	1960	AO	6,1	15'	Cocher	
37	05 52,4	32 33+	2099	AO	6,1	24'	Cocher	
38	05 28,7	35 50+	1912	AO	6,7	20'	Cocher	
39	21 32,2	48 26+	7092	AO	5,1	32'	Cygne	
40	12 22,4	58 05+		Autre	8	50'	Grande Ourse	
41	06 47,0	20 44-	2287	AO	5	32'	Grand Chien	
42	05 35,4	05 27-	1976	NL	4	30'	Orion	Nébuleuses d'Orion
43	05 35,6	05 16-	1982	NL	9,1	5'	Orion	
44	08 40,1	19 59+	2632	AO	5,5	90'	Cancer	Amas de la Ruche
45	05 34,5	22 01+		AO	1,2	120'	Taureau	Amas Les Pléiades
46	07 41,8	14 49-	2437	AO	6,7	24'	Poupe du Navire	
47	07 36,6	14 30-	2422	AO	5,2	30'	Poupe du Navire	
48	08 13,8	05 48-	2548	AO	5,2	30'	Hydre femelle	
49	12 29,8	08 00+	4472	GE	8,4	5×4'	Vierge	
50	07 03,2	08 20-	2323	AO	7,5	16'	Licorne	
51	13 29,9	47 12+	5194	GS	8,4	14×10'	Chiens de Chasse	Galaxie Whirpool
52	23 24,2	61 35+	7654	AO	7,3	13'	Cassiopée	
53	13 12,9	18 10+	5024	AG	7,7	14'	Chevelure de Bérénice	
54	18 55,1	30 29-	6715	AG	7,6	6'	Sagittaire	
55	19 40,0	30 58-	6809	AG	6,3	15'	Sagittaire	
56	19 16,6	30 11+	6779	AG	8,2	2'	Lyre	
57	18 53,6	33 02+	6720	NP	8,9	14'	Lyre	Nébuleuse de l'Anneau
58	12 37,7	11 49+	4548	GS	9,8	5×4'	Vierge	
59	12 42,0	11 39+	4621	GS	9,8	2×3'	Vierge	
60	12 43,7	11 33+	4649	GE	8,8	3'	Vierge	
61	12 21,9	04 28+	4303	GS	9,7	5'	Vierge	
62	10 01,2	30 07-	6266	AG	6,6	6'	Serpentaire	
63	13 15,8	42 02+	5055	GS	10,1	10×5'	Chiens de Chasse	Galaxie Tournesol
64	12 56,7	21 41+	4826	GS	6,6	8×5'	Chevelure de Bérénice	Galaxie Blackeye
65	11 18,9	13 05+	3623	GS	9,4	12×5'	Lion	
66	11 20,2	12 59+	3627	GS	9	14×7'	Lion	
67	08 50,4	11 49+	2682	AO	7,5	15'	Cancer	
68	12 39,5	26 45-	4590	AG	8,5	10'	Hydre femelle	
69	18 31,4	32 21-	6637	AG	7,8	4'	Sagittaire	
70	18 43,2	32 18-	6681	AG	8,1	4'	Sagittaire	
71	19 53,8	18 47+	6838	AG	8,3	6'	Flèche	
72	20 53,5	12 32-	6981	AG	10,7	2'	Verseau	
73	20 58,9	12 38-	6994	Autre		10'	Verseau	
74	01 36,7	15 47+	628	GS	9,3	12'	Poissons	
75	20 06,1	21 55-	6864	AG	8,5	5'	Sagittaire	



No	α	δ	NGC	Type*	m	Diamètre	Constellation	Autre nom
76	01 42,4	51 34+	6501	NP	9,4	2'	Persée	Nébuleuse Petite Halcère
77	02 42,7	00 01-	1068	GS	8,9	10×8'	Baleine	
78	05 46,7	00 03+	2068	NO	10,3	6×3'	Orion	
79	05 24,5	24 20-	1904	AG	7,8	8'	Lièvre	
80	16 17,0	22 59-	6093	AG	7,3	5'	Scorpion	
81	09 55,6	69 04+	3031	GS	7	35×14'	Grande Ourse	Galaxie de Bode
82	09 55,8	69 41+	3034	GI	8,4	13×9'	Grande Ourse	Galaxie de Bode
83	13 37,0	29 52-	5236	GS	10,1	8×7'	Hydre femelle	
84	12 25,1	12 53+	4374	GE	9,3	2'	Vierge	
85	12 25,4	18 11+	4382	GE	9,3	4×2'	Chevelure de Bérénice	
86	12 26,2	12 57+	4406	GE	9,2	2×1'	Vierge	
87	12 30,8	12 24+	4486	GE	8,6	3'	Vierge	
88	12 32,0	14 25+	4501	GS	9,5	5×2'	Chevelure de Bérénice	
89	12 35,7	12 33+	4552	GE	9,8	2'	Vierge	
90	12 36,8	13 10+	4569	GS	9,5	7×3'	Vierge	
91	12 35,4	14 30+	4548	GS	10,2	4'	Chevelure de Bérénice	
92	17 17,1	43 08+	6341	AG	6,5	12'	Hercule	
93	07 44,6	23 52-	2447	AO	6,2	16'	Poupe du Navire	
94	12 50,9	41 07+	4736	GS	8,1	7×3'	Chiens de Chasse	
95	10 44,0	11 42+	3351	GS	9,8	9×6'	Lion	
96	10 46,8	11 49+	3368	GS	9,3	11×8'	Lion	
97	11 14,8	55 01+	3587	NP	11,4	3'	Grande Ourse	Nébuleuse de la Chouette
98	12 13,8	14 54+	4192	GS	10,1	8×2'	Chevelure de Bérénice	
99	12 18,8	14 24+	4254	GS	9,8	4'	Chevelure de Bérénice	Galaxie Pinwheel
100	12 22,9	15 49+	4321	GS	9,4	5'	Chevelure de Bérénice	
101	14 03,2	54 21+	5457	GS	9,6	10×8'	Grande Ourse	Galaxie Pinwheel
102	15 06,5	55 46+	5866	GE	6,5	7×3'	Dragon	
103	01 33,2	60 42+	581	AO	6,8	7'	Cassiopee	
104	12 40,0	11 37-	4594	GS	8,3	7×2'	Vierge	Galaxie du Sombrero
105	10 47,8	12 35+	3379	GE	10,5	5'	Lion	
106	12 19,0	47 18+	4258	GS	8,4	24×10'	Chiens de Chasse	
107	16 32,5	13 03-	6171	AG	8,2	8'	Serpentaire	
108	11 11,5	55 40+	3556	GS	10,1	11×5'	Grande Ourse	
109	11 57,6	53 23+	3992	GS	9,9	10×7'	Grande Ourse	
110	00 40,4	41 41+	205	GE	8,2	26×16'	Andromède	Compagnon de M31

* AG: amas globulaire
 AO: amas ouvert
 GS: galaxie spirale
 GE: galaxie elliptique

GI: galaxie irrégulière
 NL: nébuleuse lumineuse
 NO: nébuleuse obscure
 NP: nébuleuse planétaire

Constellations

Nom en latin	Nom en français	Nom en anglais	Abréviation	Position*
ANDROMEDA	ANDROMÈDE	ANDROMEDE	And	N
ANTLIA	MACHINE PNEUMATIQUE	AIR PUMP	Ant	S
APUS	OISEAU DE PARADIS	BIRD OF PARADISE	Àps	S
AQUARIUS	VERSEAU	WATER BEARER	Aqr	Z
AQUILA	AIGLE	EAGLE	Aql	E
ARA	AUTEL	ALTAR	Ara	S
ARIES	BÉLIER	RAM	Ari	Z
AURIGA	COCHER	CHARIOTEER	Aur	N
BOOTES	BOUVIER	HERDSMAN	Boo	N
CAELUM	BURIN DU GRAVEUR	CHISEL	Cae	S



Nom en latin	Nom en français	Nom en anglais	Abréviation	Position*
CAMELOPARDALIS	GIRAFE	GIRAFFE	Cam	N
CANCER	CANCER	CRAB	Cnc	Z
CANES VENATICI	CHIENS DE CHASSE	HUNTING DOGS	CVn	N
CANIS MAJOR	GRAND CHIEN	BIG DOG	CMa	S
CANIS MINOR	PETIT CHIEN	LESSER DOG	CMi	N
CAPRICORNUS	CAPRICORNE	GOAT	Cap	Z
CARINA	CARÈNE DU NAVIRE	KEEL	Car	S
CASSIOPEIA	CASSIOPÉE	CASSIOPEIA	Cas	N
CENTAURUS	CENTAURE	CENTAUR	Cen	S
CEPHEUS	CÉPHÉE	CEPHEUS	Cep	N
CETUS	BALEINE	WHALE	Cet	E
CHAMAELEON	CAMÉLÉON	CHAMELEON	Cha	S
CIRCINUS	COMPAS	DIVIDERS	Cir	S
COLUMBA	COLOMBE	DOVE	Col	S
COMA BERENICES	CHEVELURE DE BÉRÉNICE	BERENICE'S HAIR	Com	N
CORONA AUSTRALIS	COURONNE AUSTRALE	SOUTHERN CROWN	CrA	S
CORONA BOREALIS	COURONNE BORÉALE	NORTHERN CROWN	CrB	N
CORVUS	CORBEAU	CROW	Crv	S
CRATER	COUPE	CUP	Crt	S
CRUX	CROIX DU SUD	SOUTHERN CROSS	Cru	S
CYGNUS	CYGNE	SWAN	Cyg	N
DELPHINUS	DAUPHIN	DOLPHIN	Del	N
DORADO	DORADE	SWORDFISH	Dor	S
DRACO	DRAGON	DRAGON	Dra	N
EQUULEUS	PETIT CHEVAL	COLT	Equ	N
ERIDANUS	ERIDAN (LE FLEUVE)	RIVER ERIDANUS	Eri	S
FORMAX	FOURNEAU	FURNACE	For	S
GEMINI	GÉMEAUX	HEAVENLY TWINS	Gem	Z
GRUS	GRUE	CRANE	Gru	S
HERCULES	HERCULE	KNEELING MAN	Her	N
HOROLOGIUM	HORLOGE	CLOCK	Hor	S
HYDRA	HYDRE FEMELLE	WATER SNAKE	Hya	S
HYDRUS	HYDRE MÂLE	WATER SNAKE LITTLE	Hyi	S
INDUS	INDIEN (OISEAU)	INDIAN	Ind	S
LACERTA	LÉZARD	LIZARD	Lac	N
LEO	LION	LION	Leo	Z
LEO MINOR	PETIT LION	LESSER LION	LMi	N
LEPUS	LIÈVRE	HARE	Lep	S
LIBRA	BALANCE	SCALES	Lib	Z
LUPUS	LOUP	WOLF	Lup	S
LYNX	LYNX	LYNX	Lyn	N
LYRA	LYRE	LYRE	Lyr	N
MENSA	TABLE	TABLE	Men	S
MICROSCOPIUM	MICROSCOPE	MICROSCOPE	Mic	S
MONOCEROS	LICORNE	UNICORN	Mon	E
MUSCA	MOUCHE	FLY	Mus	S
NORMA	RÈGLE	SQUARE	Nor	S
OCTANS	OCTANT	OCTANT	Oct	S
OPHIUCUS	SERPENTAIRE	SERPENT BEARER	Oph	E
ORION	ORION	HUNTER	Ori	E
PAVO	PAON	PEACOCK	Pav	S
PEGASUS	PÉGASE	WINGED HORSE	Peg	N
PERSEUS	PERSÉE	PERSEUS	Per	N
PHOENIX	PHÉNIX	PHOENIX	Phe	Z



Nom en latin	Nom en français	Nom en anglais	Abréviation	Position*
PICTOR	PEINTRE (CHEVALET DU)	PAINTER	Pic	S
PISCES	POISSONS	FISHES	Psc	Z
PISCIS AUSTRINUS	POISSON AUSTRAL	SOUTHERN FISH	PsA	S
PUPPIS	POUPE DU NAVIRE	STERN	Pup	S
PYXIS	BOUSSE	COMPASS	Pyx	S
RETICULUM	RÉTICULE	NET	Ret	S
SAGITTA	FLÈCHE	ARROW	Sge	N
SAGITTARIUS	SAGITTAIRE	ARCHER	Sgr	Z
SCORPIUS	SCORPION	SCORPION	Sco	Z
SCULPTOR	SCULPTEUR (ATELIER DU)	SCULPTOR	Scl	S
SCUTUM	ÉCU DE SOBIESKI	SHIELD	Sct	E
SERPENS	SERPENT	SERPENT	Ser	E
SEXTANS	SEXTANT	SEXTANT	Sex	E
TAURUS	TAUREAU	BULL	Tau	Z
TELESCOPIUM	TÉLESCOPE	TELESCOPE	Tel	S
TRIANGULUM	TRIANGLE	TRIANGLE	Tri	N
TRIANGULUM AUSTRALE	TRIANGLE AUSTRAL	SOUTHERN TRIANGLE	TrA	S
TUCANA	TOUCAN	TOUCAN	Tuc	S
URSA MAJOR	GRANDE OURSE	GREATER BEAR	UMa	N
URSA MINOR	PETITE OURSE	LITTLE BEAR	UMi	N
VELA	VOILES DU NAVIRE	SAILS	Vel	S
VIRGO	VIERGE	VIRGIN	Vir	Z
VOLANS	POISSON VOLANT	FLYING FISH	Vol	S
VULCEPULA	PETIT RENARD	FOX	Vul	N

* E: Constellation située vis-à-vis de l'équateur

N: Constellation située dans l'hémisphère Nord

S: Constellation située dans l'hémisphère Sud

Z: Constellation appartenant au zodiaque

Sources des photographies

Couverture

Photo 1 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Photo 2 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Photo 3 : NASA/NSSDC. Photo 4 : NASA/NSSDC. Photo 5 : NASA et The Hubble Heritage Team. Photo 6 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Photo 7 : NASA et The Hubble Heritage Team. Photo 8 : NASA, ESA, Andrew Fruchter et ERO Team (STScI). Photo 9 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Photo 10 : NASA/NSSDC.

Chapitre 1

Page 5 : Gaétan Morissette.

Chapitre 2

Page 40 : (fig. 2.18) avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech ; (fig. 2.19) Gemini Observatory. Page 42 : (fig. 2.20) Guy Toutant ; (fig. 2.21) avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 45 : avec la gracieuseté de NAIC - Arecibo Observatory. Page 46 : Dave Finley, avec la gracieuseté du NRAO et Associated Universities, Inc.

Chapitre 3

Page 59 : NASA. Page 71 : Jean-Sébastien Bouchard. Page 76 : Gaétan Morissette. Page 82 : avec la gracieuseté du USGS.

Chapitre 4

Page 108 : NASA. Page 111 : SOHO (ESA & NASA). Page 113 : (fig. 4.8) SOHO/MDI (ESA & NASA) ; (fig. 4.10) NASA ; Page 115 : (fig. 4.11) SOHO/MDI (ESA & NASA) ; (fig. 4.12) SOHO/EIT (ESA & NASA). Page 120 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 137 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 139 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech.

Chapitre 5

Page 153 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 155 : (fig. 5.2) avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech ; (fig. 5.3) avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 158 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 163 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 164 : (fig. 5.9) NASA/NSSDC ; (Mars) avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 166 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 169 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 170 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 171 : (fig. 5.15 basse résolution) NASA/NSSDC ; (fig. 5.15 haute résolution) avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech ; (fig. 5.16) NASA/SEDS. Page 172 : (Phobos) avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech ; (Deimos) NASA/NSSDC. Page 173 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 176 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 177 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Pages 181 et 182 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 183 : NASA/NSSDC. Page 185 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 188 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 191 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 193 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 194 : avec la gracieuseté du National Air and Space Museum. Page 197 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 198 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 203 : avec la

gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 204 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 205 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech.

Chapitre 6

Page 222 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 224 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 225 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 227 : NASA/NSSDC. Page 232 : © Akira Fujii/David Malin Images. Page 233 : NASA/NSSDC. Page 238 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech. Page 240 : avec la gracieuseté de NASA/JPL/Caltech.

Chapitre 7

Page 248 : Sophie Descoteaux. Page 27 : NASA. Page 274 : NASA. Page 276 : (fig. 7.18) NASA, ESA, Andrew Fruchter et ERO Team (STScI) ; (fig. 7.19) NASA et le Hubble Heritage Team. Page 280 : Dr. Christopher Burrows, ESA/STScI et NASA. Page 284 : Gaétan Morissette.

Chapitre 8

Page 296 : © Andy Homeyer. Page 299 : (fig. 8.3) N.A. Sharp, REU program/NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.4) © Matthew T. Russell ; (fig. 8.5) © Sven Kohle et Till Credner. Page 301 : (fig. 8.6) Michael Hilton/Adam Block/NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.7) © J.C. Cuillandre et G. Fahlman, CFHT ; (fig. 8.8) Gemini Observatory / GMOS Image ; (fig. 8.9) Bill Schoening/NOAO/AURA/NSF. Page 302 : (fig. 8.10) NASA, NOAO, ESA et Hubble Heritage Team (STScI/AURA) ; (fig. 8.11) NASA et Hubble Heritage Team. Page 303 : (fig. 8.12) NASA, ESA et Hubble Heritage Team (STScI/AURA) ; (fig. 8.13) NASA, The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) ; (fig. 8.14) Fred Calvert/Adam Block/NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.15) NASA/NSSDC ; (fig. 8.16) Adam Block/NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.17) NASA et Hubble Heritage Team (STScI/AURA). Page 305 : (fig. 8.19) NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.20) NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.21) NOAO/AURA/NSF. Page 306 : (fig. 8.22) NASA et Hubble Heritage Team (STScI/AURA). Page 307 : (fig. 8.23) John Barnes/Adam Block/NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.24) NASA et Hubble Heritage Team (STScI/AURA) ; (fig. 8.25) NASA et Hubble Heritage Team (STScI/AURA) ; (fig. 8.26) NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.27) Daryl Seibel/Adam Block/NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.28) Shannon and Grant Callin/Adam Block/NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.29) AURA/NOAO/NSF. Page 311 : (fig. 8.30) NASA/NSSDC ; (fig. 8.31) NASA, William C. Keel (University of Alabama, Tuscaloosa) ; (fig. 8.32) NASA et Hubble Heritage Team (STScI). Page 313 : (fig. 8.33) Michael Chase/Adam Block/NOAO/AURA/NSF ; (fig. 8.34) avec la gracieuseté de NRAO/AUI. Page 314 (encadré) : NOAO/AURA/NSF. Page 314 : (7a) Gemini Observatory - GMOS Team ; (7b) Adam Block/NOAO/AURA/NSF. Page 315 (7c) Dave Young and Tom Boerner/Adam Block/NOAO/AURA/NSF ; (9a) Don Stotz and Mike Ford/Adam Block/NOAO/AURA/NSF (9b) NOAO/AURA/NSF ; (9c) NASA, ESA & Mohammad Heydari-Malayeri (Observatoire de Paris, France) ; (9d) Hubble Heritage Team (AURA/ STScI/ NASA).

Chapitre 9

Page 327 : (fig. 9.3) NASA/CUBE.

Bibliographie

Une liste de sites Internet liés à l'astronomie figure au www.griffondargile.com/astronomie.

- ACKER, A. *Astronomie. Initiation*, Paris, Masson, 1992, 356 pages.
- ALLÈGRE, Claude. *Histoires de Terre*, Paris, Fayard, 2001, 1041 pages.
- ASIMOV, Isaac. *Guide de la comète de Halley*, Louiseville (Québec), Éditions du Rocher, 1985, 123 pages.
- BALFOUR, Michael. *Stonehenge and its Mysteries*, New York, Charles Scribner's Sons, 1980, 180 pages.
- BARUCH, Jacques-Olivier, et al. *Ciel. Histoires et images de l'Univers*, Montréal, Sélection du Reader's Digest, 2000, 223 pages.
- BENSAUDE-VINCENT, B., et al. *Éléments d'histoire des sciences*, Paris, Larousse, 1997, «In Extenso», 890 pages.
- BLANCHARD, Alain. *L'univers*, Paris, Flammarion, 1995, 126 pages.
- BONE, Neil. *The Aurora, Sun-Earth interactions*, New York, Ellis Horwood, 1991, 156 pages.
- BRAHIC, André. *Planètes et satellites, cinq leçons d'astronomie*, Paris, Vuibert, 2001, 360 pages.
- BRUNIER, Serge. *Nébuleuses et galaxies*, Paris, Dunod, 1981, 191 pages.
- CARPENTIER, Jean-Marc. *La conquête de l'espace*, Montréal, Éditions Libre Expression, 1986, 231 pages.
- CHENUET, Gérard, et al. *La fabuleuse histoire de la Terre*, Sélection du Reader's Digest, 2001, 320 pages.
- COUPER, Heather, et Nigel HENBEST. *Atlas jeunesse du ciel et de l'espace*, Paris, Seuil, 1993, 64 pages.
- DE LA COTARDIÈRE, Philippe. *Astronomie*, Paris, Larousse, 1989, 544 pages.
- DUCROCQ, Albert. *La chaîne bleue*, Paris, Livre de Poche, 1979, 315 pages.
- . *À la recherche d'une vie sur Mars*, Paris, Flammarion, 1976, 296 pages.
- EMILIANI, Cesar. *Planet Earth*, New York, Cambridge University Press, 1992, 719 pages.
- FESTOU, Michel, Jean-Claude RIBES et Philippe VERON. *Les comètes, mythes et réalités*, Paris, Flammarion, 1985.
- FILION, Jacky. *Introduction à l'astronomie*, Montréal, Études Vivantes, 1990, 228 pages.
- FRAZIER, Kendrick. *Le système solaire*, Amsterdam, Time-Life, 1986, 176 pages.
- GINGRAS, Yves, Peter KEATING et Camille LIMOGES. *Du scribe au savant*, Montréal, Boréal, 1998, 361 pages.
- GREENE, Brian. *L'Univers élégant*, Paris, Robert Laffont, 2000, 480 pages.
- GREENSTEIN, Georges. *Le destin des étoiles, pulsars et trous noirs*, Paris, Seuil, 1987, 338 pages.
- Guide du Cosmos. Voyage à travers l'Univers*, Amsterdam, Time-Life, 1992, 144 pages.
- GUPTA, Rajiv. *Observer's Handbook 2002*, Toronto, The Royal Astronomical Society of Canada; University of Toronto Press, 2001, 288 pages.
- HEIDMANN, Jean, Alfred VIDAL-MADJAR, Nicolas PRANTZOS et Hubert REEVES. *Sommes-nous seuls dans l'univers ?*, entretiens réalisés par Catherine David, Frédéric Lenoir et Jean-Philippe de Tonnac, Paris, Fayard, 2000, 307 pages.
- HEPPENHEIMER, T.A. *Colonies in Space*, Mechanicsburgh (PA), Stackpole Books, 1977.
- KITT, Michael T. *La lune, un guide d'observation pour l'astronome amateur*, Laprairie, Broquet, 1994, 80 pages.
- KLEPESTA, J., et A. RULK. *Constellations, atlas illustré*, Paris, Gründ, 1979, 288 pages.
- KOWAL, Charles T. *Asteroids, their Nature and Utilization*, New York, John Wiley and Sons, 1988, 152 pages.



- KUTNER, Marc L. *Astronomy. A Physical Perspective*, New York, Harper & Row, 1987, 636 pages.
- LALER, James B. *Astronomy*, New York, Harper Collins College, 1994, 616 pages.
- LIPPINCOTT, Kristen. *L'astronomie*, Paris, Gallimard, 1995, 64 pages.
- LUMINET, Jean-Pierre. *Les trous noirs*, Paris, Seuil, 1992, 400 pages.
- MAURY, Jean-Pierre. *Galilée. Le messager des étoiles*, Paris, Gallimard, 1986, « Découvertes », n° 10, 160 pages.
- NADEAU, Alphée. *Découvrir l'astronomie*, La Pocatière (Québec), Les Productions Soleil, 1979, 8 fasc.
- O'MEARA, Stephen. *Les objets Messier*, Boucherville, Broquet, 2002, 360 pages.
- PERCY, John R. *The Study of Variable Stars Using Small Telescopes*, New York, Cambridge University Press, 1986, 265 pages.
- PETT, Michel. *Variables Stars*, New York, John Wiley and Sons, 1987, 257 pages.
- REEVES, Hubert, et al. *Pour comprendre l'univers*, Montréal, Études Vivantes, 1988, 220 pages.
- . *Patience dans l'azur ou évolution cosmique*, Paris ; Québec, Seuil ; Québec Science, 1981, 303 pages.
- . *L'heure de s'enivrer. L'Univers a-t-il un sens ?*, Paris, Seuil, 1986.
- . *Poussières d'étoiles*, Paris, Seuil, 1984, 195 pages.
- RIBES, Jean-Claude, et Guy MONNET. *La vie extraterrestre*, Paris, Larousse, 1991, 191 pages.
- ROTH, Günther D. *Le multiguide nature des étoiles et des planètes*, Paris, Bordas, 1985, 232 pages.
- ROY, Jean-René. *L'astronomie et son histoire*, Québec ; Paris, Presses de l'Université du Québec ; Masson, 1982, 665 pages.
- SAGAN, Carl. *Cosmos*, New York, Random House, 1980.
- . *Cosmic Connection ou l'Appel des Étoiles*, Paris, Seuil, 1975, 313 pages.
- SCHATZMAN, Evry. *Les enfants d'Uranie : à la recherche des civilisations extraterrestres*, Paris, Seuil, 1986, 216 pages.
- Sciences du ciel (Les). Bilan et perspectives. Concepts et vocabulaire*, Paris, Flammarion, 1996, 685 pages.
- SÉGUIN, Marc, et Benoît VILLENEUVE. *Astronomie et astrophysique*, 2^e éd., Saint-Laurent, ERPI, 2001, 618 pages.
- THORNE, Kip S. *Trous noirs et distorsions du temps*, Paris, Flammarion, 1997, 653 pages.
- TOCQUET, Robert. *L'univers de l'astronomie*, Montréal, Éditions de l'Homme, 1985, 671 pages.
- Trésor (Le). Dictionnaire des sciences*, Paris, Flammarion, 1997, 1098 pages.
- URBAIN, Jean-Pierre. *Annuaire astronomique 2000*, Boucherville, Broquet, 1999, 178 pages.
- VALLIÈRE, J. *Devenez astronome amateur*, Québec Science, 1980, 239 pages.
- VERDET, Jean-Pierre. *Astronomie et astrophysique, textes essentiels*, Paris, Larousse, 1993, 830 pages.
- WEINBERG, S. *Les trois premières minutes de l'univers*, Paris, Seuil, 1980, 211 pages.
- WIMMER, Chartrand. *Guide du ciel pour amateurs astronomes*, Laprairie, Marcel-Broquet, 1982, 280 pages.
- YEOMANS, Donald K. *Comets*, New York, Wiley Science Editions, 1991, 485 pages.

Périodiques

Québec Science (Québec)

Ciel et espace (France)

Astronomy (États-Unis)

Sky and Telescope (États-Unis)

Logiciels d'astronomie

Redshift 3, Alsyd Multimédia, 1998.

FORTIER, Louis. *Andromède, le ciel profond*, Saint-Laurent, ERPI.

Index

A

Accélération gravitationnelle, 17
Accrétion, 60, 339
Activité solaire, 113
Albédo, 121
ALMA, voir Interféromètre
Atacama Large Millimeter
Array
Almageste, 10
ALVAREZ, Walter, 233
Amas
 de galaxies, 308
 d'étoiles, 298
 globulaires, 298, 299
 ouverts, 298, 299
Analemme, 86
Anneaux
 de Jupiter, 177
 de Neptune, 202
 de Saturne, 188
 d'Uranus, 196
Année sidérale, 83
Année tropique, 83
Année-lumière, 250
Apesanteur, 17
Apex, 248
APIAN, Peter, 228
Apollo (sondes), 140
Arabes, 10
Arc, 36
Arc-en-ciel, 31
ARISTARQUE DE SAMOS, 7
Ascension droite, 89
Astéroïde(s), 217
 Amor, 222
 Apollo, 222
 Aten, 222
 ceinture d', 218
 Cérès, 218, 226
 Chiron, 223
 Cruithne (3753), 225
 Dactyl, 225
 Éros, 222

famille d' – de Hirayama, 221

Gaspra, 224
géocroiseurs, 222
Hidalgo, 223
Ida, 225
Ixion, 99, 223
Kleopatra, 225
Mathilde, 225
Pholus, 223
Quaoar, 99, 223
Toutatis, 224
troyens, 223
Varuna, 99, 223
Vesta, 226
Astroblème, 240
Astrolabe à prisme, 53
Astrologie, 25
Atmosphère, 66
 couches de l', 68
 densité de l', 67
Atome primitif, 324
Aurores polaires, 76, 77
Axe de rotation, 59
Azimut, 90

B

Bassin Caloris, 154
BAYER, Jean, 245
BELL, Jocelyn, 280
BETHE, Hans Albrecht, 118
Bêta Pictoris, 340
Big Bang, 322–328
Big Crunch, 329
Binaires, 262
 à éclipses, 265, 269
 serrées, 267
 spectroscopiques, 266
 visuelles, 264
Blazars, 314
BODE, Johann Elert, 217
BOK, Bart, 274
BRAHÉ, Tycho, 13, 228
Brume cosmologique, 326

C

Cadran solaire, 5
Calendrier de Sagan, 61
Callisto, 182, 183
Caméra à coupleur de charge, 48
Carnac, 3
Catalogue(s)
 astronomiques, 298
 Index Catalog, 298
 Messier, 298, 300
 New General Catalog, 298
CCD, voir Caméra à coupleur
 de charge
Ceinture(s)
 d'astéroïdes, 100, 218
 de Kuiper, 99, 100
 de Van Allen, 76
 principale, voir Ceinture
 d'astéroïdes
Centaures, 223
Céphéides, 271
Cercles polaires, 83
Champ magnétique, 72
CHANDRASEKHAR,
Subrahmanyan, 278
Charon, 208
Cherche-étoiles, 247
Chinois, 5
Chondrites carbonées, 235
Chromosphère, 111
Civilisations extraterrestres, 342
Classes
 de luminosité, 261
 principales, 259
 spectrales, 258
Classification de Hubble, 304
Clepsydre, 5
Collapsar, 281
Comète(s), 227
 Borelly, 232
 de courte période, 230
 de Halley, 227
 de longue période, 231



Hale-Bopp, 232
 Shoemaker-Levy, 229
 Conjonction, 105, 106
 inférieure, 107
 supérieure, 107
 Constante
 de Hubble, 322
 de Planck, 27
 Constellation(s), 245
 circumpolaires, 94, 248
 Coordonnées
 célestes, 88
 équatoriales, 89
 horizontales, 90
 COPERNIC, Nicolas, 11
 Corps noir, 257
 Couche D", 64
 Couronne, 111
 Cratère
 de Chicxulub, 234
 de la Manicouagan, 239, 240
 du Nouveau-Québec, 239
 Meteor, 238
 Croûte terrestre, 62
 Cycle
 de Bethe, 118
 de Méthon, 124
 saros, 5, 129

D

DARWIN, Charles, 60
 Datation, 60
 Décalage vers le rouge, 320
 Déclinaison, 90
 Déférent, 9
 Deimos, 171, 172
 Démarche scientifique, *voir*
 Méthode scientifique
 Demi-vie, 60
 Dérive des continents, 65
 DESCARTES, René, 32
 Diagramme H-R, 258, 260, 286
 Différenciation, 62, 137
 Diffusion de Rayleigh, 70
 Discontinuité, 63
 de Gutenberg, 64
 de Lehman, 64
 de Mohorovičić, 64
 de Repetti, 64

Distance focale d'une lentille, 34
 DOMINIS, Marco Antonio de, 32
 DOPPLER, Christian, 320
 Dorsales océaniques, 65
 DRAKE, Frank, 343

E

Échelle logarithmique, 253
 Éclipse
 de Lune, 129–131, 134
 de Soleil, 129, 131–133, 135
 Écliptique, 90, 102
 Écorce terrestre, *voir* Croûte
 terrestre
 Effet
 catapulte, 50
 de serre, 67, 160, 161, 165
 Doppler-Fizeau, 320
 Égyptiens, 4
 EINSTEIN, Albert, 320
 Ellipse, 14
 Élongation, 105, 107
 Énergie solaire, 116
 Épicycle, 9
 Équation
 de Drake, 343
 du temps, 86
 Équinoxe, 82
 ÉRATOSTHÈNE, 7
 Ère
 copernicienne, 139
 ératosthénienne, 139
 imbrienne, 138
 nectarienne, 137
 prénectarienne, 137
 Étoile(s)
 à neutrons, 278
 amas d', 298
 binaires, 262–269
 circumpolaires, 94
 classes principales des, 259
 classes spectrales des, 258
 classification des, 258
 couleur des, 256
 de la séquence principale, 261
 de population I, 297
 de population II, 297
 de population III, 297
 doubles, 262

du berger, 159
 filante(s), 235, 237
 mort d'une, 277
 multiples, 262
 naine(s), 259, 278
 naissance d'une, 274
 pouponnières d', 300
 température des, 256
 types spectraux des, 258
 variable(s), 266, 268–272
 vie d'une, 275
 Wolf-Rayet, 259
 Europe, 181, 182
 Exoplanète, 337
 Exosphère, 70
 Expansion de l'Univers, 322, 327

F

Facules, 113
 Fenêtre
 optique, 27
 radio, 27
 FERMI, Enrico, 344
 FIZEAU, Hippolyte, 320
 Flash de l'hélium, 276
 FOUCAULT, Léon, 77
 Foyer d'une lentille, 34
 Fréquence d'une onde, 26
 Fuseau horaire, 87
 Fusion nucléaire, 117

G

Galaxie(s)
 actives, 312
 amas de, 308
 Andromède, 296, 300
 cannibale, 312
 classification des, 303
 de Seyfert, 312, 313
 elliptiques, 304, 305
 en interaction, 310, 311
 irrégulière(s), 304, 307
 lenticulaires, 304, 305
 naines elliptiques, 305
 spirale(s), 304, 306, 307
 barrée(s), 304, 306, 307
 superamas de, 309
 Voie lactée, 295
 GALILÉE (Galileo Galilei, dit), 16



Galileo (sonde), 50, 178, 182
 GALLE, Johann, 199
 GAMOW, George, 324
 Ganymède, 181, 183
 Gaz à effet de serre, 67, 160,
 161, 165

Géantes gazeuses, 173
 Géocroiseurs, 222
 Globules de Bok, 274
 Gnomon, 5
 Graine, 64
 Grand Nuage de Magellan, 307
 Grande Tache rouge, 176
 Grande Tache sombre, 201
 Granules, 115
 Grecs, 6
 Grossissement d'un télescope,
 35
 Groupe local, 308

H

HALLEY, Edmond, 228
 Héliosphère, 116
 Hélium, 110
 HERSCHEL, Caroline, 295
 HERSCHEL, William, 194, 295
 HERTZSPRUNG, Ejnar, 260
 Hipparcos, 251, 298
 HIPPARQUE, 9, 252
 HIRAYAMA, Kiyotsugu, 221
 Horizon, 281
 HOYLE, Fred, 323
 HUBBLE, Edwin P., 303
 Hubble
 classification de, 304
 constante de, 322
 loi de, 322, 330
 voir Télescope spatial
 HUYGENS, Christiaan, 185
 Hyades, 299

I

Indicateur de distance, 251
 Instant de Planck, 325
 Interféromètre, 46
*Atacama Large Millimeter
 Array*, 47
 Very Large Array, 46
 Very Long Baseline Array, 46

Interférométrie, 40
 Io, 181, 182
 Ion, 69
 Ionosphère, 69

J

JANSKY, Karl, 44
 Jour julien, 87
 Jupiter, 100, 103, 104, 173, 174
 anneaux de, 177
 Grande Tache rouge, 176
 satellites de, 179

K

KELVIN, sir William Thomson,
 lord, 117
 KEO, projet, 348
 KEPLER, Johannes, 14
 KIRKWOOD, Daniel, 220
 KOWAL, Charles, 223
 KUIPER, Gerard Pieter, 99

L

Lacunes de Kirkwood, 220
 LAGRANGE, Joseph Louis, comte
 de, 223
 LE VERRIER, Urbain, 199
 LEMAÎTRE, Georges, 324
 Lentille(s)
 convergentes, 34
 distance focale d'une, 34
 divergentes, 34
 foyer d'une, 34
 gravitationnelle, 314
 Libration
 en latitude, 123
 en longitude, 123
 Limite
 de Chandrasekhar, 278
 de résolution, 36
 de Roche, 128
 Lithosphère, 64
 Lobes de Roche, 267
 LOCKYER, Norman, 110
 Loi(s)
 de Hubble, 322, 330
 de Kepler, 14
 de Titius-Bode, 217
 Longueur d'onde, 26

LOWELL, Percival, 170
 Lumière
 réfraction de la, 71
 visible, 25, 30
 vitesse de la, 26
 Lune, 120
 éclipse de, 129–131
 exploration de la, 140
 intérieur de la, 135
 origine de la, 141
 phases de la, 123, 125
 surface de la, 137
 Lunette, 34, 35
 astronomique, 34
 de Galilée, 35

M

Magellan (sonde), 162
 Magnétosphère, 74
 Magnitude, 252
 absolue, 254
 apparente, 254
 Mal des hauteurs, 67
 Manteau, 64
 Marées, 124–129
 Mars, 100, 103, 104, 164–172
 satellites de, 171
 vallée Marineris, 167, 169
 visage de, 171
 Mars Pathfinder (sonde), 50, 169
 Mascons, 140
 MÉCHAIN, Pierre, 298
 Mégolithes, 3
 Mercure, 100, 103, 104, 153–157
 Bassin Caloris, 154, 155, 156
 Mésopotamiens, 3
 Mésosphère, 69
 MESSIER, Charles, 298
 Météore, 235
 Météorite(s),
 Ahnighito, 236
 ferreuses, 235
 Hoba, 236
 martienne, 171, 341
 métalliques, 235
 pierreuses, 235
 pierro-ferreuses, 235
 Méthode scientifique, 23
 Micro-ondes, 25, 29



Mille marin, 88
 Minimum de Maunder, 114
 Mois
 sidéral, 121
 synodique, 121
 Mont Maxwell, 162
 Mont Olympe, 166
 Mortes-eaux, 126
 Mouvement
 direct, 195
 propre, 248
 rétrograde, 104, 195

N

Nadir, 90
 Naine(s)
 blanche, 278
 brunes, 259
 de la séquence principale, 261
 elliptiques, 305
 noire, 278
 Nébuleuse(s), 300
 d'Andromède, 300, 304
 en émission, 300
 en réflexion, 300
 lumineuse(s), 300, 301
 obscur(e)s, 300, 301, 302
 planétaire(s), 276, 300, 303
 Nemesis, 234
 Neptun, 100, 103, 104, 199–205
 anneaux de, 202
 Grande Tache sombre, 201
 satellites de, 203, 204
 Triton, 204
 Neutrino, 119
 NEWTON, Isaac, 16, 32, 228
 Nœud, 88
 Novæ, 272
 Noyau
 de la Terre, 64
 du Soleil, 112
 Nuage de Oort, 101, 231
 Nucléosynthèse, 277
 primordiale, 326
 Nutation, 84

O

Obélisque, 5

Objectif, 34
 Objets trans-neptuniens, 223
 Occultation, 197
 Oculaire, 34
 OLBERS, Heinrich, 319
 Ondes
 électromagnétiques, 25
 infrarouges, 29
 radio, 29
 OORT, Jan Hendrik, 101
 Opposition, 105, 106
 Optique adaptative, 39
 Orage magnétique, 116, 117
 Ozone, couche d', 68

P

Pangée, 65
 Paradoxe
 de Fermi, 344
 d'Olbers, 319
 Parallaxe, 250
 Parsec, 250
 PEARY, Robert, 236
 Pendule de Foucault, 77
 PENROSE, Roger, 282
 PENZIAS, Arno, 325
 Phobos, 171, 172
 Photon, 26
 Photosphère, 111
 Photosynthèse, 67
 PIAZZI, Giuseppe, 218
 Pioneer (sondes), 50, 176, 188, 346
 Planète(s),
 extérieures, 104, 106
 géantes gazeuses, 173
 intérieures, 104, 107
 jovienne, 103, 175
 telluriques, 103
 Pléiades, 299
 Plutinos, 223
 Pluton, 100, 103, 104, 205–209
 POGSON, Norman, 253
 Point
 de Lagrange, 223, 267
 vernal, 90
 Pôles
 de chaleur, 154
 magnétiques, 73

Pollution lumineuse urbaine, 42
 Pouvoir de résolution, 36
 Præsepe, 299
 Précession
 de l'axe de rotation, 9, 25, 83
 des équinoxes, voir également Précession de l'axe de rotation
 Projet KEO, 348
 Protoétoile, 274
 Protubérances, 115
 PROLÉMÉE, Claude, 9, 245
 Pulsar, 278, 280
 Pythagore, 6

Q

Quadrature, 105, 106
 Quasar, 313
 Quasi Stellar Objects (QSO), 314

R

Radar, 44
 Radian, 88
 Radiant, 237
 Radioactivité, 60
 Radiogalaxie, 313
 Radiotélescope, 44, 47
 d'Arecibo, 45
 Ralentissement séculaire, 78
 RAYET, Georges, 259
 RAYLEIGH, lord John William Strutt, 70
 Rayonnement
 de fond cosmologique, 325
 du corps noir, 257
 fossile, 325
 synchrotron, 280
 Rayon(s)
 de Schwarzschild, 282
 gamma, 30
 ultraviolets, 25, 30
 X, 25, 30
 Réaction proton-proton, 118
 Redshift, voir Décalage vers le rouge
 Réfraction, 71
 Régolite, 139



Relativité générale, théorie de
la, 320

Résolution

- d'un télescope, 35
- limite de, 36

Résonance gravitationnelle, 155

Révolution, 79

- astronomique, 10, 11
- copernicienne, 11

ROCHE, Édouard, 128

RØMER, Ole, 184

Rotation, 77

- différentielle, 109

RUSSELL, Henry Norris, 260

S

SAGAN, Carl, 61, 346

Saisons, 80

Satellite(s)

- bergers, 190
- de Jupiter, 179
- de Mars, 171
- de Neptune, 203
- de Pluton, 208
- de Saturne, 191
- d'Uranus, 198
- galiléens, 179, 180, 184
- gardiens, 190
- intérieurs, 179

Saturne, 100, 103, 104, 185–192

- anneaux de, 188
- satellites de, 191, 192

SCHIAPARELLI, Giovanni, 170

SCHWABE, Samuel Heinrich, 113

SCHWARZSCHILD, Karl, 281

Scintillement des étoiles, 72

Séquence principale, 261

Sextant, 53

SEYFERT, Carl, 312

SHAPLEY, Harlow, 295

Sial, 62

Signes du zodiaque, 245

Singularité, 281

- primordiale, 324

SN 1987A, 273, 280

Sojourner, 169, 170

Soleil, 108

- activité du, 113
- couches du, 111

de minuit, 83

éclipse de, 129, 131–133, 135

Solstice, 82

Sondes spatiales, 48

Spectre

- continu, 31
- d'absorption, 33
- d'émission, 32
- électromagnétique, 27

Spectrographe, 28

Spicules, 116

Stonehenge, 3

Stratosphère, 68

Superamas

- de galaxies, 309
- local, 310

Supernovæ, 273

Système solaire, 99

- formation du, 338

T

Taches solaires, 113

Tectonique des plaques, 65

Télescope, 35

- à miroir liquide, 43
- Canada-France-Hawaii, 41, 42

- de l'Observatoire du mont
Mégantic, 43

de type Cassegrain, 38

de type Newton, 38

de type Schmidt-Cassegrain,
38, 39

Gemini, 40

grossissement d'un, 35

Keck 1 et 2, 40, 254

réflecteur, 37

réfracteur, 34

résolution d'un, 35

spatial Hubble, 42, 254

Very Large Telescope, 40, 254

Temps

- équation du, 86
- légal, 87
- sidéral, 85
- solaire, 86
- universel, 87
- vrai, 86

Terminateur, 120

Terre, 59, 100, 103

- atmosphère de la, 66
- champ magnétique de la, 72
- intérieur de la, 62
- origine de la, 59
- pôles magnétiques de la, 73
- révolution de la, 79
- rotation de la, 77
- température de la, 82

THALÈS DE MILET, 6

Théorie

- de l'état stationnaire, 324
- du Big Bang, 323

Thermosphère, 68

- externe, 70

Titan, 192

TIPIUS, Johann Daniel, 217

Triton, 204

Troposphère, 68

Trou(s) noir(s), 281

- de Kerr, 282

Trous de ver, 282

Turbulence, 72

Types spectraux, 258, 259

U

Unité astronomique, 15, 100, 249

Univers

- cyclique, 329
- fermé, 329
- marginalelement ouvert, 329
- ouvert, 329

Uranus, 100, 103, 104, 193–198

- anneaux d', 196
- satellites d', 198

V

Vallée Marineris, 167, 169

VAN ALLEN, James Alfred, 76

Variable(s), 268

- à éclipses, 266, 269
- cataclysmiques, 269, 272
- éruptives, 269, 271
- par rotation, 269
- pulsantes, 269, 270

Vent solaire, 116

Vénus, 100, 103, 104, 158–164

- mont Maxwell, 162
- phases de, 159



Vie extraterrestre, 342
Vie terrestre, origine de la, 340
Viking (sondes), 50, 169
Vitesse de la lumière, 26
Vives-eaux, 126
VLA, voir Interféromètre Very Large Array
VLBA, voir Interféromètre Very Long Baseline Array
VLT, voir Télescope Very Large Telescope

Voie lactée, voir Galaxie(s)
Voyager (sondes), 50, 177, 182, 186, 188, 193, 199, 200, 346, 347

W

WEGENER, Alfred, 65
WILSON, Robert, 326
WOLF, Charles, 259
WRIGHT, Thomas, 295

Z

Zénith, 90
Zodiaque, 102, 245
signes du, 245
Zone(s)
convective, 112
de subduction, 66
radiative, 112

Astronomie. Premier contact, c'est :

Explorer un ciel étoilé et un Univers que vous ne regarderez plus de la même manière.

Comprendre l'immensité du cosmos, son infinie complexité et sa beauté.

S'étonner d'avoir cru si longtemps que tous les points lumineux que l'on contemple sur la voûte céleste sont plus ou moins semblables.

S'émerveiller devant un tel foisonnement d'astres et de phénomènes célestes dont les secrets sont toujours un peu plus dévoilés grâce à des instruments d'observation de plus en plus puissants.

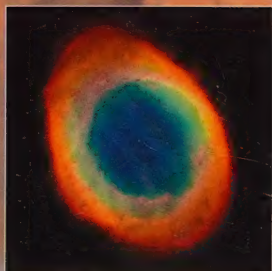
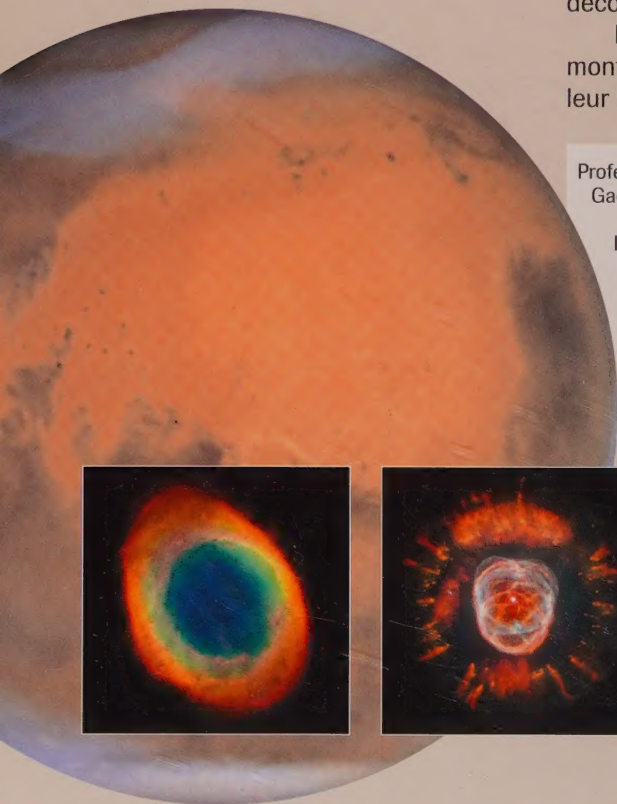
Astronomie. Premier contact est d'abord destiné aux étudiants (cégep et université) inscrits à un cours d'astronomie. Il ne nécessite aucun préalable en mathématiques ou en sciences. Cela en fait un ouvrage accessible à toute personne intéressée à connaître un peu plus l'Univers qu'elle habite, et constitue une véritable synthèse des connaissances actuelles de l'humanité sur notre cosmos.

La troisième édition d'*Astronomie. Premier contact* offre à ses lecteurs une variété d'éléments graphiques et pédagogiques permettant une meilleure compréhension des phénomènes astronomiques. Le texte a été entièrement mis à jour et enrichi d'encadrés portant sur des sujets connexes à l'astronomie. Des capsules proposent des sujets de discussion ou de débat qui pourront servir d'amorce à des activités de production écrite ou orale dans le cadre d'un cours. Chaque chapitre comporte une série de questions de révision qui permettent de revenir sur les notions importantes du texte et d'en vérifier la compréhension. Pour explorer certains contenus, l'ouvrage comprend, de plus, quelques activités qui invitent le lecteur à faire ses observations célestes ou à reprendre des découvertes importantes.

Dans cette édition abondamment illustrée, un encart montre en couleurs plusieurs astres importants dans toute leur splendeur.

Professeur de physique et d'astronomie au Cégep de Sept-Îles depuis 1976, Gaétan Morissette a publié deux ouvrages en mécanique et en optique.

Laurent Drissen est titulaire de la Chaire de recherche du Canada sur les étoiles massives à l'Université Laval (Québec). Après avoir obtenu son doctorat en astrophysique (Université de Montréal), il a travaillé cinq ans à l'Institut du télescope spatial Hubble de Baltimore, aux États-Unis (Maryland). Chroniqueur à l'émission radiophonique *Les Années-lumière* de Radio-Canada, il s'intéresse particulièrement à l'évolution des étoiles les plus massives ainsi qu'à la conception d'instruments astronomiques de pointe.



les éditions
Le Griffon d'argile

