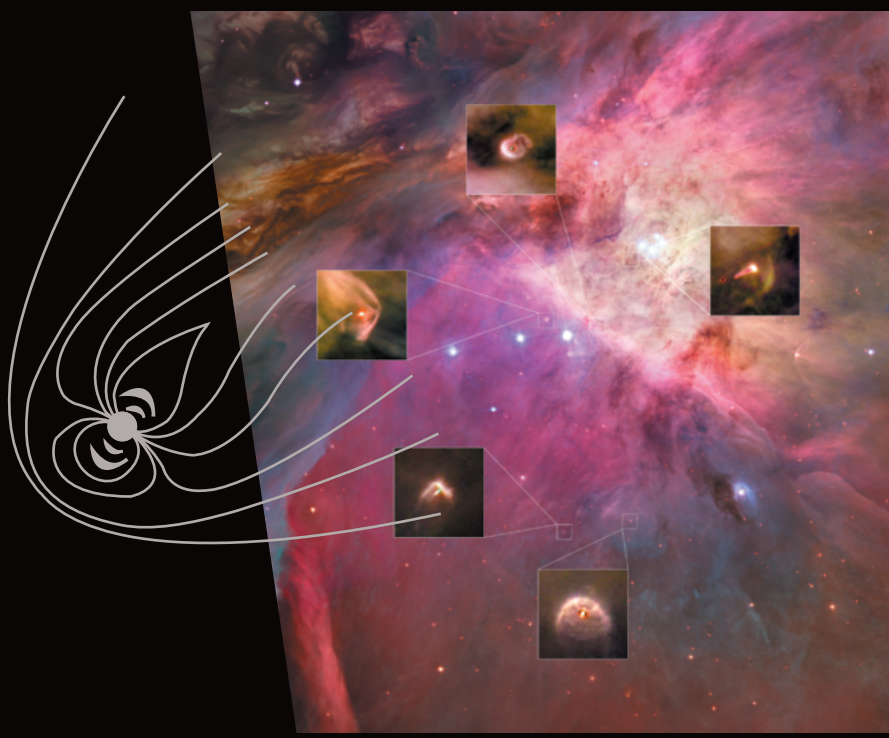
Jean-Yves Daniel | Alain Riazuelo

Avec les écrits d'André Brahic

Sciences de l'Univers

Du Big Bang aux exoplanètes



deboeck SUPÉRIEUR

Sciences de l'Univers

Jean-Yves Daniel | Alain Riazuelo

Avec les écrits d'André Brahic

Sciences de l'Univers

Du Big Bang aux exoplanètes

deboeck SUPÉRIEUR

Chez le même éditeur (extrait du catalogue)

Collectif, *Sciences de la Terre et de l'Univers*, 3e éd.

Bond P., *L'exploration du système solaire*.

Combes F., *La matière noire, clé de l'Univers ?*

Comins N., *À la découverte de l'Univers. Les bases de l'astronomie et de l'astrophysique*, 3e éd.

Daniel J.-Y. & Peter P., *Cosmologie*.

Kiefer F., *Les exoplanètes. À la recherche des nouveaux mondes*.

Marshak S., *Terre, portrait d'une planète*, 2e éd.

Riazuelo A., *Les trous noirs. À la poursuite de l'invisible*, 2e éd.

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web :
www.deboecksuperieur.com

En couverture :
Image prise par le télescope spatial *Hubble* de la nébuleuse d'Orion, haut lieu de la formation stellaire de notre Galaxie. Les zooms montrent quelques-uns des nombreux disques protoplanétaires ionisés qu'elle contient. Ces disques, ou proplyds, représentent la phase précoce de la formation d'une étoile entourée d'un cocon de matière dont une partie formera un cortège de planètes.
© NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA), the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team & L. Ricci (ESO).

Croquis de la magnétosphère terrestre, bouclier magnétique qui entoure notre planète et la protège des humeurs solaires.

Maquette intérieure, mise en page & relecture : Jean-Louis Liennard/GraphieProd
Couverture : Primo&Primo

Dépôt légal :
Bibliothèque royale de Belgique : 2020/13647/071
Bibliothèque nationale, Paris : septembre 2020
ISBN : 978-2-8073-2912-6

Tous droits réservés pour tous pays.
Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme ou de quelque manière que ce soit.

© De Boeck Supérieur SA, 2020 - Rue du Bosquet 7, B-1348 Louvain-la-Neuve
De Boeck Supérieur - 5 allée de la 2e DB, 75015 Paris

Table des matières

Avant-propos IX

1 *La place de la Terre dans l'Univers*

1 Introduction. 1

2 La naissance de la raison ou comment notre vision de la place de la Terre a émergé 1

2.1 Les grandes étapes de l'Antiquité – 2

2.2 La mesure de la taille de la Terre, de la distance de la Lune et du Soleil – 3

2.3 Aristarque, Hipparque et Ptolémée – 4

2.4 La Renaissance – 4

2.5 Le XX^e^ siècle et la naissance de l'astrophysique – 6

3 Le mouvement de la Terre dans l'espace 6

3.1 Les preuves de la rotation terrestre – 7

3.1.1 *L'effet Coriolis* – 7

3.1.2 *Le pendule de Foucault* – 7

3.1.3 *L'aplatissement de la Terre* – 8

3.2 Les preuves de la révolution de la Terre autour du Soleil – 8

3.2.1 *L'aberration de la lumière des étoiles* – 8

3.2.2 *Les parallaxes stellaires* – 9

3.2.3 *L'effet Doppler-Fizeau* – 9

4 La répartition de la matière dans l'Univers 10

4.1 Planètes, étoiles et galaxies – 10

4.2 La mesure des distances – 11

4.3 La mesure des âges – 13

4.4 Le milieu interstellaire et les molécules interstellaires – 15

4.5 La Galaxie – 15

4.6 Les galaxies – 19

4.7 Les amas de galaxies – 21

4.8 La distribution de la matière visible et du rayonnement à grande échelle – 22

4.9 L'Univers à différentes longueurs d'onde – 24

5 L'histoire de l'Univers 24

5.1 Pourquoi le ciel est-il noir la nuit ? – 24

5.2 L'expansion de l'Univers et le principe cosmologique – 25

E1 **L'universalité des lois de la physique** – 25

5.3 La cosmologie : l'Univers comme système physique – 29

5.4 Matière baryonique, matière noire et énergie noire – 30

E2 **À la recherche de la matière noire** – 31

5.5 Le fond diffus cosmologique – 32

5.6 L'histoire thermique de l'Univers et de ses premiers instants – 34

E3 **Particules et interactions** – 36

5.6.1 *L'ère de Planck* ($t \leq 10^{-43}$ s – $T \geq 10^{32}$ K) – 40

5.6.2 *L'ère de grande unification* ($10^{-43} \leq t \leq 10^{-37}$ s – 10^{32} K $\geq T \geq 10^{28}$ K) – 40

5.6.3 *L'ère des quarks et l'ère hadronique* (10^{-37} s $\leq t \leq 10^{-2}$ s – 10^{28} K $\geq T \geq 10^{11}$ K) – 41

5.6.4 *L'ère leptonique* (10^{-2} s $\leq t \leq 10$ s – 10^{11} K $\geq T \geq 3 \times 10^{9}$ K) – 41

5.6.5 *La nucléosynthèse primordiale* (10 s $\leq t \leq$ 2 000 s – 3×10^{9} K $\geq T \geq 2 \times 10^{8}$ K) – 42

5.6.6 *L'ère radiative* (2 000 s $\leq t \leq 4 \times 10^{5}$ ans – 2×10^{7} K $\geq T \geq 3 \times 10^{3}$ K) – 43

5.6.7 *Les âges sombres* (4×10^{5} ans $\leq t \leq 10^{8}$ ans – 3×10^{3} K $\geq T \geq 100$ K) – 43

5.6.8 *L'ère stellaire* ($t \geq 10^{8}$ ans) – 43

5.7 La part d'obscurité de la cosmologie moderne – 43

6 Étoiles et poussières d'étoiles 45

6.1 L'intérieur des étoiles, ou pourquoi le Soleil brille-t-il ? – 45

E4 **Équilibre hydrostatique d'une étoile** – 46

6.2 Le théorème du viriel – 47

E5 **Le théorème du viriel et ses applications** – 47

6.3 L'intérieur des étoiles – 49

6.4 Les réactions thermonucléaires au centre des étoiles – 50

E6 **Réactions thermonucléaires de transformation de l'hydrogène en hélium** – 50

6.5 La vie des étoiles après la séquence principale – 52

6.6 La fin de vie des étoiles massives – 54

6.7 L'évolution des étoiles résumée en un graphique : le diagramme d'Hertzsprung-Russell – 57

7 La nucléosynthèse des éléments. 58

7.1 La nucléosynthèse explosive – 58

7.2 Lors de la fin de vie des étoiles de faible masse – 59

7.3 Les supernovæ thermonucléaires – 59

7.4 Les kilonovæ – 60

7.5 La spallation cosmique – 60

7.6 Une image enfin complète et cohérente – 61
7.7 Le tableau de Mendeleïev – 63
7.7.1 *Isotopes et stabilité des éléments* – 63
7.7.2 *Propriétés chimiques* – 66
7.7.3 *Diagramme des phases* – 67
7.7.4 *Les classifications géochimiques des éléments* – 68

8 Quelques notions astronomiques importantes . . 69
8.1 Les lois de Kepler et le mouvement des deux corps – 69
E7 DÉMONSTRATION DES LOIS DE KEPLER – 70
8.2 Les paramètres orbitaux – 71
8.3 La vitesse d'évasion – 73
8.4 Les effets de marée – 73
8.5 Limite de Roche, orbite synchrone et sphère d'influence – 76
8.5.1 *La limite de Roche* – 76
8.5.2 *L'orbite synchrone* – 76
8.5.3 *La sphère d'influence* – 76
E8 LIMITE DE ROCHE – 77
E9 RAYON DE L'ORBITE SYNCHRONE – 78
E10 SPHÈRE D'INFLUENCE OU LIMITE DE STABILITÉ – 78
8.6 Les points de Lagrange – 79
8.7 Les résonances – 79
8.8 Les occultations – 81
8.9 La luminosité apparente et absolue des astres – Le concept de magnitude – 81

Exercices 82

FICHES
1. RAPPELS DE MÉCANIQUE CLASSIQUE 83
2. TROUS NOIRS ET AUTRES OBJETS COMPACTS 87
3. L'ASTRONOMIE MULTI-LONGUEURS D'ONDE ET MULTI-MESSAGERS. 88

2 *Le système solaire et les exoplanètes*

1 Introduction. 99

2 L'exploration spatiale 99
2.1 La course à la Lune et le retour d'échantillons – 100
2.2 L'observation du Soleil – 100
2.3 Les missions martiennes – 100
2.4 Missions vers Mercure et Vénus – 100
2.5 L'exploration interplanétaire : les sondes *Pioneer* et *Voyager* – 100
2.6 Les missions dédiées au-delà de Mars : *Galileo* et *Cassini* – 101
2.7 Les missions vers les autres corps du système solaire – 101

3 La Terre au sein du système solaire. 102
3.1 La masse de la Terre – 102
E11 COMMENT HENRY CAVENDISH A « PESÉ LA TERRE », ET LE RESTE DU SYSTÈME SOLAIRE – 102
3.2 La rotation de la Terre – 103
3.2.1 *L'obliquité de l'axe de rotation et les saisons* – 103
3.2.2 *La rotation de la Terre dans l'espace* – 105
3.2.3 *Rotation de la Terre et climat* – 106
3.2.4 *Le mouvement du pôle* – 106
3.3 Le champ de gravité terrestre et la forme de la Terre – 106

4 Le Soleil et ses relations avec la Terre. 108
E12 SONDER L'INTÉRIEUR DU SOLEIL À L'AIDE DE L'HÉLIOSISMOLOGIE – 109
4.1 La composition chimique du Soleil – 110
4.2 Les neutrinos solaires – 111
4.3 L'atmosphère du Soleil – 112
4.3.1 *La photosphère et les taches solaires* – 112
4.3.2 *La chromosphère* – 113
4.3.3 *La couronne solaire* – 114
4.3.4 *Le vent solaire* – 115
4.4 L'activité solaire – 115
4.4.1 *Le cycle solaire* – 115
4.4.2 *La constante solaire* – 116
4.5 Les relations Soleil–Terre – 117
4.5.1 *L'irradiation et le bombardement cosmique* – 117
4.5.2 *Les relations Soleil–climat* – 118
4.5.3 *La température de surface des planètes et l'effet de serre* – 119

5 Les planètes 120
5.1 Caractéristiques physiques des planètes – 120
5.2 Les deux types de planètes – 123
5.3 Les planètes telluriques – 124
5.4 Les planètes géantes – 126

6 Les satellites et anneaux planétaires. 128
6.1 Les satellites de Saturne – 133
6.1.1 *Titan* – 133
6.1.2 *Hypérion* – 137
6.1.3 *Japet* – 137
6.1.4 *Encelade* – 139
6.1.5 *Phœbé* – 140
6.1.6 *Mimas, Téthys, Dioné et Rhéa* – 141
6.1.7 *Les petits satellites de Saturne* – 145
6.2 Les satellites de Jupiter – 147
6.2.1 *Io* – 147
6.2.2 *Europe* – 147
6.2.3 *Ganymède* – 148
6.2.4 *Callisto* – 149
6.3 Les satellites d'Uranus et Neptune – 150
6.4 Les anneaux des planètes – 150
6.5 Les anneaux de Saturne – 151
6.5.1 *Structure générale* – 151
6.5.2 *Notes historiques* – 154

6.5.3 *Un système particulièrement complexe* – 154
6.5.4 *L'équinoxe de 2009* – 156

7 Les petits corps du système solaire 157
7.1 Les astéroïdes – 157
7.2 Les comètes – 160
7.2.1 *Quelques remarques historiques* – 160
7.2.2 *Caractéristiques des comètes connues* – 160
7.2.3 *L'origine des comètes* – 162
7.3 Les météorites – 163
7.4 Le milieu interplanétaire et les poussières – 163
7.5 Pluton et au-delà – 164
7.6 Au-delà du système solaire – 168

8 La nouvelle hypothèse d'une neuvième planète 168

9 Les atmosphères planétaires 170
9.1 Structure générale des atmosphères – Le cas de la Terre – 170
9.1.1 *Le rôle de l'altitude* – 170
9.1.2 *Le rôle de la température* – 171
9.1.3 *Le cas particulier de la vapeur d'eau* – 172
9.2 Les différentes couches atmosphériques – 172
9.3 La magnétosphère – 173
9.4 L'atmosphère des planètes telluriques – 176
9.5 L'atmosphère des satellites et des planètes naines – 177
9.6 L'atmosphère des planètes géantes – 178
9.6.1 *Atmosphère et météorologie jovienne* – 179
9.6.2 *L'atmosphère et la magnétosphère de Saturne* – 181
9.6.3 *Les tempêtes de Saturne* – 182

10 L'eau dans l'Univers 184

11 Les planètes extrasolaires 185
11.1 Au-delà du système solaire – 185
11.2 Une histoire récente – 186
11.3 Des techniques de détection très variées – 187
11.3.1 *La méthode des vitesses radiales* – 187
11.3.2 *La méthode des transits* – 187
11.3.3 *La méthode des microlentilles* – 188
11.3.4 *La méthode astrométrique* – 190
11.3.5 *L'imagerie directe* – 190
11.4 Une diversité inattendue – 190
11.5 De nouveaux mondes à cerner – 190
11.6 En attendant de trouver la vie ailleurs – 192

Exercices 193

FICHE
4. DÉFINITION D'UNE PLANÈTE 194

La formation et l'évolution du système solaire

1 Introduction. 197

2 Création ou éternité ? 198

3 Quelques faits d'observation 201
3.1 La régularité des orbites planétaires – 202
3.2 La rotation lente du Soleil – 202
3.3 La composition chimique du système solaire – 202
3.4 Les similitudes entre les systèmes de satellites et les systèmes de planètes – 203
3.5 L'âge de la Terre et du système solaire – 203
3.6 La cratérisation – 203
3.7 Les météorites et les méthodes de datation – 204
3.8 Les rapports isotopiques – 205
3.9 Les astéroïdes – 205
3.10 Les comètes – 206
3.11 Les anneaux – 206
3.12 Quelques fausses pistes – 207
3.13 L'observation des sites de formation d'étoiles – 208
3.14 Les disques circumstellaires – 211

4 Un scénario de la formation des planètes 211
4.1 L'effondrement d'un nuage interstellaire – 211
E13 FORMER DES ÉTOILES PAR INSTABILITÉ GRAVITATIONNELLE – 213
4.2 Les inconnues de la formation stellaire – 214
4.3 De l'effondrement au disque protoplanétaire – 215
4.4 D'un disque de gaz à un disque de planètes – 216
4.4.1 *La formation des grains* – 216
4.4.2 *La formation des agrégats* – 216
4.4.3 *La barrière du mètre et la formation des planétésimaux* – 217
4.4.4 *La formation des embryons planétaires* – 217
4.5 La formation des planètes terrestres – 218
4.6 La formation des planètes géantes – 218
4.7 Les migrations planétaires et le scénario du Grand Tack – 220
4.8 L'évolution ultérieure : le Grand Bombardement tardif – 221
4.9 La formation des satellites et des anneaux – 222
4.10 Résumé : les grande étapes de la formation du système solaire – 223

5 La formation de la Lune 224
5.1 La théorie de la fission – 225
5.2 La théorie de la capture – 225
5.3 La théorie des planètes jumelles – 225
5.4 Un impact géant – 225

6 L'évolution des planètes. 226
6.1 La différenciation – 226

6.2 Activité interne et flux de chaleur – 227
6.3 Les traceurs de l'intérieur des astres – 229
6.3.1 *La sismologie* – 229
6.3.2 *Le magnétisme* – 229
6.3.3 *La mécanique céleste* – 231
6.4 La structure interne de la Terre – 232
6.5 L'intérieur des autres planètes et satellites – 232

7 Le volcanisme 235
7.1 Le volcanisme terrestre – 235
7.2 Le volcanisme lunaire – 236
7.3 Le volcanisme de Mercure – 237
7.4 Le volcanisme vénusien – 237
7.5 Le volcanisme martien – 239
7.6 Io, lieu du plus intense volcanisme du système solaire – 241
7.7 Le cryovolcanisme d'Encelade, Triton et Pluton – 244
7.8 L'hypothétique volcanisme des petits corps du système solaire – 246

8 La cratérisation 248
8.1 Le processus géologiquement dominant sur le long terme – 248
8.2 La physique des impacts – 249
8.3 Variations en fonction du corps impacté – 252
8.4 Chronomètres planétaires – 256
8.5 L'impactisme sur Terre – 258

9 Mécanismes d'érosion 260

10 Formation et évolution des atmosphères, vapeurs des planètes 263
10.1 Origine et survie des atmosphères – 263
10.2 L'atmosphère et la vie – 264

11 L'évolution à long terme du système solaire . . . 265
11.1 Le futur de la Terre et du Soleil – 265
11.2 L'évolution dynamique : stabilité et chaos – 267

Exercices 269

Solutions des exercices 271
Bibliographie 277
Index 278
Unités, constantes et valeurs astronomiques 290

La Philosophie est écrite dans ce grand livre de l'Univers, qui demeure constamment ouvert, devant notre regard admiratif et étonné. Mais on ne peut comprendre ce livre que si on en apprend tout d'abord le langage, et l'alphabet dans lequel il est rédigé. Il est écrit dans le langage des mathématiques, et les caractères en sont les triangles, les cercles, et autres figures géométriques, sans lesquelles il est humainement impossible d'en déchiffrer le moindre mot ; sans elles nous serions condamnés à errer dans un noir labyrinthe.

Galilée, *Il Saggiatore*, 1623.

Avant-propos

Consacré à l'astronomie et à l'astrophysique, cet ouvrage est conçu comme une introduction complète à l'étude de la Terre considérée sous son aspect planétaire. Elle est ainsi replacée dans le cadre général d'un Univers en évolution depuis 13,8 milliards d'années, dans lequel elle est apparue il y a 4,5 milliards d'années en même temps que le système solaire qui l'abrite et avec lequel elle évolue depuis cette époque. Il s'agit notamment, grâce aux nombreuses thématiques abordées dans cet ouvrage, de poser le cadre conceptuel global qui introduise naturellement et plus spécifiquement l'étude de notre planète par les sciences de la Terre dans d'autres ouvrages.

Dans le premier chapitre, nous évoquons la cosmologie, c'est-à-dire l'histoire de l'Univers, dans l'optique d'expliquer la formation des grandes structures qu'il contient et, donc, à plus petite échelle, des galaxies, puis celle des étoiles. L'évolution stellaire est de même présentée dans le but d'expliquer la nucléosynthèse des éléments chimiques et donner une idée de leurs abondances respectives, préalable indispensable pour expliquer la composition chimique globale du système solaire. Un accent est également mis sur l'universalité des lois de la physiques, très bien établies sur des durées et des conditions physiques qui dépassent largement celles de la Terre elle-même, afin d'assurer aux lecteurs de cet ouvrage, exigeants par définition, que tout ce qui leur sera ainsi écrit ou dit au sujet de l'histoire de la Terre, y compris dans ses époques les plus reculées, peut effectivement être correctement décrit par les lois que nous connaissons, et qui ont, au sens propre, une portée universelle.

Le deuxième chapitre est consacré à un survol du système solaire dans toute sa diversité, partant bien sûr du Soleil et des interactions Soleil–Terre, et présentant ensuite les autres objets du système solaire, depuis les planètes et leurs satellites jusqu'aux petits corps. L'objectif ici est double : montrer la diversité des objets et des phénomènes à l'œuvre dans notre environnement proche, directement accessible à l'exploration spatiale *in situ*, et indiquer en quoi la Terre se singularise sur certains points. Diversité et singularité trouvent aussi leur expression dans l'accent mis sur les exoplanètes, domaine dans lequel les progrès ont été particulièrement importants ces dernières années.

Le troisième chapitre aborde la question complexe de la formation et de l'évolution du système solaire, préalable indispensable à l'abord de celles de la Terre elle-même. Les phénomènes génériques observés sous des formes très différentes dans le précédent chapitre (volcanisme, impactisme, atmosphère, etc.) sont cette fois expliqués dans un cadre général, l'objectif étant de montrer en quoi l'étude de ces phénomènes sur d'autres corps du système solaire permet d'aborder leur étude dans le contexte de la Terre sous un angle nouveau.

La science étant par essence une activité où se posent aussi en permanence des questions auxquelles nous n'avons pas (encore) de réponse, nous avons pris le soin de préciser quelles sont les zones d'ombre qui parsèment les thèmes que nous traitons. Il n'est donc pas exclu que des développements nouveaux et inattendus modifient dans les années qui viennent certains des aspects développés ici, même s'il est peu probable que l'édifice que nous présentons s'écroule tel un château de cartes. Au contraire, il apparaît vraisemblable qu'il en sortira enrichi et non appauvri. C'est en tout cas la façon dont a progressé notre compréhension du cosmos depuis la révolution copernicienne, où des connaissances acquises dès l'Antiquité ont aussi pu jouer leur rôle.

Nous avons tenu à rédiger ces trois chapitres dans un style relativement peu technique en essayant de limiter au maximum la présence d'équations, un minimum étant, bien sûr, nécessaire. Les parties les plus techniques sont mises à part, dans diverses fiches et encadrés. Nous avons tenu aussi à enrichir notre propos d'un grand nombre de schémas et d'illustrations en couleur, à la fois pour mieux illustrer notre propos, et pour faire partager la beauté, que nous pensons… universelle, du vaste Univers qui nous entoure, et de la Terre en son sein.

Jean-Yves Daniel et Alain Riazuelo

Hommage à André Brahic

André Brahic nous a quittés le 15 mai 2016.

Il était le rédacteur principal de la partie « astronomie » de *Sciences de la Terre et de l'Univers* chez Vuibert (dernière édition septembre 2014), avec la contribution de l'un d'entre nous, ouvrage que nous faisons évoluer pour réaliser le présent *Sciences de l'Univers*, chez De Boeck.

Il ne s'agit pas ici de récapituler la grande carrière d'André. Disons simplement qu'il était un astrophysicien mondialement reconnu, spécialiste de la formation du système solaire et de la dynamique des anneaux planétaires. Professeur à l'université Paris-Diderot, responsable d'une équipe de recherche au CEA, il avait mené une activité de recherche fructueuse, autant sur le plan théorique qu'observationnel, avec notamment la découverte des anneaux de Neptune.

Il était aussi particulièrement connu pour ses talents de pédagogue enthousiaste et disert, de vulgarisateur au meilleur niveau de la connaissance scientifique, que ce soit par ses nombreux ouvrages, ses passages à la télévision ou à la radio, ses conférences. Il ne manquait alors pas l'occasion de réaffirmer son combat en faveur de la démarche scientifique, qui allie déductions rationnelles et vérifications observationnelles. Il pouvait avoir à ce titre la dent dure à l'égard de tous les obscurantismes et de leurs propagandistes.

Son humour était également bien connu. À titre d'anecdote parmi tant d'autres, on peut rappeler qu'à un ministre qui s'engageait à lui rembourser ses frais de déplacements à partir de « ses terres » pour des travaux au sein d'une commission officielle, il révélait l'existence de l'astéroïde « (3488) Brahic »…

Dans le présent ouvrage, nous avons repris la très grande partie de ses écrits de *Sciences de la Terre et de l'Univers*, avec pour objectif essentiel de les actualiser en fonction de l'évolution des connaissances, qui peut en six ans être substantielle dans certains domaines (exoplanètes, ondes gravitationnelles, trous noirs, résultats des missions spatiales récentes, etc.).

De fait, en réalisant *Sciences de l'Univers*, nous avons tenu autant à rendre hommage à André que faire acte éditorial de mise à jour d'un ouvrage. Nous avons pu le faire grâce à l'accord d'Isabelle Grenier, son épouse, notre collègue, à qui nous adressons nos plus vifs remerciements et notre très sincère sympathie.

Jean-Yves Daniel et Alain Riazuelo

Les auteurs

• Normalien, docteur d'État en astrophysique, spécialiste de la polarisation dans les enveloppes circumstellaires, **Jean-Yves Daniel** est doyen honoraire de l'inspection générale de l'Éducation nationale, qu'il a dirigée entre 2012 et 2016. Il est collaborateur à l'Institut d'astrophysique de Paris et a été professeur associé à l'université de Marne-la-Vallée.

• Polytechnicien, docteur en astrophysique, **Alain Riazuelo** est chercheur au CNRS et astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris. Ses travaux portent principalement sur la formation des grandes structures, la topologie de l'Univers et les trous noirs.

• Disparu le 15 mai 2016, **André Brahic**, astrophysicien, était spécialiste de la formation du système solaire et de la dynamique des anneaux planétaires. Il était professeur à l'université Paris-Diderot et au Commissariat à l'énergie atomique à Saclay. Au titre de ses nombreuses découvertes, il faut notamment mentionner celle des anneaux de Neptune.

Note sur les images

Nombre des images présentées ici sont issues de missions spatiales ou de grands observatoires. Les crédits indiqués devraient suffire au lecteur pour trouver ces images sur la Toile avec des éléments de contexte plus nombreux que ceux donnés ici, limités par la place disponible. En particulier, de nombreuses images du système solaire sont tirées du site https://photojournal.jpl.nasa.gov/ du Jet Propulsion Laboratory. Leur identifiant, commençant par les lettres PIA, est systématiquement indiqué dans les crédits.

Remerciements

De nombreux spécialistes ont apporté leur concours à la réalisation de ce livre, par leurs travaux comme par les documents qu'ils nous ont communiqués. Nos plus vifs remerciements vont à chacun d'entre eux, qu'ils soient individuellement nommés ou non. Parmi eux, nous sommes particulièrement redevables, de l'appui qu'ils nous ont apporté pour illustrer l'ouvrage, à :

Christian Bizouard (Observatoire de Paris et International Earth Rotation and Reference Systems Service – IERS), Quentin Boesch (Université de Strasbourg et École et Observatoire des sciences de la Terre), Damia Bouic, James Condon, Aurélien Crida (Observatoire de la Côte d'Azur – OCA), Daniel Gambis (IERS), Scott Gaudi (Ohio State University), Isabelle Grenier (Université de Paris et Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), Olivier Hardy, Jochen Hoefs (Georg-August-Universität Göttingen), Laurent Kelsch, Martin Kornmesser (Union Astronomique Internationale), Serge Koutchmy (Institut d'Astrophysique de Paris – IAP), Jacques Laskar (Observatoire de Paris), Jean-Louis Liennard, Alain Luguet (De Boeck Supérieur), David Malin, Alessandro Morbidelli (OCA), Jean Mouette (IAP), Klaus-Peter Schröder (Universidad de Guanajuato), Volker Springel (Max Planck Institute for Astrophysics).

D'un point de vue institutionnel, nous remercions également :

l'Agence spatiale européenne (ESA), la Collaboration Planck, la Collaboration Virgo, l'Event Horizon Telescope, la Fondation Wikimedia, l'Institut d'Astrophysique de Paris, l'Institute for Cosmic Ray Research, la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), le Jet Propulsion Laboratory (JPL), le Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, le Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, la NASA, la National Science Foundation, l'Observatoire européen austral (ESO), l'Observatoire Pierre-Auger, l'Observatoire Royal de Belgique, le Space Telescope Science Institute, le Two-Micron All-Sky Survey et l'Université Pierre-et-Marie-Curie / Sorbonne Universités,

ainsi que les revues scientifiques suivantes :

Annual Review of Astronomy and Astrophysics, *Astrophysical Journal*, *Elements*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Space Science Review* et *Science*.

1 La place de la Terre dans l'Univers

1 Introduction

Il aura fallu plusieurs millénaires et des trésors d'intelligence aux hommes pour commencer à comprendre quel était leur environnement cosmique et où ils se situaient dans l'Univers. Ce n'est qu'au XX^e^ siècle qu'ils ont découvert le monde des galaxies, l'expansion de l'Univers, la source d'énergie des étoiles et la place de la Terre dans notre Galaxie. La fin de ce siècle aura été marquée par l'observation de l'Univers dans toutes les gammes de longueur d'onde et par la visite des planètes et des satellites par robots interposés. Ce triomphe de la raison a pourtant été précédé par de nombreux épisodes douloureux où l'approche critique s'est heurtée à des réticences d'ordre culturel et religieux. Si Galilée a finalement eu la vie sauve, Giordano Bruno a été brûlé en place publique.

Les hommes ont maintenant pris conscience que la Terre était une planète parmi les autres, que le système solaire était beaucoup plus riche que prévu et que ***tous les objets de l'Univers évoluent***. À l'instar des êtres vivants, les planètes, étoiles et galaxies naissent, vivent et meurent, même si ces termes ont une acception différente du monde du Vivant.

Il est clair qu'une bonne connaissance de la Terre passe par la compréhension de sa place dans l'Univers et de la succession d'événements qui ont conduit à l'agglomération des atomes qui constituent actuellement notre planète. Avant les années 1960, les géologues ne s'intéressaient pas aux autres planètes et les astronomes ignoraient la planète Terre. Ce manque d'ouverture de la part de ces deux communautés s'est peu à peu comblé, et nous comprenons maintenant que la Terre n'est qu'un membre parmi d'autres d'une grande famille qui habite autour de l'étoile Soleil. Comment les atomes se sont-ils formés et dans quelle proportion depuis une petite quinzaine de milliards d'années ? Comment des planètes et des satellites se sont-ils rassemblés autour du Soleil ? Autant de questions qui sont un préalable à une bonne connaissance de la Terre et de son évolution, prérequis indispensable pour mieux maîtriser notre environnement et évaluer les menaces potentielles. Car, si pendant des milliards d'années l'évolution globale de la Terre s'est faite sans la présence de l'Homme, il semble désormais bien en être un acteur géologique majeur, et il est essentiel de comprendre comment et dans quelle mesure les activités anthropiques sont de plus en plus prégnantes dans l'évolution globale de notre planète.

C'est la raison pour laquelle une bonne connaissance des sciences de la Terre et de l'Univers nous paraît si importante pour les futurs adultes. Il serait en effet fâcheux que des hommes et femmes ne possédant que quelques rudiments scientifiques datant souvent de la vision mécaniste du XVII^e^ siècle et n'ayant qu'une vague idée de la science contemporaine ne puissent exercer leur rôle de citoyen ou même soient amenés à prendre des décisions importantes sans avoir été acculturés auparavant à la connaissance moderne.

Des tâtonnements primitifs et de l'époque où les planètes étaient inaccessibles aux hommes, il subsiste des croyances qui ne résistent pas à un examen sérieux, du créationnisme à l'astrologie en passant par l'ufologie. Ces manifestations sociales n'appartiennent hélas pas à un passé révolu et il subsiste des escrocs qui exploitent la crédulité humaine. On pourrait se contenter d'en sourire, mais il faut dénoncer cette pollution des esprits. La lecture de livres, aussi « sacrés » soient-ils, ne nous révélera jamais l'histoire de nos origines. La position des planètes au moment de la naissance d'un individu n'a évidemment aucune influence sur son futur et on peut s'en féliciter. De même, les milliers d'astronomes qui scrutent le ciel depuis des siècles en utilisant des techniques de plus en plus sophistiquées n'ont encore jamais vu le moindre débarquement d'extraterrestres.

2 La naissance de la raison ou comment notre vision de la place de la Terre a émergé

Le besoin d'un calendrier pour maîtriser l'agriculture, la curiosité naturelle pour le ciel et le développement des mythes célestes avec la divinisation des astres ont été parmi les premières causes de la naissance de la plus ancienne des sciences, l'astronomie. Dans toutes les civilisations, son histoire est extrêmement riche. L'astronomie américaine précolombienne, l'astronomie chinoise ancienne ou encore l'astronomie hindoue d'avant Alexandre le Grand ont atteint

un niveau remarquable pour leur époque, mais elles ont eu peu d'influence sur le monde occidental dans la mesure où les Européens ont découvert ces pays à un moment où ces civilisations étaient en perte de vitesse et où l'astronomie connaissait une longue éclipse en Amérique et en Asie. De plus, à partir du XVI[e] siècle, les explorateurs, soldats et missionnaires ont souvent eu tendance à détruire toute production indigène originale quand en même temps ils en faisaient disparaître les auteurs.

Il n'est pas question ici de décrire en détail la manière dont les hommes ont peu à peu compris la nature des astres. Seuls quelques points de repère sont donnés ci-dessous.

2.1 LES GRANDES ÉTAPES DE L'ANTIQUITÉ

L'astronomie était florissante dans l'Antiquité chez les Sumériens, les Babyloniens, les Assyriens, les Égyptiens et bien d'autres. Avec les instruments rudimentaires dont ils disposaient, ils ont bâti leur vision du monde. Leurs premières mesures des positions et des mouvements des astres ont été fort utiles pour leurs successeurs. Parmi nos ancêtres, les Grecs sont probablement ceux à qui nous devons le plus. Avec la civilisation grecque, on assiste au premier effort important pour comprendre le monde et pour écarter le surnaturel, le mystique ou la magie dans l'interprétation des phénomènes naturels.

- En −585, Thalès de Milet (env. −624 à −547) se montre capable de prédire la date d'une éclipse de Lune, sans que l'on sache avec certitude quels moyens il avait utilisés pour cela.
- Vers −500, un savant grec, qui selon les auteurs est soit Parménide (env. −515 à −450), soit Pythagore (env. −572 à −479), propose l'idée que la Terre est sphérique. Ce dernier fonde une école qui, pendant deux siècles, allait avoir une importance considérable, en particulier dans l'explication du monde à partir des nombres.
- Vers −450, Anaxagore (env. −500 à −428) propose que les phases de la Lune sont dues à l'éclairement par le Soleil, ce qui donne une explication naturelle aux éclipses. Anaxagore est aussi le premier à proposer la théorie de la panspermie comme origine de la vie sur Terre.
- Vers −350, Aristote (−384 à −322) donne la preuve la plus directe de la sphéricité de la Terre, du fait que son ombre, visible lors des éclipses de Lune, est toujours circulaire. Il invoque aussi d'autres arguments convaincants comme la variation du champ des étoiles visibles avec la latitude du lieu d'observation ou encore l'apparition des voiles des navires lointains avant leur coque. Il propose aussi, à la suite d'autres savants comme Eudoxe de Cnide (−408 à −355), un modèle géocentrique plaçant la Terre au centre de l'Univers.
- Vers −330, Héraclite du Pont (−388 à −315) propose que la Terre tourne sur elle-même en 24 heures alors que les étoiles sont immobiles. Il estime que les mouvements apparents de Mercure et Vénus suggèrent qu'elles tournent autour du Soleil.
- Aux alentours de −270, Aristarque de Samos (env. −320 à −250) fait la première tentative de détermination de la distance de la Terre au Soleil (fig. 1.3) et démontre que celui-ci est bien plus éloigné que la Lune. Il est le premier à proposer une vision héliocentrique du monde.
- Vers −240, Ératosthène de Cyrène (−276 à −194) mesure le rayon de la Terre (fig. 1.1) avec une remarquable justesse.

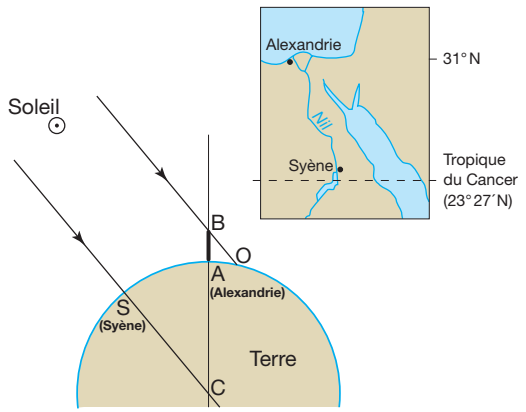


Figure 1.1. La mesure de la circonférence de la Terre par Ératosthène. Le jour du solstice d'été à midi, le Soleil est au zénith à Syène (S) située en Haute Égypte (voir carte dans le coin supérieur droit). Le même jour à Alexandrie (A), située pratiquement sur le même méridien, Ératosthène a mesuré la longueur AO de l'ombre d'un obélisque [AB], ce qui donne l'angle $\widehat{ABO}$, et donc $\widehat{ACS}$. La connaissance de la distance Syène–Alexandrie, fréquemment parcourue par les caravanes, permet d'en déduire la valeur du rayon terrestre par une simple règle de trois. L'angle ACS fait environ 7,2°, soit un cinquantième de 360°. La circonférence terrestre est donc cinquante fois plus grande que la distance Syène–Alexandrie. Ératosthène a ainsi estimé que la Terre avait une circonférence de 252 000 stades égyptiens (le stade était la mesure fréquemment utilisée à l'époque et s'avère valoir 157,5 m), soit un peu moins de 40 000 km, ce qui est remarquablement proche de la valeur réelle.

- En −129, Hipparque (env. −190 à −120) détermine la distance Terre–Lune (fig. 1.2) et découvre la précession des équinoxes, c'est-à-dire la lente variation de la direction de l'axe de rotation de la Terre (cf. chapitre 2, §3.2.2), et établit une loi du mouvement du Soleil et de la Lune. Il est crédité par certains historiens comme étant l'inventeur de la trigonométrie, et est considéré par tous comme le meilleur observateur de l'Antiquité. Ses observations (il est l'auteur du premier catalogue d'étoiles) ont été faites avec une précision, remarquable

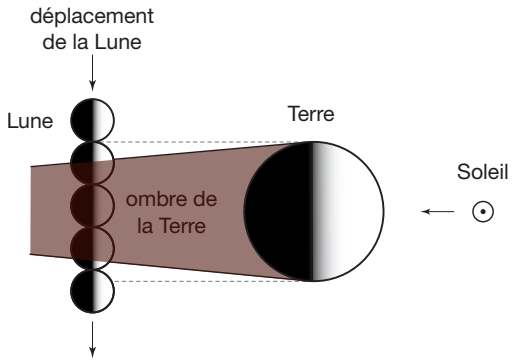


Figure 1.2. La mesure de la distance de la Lune dans l'Antiquité. La comparaison du temps que la Lune met pour entrer dans l'ombre de la Terre avec celui qu'elle met pour la traverser durant une éclipse de Lune permet de savoir que la Lune est 2,5 fois plus petite que l'ombre de la Terre. Mais le fait que la Lune ait un diamètre apparent quasi identique au Soleil implique que sur la distance Terre–Lune, les «cônes» d'ombre de la Lune et de la Terre se réduisent chacun d'un diamètre lunaire. La Lune est donc 3,5 fois plus petite que la Terre. Le rapport entre les durées d'une lunaison entière et d'une éclipse de Lune permet alors de déterminer la circonférence de l'orbite lunaire et par suite la distance Terre–Lune en fonction du diamètre terrestre, et en l'occurrence de trouver que la Lune est située à environ 60 rayons terrestres de notre planète. À noter que, lors d'une telle éclipse, la Lune ne devient pas complètement sombre, car encore éclairée par la diffusion de la lumière solaire par le limbe de la Terre, qui lui confère un ton cuivré plus ou moins sombre en fonction de la couverture nuageuse sur le limbe terrestre.

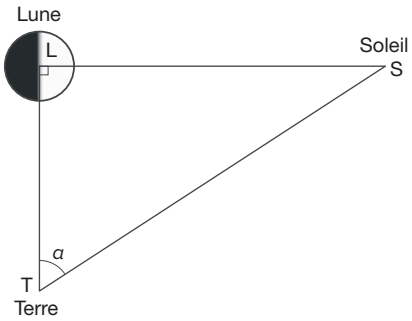


Figure 1.3. La mesure de la distance du Soleil par Aristarque de Samos. En considérant le triangle rectangle formé par la Terre, la Lune et le Soleil au moment de la demi-Lune (ou quartier) et en mesurant l'angle «Lune–Terre–Soleil» (α sur le schéma), Aristarque a compris que la connaissance de la distance Terre–Lune permettait d'en déduire la distance du Soleil en utilisant les relations simples du triangle rectangle. Aristarque estimait que le Soleil était 19 fois plus éloigné que le Lune, alors qu'il est en fait près de 400 fois plus loin. L'erreur vient de ce que l'angle α à mesurer est très proche de 90°, et que c'est le faible écart à cette valeur qui détermine précisément la distance Terre-Soleil. (En pratique, le fait que cet angle ne soit pas exactement égal à 90° a pour conséquence que l'intervalle de temps entre le dernier quartier et le premier quartier est légèrement plus court que celui entre le premier quartier et le dernier quartier. Aristarque estimait cette différence à un jour, alors qu'elle n'est en réalité que d'une heure.)

pour l'époque, de l'ordre de quelques minutes d'arc (un degré d'angle est subdivisé en 60 minutes d'arc; une minute d'arc correspond à la limite de résolution de l'œil humain). Plus de 1 800 ans plus tard, la comparaison par Edmund Halley (1656–1742) de la position des étoiles avec les mesures d'Hipparque a permis de mettre en évidence le mouvement relatif par rapport au Soleil (appelé mouvement propre) des plus rapides d'entre elles.

– En 150, Claude Ptolémée (env. 85–165) propose une théorie géocentrique du mouvement des planètes (fig. 1.4), qui sera suffisamment précise pour être utilisée pendant plus de 1 000 ans et qui ne sera contredite avec succès que quatorze siècles plus tard par Nicolas Copernic.

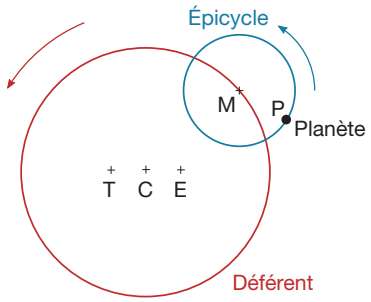


Figure 1.4. Les épicycles de Ptolémée. En plaçant la Terre au centre de l'Univers, Ptolémée expliquait le mouvement apparent des planètes par la combinaison d'un mouvement circulaire autour de la Terre T et d'un mouvement de la planète P sur un épicycle. Le centre M de l'épicycle se déplace sur le cercle dit déférent, de centre C, d'un mouvement angulaire uniforme par rapport au point E, l'équant, distinct de C. Le point T, symétrique de E par rapport à C, n'est donc pas vraiment au centre de l'Univers.

2.2 La mesure de la taille de la Terre, de la distance de la Lune et du Soleil

Les méthodes employées dans l'Antiquité pour mesurer le rayon de la Terre et la distance de la Lune étaient particulièrement simples et ingénieuses. Grâce à la mesure de la taille de la Terre par Ératosthène de Cyrène, il devenait possible de trouver celle de la Lune.

La taille de la Lune par rapport à la Terre, et par suite sa distance en unités du rayon terrestre, peuvent être facilement calculées lors d'une éclipse de Lune. Il suffit de mesurer, d'une part, la durée t_1 qui s'écoule entre le moment où la Lune atteint l'ombre de la Terre et le moment où la Lune est complètement éclipsée, et, d'autre part, la durée t_2 que met la Lune pour traverser l'ombre de la Terre (fig. 1.2). Le rapport t_1/t_2 est égal à celui du rayon lunaire au rayon de l'ombre de la Terre. La dernière étape, la plus astucieuse, était

de remarquer que l'ombre de la Terre n'était pas un cylindre, mais un cône et que celui-ci se rétrécissait d'un diamètre lunaire sur la distance Terre–Lune puisque, lors des éclipses de Soleil, le cône d'ombre de la Lune était très petit (la taille apparente de la Lune est à peine suffisante pour masquer le Soleil). On savait ainsi il y a plus de 2000 ans que la Lune était 3,5 fois plus petite que la Terre et qu'elle était située à environ 60 rayons terrestres.

La mesure de la distance de la Terre au Soleil était plus délicate à faire. En utilisant les propriétés des triangles bien connues des géomètres grecs, Aristarque avait estimé la distance angulaire de la Lune et du Soleil au moment du quartier (fig. 1.3) et en avait déduit une première estimation scientifique de la distance du Soleil. Malgré une erreur d'un facteur 20, il trouvait tout de même que le Soleil était 19 fois plus éloigné que la Lune (au lieu de 400), et il avait compris que le Soleil était beaucoup plus gros que la Terre. Aristarque en avait déduit qu'il était plus logique de penser que le petit corps tournait autour du gros et non l'inverse. On peut le considérer comme le père des théories héliocentriques. Malheureusement, la vanité des hommes de se placer au centre de l'Univers fera perdre près de 2000 ans à la compréhension de notre place dans l'Univers.

Les deux distances ci-dessus sont exprimées par rapport au diamètre terrestre. Pour passer de ces distances relatives en distances absolues, il faut donc déterminer le rayon, le diamètre ou la circonférence terrestre. Pour déterminer la taille de la Terre, Ératosthène utilisa le fait que, lors du solstice d'été, le Soleil était au zénith à Syène (on voyait son reflet au fond d'un puits) alors qu'il faisait un angle de 7,2 degrés par rapport à la verticale à Alexandrie, plus au nord (l'angle étant mesuré avec précision à l'aide de l'ombre d'un obélisque). Il en conclut qu'Alexandrie était située à 7,2 degrés de latitude plus au nord, et que la circonférence terrestre pouvait s'obtenir par une simple règle de trois à partir de la distance Syène–Alexandrie mesurée, selon la légende, à partir du nombre de jours qu'un chameau mettait à parcourir la distance après avoir déterminé la distance parcourue par un chameau en un jour, ou plus probablement par un odomètre rudimentaire.

2.3 ARISTARQUE, HIPPARQUE ET PTOLÉMÉE

Le Soleil est tellement plus éloigné de la Terre que ne l'est la Lune que l'angle α entre la Lune et le Soleil au moment de la demi-Lune (cf. fig. 1.3) est très proche d'un angle droit : il ne diffère de 90 degrés que par 8,6 minutes d'arc. D'une part, il est très difficile d'avoir des mesures d'angle avec une précision meilleure qu'une minute d'arc sans l'aide de l'optique moderne ; d'autre part, il est extrêmement difficile de déterminer précisément l'instant du premier ou du dernier quartier (où on observe une demi-Lune). Cet ensemble de difficultés faisait que l'angle α était estimé à 87 degrés au lieu de 89,86 degrés. Hipparque avait bien remarqué la difficulté de la mesure et avait donc critiqué, avec raison, la valeur numérique d'Aristarque. Sous prétexte que la mesure était douteuse, les conclusions d'Aristarque au sujet de la taille du Soleil ont elles aussi été rejetées et, dans le prolongement des travaux d'Hipparque, Claude Ptolémée a alors proposé son fameux système géocentrique.

Pour expliquer les rétrogradations apparentes des planètes dans le ciel, celui-ci avait représenté leur mouvement par une combinaison de mouvements circulaires et uniformes. De tels mouvements étaient en effet considérés comme « parfaits » pour les objets du ciel, domaine des dieux. Mais, pour rendre compte des observations, Ptolémée avait dû prendre quelques libertés avec le principe d'un mouvement circulaire et uniforme (fig. 1.4). Il avait décalé la Terre T par rapport au centre C du cercle tandis que le mouvement du point M était uniforme non pas par rapport au centre C du cercle mais par rapport au point E, symétrique de la Terre par rapport à C. Le mouvement n'était donc, en réalité, ni uniforme ni géocentrique, mais accordait tout de même à la Terre une place presque centrale.

2.4 LA RENAISSANCE

Brûlée en −47 après l'entrée de César à Alexandrie, puis reconstituée, la célèbre bibliothèque d'Alexandrie a été définitivement détruite en 390. Après le déclin de la civilisation grecque, l'astronomie est florissante dans le monde arabe et en Chine. Elle ne connaît aucun progrès important dans le monde occidental au cours du Moyen Âge, au point même que l'apparition de la célèbre supernova du Crabe en 1054, qui a été observée par les astronomes chinois et arabes, n'a pas été mentionnée dans les écrits du monde occidental parvenus jusqu'à nous. Pourtant, ce nouvel astre éphémère était le plus brillant du ciel après le Soleil et la Lune, au point d'être visible en plein jour pendant trois semaines au mois de juillet 1054.

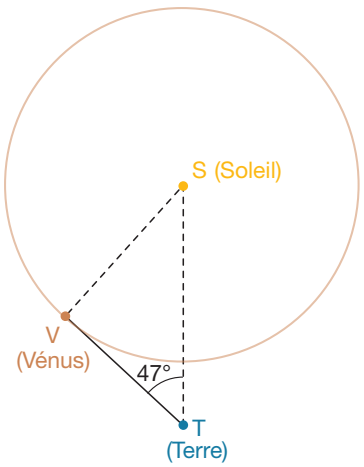
La renaissance de l'astronomie occidentale n'est pas étrangère à la situation économique et politique. À l'aube de l'ère coloniale, la connaissance des positions précises des étoiles est particulièrement utile pour la navigation loin des côtes, de la même manière qu'au IX^{e} siècle l'âge d'or de l'astronomie arabe avait coïncidé avec l'expansion la plus grande du monde musulman. Tout au long de son histoire, l'astronomie a toujours été étroitement liée non seulement aux autres disciplines dont elle a souvent été la mère, mais aussi avec l'évolution sociale et politique.

Cinq noms ont marqué la renaissance de l'astronomie en Occident : Nicolas Copernic (1473–1543), Tycho Brahé (1546–1601), Johannes Kepler (1571–1630), Galilée (1564–1642) et Isaac Newton (1643–1727). On peut les considérer comme les « pères fondateurs » de l'astronomie moderne.

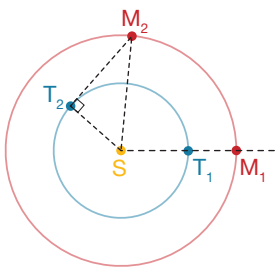
Il est souvent dit que la théorie de Ptolémée s'accommodait mal des observations et qu'elle avait dû être complexifiée avec le temps, preuve criante de ses insuffisances, mais il n'en est rien, et mis à part un recalage de certains de ces paramètres, c'est essentiellement la même théorie (assez complexe à manipuler, du reste) que celle qui avait été établie par Ptolémée qui continuait à être utilisée au XVI^e siècle. Il n'en demeure pas moins que, si la théorie de Ptolémée avait une certaine efficacité pour prédire les longitudes des planètes (c'est-à-dire l'écart angulaire les séparant du Soleil le long de l'écliptique, plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil), elle échouait à prédire correctement leur latitude (résultant, en langage moderne, du fait que les planètes n'orbitent pas autour du Soleil dans le même plan que la Terre), et souffrait aussi de certaines incohérences, notamment par le fait que, pour expliquer le mouvement de la Lune, elle devait faire l'hypothèse que la distance Terre–Lune variait d'un facteur supérieur à deux lors d'un mois lunaire, en contradiction flagrante avec l'observation directe qui indique que la taille apparente de la Lune (et donc sa distance à la Terre) ne varie guère que de 10 %.

C'est en voulant retrouver des mouvements circulaires et uniformes que Copernic a été conduit à proposer un système héliocentrique beaucoup plus simple. À son époque, aucune expérience ne permettait de décider si la Terre était au repos ou en mouvement (la première preuve directe sera donnée en 1729, cf. §3.2.1). Copernic, qui connaissait la théorie héliocentrique d'Aristarque et avait sans doute également été influencé par les écrits des astronomes arabes médiévaux comme Al-Battani (env. 858–929), avait remarqué les insuffisances de la théorie des épicycles de Ptolémée (qui du reste n'était pas tant une théorie au sens moderne du terme qu'une description des mouvements apparents des astres). Le fait que Mercure et Vénus accompagnent le Soleil dans sa marche annuelle, les variations d'éclat de Mars, et dans une moindre mesure de Vénus et Jupiter, le fait que les rétrogradations de Mars ont plus d'ampleur que celles de Jupiter, qui elles-mêmes dépassent celles de Saturne, trouvent une explication naturelle en plaçant le Soleil au centre du système. De plus, le système héliocentrique de Copernic permettait de déterminer aisément les distances relatives des planètes (cf. fig. 1.5), là où la théorie de Ptolémée invoquait des arguments philosophiques guère convaincants (et, en réalité, tout à fait faux) pour deviner leur valeur.

Cette œuvre présente un certain nombre d'imperfections. Pour Copernic comme pour Aristote, l'Univers est limité par la «sphère des fixes» et le mouvement circulaire est considéré comme «naturel» pour les astres. Le Soleil ne joue qu'un simple rôle optique de source de lumière et son rôle dynamique de cause du mouvement est ignoré. La Terre continue, dans ce système, à jouer un rôle privilégié puisque les mouvements sont rapportés au centre de l'orbite terrestre et non au Soleil. Malgré toutes ces imperfections, la portée philosophique de l'œuvre est considérable. La Terre perd sa situation centrale. Finalement mise à l'Index par l'Église catholique en 1616, l'œuvre de Copernic y demeurera durant deux siècles et connaîtra la même hostilité chez les protestants.



(a) Vénus, planète inférieure



(b) Mars, planète supérieure

Figure 1.5. Détermination des distances relatives des planètes dans le système héliocentrique de Copernic. On peut aisément exprimer la distance des planètes au Soleil dans le système de Copernic en prenant pour unité la distance Terre–Soleil.

(a) Les planètes inférieures. Vu de la Terre, l'écart entre Vénus et le Soleil (l'élongation) ne dépasse pas 47°. Le rapport SV/ST est donc égal à $\sin(47°) \simeq 0{,}73$. De la même manière, on trouve que le rapport des distances Soleil–Mercure/Soleil–Terre est égal à 0,4 environ, la valeur trouvée dépendant de l'élongation mesurée, affectée par l'excentricité de l'orbite de Mercure.

(b) Les planètes supérieures. Le temps qui sépare une quadrature, où le triangle ST_2M_2 formé par le Soleil S, la Terre T_2 et Mars M_2 est rectangle en T_2, d'une opposition, où le Soleil S, la Terre T_1 et Mars M_1 sont alignés, permet de connaître d'une part l'angle $\widehat{T_1ST_2}$ dont la Terre a tourné autour du Soleil et d'autre part, connaissant la période synodique de Mars (cf. fiche 1, §6, p. 86), l'angle $\widehat{M_1SM_2}$ dont la planète rouge a tourné autour du Soleil, ce qui permet de trouver l'angle $\widehat{T_2SM_2}$ et par suite le rapport SM/ST = 1,6. En appliquant la même méthode, on trouve un rapport de distance de 5,2 pour Jupiter et 9,6 pour Saturne.

En obtenant les faveurs du roi du Danemark Frédéric II, Tycho Brahé fit édifier le fameux Observatoire d'Uraniborg et réalisa les meilleures observations du mouvement des planètes. C'est en s'appuyant sur ses observations remarquables du mouvement de Mars que Johannes Kepler, cherchant à réaliser le vieux rêve des Grecs de géométriser l'Univers, découvrit les fameuses trois lois qui portent maintenant son nom (cf. §8.1, p. 69).

On peut considérer Galilée comme le fondateur de la physique moderne. Il inventa la cinématique, la microscopie, la thermométrie, et établit la loi de la chute des corps et du mouvement du pendule. Il découvrit le phénomène de l'inertie. En étant un des premiers à pointer une lunette vers le ciel, il fit en quelques nuits du mois de juillet 1610 la plus grande moisson de découvertes jamais faites par un astronome. Il découvrit les taches et la rotation du Soleil, les cratères et les montagnes de la Lune, les quatre gros satellites de Jupiter, les anneaux de Saturne – qu'il n'arriva pas à interpréter –, une multitude d'étoiles jusqu'alors invisibles et de nombreux amas d'étoiles. Il résolut la Voie lactée en étoiles…

Isaac Newton fonda la mécanique, l'optique moderne et le calcul différentiel. Il inventa le télescope et l'analyse spectrale. Sa théorie de la gravitation universelle, qui ne sera dépassée que par la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein (1879–1955) plus de deux siècles plus tard, fut le point de départ de l'astronomie mathématique. Pendant près de 250 ans, l'essentiel des efforts en astronomie a été consacré à l'étude des mouvements des corps dans le système solaire. La mécanique céleste a connu son apogée en 1846 avec la découverte «par le calcul» de la planète Neptune indépendamment par John Couch Adams (1819–1892) et Urbain Le Verrier (1811–1877). Elle connaissait ses limites quelques années plus tard avec des anomalies dans le mouvement de Mercure, qui nécessiteront, pour être expliquées, de faire appel à la théorie de la relativité générale découverte par Einstein en 1915.

2.5 Le XXe siècle et la naissance de l'astrophysique

Au cours du XIXe siècle, le développement de la photographie, de la spectroscopie et de la photométrie a fourni aux astronomes les outils nécessaires pour ne plus se contenter d'observer les positions et mouvement des astres, en fondant l'étude de leur nature physique. Au début du XXe siècle, l'astrophysique naissante prenait de plus en plus de place dans les recherches astronomiques. Les principaux mécanismes responsables de la physique des étoiles étaient compris au milieu du siècle. On savait enfin pourquoi le Soleil et les étoiles brillaient et on avait compris que les cœurs des étoiles étaient de gigantesques réacteurs nucléaires au sein desquels un grand nombre d'atomes étaient fabriqués. Dès les années 1920, les astronomes avaient réalisé que la matière était rassemblée au sein d'immenses ensembles, les galaxies, grâce en particulier aux travaux d'Edwin Hubble (1889–1953), qui avec Georges Lemaître (1894–1966) découvrait peu après l'expansion de l'Univers.

À partir des années 1960, les sciences de l'Univers ont connu un développement si considérable qu'on peut l'assimiler à une véritable explosion de nos connaissances. Cet âge d'or est dû à la conjugaison de plusieurs facteurs favorables comme le développement de l'astronomie spatiale, l'utilisation des ordinateurs, la construction de grands télescopes, la mise au point de nouveaux détecteurs et la multiplication du nombre d'astronomes dans le monde : de 200 lors de la première assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale tenue en 1922 à Rome, leur nombre est désormais supérieur à 10 000. Quelques éléments sur la diversité des moyens d'observations sont donnés sur la fiche dédiée, p. 88.

Avec l'exploration *in situ* des planètes par des robots et sondes spatiales, nous venons de vivre l'âge d'or de l'exploration du système solaire (cf. chapitre 2, §2). On peut comparer ce moment à celui de la découverte de l'Amérique. Ce qui fut un exploit il y a plus de cinq siècles est devenu un élément de notre vie quotidienne. Les planètes et satellites ne sont plus pour nous des points de lumière dont on se contente d'étudier le mouvement. Ce sont des «Terres» à part entière dont l'étude échappe aux seuls astronomes pour devenir aussi le domaine des géophysiciens.

3 Le mouvement de la Terre dans l'espace

La question de savoir si la Terre était plate ou ronde a été posée dès l'Antiquité et était résolue depuis au moins l'époque de Platon et Aristote, mais tant que les hommes ont considéré que la Terre était au centre de l'Univers le problème de son mouvement ne se posait évidemment pas. Avec la Renaissance scientifique et les travaux de Copernic, Tycho Brahé, Kepler, Galilée et Newton, les outils nécessaires à l'étude du mouvement de la Terre étaient en place dès la fin du XVIIe siècle. La connaissance précise de la forme de la Terre et de ses mouvements a fait de spectaculaires progrès à la fin du XXe siècle. Nous y reviendrons brièvement dans le prochain chapitre (§3.2 et 3.3).

C'est un épisode très intéressant de l'histoire des sciences que de constater que l'idée du mouvement de la Terre dans l'espace avait progressivement triomphé dans les esprits, de l'hypothèse de Copernic aux succès de la théorie de Newton, avant que des preuves expérimentales y fussent apportées. En effet, trois preuves du mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil, qui auraient été bien utiles à Galilée lors de

son procès face à l'Église, n'ont été apportées qu'entre 1729 et 1900 : la mesure de l'aberration des étoiles, l'observation des parallaxes stellaires et l'effet Doppler-Fizeau.

Le mouvement apparent de la sphère céleste jour après jour pourrait aussi bien provenir d'un ciel tournant chaque jour autour d'une Terre immobile que d'une Terre tournant sur elle-même. Depuis le XVII^e siècle, il était admis que c'est bien la Terre qui tournait, mais ce n'est qu'au début du XIX^e siècle avec la déviation vers l'est de la chute des corps qu'elle fut prouvée expérimentalement. En 1851, après des expériences à l'Observatoire de Paris, Léon Foucault (1819–1868) en établit une spectaculaire confirmation publique en suspendant un pendule de 60 mètres de long et de 25 kg au dôme du Panthéon à Paris. Si la Terre avait été immobile, aucune force n'aurait perturbé le plan d'oscillation du pendule. Au bout de quelques minutes, il était évident que ce plan tournait par rapport au sol et aux spectateurs. En fait, c'est la Terre qui tourne au-dessous du pendule.

Pour les bases théoriques de ce qui suit, on pourra se reporter aux « Rappels de mécanique classique », p. 83.

3.1 Les preuves de la rotation terrestre

3.1.1 *L'effet Coriolis*

Pour un référentiel lié à la Terre, non galiléen, tout se passe comme si un objet de masse m subissait une force supplémentaire, la force de Coriolis $\boldsymbol{f}_C$, dont l'expression est donnée par :

$$\boldsymbol{f}_C = -2m\,\boldsymbol{\omega}_e \wedge \boldsymbol{v}_r$$

où $\boldsymbol{v}_r$ est la vitesse du projectile et $\boldsymbol{\omega}_e$ le vecteur vitesse angulaire de la Terre, de module $7{,}3 \times 10^{-5}$ rad·s^{-1}.

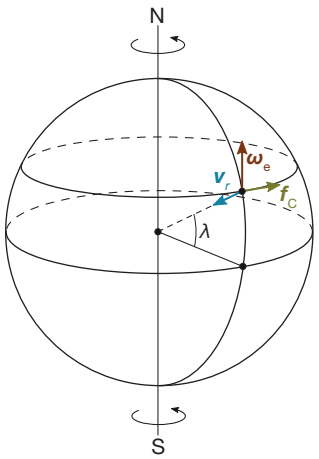


Figure 1.6. Déviation de la chute des corps vers l'est. Un corps de vitesse $\boldsymbol{v}_r$ en chute libre verticale subira une force $\boldsymbol{f}_C$ orientée vers l'est.

Cet effet a été mis en évidence par Ferdinand Reich (1799–1882) en 1831 avec l'observation de la déviation vers l'est des corps en chute libre verticale dans des puits de mine (fig. 1.6), et formalisé par Gaspard-Gustave Coriolis (1792–1843) en 1835. Comme conséquence de cet effet, on observe que les cyclones tournent dans le sens contraire des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord, et dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud. L'affirmation que le tourbillon d'une baignoire que l'on vide a un sens de rotation qui dépend de l'hémisphère où l'on se trouve relève en revanche de la légende urbaine.

3.1.2 *Le pendule de Foucault*

Cette expérience a été effectuée par Léon Foucault en 1851, au Panthéon. Si on considère le cas où un pendule est situé au pôle Nord, le plan d'oscillation du pendule est fixe par rapport aux étoiles lointaines, et la Terre tourne en dessous dans le sens rétrograde. Par rapport à la surface de notre planète, on observe donc une rotation constante du plan d'oscillation du pendule dans le sens horaire. Pour déterminer le comportement du pendule à une latitude arbitraire, il faut inclure la force de Coriolis dans le calcul du mouvement du pendule.

– À l'équateur, quand le pendule est au plus bas de sa trajectoire, la force de Coriolis est orientée suivant la verticale du lieu. Elle n'a aucune composante perpendiculaire au plan d'oscillation. Si on considère une demi-oscillation entre les deux points extrêmes du battement, la composante latérale de la force de Coriolis s'annule en moyenne et ne participe non plus à la rotation du plan d'oscillation.

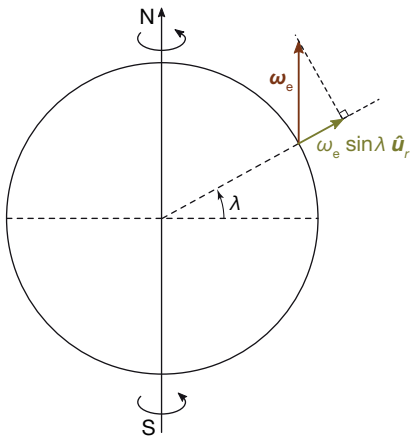


Figure 1.7. Composante du vecteur vitesse angulaire de la Terre qui intervient dans la force de Coriolis s'exerçant sur un pendule de Foucault. C'est la composante verticale du vecteur prise au niveau du plan d'oscillation qui intervient ici. Dans le référentiel géocentrique, cela correspond à sa projection le long de la direction radiale, dont $\hat{\boldsymbol{u}}_r$ est un vecteur unitaire.

– À une latitude nord λ intermédiaire, la composante latérale moyenne ne s'annule plus sur une demi-oscillation, ce qui produit la rotation du plan d'oscillation. La composante verticale du vecteur vitesse angulaire de la Terre étant égale à $\omega_e \sin\lambda$ (cf. fig. 1.7) et la vitesse angulaire étant inversement proportionnelle à la période de rotation, le pendule semble donc tourner dans le sens des aiguilles d'une montre, mais avec une période égale à :

$$T = \frac{24\,\text{h}}{\sin\lambda},$$

la rotation se faisant avec la même période mais en sens opposé à la même latitude dans l'hémisphère sud.

3.1.3 *L'aplatissement de la Terre*

La Terre est un sphéroïde aplati de rayon équatorial R_e et de rayon polaire R_p :

- R_e = 6 378,14 km
- R_p = 6 356,75 km

La différence est donc de 21,39 km. L'aplatissement est égal à :

$$\frac{R_e - R_p}{R_e} = \frac{21{,}39}{6\,378{,}14} = \frac{1}{298{,}18}$$

Ceci a pour effet que la longueur d'un arc de méridien d'un degré n'est pas la même selon la latitude. Par ailleurs, si on considère la Terre en rotation comme un fluide, une masse m située à sa surface à la latitude λ est soumise à deux forces qui produisent les accélérations suivantes :

– l'accélération gravitationnelle ($\boldsymbol{g}$ sur la fig. 1.8) dirigée vers le centre de la Terre et de module $GM_\oplus/R_\oplus^2$;
– l'opposée de l'accélération d'entraînement $\boldsymbol{a}_e$ due au mouvement circulaire de rayon $R_\oplus \cos\lambda$ de la surface, consécutif à la rotation terrestre. Cette accélération est orientée perpendiculairement à l'axe de rotation terrestre et d'amplitude $\omega_e R_\oplus \sin\lambda$.

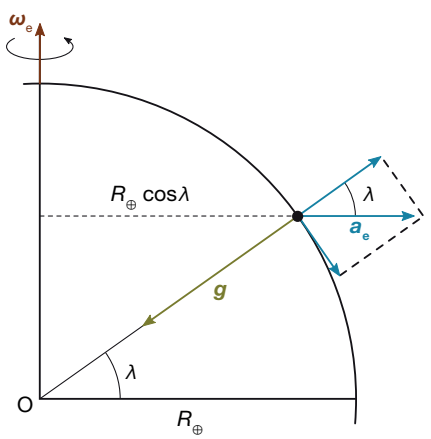


Figure 1.8. Les deux composantes, $\boldsymbol{g}$ et $\boldsymbol{a}_e$, de l'accélération ressentie à la surface de la Terre en rotation. Par rapport à la surface terrestre, $\boldsymbol{g}$ est en première approximation de module et de direction constants, au contraire de $\boldsymbol{a}_e$.

La projection de la force d'inertie associée sur la verticale du lieu diminue la «vraie» valeur de l'accélération de la pesanteur, qui est elle-même modulée en fonction de la latitude par le fait que la distance au centre de la Terre varie. L'intensité du champ gravitationnel terrestre dépend donc de la latitude et décroît des pôles vers l'équateur. Historiquement, cet effet a été découvert en remarquant qu'un pendule qui battait la seconde à Paris battait plus lentement à l'équateur (expérience de Jean Richer (1630–1696) en 1672).

3.2 Les preuves de la révolution de la Terre autour du Soleil

3.2.1 *L'aberration de la lumière des étoiles*

Elle a été découverte par James Bradley (1693–1762) en 1729. La Terre se déplace autour du Soleil à une vitesse moyenne égale à $v_\oplus$ = 29,80 km·s^{-1}. La lumière des étoiles semble donc provenir d'une direction différente de la direction réelle. C'est le phénomène de composition des vitesses, aisément observable quand on est à bord d'un véhicule qui se déplace sous la pluie : quand le véhicule est immobile, la pluie tombe verticalement par rapport au sol, mais quand le véhicule avance, la pluie tombe de façon d'autant plus inclinée que la vitesse du véhicule est grande, et la direction apparente de provenance de la pluie tend toujours à se rapprocher de la direction du déplacement. Appliqué à la lumière, ce phénomène se traduit par une variation de la position apparente d'une étoile (fig. 1.9). Dans l'hypothèse où la vitesse de déplacement du «véhicule» Terre est faible par rapport à la vitesse de la lumière, l'écart angulaire maximal $\Delta\theta$ entre la vraie position de l'étoile et celle dont la lumière reçue semble provenir est donné par :

$$\Delta\theta \simeq \frac{v_\oplus}{c} \simeq 9{,}94 \times 10^{-5}\ \text{rad} \simeq 20{,}49''$$

L'angle de déviation dépend de l'angle entre la direction dans laquelle se trouve l'étoile et la direction du déplacement de la Terre, qui varie au cours de son orbite :

- sur l'écliptique : la position apparente des étoiles est décrite par une oscillation sur des segments de demi-longueur 20,49″ ;
- au pôle écliptique : elle décrit un cercle de rayon 20,49″ ;
- dans une position intermédiaire, à une latitude céleste β : elle décrit une ellipse de demi-grand axe 20,49″ et de demi-petit axe 20,49″ $\sin\beta$.

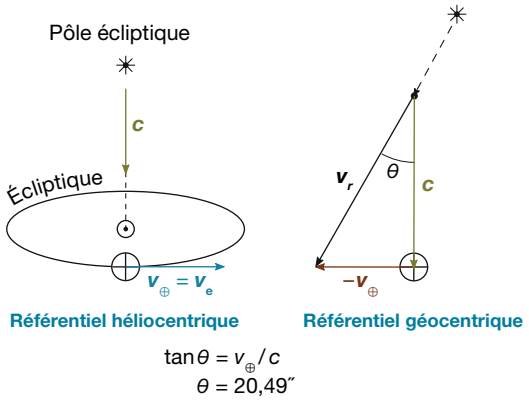


Figure 1.9. Le phénomène d'aberration. Dans le référentiel de Copernic (ou héliocentrique, à gauche), une étoile située à la verticale du plan de l'orbite terrestre apparaîtra pour un observateur terrestre (à droite) décalée vers l'avant de la direction instantanée de la Terre sur son orbite.

Bien qu'un traitement classique (non relativiste) ne puisse être théoriquement appliqué à la lumière, il donne un résultat exact en première approximation car $v_\oplus \ll c$. Il existe également une aberration diurne, bien plus faible, liée à la rotation terrestre.

3.2.2 *Les parallaxes stellaires*

Par analogie avec une voiture d'où l'on voit un arbre proche se déplacer par rapport à l'horizon lointain, un observateur terrestre voit, du fait de la révolution de la Terre autour du Soleil, une étoile proche se déplacer par rapport au fond d'étoiles lointaines (fig. 1.10). On définit la distance d'un parsec (pc) comme étant celle à laquelle le déplacement apparent d'une étoile sur la voûte céleste, en réalité dû au déplacement annuel de la Terre autour du Soleil, s'écarte d'une seconde d'arc de sa position moyenne. Ainsi, pour un astre situé à une distance arbitraire, la parallaxe, notée π, est égale à $1/d$, quand π est exprimée en secondes d'arc et d en parsecs (pc) :

$$\frac{d}{1\ \text{pc}} = \frac{1''}{\pi}$$

Comme un angle d'une seconde d'arc correspond à 1/206 265 radian, la distance d'un parsec correspond à 206 265 fois le rayon de l'orbite terrestre.

$$1\ \text{pc} = 206\,265\ \text{au} \simeq 3{,}086 \times 10^{13}\ \text{km} \simeq 3{,}26\ \text{al.}$$

Historiquement, la distance Terre–Soleil était mal connue, c'est la raison pour laquelle les astronomes utilisent le parsec comme unité de longueur relative. De nos jours, l'année-lumière pourrait sembler plus naturelle d'autant que c'est un multiple du mètre, qui est proche d'une puissance de 10 (environ 10^{13} km). Mais les astronomes ont une certaine tendance à garder leurs habitudes «pour raisons historiques», quand bien même cela ne s'avère pas le plus commode pour les générations futures.

La première parallaxe a été mesurée par Friedrich Bessel (1784–1846) en 1838, avec l'étoile 61 Cygni qui avait une parallaxe de 0,294″. Cette étoile avait été choisie non pas pour son éclat, relativement modeste, mais parce que son mouvement propre était important, ce qui laissait présager qu'elle faisait partie des étoiles les plus proches du Soleil. L'étoile la plus proche, Proxima du Centaure, a une parallaxe de 0,764″. Toutes les étoiles ont donc une parallaxe inférieure à une seconde d'arc, une valeur qui nécessite des moyens sophistiqués pour être mesurée. C'est la raison pour laquelle on ne pouvait utiliser cette méthode du temps de Galilée pour prouver la théorie héliocentrique.

Les trajectoires apparentes des étoiles dues à l'effet de parallaxe (orbites parallactiques) sont :

- au pôle écliptique : des cercles ;
- dans le plan de l'écliptique : des segments (oscillations) ;
- dans une position intermédiaire de latitude céleste β : des ellipses. Le rapport des axes de l'ellipse est égal à $\sin\beta$.

La parallaxe ne peut être confondue avec l'aberration. Pour une direction donnée, l'orbite d'aberration est toujours la même quelle que soit l'étoile, alors que l'orbite parallactique dépend de la distance. De plus, il y a un quart de phase de différence. Ces deux mouvements ne sont pas les seuls que montrent les étoiles sur la voûte céleste : il faut y ajouter les mouvements individuels des étoiles, tels que le mouvement propre et le mouvement des étoiles binaires, sans parler des mouvements apparents en réalité dus aux mouvements de l'axe polaire engendrés par la présence de la Lune (précession des équinoxes, nutation, cf. chapitre 2, §3.2.2).

3.2.3 *L'effet Doppler-Fizeau*

Soit λ_e la longueur d'onde d'émission d'une raie et λ_o la longueur d'onde observée de celle-ci. Si v est la vitesse de la Terre le long de la direction d'observation, alors :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_e} = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{v}{c}$$

Au pôle écliptique, aucun effet n'est observé puisque la direction d'observation est perpendiculaire au déplacement de la Terre. Dans une position intermédiaire, le décalage $\Delta\lambda$ est sinusoïdal, avec une période égale à un an et une amplitude proportionnelle à $\cos\beta$, où β est la latitude écliptique. Dans le plan de l'écliptique, l'amplitude est maximale et la variation relative de longueur d'onde atteint 10^{-5} (la vitesse de la Terre est égale à $v_\oplus = 29{,}80\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ autour du Soleil, soit environ un cent-millième de la vitesse de la lumière).

La rotation diurne de la Terre est la cause d'un décalage Doppler supplémentaire avec une amplitude journalière proportionnelle à $\cos\lambda\cos\delta$, où λ est la latitude terrestre de l'observateur et δ la déclinaison de la source (sa latitude

par rapport à l'équateur céleste). Cet effet est d'amplitude moindre (la vitesse due à la rotation de la Terre n'excède pas 1 700 $km \cdot h^{-1}$ à l'équateur), mais doit être prise en compte dès que les mesures d'effet Doppler-Fizeau doivent être très précises, notamment pour la détection des exoplanètes par la méthode des vitesses radiales (cf. chapitre 2, §11).

4 La répartition de la matière dans l'Univers

4.1 Planètes, étoiles et galaxies

Même avec un instrument de taille modeste, on distingue aisément dans le ciel des galaxies, des étoiles, des nuages interstellaires, des planètes, des comètes, des astéroïdes et une grande variété d'astres. Ceci montre que la matière n'est pas répartie au hasard, mais qu'elle est rassemblée au sein d'entités que les astronomes ont appris à connaître au cours des âges. Un esprit curieux peut immédiatement se demander pourquoi la matière est ainsi répartie de façon hiérarchique : amas de galaxies, galaxies, amas d'étoiles, étoiles, planètes… La réponse est connue depuis le début du XX^{e} siècle. C'est avant tout la masse initiale d'une condensation qui détermine son futur. En raison de l'existence de la force de gravitation, ceci est aisé à comprendre. Plus la masse d'un objet est importante, plus il tend à s'effondrer sur lui-même et plus sa pression, sa densité et sa température internes tendent à être élevées.

Par exemple, pour une planète, il y a en tout point à l'intérieur équilibre entre gravité et pression interne. Le corps peut se contracter jusqu'à ce que les liaisons électromagnétiques entre les atomes ou molécules du corps solide qu'est une planète compensent les forces gravitationnelles. Quand un astre a une dimension supérieure à quelques centaines de kilomètres, il est sphérique. En deçà, la force de gravitation n'est pas suffisante pour que les aspérités soient suffisamment attirées par le reste du corps et gommées. L'objet est irrégulier. C'est le cas d'Hypérion, satellite de Saturne et ses 360 km dans sa plus grande dimension, d'Amalthée, satellite de Jupiter et ses 250 km, et, plus généralement, de la quasi-totalité des corps du système solaire dont la dimension est inférieure à environ 500 km (cf. chapitre 2, exercice 5, p. 193).

Dans le cas d'une étoile, la masse disponible au départ est si grande que la température et la pression interne sont très élevées et que l'état de l'objet peut être décrit comme gazeux. L'objet est en équilibre : la gravité et la pression thermique se compensent. Au sein de l'étoile, les électrons et les ions sont séparés, c'est donc un gaz constitué de particules chargées, c'est-à-dire un plasma. Au cœur de l'étoile, la température dépasse le plus souvent dix millions de degrés. L'énergie cinétique des noyaux est alors si grande que la force de répulsion électrostatique est vaincue et que les noyaux fusionnent. Des réactions thermonucléaires s'allument et sont responsables de la production d'un flux d'énergie considérable assurant une longue vie à l'étoile tant qu'il y a du carburant nucléaire disponible au centre. À l'âge « adulte », une étoile est donc une immense boule de plasma en équilibre, d'une part, sous l'effet de la force de gravitation qui, seule, conduirait à l'effondrement de l'étoile, et, d'autre part, de l'effet du gradient de la pression thermique qui conduirait, si elle était seule, à une volatilisation de l'étoile. Les réactions thermonucléaires qui se développent au cœur de l'étoile assurent une source de chaleur suffisante permettant à la pression de perdurer. Les étoiles sont responsables de l'essentiel du rayonnement visible que nous recevons sur Terre.

Si la masse d'une étoile est initialement trop grande, le flux d'énergie rayonné sera trop important et l'objet deviendra instable. C'est la raison pour laquelle une étoile ne peut exister que si sa masse est inférieure à une certaine valeur, sans quoi, avant même de se former, elle va se fragmenter en structures plus petites qui pourront donner naissance à des étoiles de plus faible masse. Si au contraire la masse est trop petite, l'objet se contracterait jusqu'à atteindre un état d'équilibre avant que sa température n'atteigne dix millions de degrés, valeur requise pour que le premier maillon de la chaîne de réactions thermonucléaires, la transformation de l'hydrogène en hélium (cf. §6.4 et encadré 6, p. 50), puisse démarrer. L'astre ne deviendrait jamais une étoile. Dans ce cas, son équilibre n'est plus assuré par la pression thermique, mais par son cœur d'électrons. Leur comportement est gouverné par le principe d'exclusion de Pauli, qui stipule que deux particules de matière identiques – ici des électrons – ne peuvent pas occuper le même état quantique (c'est-à-dire avoir la même énergie et la même quantité de mouvement) au même instant et au même endroit. Lorsque la matière devient très compacte, ce principe entraîne une sorte de répulsion entre ses électrons qui rend le milieu bien plus difficilement compressible que la simple répulsion électrostatique entre particules chargées. La matière est alors dite dégénérée. Un tel objet, où il y a équilibre entre la gravité et la pression du gaz d'électrons dégénérés (logiquement appelée pression de dégénérescence), n'est pas une étoile, ce n'est pas non plus une planète. De tels astres sont appelés des naines brunes, ils n'ont pas de source d'énergie nucléaire pérenne[1]. Ils se refroidissent lentement depuis leur période de formation.

1. Des réactions nucléaires transitoires peuvent cependant avoir lieu en détruisant du deutérium (cf. §5.6.5 et encadré 6, p. 50), sans pour autant être en mesure d'arrêter le phénomène de contraction gravitationnelle. C'est ce point qui différencie les naines brunes des planètes géantes.

Notre Soleil, qui est une étoile de taille moyenne, a une masse d'environ $M_\odot = 2 \times 10^{30}$ kg. Une étoile ne peut exister qu'entre environ 0,075 et 100 masses solaires. Une naine brune a une masse comprise entre 0,013 et 0,075 masse solaire. En dessous d'une masse inférieure à environ un quatre-vingtième de masse solaire, il s'agit d'une planète, dont le cœur est un solide dominé, selon les cas, par les interactions électromagnétiques ou la pression de dégénérescence. Jupiter, qui a une masse d'environ un millième de masse solaire, est ainsi loin de la masse maximum pour une planète.

À plus grande échelle, on observe d'immenses ensembles regroupant des milliards d'étoiles. Ce sont des galaxies. Une galaxie typique, comme la nôtre, a une masse de quelques centaines de milliards de masses solaires. Les galaxies ne vivent pas de manière isolée. On observe des amas de galaxies qui comprennent entre quelques dizaines et quelques milliers de membres. À une échelle encore plus grande, des superamas rassemblent plusieurs amas de galaxies (tableau 1.1). À l'échelle de l'Univers, la matière est rassemblée dans d'immenses filaments et les amas de galaxies se trouvent dans les parties les plus denses.

La prise de conscience de la place de la Terre dans l'Univers et de sa relative insignifiance repose sur la mesure des distances des astres. Les premières distances stellaires n'ont été mesurées qu'au XIXe siècle, et la majorité des astronomes s'étaient alors déjà habitués à l'idée que le Soleil n'occupe pas de position privilégiée dans l'Univers. En supposant que le Soleil est une étoile «comme les autres», on peut imaginer que les autres étoiles ont une luminosité intrinsèque qui est du même ordre de grandeur que celle du Soleil et donc estimer leur distance. En réalité, la luminosité des étoiles varie fortement avec leur masse, et une telle méthode s'avère bien grossière. Elle a tout de même permis d'avoir une première estimation des distances considérables des étoiles. Cela explique pourquoi, très généralement, on ne voit pas d'effet de parallaxe, c'est-à-dire les étoiles les plus proches se déplacer par rapport aux plus lointaines comme on voit les objets proches défiler devant le paysage lointain lorsque l'on est en voiture. De même, les déplacements relatifs des étoiles sont faibles (quelques dizaines de kilomètres par seconde) alors que leurs distances sont importantes, de sorte que l'on n'observe pas non plus facilement le mouvement propre des étoiles les plus proches. Sauf configuration extrêmement favorable[2], il faudrait en fait attendre quelques dizaines de milliers d'années pour observer un tel déplacement apparent à l'œil nu.

2. C'est par exemple le cas de l'étoile Arcturus, une des plus brillantes de l'hémisphère nord, dont le déplacement sur la voûte céleste en 2 000 ans est supérieur au diamètre apparent de la Lune, comme en témoigne la comparaison entre la position indiquée par Hipparque et celle observée aujourd'hui.

Limite inférieure (en $M_\odot$)	Objets	Masse typique ($M_\odot$)	Taille typique	Densité
10^{12}	Amas de galaxies	10^{14}	10^7 pc	10^{-28}
10^8	Galaxies	10^{11}	10^4 pc	10^{-23}
10^2	Amas d'étoiles	10^5	10^2 pc	10^{-22}
10^{-1}	Étoile	1	10^6 km	1
10^{-2}	Naine brune	5×10^{-2}	10^5 km	10
10^{-10}	Planète	10^{-5}	10^4 km	4
10^{-33}	Astéroïde	10^{-12}	100 km	1
–	Poussière	10^{-39}	1 µm	1

Tableau 1.1. Les principaux objets de l'Univers. Masses et principales caractéristiques. $M_\odot$ correspond à la masse du Soleil (2×10^{30} kg). La densité est le rapport entre la masse volumique et celle de l'eau (ou bien, de façon équivalente, la masse volumique exprimée en g·cm^{-3}).

4.2 La mesure des distances

Ce n'est qu'au cours du XXe siècle que les astronomes ont été capables de mesurer avec une certaine précision la distance des corps célestes. Les premiers pas avaient été faits au XIXe siècle en utilisant une méthode de triangulation appelée parallaxe (cf. §3.2.2). Friedrich Bessel fut le premier en 1838 à mesurer une parallaxe stellaire (fig. 1.10).

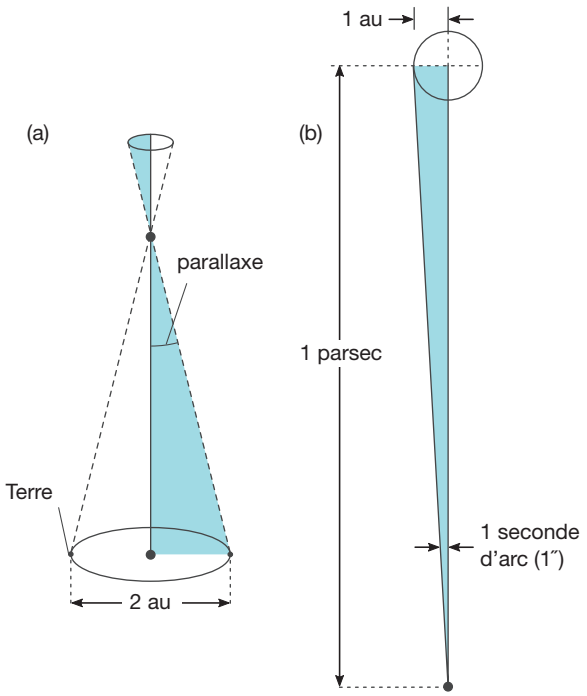


Figure 1.10. La mesure de la distance des étoiles les plus proches par parallaxe. Le rayon de l'orbite terrestre vaut une unité astronomique (symbole au).

De la même manière qu'il n'est pas nécessaire de monter au sommet des montagnes pour mesurer leur hauteur, on peut, sans quitter la Terre, estimer très correctement les distances des objets célestes pour peu que l'on dispose d'instruments de mesure suffisamment précis et de plusieurs points d'observation.

Pour les étoiles les plus proches, on utilise le diamètre de l'orbite terrestre autour du Soleil comme base et on mesure le mouvement apparent d'une étoile vue de la Terre à six mois d'intervalle. L'étoile la plus proche, Proxima du Centaure, est à un peu plus d'un parsec et la plupart des étoiles sont si éloignées que cette méthode a pendant longtemps été limitée à des distances de quelques dizaines de parsecs. L'avènement des mesures de parallaxes par des satellites dédiés (*Hipparcos* dans les années 1990 puis désormais *Gaia*, lancé en 2013) a permis de déterminer les parallaxes de plus de 100 000 étoiles pour *Hipparcos* et plusieurs centaines de millions d'astres pour *Gaia*.

Pour les étoiles plus lointaines, on utilise les propriétés remarquables de certaines étoiles variables. Par exemple, il existe une famille d'étoiles variables, appelées Céphéides, du nom de l'étoile δ de la constellation de Céphée, dont l'éclat varie périodiquement avec le temps et dont la période de variation est liée à la luminosité. La mesure de la période permet donc de connaître la quantité de lumière émise par l'étoile. La mesure de leur luminosité permet de connaître la quantité de lumière qui arrive sur Terre. La quantité de lumière décroissant comme le carré de la distance, on peut mesurer aisément cette distance. Cette méthode permet de mesurer la distance des galaxies les plus proches comme Andromède (fig. 1.17). D'autres étoiles variables sont aussi utilisées de la même manière. Ces méthodes sont efficaces pour mesurer les distances des astres jusqu'à plusieurs millions de parsecs.

Pour des galaxies encore plus lointaines, la méthode des Céphéides manque de précision. On essaye alors de reconnaître des objets très brillants et d'estimer la quantité de lumière qu'ils émettent. On estime par exemple que les étoiles les plus brillantes d'une galaxie ont la même luminosité intrinsèque d'une galaxie à l'autre puis, pour des distances encore plus grandes, on estime que les galaxies les plus brillantes d'un amas ont la même luminosité intrinsèque.

Parmi tous les phénomènes physiques utilisés pour connaître la distance des astres, il en est un qui joue un rôle particulièrement important. Il s'agit de l'effet Doppler-Fizeau du nom des physiciens qui l'ont mis en évidence au XIX^{e} siècle. L'expérience quotidienne nous apprend que la hauteur d'un son varie selon que la source du bruit s'approche de nous ou s'éloigne. Nous avons tous entendu ces variations du son au passage des voitures devant nous. Les ondes sonores d'un mobile qui s'approche de nous sont comprimées. La longueur d'onde est plus courte et donc la fréquence est élevée. Dans le cas contraire d'un mobile qui s'éloigne, elles sont étirées et la fréquence est plus basse. Il en est de même de la lumière : quand un objet s'approche de nous, la longueur d'onde de la lumière émise est plus courte, il est bleui. Un objet qui s'éloigne est rougi. Les radars qui mesurent la vitesse des voitures au bord des routes utilisent ce phénomène. En mesurant le décalage des raies spectrales des galaxies, les astronomes ont observé que les galaxies s'éloignaient de nous d'autant plus vite qu'elle étaient plus lointaines. Cette expansion de l'Univers, prédite par Georges Lemaître dans le courant des années 1920 et suggérée par les données observationnelles à sa disposition, puis confirmée quelques années plus tard par Edwin Hubble, permet de mesurer la distance d'objets très éloignés dans l'Univers.

L'expansion de l'Univers se traduit par le fait que les raies du spectre des galaxies les plus lointaines sont toutes décalées vers le rouge et que ce décalage est d'autant plus grand qu'elles sont plus éloignées. La vitesse v de récession de ces galaxies est proportionnelle à la distance d d'une galaxie : $v = H_0 d$ (fig. 1.11). La constante de proportionnalité H_0, appelée « constante de Hubble » (au sens où c'est la même pour toutes les galaxies[3]), correspond à l'inverse d'un temps (c'est le rapport d'une vitesse à une distance). En supposant que l'expansion de l'Univers a lieu à un rythme constant (ce qui n'est pas le cas en pratique, nous en parlerons plus loin), la quantité $1/H_0$ représente le temps depuis lequel l'expansion a commencé. Après de nombreuses polémiques pendant plus de 70 ans, la valeur de H_0 est maintenant connue avec une bonne précision : $H_0 = 68\ \mathrm{km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}}$ à un ou deux pourcents près. L'inverse de H_0 donne un ordre de grandeur de l'âge de l'Univers, entre 10 et 15 milliards d'années.

En utilisant ainsi de proche en proche une série de méthodes dont chacune est adaptée aux distances mesurées, on est en mesure d'estimer les distances des astres. Cependant, ces méthodes, dont le principe est simple, sont en fait très délicates dans leur application, car chaque méthode est adaptée à une échelle de distance donnée et calibrée sur la précédente (par exemple, la luminosité absolue des Céphéides est connue par les rares Céphéides dont on connaît les distances par la méthode des parallaxes), et il n'est pas rare que les incertitudes d'une méthode se répercutent sur les suivantes. De nos jours, la précision des mesures de distances est, selon la méthode employée, de l'ordre de 10 %. On obtient ainsi l'échelle des distances dans l'Univers (fig. 1.12). Des progrès considérables sur la nature et l'évolution des étoiles et des galaxies ont été obtenus dès que les mesures de distances ont été maîtrisées.

3. Le terme reste néanmoins ambigu car la valeur de cette « constante » change au cours du temps, aussi les cosmologistes lui préfèrent-ils l'appellation de « paramètre de Hubble ».

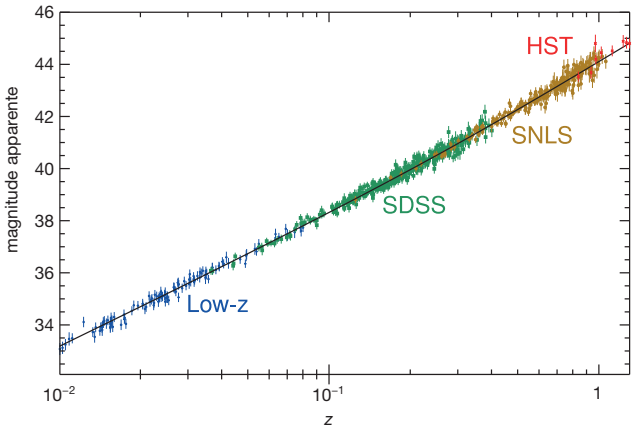


Figure 1.11. La loi de Hubble-Lemaître. La vitesse d'éloignement v d'une galaxie est proportionnelle à sa distance d. Ici sont représentées les luminosités d'un certain type d'explosion d'étoiles, appelées supernovæ thermonucléaires (cf. §7.3), en fonction de leur vitesse d'éloignement. En ordonnée, le flux reçu, inversement proportionnel à la distance, est codé par ce que l'on appelle le module de distance, quantité égale à une constante additive près à la magnitude apparente (cf. §8.9) qui est une échelle logarithmique. En abscisse est indiqué le décalage vers le rouge z (cf. §5.6), proportionnel à la vitesse de récession des galaxies hôtes de ces supernovæ. Le décalage vers le rouge est représenté de façon logarithmique afin de compenser la dépendance logarithmique de la magnitude. Les intitulés des codes de couleurs indiquent les noms des programmes d'observation dédiés utilisés pour identifier ces explosions. Les écarts à la loi linéaire à grand décalage vers le rouge donnent des informations sur l'histoire de la dynamique de l'expansion, ce qui permet de déterminer le contenu matériel de l'Univers (cf. §5.2 et 5.4). *Crédit : ESO & M. Betoule* et al., A&A, *568, A22 (2014)*

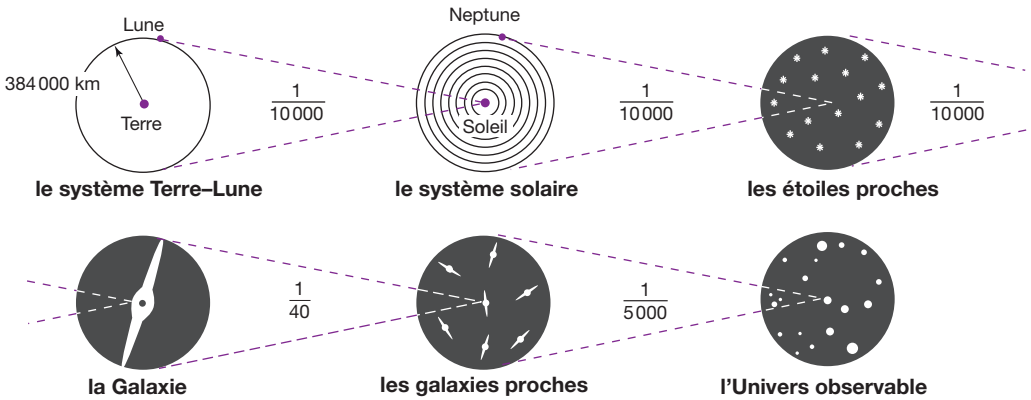


Figure 1.12. L'échelle des distances dans l'Univers. Ces six cercles représentent successivement les domaines où interviennent la géophysique, la planétologie, la physique stellaire, la physique galactique, la physique extragalactique et la cosmologie. On passe successivement de l'un à l'autre en corrigeant l'échelle par des facteurs de l'ordre de 10 000, 10 000, 10 000, 40 et 5 000, soit un facteur total de 2×10^{17}.

4.3 La mesure des âges

Quatre grandes méthodes permettent de mesurer les âges : la mesure des âges des éléments par datation radioactive, l'étude de l'évolution stellaire, celle des amas globulaires et celle de l'expansion de l'Univers. Ces quatre approches donnent des valeurs compatibles entre elles. Le début de l'expansion a eu lieu il y a un peu moins de quinze milliards d'années, les galaxies et les amas de galaxies se sont formés peu de temps après et les générations d'étoiles se succèdent depuis. La durée de vie d'un amas globulaire (concentration très dense d'étoiles vieilles formant un petit satellite d'une galaxie) est, en première approximation, proportionnelle au nombre d'étoiles de l'amas. Les amas globulaires les plus anciens comprennent plusieurs centaines de milliers d'étoiles et ont un âge de plus de dix milliards d'années (fig. 1.13).

Figure 1.13. L'amas globulaire M3. Cet amas d'étoiles est un des plus grands de notre Galaxie. Situé à 34 000 années-lumière de nous, il contient environ 500 000 étoiles. Son âge est estimé à 8 milliards d'années. *Crédit : A. Block/Mount Lemmon SkyCenter/University of Arizona*

Dates	Événements	Âge réel (en années)	Dans cet ouvrage
Avant le mois de décembre			
1er janvier, 0 h 00	Début de l'expansion de l'Univers (Big Bang)	$13{,}8 \times 10^9$	Chapitre 1, § 5.6
1er janvier, 0 h 00 + 13 ns	Fin de la nucléosynthèse primordiale	$13{,}8 \times 10^9$	Chapitre 1, § 5.6
1er janvier, 0 h 14	Émission du fond diffus cosmologique	$13{,}8 \times 10^9$	Chapitre 1, § 5.5
5 janvier	Allumage des premières étoiles	$13{,}6 \times 10^9$	Chapitre 1, § 5.6
11 avril	Formation du disque de notre Galaxie	$1{,}0 \times 10^{10}$	Chapitre 1, § 4.5
21 juillet	Accélération de l'expansion de l'Univers	$6{,}2 \times 10^9$	Chapitre 1, § 5.4
2 septembre	Début de la formation du système solaire	$4{,}55 \times 10^9$	Chapitre 3, § 3.5
3 septembre	Fin de la formation de la Terre	$4{,}5 \times 10^9$	Chapitre 3, § 4.5
21 septembre	Apparition de la vie sur Terre (?)	$3{,}85 \times 10^9$	
22 septembre	Formation des plus vieilles roches connues sur Terre	$3{,}8 \times 10^9$	
1er octobre	Plus vieux fossiles	$3{,}46 \times 10^9$	
26 octobre	Fin de la croissance de la croûte continentale primitive	$2{,}5 \times 10^9$	
28 octobre	Oxygénation de l'atmosphère terrestre	$2{,}45 \times 10^9$	Chapitre 3, § 10.2
22 novembre	Invention du sexe par les microorganismes	$1{,}5 \times 10^9$	
Décembre			
17, 16 h	Explosion cambrienne. Début de l'ère primaire	541×10^6	
20, 2 h	Les plantes colonisent les terres	450×10^6	
22, 5 h	Premiers amphibiens	370×10^6	
25, 15 h	Premiers dinosaures	340×10^6	
26, 4 h	Premiers mammifères	320×10^6	
24, 14 h	Formation de la Pangée	280×10^6	
25, 8 h	Début de l'ère secondaire	253×10^6	
25, 12 h	Fin de la croissance de la croûte continentale	245×10^6	
27, 6 h	Dislocation de la Pangée	180×10^6	
30, 3 h	Premiers primates	70×10^6	
30, 6 h	Disparition des dinosaures. Début de l'ère tertiaire	66×10^6	Chapitre 3, § 8.5
31 décembre			
21 h	Australopithèques	$4{,}5 \times 10^6$	
22 h 53 min	Premiers hommes (*Homo habilis*)	$1{,}75 \times 10^6$	
23 h 40 min	Domestication du feu	500 000	
23 h 58 min 30 s	*Homo sapiens*	40 000	
23 h 59 min 37 s	Révolution néolithique – Invention de l'agriculture	10 000	
23 h 59 min 44 s	Invention de l'écriture	7 000	
23 h 59 min 55 s	Géométrie d'Euclide, physique d'Archimède, astronomie de Ptolémée	2 000	Chapitre 1, § 2.1
23 h 59 min 59 s	Lunette astronomique	410	Chapitre 1, § 2.4
0,16 s avant minuit	Conquête spatiale	70	Chapitre 2, § 2
Minuit	*Bonne lecture !*	–	Chapitre 1 à 3

Tableau 1.2. Histoire de l'Univers (à droite) ramenée à une année (à gauche), avec différentes étapes étudiées en sciences de la Terre et de l'Univers. Une journée correspond à 38 millions d'années, une heure à 1,6 million d'années, une minute à 26 000 ans et une seconde à quatre siècles et demi. Tableau inspiré du calendrier cosmique inventé par Carl Sagan (1934–1996), et mis à jour en fonction des datations récentes. Les éventuelles incertitudes sont données dans les chapitres correspondants.

Pour illustrer l'histoire de l'Univers, on peut la résumer en un calendrier idéal d'une année fictive dans laquelle l'histoire aurait commencé le 1er janvier alors que nous serions le 31 décembre à minuit (tableau 1.2). Dans cette correspondance, une seconde du calendrier s'identifie à un trente-millionième de l'âge de l'Univers, soit 440 ans environ.

4.4 Le milieu interstellaire et les molécules interstellaires

L'espace entre les étoiles, le milieu interstellaire, est loin d'être vide. Il contient un mélange de matériau primitif, issu des premiers instants de l'Univers, et de matériau éjecté par les étoiles géantes, les novæ, les supernovæ et les nébuleuses qui entourent certaines étoiles. Composé de gaz et de poussières, le milieu interstellaire a une structure et une dynamique très complexes. Le matériau présent dans le milieu interstellaire peut être considéré comme la matière première des futures étoiles.

Ce milieu n'étant que faiblement chauffé par les étoiles, il est très froid, et émet son rayonnement thermique à des longueurs d'ondes plus importantes que celles de la lumière visible. L'observation dans les domaines radio, millimétrique et infrarouge fournit de nombreuses informations précieuses sur les conditions physiques de ce milieu. Le rougissement du rayonnement visible à la traversée des poussières interstellaires qui dispersent la lumière bleue plus efficacement que la lumière rouge, ainsi que l'absorption du rayonnement émis derrière d'immenses nuages de poussières, traduisent la présence d'immenses quantités de grains de poussières. Ces grains de poussières ont des dimensions de l'ordre de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Certains sont constitués de carbone pur, d'autres sont de petits morceaux rocheux, d'autres possèdent des glaces d'eau, de méthane ou d'ammoniac.

Des nuages moléculaires très denses sont composés pour l'essentiel de molécules d'hydrogène et sont détectés, dans le domaine millimétrique, grâce à la molécule CO. Ces nuages moléculaires ont une chimie passionnante, fort différente de celle observée sur Terre. Certaines de ces molécules, instables dans les laboratoires terrestres, comme le radical OH (radical hydroxyle), sont abondantes dans le gaz interstellaire. Dans les conditions de densité très faible qui règnent dans ce milieu, ces molécules peuvent survivre longtemps et la chimie des gaz raréfiés peut être étudiée beaucoup plus aisément que sur Terre. Les grains interstellaires peuvent jouer un rôle important de catalyseur, au point qu'il semble possible que certaines molécules nécessaires à l'apparition de la vie aient été synthétisées dans l'espace interstellaire. Plus généralement, la vie sur Terre est-elle apparue uniquement à la suite des réactions chimiques qui se sont développées à la surface de la Terre ou bien a-t-elle fait intervenir un enrichissement par des molécules synthétisées dans le milieu interstellaire ? Cette question est pour l'instant complètement ouverte. Pour l'heure, ce sont près de 200 molécules distinctes (chiffre début 2018) qui ont été détectées dans le milieu interstellaire ou les enveloppes circumstellaires (couches externes d'une étoile soufflées par le vent stellaire, cf. § 6.5). Un aperçu de ces molécules est donné dans le tableau 1.3. Une des molécules les plus activement recherchées est la glycine (NH_2CH_2COOH), le plus simple des acides aminés, mais malgré plusieurs annonces de détection, la présence de celle-ci dans le milieu interstellaire n'a jamais été confirmée. Cependant, sa présence a été détectée sans ambiguïté sur la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko ainsi que dans certaines météorites dans lesquelles on trouve parfois, du reste, de très nombreuses molécules organiques complexes.

Les nuages moléculaires sont considérés comme le berceau de la formation des étoiles. Nous en reparlerons plus loin (chapitre 3, § 3.13 et § 4.1) à propos de la formation du système solaire.

4.5 La Galaxie

La Voie lactée, si spectaculaire à voir au cours d'une belle nuit claire, est la vue de l'intérieur du système d'étoiles auquel nous appartenons, notre Galaxie[4]. Nous manquons de recul pour étudier notre Galaxie, aussi avons-nous paradoxalement une meilleure vue des autres galaxies. Si nous pouvions « sortir » de notre Galaxie pour l'admirer de l'extérieur, nous lui trouverions une certaine ressemblance avec les bras spiraux de notre voisine, la galaxie d'Andromède, et une ressemblance encore plus forte avec la galaxie NGC 6744. Ce n'est que dans les années 1930 que la situation du Soleil au sein de la Galaxie a été comprise, et il a fallu attendre la fin du XXe siècle pour que les astronomes réussissent à avoir une bonne idée de la structure d'ensemble de notre Galaxie, de ses bras spiraux, et de la présence d'une barre centrale. Loin d'être au milieu, le Soleil est situé à un peu plus de 25 000 années-lumière du centre (fig. 1.14). La matière visible de notre Galaxie s'étale en un disque d'environ 1 000 années-lumière d'épaisseur et 120 000 années-lumière de diamètre, contenant quelques centaines de milliards d'étoiles, et possédant un renflement central appelé bulbe. De notre point d'observation et dans le domaine visible, seule une toute petite partie des étoiles de notre Galaxie est observable, les autres étant masquées essentiellement par les poussières interstellaires. Dans le domaine infrarouge proche, le rayonnement peut passer à travers les poussières et nous avons une bien meilleure vue de l'ensemble du disque (fig. 1.15).

4. Écrite avec un G majuscule pour la différencier d'une galaxie quelconque (avec un g minuscule). Le terme de Voie lactée permet de limiter les risques de confusion.

2 atomes			3 atomes		
H_2	NS	SiH (?)	C_3	MgNC	AlOH
AlF	NaCl	PO	C_2H	N_2H^+	H_2O^+
AlCl	OH	AlO	C_2O	N_2O	H_2Cl^+
C_2	PN	OH^+	C_2S	NaCN	KCN
CH	SO	CN^-	CH_2	OCS	FeCN
CH^+	SO^+	SH^+	HCN	SO_2	HO_2
CN	SiN	SH	HCO	*c*-SiC_2	TiO_2
CO	SiO	HCl^+	HCO^+	CO_2	C_2N
CO^+	SiS	TiO	HCS^+	NH_2	Si_2C
CP	CS	ArH^+	HOC^+	H_3^+	HS_2
SiC	HF	N_2	H_2O	SiCN	HCS
HCl	HD	NO^+ (?)	H_2S	AlNC	HSC
KCl	FeO (?)	NS^+	HNC	SiNC	
NH	O_2		HNO	HCP	
NO	CF^+		MgCN	CCP	

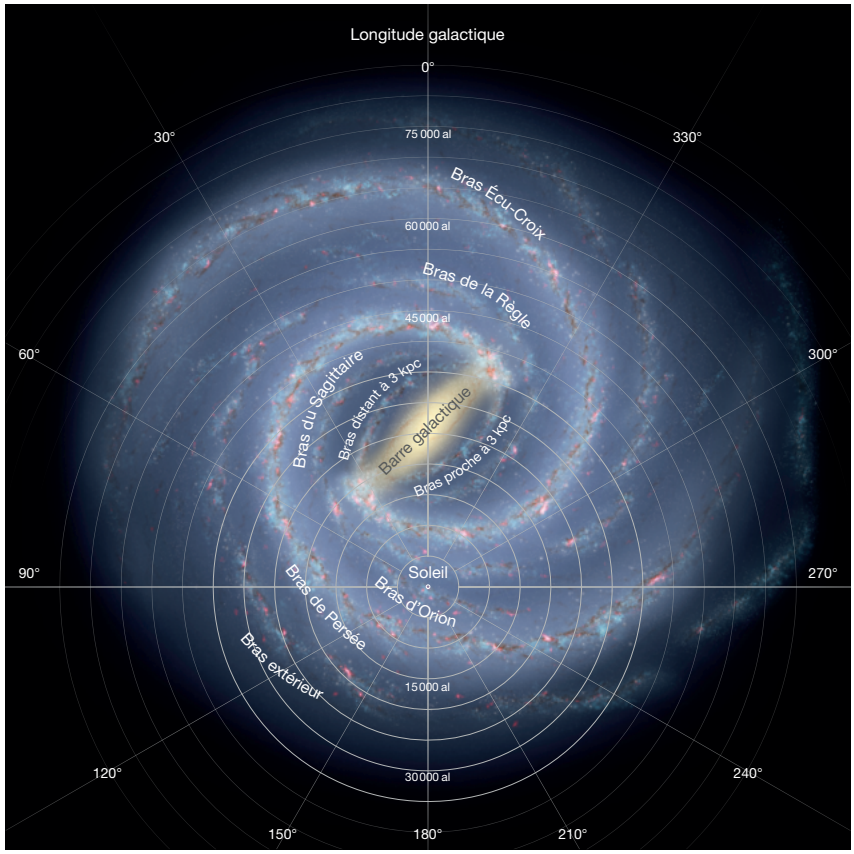
4 atomes		5 atomes		6 atomes	
c-C_3H	H_2CS	C_5	SiH_4	C_5H	HNCHCN
l-C_3H	H_3O^+	C_4H	H_2COH^+	*l*-H_2C_4	SiH_3CN
C_3N	*c*-SiC_3	C_4Si	C_4H^-	C_2H_4	
C_3O	CH_3	*l*-C_3H_2	HC(O)CN	CH_3CN	
C_3S	C_3N^-	*c*-C_3H_2	HNCNH	CH_3OH	
C_2H_2	PH_3	H_2CCN	NH_4^+	CH_3SH	
NH_3	HCNO	CH_4	CH_3O	HC_3NH^+	
HCCN	HOCN	HC_3N	H_2NCO^+ (?)	HC_2CHO	
$HCNH^+$	HSCN	HC_2HC	$NCCNH^+$	NH_2CHO	
HNCO	H_2O_2	HCOOH	CH_3Cl	C_5N	
HNCS	C_3H^+	H_2CNH		*l*-HC_4H	
$HOCO^+$	HMgNC	H_2C_2O		*c*-H_2C_3O	
H_2CO	HCCO	H_2NCN		H_2CCNH (?)	
H_2CN		HNC_3		C_5N^-	

7 atomes	8 atomes	9 atomes	10 atomes	11 atomes	12 atomes et plus
C_6H	CH_3C_3N	CH_3C_4H	CH_3C_5N	HC_9N	*c*-C_6H_6
CH_2CHCN	$HC(O)OCH_3$	CH_3CH_2CN	$(CH_3)_2CO$	CH_3C_6H	*n*-C_3H_7CN
CH_3C_2H	CH_3COOH	$(CH_3)_2O$	$(CH_2OH)_2$	C_2H_5OCHO	*i*-C_3H_7CN
HC_5N	C_7H	CH_3CH_2OH	CH_3CH_2CHO	$CH_3OC(O)CH_3$	$C_2H_5OCH_3$ (?)
CH_3CHO	C_6H_2	HC_7N	CH_3CHCH_2O		*c*-C_6H_5CN
CH_3NH_2	CH_2OHCHO	C_8H	CH_3OCH_2OH		C_{60}
c-C_2H_4O	*l*-HC_6H	$CH_3C(O)NH_2$			C_{60}^+
H_2CCHOH	CH_2CHCHO (?)	C_8H^-			C_{70}
C_6H^-	CH_2CCHCN	C_3H_6			
CH_3NCO	H_2NCH_2CN	CH_3CH_2SH (?)			
HC_5O	CH_3CHNH	CH_3NHCHO (?)			
	CH_3SiH_3	HC_7O			

Tableau 1.3. Liste des molécules et ions identifiés dans le milieu interstellaire début 2019. La plupart n'ont été détectés que dans notre Galaxie, mais sont selon toute vraisemblance également présents dans les autres galaxies. Les points d'interrogation indiquent des molécules dont la détection n'est pas encore considérée comme certaine. Le nombre de molécules présentes est sans doute bien plus grand, mais les limites sur la connaissance de leur spectre empêche pour l'heure la détection de nombre d'entre elles.

Source : https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules

(a)



(b)

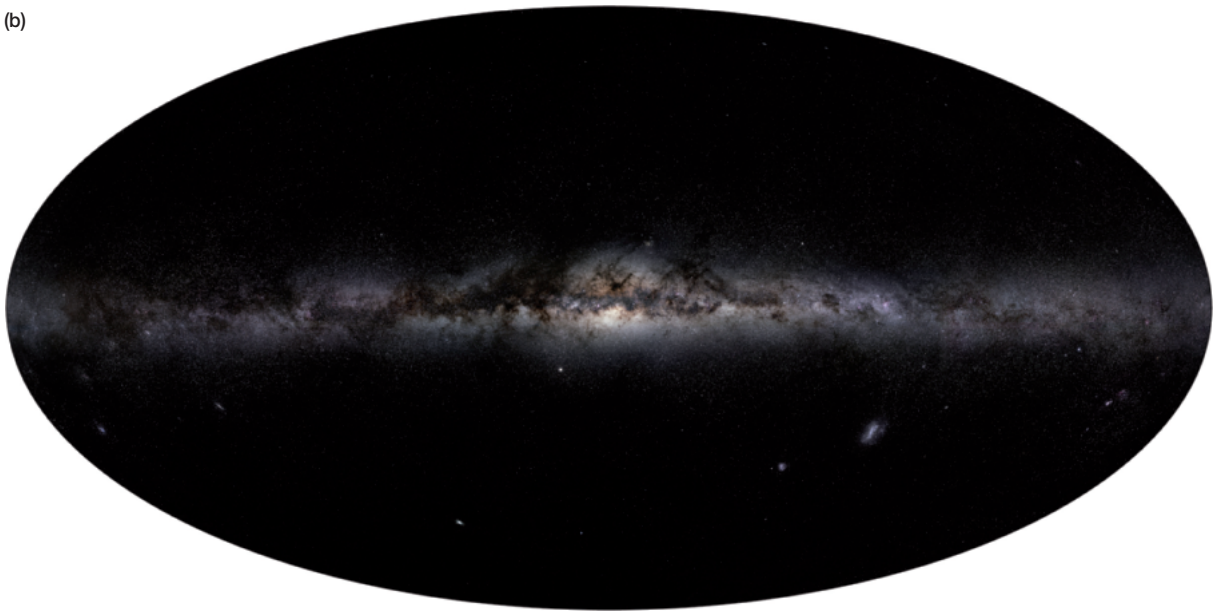


Figure 1.14. La Galaxie.

(a) Schéma de notre Galaxie, vue du « dessus », avec position du Soleil, la barre centrale et les principaux bras spiraux.

(b) Partie directement observable en visible, avec notamment le bulbe central. Les taches floues dans la partie basse sont les Pléiades et la galaxie d'Andromède (à gauche), le Petit et le Grand Nuage de Magellan (à droite).

Crédit : NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt ; ESO/S. Brunier

Jean-Yves Daniel | Alain Riazuelo

Sciences de l'Univers

Du Big Bang aux exoplanètes

Consacré à l'astronomie et à l'astrophysique, cet ouvrage est conçu comme une introduction complète à l'étude de la Terre considérée sous son aspect planétaire. Elle est ainsi replacée dans le cadre général d'un Univers en évolution depuis 13,8 milliards d'années, dans lequel elle est apparue il y a 4,5 milliards d'années en même temps que le système solaire qui l'abrite et avec lequel elle évolue en symbiose depuis cette époque. Les nombreuses thématiques abordées dans cet ouvrage permettent notamment de poser le cadre conceptuel global qui introduit naturellement et plus spécifiquement l'étude de notre planète par les sciences de la Terre dans d'autres ouvrages.

Cet ouvrage représente l'évolution de la première partie du manuel *Sciences de la Terre et de l'Univers* – 3e édition, paru chez Vuibert en 2014, dont le regretté André Brahic était le rédacteur principal. Réaliser *Sciences de l'Univers* se veut être aussi un hommage des auteurs à la mémoire de leur défunt et éminent collègue et ami.

- Le premier chapitre, « La place de la Terre dans l'Univers », évoque en particulier la cosmologie et donc l'histoire de l'Univers, dans l'optique d'expliquer la formation des grandes structures qu'il contient et, donc, à plus petite échelle, des galaxies, puis celle des étoiles.
- Le deuxième chapitre, « Le système solaire et les exoplanètes », est consacré à un survol du système solaire dans toute sa diversité, pour déboucher sur la révolution pour l'astronomie que constitue la découverte en nombre croissant de systèmes planétaires autour d'autres étoiles que notre Soleil.
- Le troisième chapitre, « La formation et l'évolution du système solaire », aborde les questions complexes de l'histoire et du devenir de ce système, préalable indispensable à l'abord de ces questions pour la Terre elle-même.

Pour éviter à l'ouvrage un aspect trop formel, la place des équations et des formules a été réduite quand cela était possible et sans appauvrir le contenu scientifique de l'ouvrage. Ainsi, les parties les plus techniques ont fait l'objet de fiches et encadrés spécifiques. Les auteurs ont enrichi leurs propos d'un grand nombre de schémas et d'illustrations en couleur et complété les chapitres par des énoncés d'exercices dont les corrigés figurent à la fin de l'ouvrage.

Les auteurs

Normalien, docteur d'État en astrophysique, dont les travaux ont porté sur la polarisation des enveloppes circumstellaires, **Jean-Yves Daniel** est doyen honoraire de l'inspection générale de l'Éducation nationale, qu'il a dirigée de 2012 à 2016. Il a été professeur associé à l'université de Marne-la-Vallée et est actuellement collaborateur bénévole à l'Institut d'astrophysique de Paris.

Polytechnicien, docteur en astrophysique, **Alain Riazuelo** est chercheur au CNRS et astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris. Ses travaux portent principalement sur la formation des grandes structures, la topologie de l'Univers et les trous noirs.

- **Nombreux schémas et illustrations en couleur**
- **Encadrés techniques et fiches pédagogiques**
- **Exercices d'application intégralement corrigés**

ISBN : 978-2-8073-2912-6

9 782807 329126

deboeck SUPÉRIEUR

www.deboecksuperieur.com

Conception graphique : Primo&Primo®