

Éléments de géologie

Éléments de géologie

17^e édition

Maurice Renard

Professeur émérite de l'Institut des Sciences et de
la Terre de Paris (Sorbonne Université)

Yves Lagabrielle

Directeur de recherche au CNRS
au laboratoire Géosciences Rennes (Université Rennes 1)

Erwan Martin

Maître de conférences de l'Institut des Sciences et de
la Terre de Paris (Sorbonne Université)

Marc de Rafélis

Professeur au laboratoire GET (Géosciences Environnement Toulouse
de l'Université Paul Sabatier (Toulouse 3))

Sylvie Leroy

Directrice de Recherche au CNRS à l'institut des Sciences et de
la Terre de Paris (Sorbonne Université)

Nicolas Coltice

Professeur des universités à l'École Normale Supérieure de Paris

DUNOD

Crédits photographiques

p. 1 : le sommet du Mauna Kea, 4205 m à Hawaï regroupe un ensemble d'observatoires internationaux © M. Lagabrielle. p. 69 : vallée encaissée recoupant le socle de la chaîne himalayenne © S. Guillot. p. 255 : falaise côtière de Big Island, Hawaï, montrant les coulées des éruptions les plus récentes © M. Lagabrielle. p. 339 : le Cervin. Le sommet appartient à la plaque apulienne et la base est européenne © B. Corre. p. 459 : Piton de la fournaise (Réunion) en octobre 2006 © A. Peltier. p. 615 : baie de Baffin (Groenland) lors de la mission ArcticNet le 26 juillet 2014 à bord du NGCC Amundsen © C. Aubry/Université Laval – Canada. p. 781 : panorama des terrains continentaux du Danien affleurant sur la colline d'Albas (Corbières, France) © D. Desmares/Sorbonne Université. p. 969 : sédimentation pélagique alternante d'âge Pliocène de la coupe de Punta di Maiata (Scala di turchi, Agrigente, Sicile) © M. de Rafélis/Toulouse 3. Photo de couverture : Vue de la falaise et du rocher à Bell Island Light House, Terre-Neuve, Canada. ©Agnus.AdobeStock

Les sites Internet mentionnés dans cet ouvrage n'engagent pas la responsabilité de Dunod Éditeur, notamment quant au contenu de ces sites, à leur éventuel dysfonctionnement ou à leur indisponibilité d'accès. Dunod Éditeur ne gère ni ne contrôle en aucune façon les informations, produits ou services contenus dans ces sites tiers. Il en est de même des liens externes accessibles depuis le site dunod.com.

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--



© Dunod 2002, 2005, 2011, 2015, 2018, 2021 pour la 17^e édition

© Armand Colin, Masson 1965, 1997 pour les précédentes éditions

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff Cedex

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-082831-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	XI	4.5 Les anomalies de la gravité	93
		4.6 L'interprétation des anomalies gravimétriques : isostasie et mouvements verticaux de la lithosphère	96
PARTIE I – La Terre : une planète dans l'Univers			
Chapitre 1 • L'architecture de l'Univers	2	Chapitre 5 • Composition et histoire de la Terre solide : géochimie globale et géochronologie	104
1.1 L'architecture de l'Univers	3	5.1 Structure interne et composition chimique du globe : évolution des connaissances	105
1.2 Une architecture hiérarchisée	5	5.2 La géochimie : objectifs et méthodes d'études	111
1.3 L'expansion de l'Univers et le « Big Bang »	7	5.3 La radiochronologie : dater les événements géologiques	116
1.4 Les dimensions de l'Univers	9	5.4 Réservoirs géochimiques, différenciation mantellique et origine des continents	125
1.5 Le fond cosmique de rayonnement radio ou rayonnement fossile (fond diffus cosmologique)	12		
1.6 L'âge de l'Univers	15	Chapitre 6 • Structure du globe et mobilité de la lithosphère : sismologie et géomagnétisme	135
		6.1 La sismologie	136
Chapitre 2 • La nucléosynthèse	17	6.2 Le géomagnétisme	185
2.1 La structure de la matière : particules, noyaux et atomes	17	Chapitre 7 • La tectonique des plaques lithosphériques	207
2.2 Nucléosynthèse et évolution de l'Univers	21	7.1 La dérive des continents	208
		7.2 L'expansion des fonds océaniques	212
Chapitre 3 • Le Système solaire	31	7.3 La tectonique des plaques	214
3.1 La structure du Système solaire	31	7.4 L'analyse du mouvement des plaques : notions de cinématique	219
3.2 La naissance du Système solaire	37		
3.3 Le Soleil	46	Chapitre 8 • Synthèse sur la dynamique globale : mobilité de la lithosphère et de l'asthénosphère	236
3.4 Les différentes planètes	48	8.1 Deux régimes dynamiques bien différents	237
		8.2 Lithosphère-Asthénosphère-Mésosphère	237
PARTIE II – La dynamique de la Terre solide : géochimie et géophysique globales			
Chapitre 4 • Forme et structure de la Terre solide : géodésie et gravimétrie	70	8.3 La lithosphère : une enveloppe rigide visco-élastique	238
4.1 Forme et surfaces remarquables de la Terre : les apports de la géodésie	72	8.4 Le manteau asthénosphérique : le fluage plastique et la convection	243
4.2 Les enveloppes externes de la terre solide : croûte et manteau, lithosphère et asthénosphère	76	8.5 Dynamique du manteau et mouvements verticaux : la topographie dynamique	250
4.3 La mesure de la pesanteur terrestre : la gravimétrie	79	8.6 Évolution des plaques au cours de l'histoire de la Terre	251
4.4 La représentation gravimétrique de la Terre : L'ellipsoïde de référence et le géoïde	83		

PARTIE III – La dynamique de la lithosphère océanique

Chapitre 9 • Exploration sous-marine et géologie des fonds océaniques **256**

- 9.1 L'exploration sous-marine 257
- 9.2 Morphologie des fonds sous-marins 262

Chapitre 10 • La lithosphère océanique : plaines abyssales, bassins arrière-arc et points chauds **269**

- 10.1 Les plaines abyssales 269
- 10.2 Les bassins océaniques marginaux
ou arrière-arcs 272
- 10.3 Les îles océaniques, rides et points chauds 274

Chapitre 11 • Les dorsales océaniques **279**

- 11.1 Bathymétrie et géophysique des dorsales 279
- 11.2 Les processus magmatiques au niveau des
dorsales. Comparaison avec les ophiolites 284
- 11.3 Dorsales lentes et dorsales rapides 290
- 11.4 La segmentation des dorsales 295
- 11.5 Les zones de fracture et les failles
transformantes 299
- 11.6 Les structures particulières : propagateurs,
microplaques, jonctions triples, interaction
avec les points chauds 302
- 11.7 L'hydrothermalisme des dorsales 303

Chapitre 12 • Les marges continentales et océaniques **307**

- 12.1 Les marges stables 308
- 12.2 Les marges actives 322

PARTIE IV – La déformation de la lithosphère continentale

Chapitre 13 • La rhéologie des ensembles géologiques **340**

- 13.1 Force et contrainte : le tenseur
des contraintes 340
- 13.2 Déformation expérimentale 342
- 13.3 Relations contrainte-déformation 344
- 13.4 Déformation des ensembles géologiques 349
- 13.5 Conclusion 356

Chapitre 14 • Tectonique analytique : étude des objets déformés aux différentes échelles **358**

- 14.1 La déformation cassante 359
- 14.2 Les plis 369
- 14.3 Chevauchements et nappes de charriage,
rampes et duplex 375

- 14.4 Déformation des roches profondes 379
- 14.5 La représentation géométrique des objets
tectoniques 387
- 14.6 Tectoniques superposées et héritage 389
- 14.7 Tectonique et morphologie 390

Chapitre 15 • Des bassins sédimentaires aux chaînes de montagne **396**

- 15.1 Bassins et rifts 399
- 15.2 Les chaînes de subduction 406
- 15.3 Les chaînes d'obduction 412
- 15.4 Les chaînes de collision 419
- 15.5 Une chaîne dite intracontinentale :
les Pyrénées 439
- 15.6 Un problème récurrent dans les chaînes
de subduction-collision : l'exhumation
des unités de haute pression 444
- 15.7 Tectonique de l'Europe préalpine 451
- 15.8 Conclusion 455

PARTIE V – Les constituants endogènes des enveloppes solides de la Terre : roches ignées et roches métamorphiques

Chapitre 16 • Minéralogie **460**

- 16.1 Caractéristiques et propriétés des minéraux 460
- 16.2 Les principaux minéraux 469

Chapitre 17 • Les magmas : origine et diversité **481**

- 17.1 Le magmatisme sur Terre : répartition
géodynamique et causes 482
- 17.2 Les processus conduisant à la grande
variété des roches magmatiques 500
- 17.3 Le magmatisme au cours des périodes
géologiques 513

Chapitre 18 • Les roches magmatiques : textures, classification et mise en place **518**

- 18.1 Textures et classification des roches
magmatiques 519
- 18.2 Les roches plutoniques 525
- 18.3 Les roches volcaniques 532

Chapitre 19 • Le métamorphisme **576**

- 19.1 Notions principales, répartition du
métamorphisme 577
- 19.2 Structures des roches métamorphiques 585
- 19.3 Les facteurs du métamorphisme 587
- 19.4 Évolution métamorphique et trajet P-T-t 590
- 19.5 Métamorphisme et géodynamique 600

PARTIE VI – Les enveloppes fluides de la planète Terre : climat, paléoclimats, océanographie et hydrogéologie

Chapitre 20 • Le bilan thermique de la planète Terre 616

- 20.1 La Terre : un système thermique globalement en équilibre 616
- 20.2 Des sous-systèmes climatiques (surface terrestre vs atmosphère) en déséquilibre radiatif 618
- 20.3 Des déséquilibres énergétiques régionaux 619
- 20.4 Les circulations atmosphériques et océaniques : une redistribution de l'énergie à la surface de la Terre 620

Chapitre 21 • L'atmosphère 622

- 21.1 Composition de l'atmosphère terrestre 622
- 21.2 Structure de l'atmosphère 623
- 21.3 Les nuages 626
- 21.4 Origine et évolution de l'atmosphère 628
- 21.5 Les circulations atmosphériques et la zonation climatique 633
- 21.6 Des dispositifs climatiques régionaux 636

Chapitre 22 • Le contrôle astronomique du climat : la théorie de Milankovitch 641

- 22.1 Le cycle des saisons 641
- 22.2 La théorie astronomique du climat ou théorie de Milankovitch 643
- 22.3 La dissymétrie climatique des deux hémisphères terrestres 649

Chapitre 23 • L'océan : Propriétés physiques et chimiques de l'eau de mer 651

- 23.1 Un océan mondial ou des océans ? 652
- 23.2 Les propriétés de l'eau de mer 654
- 23.3 L'origine de l'eau sur Terre 656
- 23.4 La répartition des températures dans l'océan 660
- 23.5 La composition chimique de l'eau de mer 662
- 23.6 L'hydrothermalisme sous-marin 671
- 23.7 Les circulations océaniques 676
- 23.8 L'eustatisme : les variations absolues du niveau marin et notion de niveau marin relatif 687

Chapitre 24 • Les grandes étapes de l'histoire climatique de la Terre 692

- 24.1 Les méthodes de la paléoclimatologie 693
- 24.2 Les fluctuations climatiques de premier ordre 696
- 24.3 Les fluctuations climatiques de second ordre 697

- 24.4 Les fluctuations climatiques de troisième ordre 704
- 24.5 Les fluctuations climatiques de quatrième ordre 711
- 24.6 Synthèse des variations climatiques depuis le Mésozoïque 718

Chapitre 25 • Prévisions sur l'évolution du climat terrestre 721

- 25.1 La sortie de l'interglaciaire actuel 723
- 25.2 Deux scénarios climatiques liés à l'augmentation du CO₂ d'origine anthropique 724
- 25.3 Le Miocène et le Crétacé moyen, des analogues fossiles des deux scénarios 725
- 25.4 Le Pliocène, un analogue Fossile possible des prévisions du GIEC pour 2100 727

Chapitre 26 • Les eaux continentales : Notions d'hydrogéologie, de glaciologie et de géomorphologie 731

- 26.1 Les eaux de surface 732
- 26.2 Les eaux souterraines, éléments d'hydrogéologie 747
- 26.3 Glaciologie 760
- 26.4 Les ablations sans vecteurs organisés et l'évolution des versants 776

PARTIE VII – Sédimentologie : roches et environnements sédimentaires

Chapitre 27 • L'altération des continents et la production des constituants des sédiments 784

- 27.1 Les processus d'altération 785
- 27.2 Les mécanismes de l'altération soustractive à l'échelle du minéral et de la roche 790
- 27.3 Les altérations additives 801
- 27.4 Influence du relief sur la répartition des types d'altérations (additives vs. soustractives) 803
- 27.5 Les sols 805
- 27.6 L'érosion des continents 808
- 27.7 Le bilan des grands fleuves, transport particulière vs. transport dissous : une image de l'érosion mondiale 809

Chapitre 28 • Transport et sédimentation : figures et structures sédimentaires associées 812

- 28.1 Le transport par les eaux 813
- 28.2 Impact de l'hydrodynamisme sur les sédiments et figures sédimentaires associées aux modes de transport et de dépôt 822

Éléments de géologie

28.3	La classification granulométrique des roches sédimentaires	834	33.4	La caractérisation chimique de la matière organique sédimentaire	943
28.4	Le transport par le vent	839	33.5	Les principales roches carbonées	945
Chapitre 29 • Sédimentation et environnements continentaux		846	Chapitre 34 • Du sédiment à la roche : la diagenèse		952
29.1	La sédimentation lacustre et margino-littorale (lagunes)	846	34.1	Les facteurs de la diagenèse	952
29.2	La sédimentation fluviatile	856	34.2	La diagenèse siliceuse	957
29.3	Le domaine fluvio-marin : estuaires et deltas	860	34.3	La diagenèse carbonatée	959
Chapitre 30 • Sédimentation et environnements néritiques		865	PARTIE VIII – Notions de stratigraphie : aperçu de l'histoire de la vie et de la Terre		
30.1	La sédimentation carbonatée de plate-forme	867	Chapitre 35 • La stratigraphie et ses méthodes		972
30.2	La classification des roches carbonatées	875	35.1	Les principes de la stratigraphie	973
30.3	Récifs et bioconstructions	880	35.2	La lithostratigraphie	976
30.4	Les plates-formes carbonatées actuelles	886	35.3	La biostratigraphie	979
30.5	Modèles et profils de dépôt, analyse séquentielle	889	35.4	La radiochronologie	983
30.6	La sédimentation phosphatée	893	35.5	Cyclostratigraphie, dendrochronologie et sclérochronologie, téphrochronologie, thermochronologie	984
Chapitre 31 • Sédimentation gravitaire et environnements du talus		896	35.6	La magnétostratigraphie	988
31.1	Les phénomènes gravitaires	896	35.7	La chimiostratigraphie	989
31.2	Les séquences gravitaires	900	35.8	La stratigraphie séquentielle : une approche synthétique de la stratigraphie	989
31.3	Les séries gravitaires	903	35.9	L'échelle stratigraphique	1003
Chapitre 32 • Sédimentation et environnements pélagiques		910	Chapitre 36 • Géochimie sédimentaire : chimiostratigraphie		1010
32.1	La sédimentation pélagique carbonatée	911	36.1	Signal géochimique primaire vs. signal diagénétique	1011
32.2	La sédimentation pélagique argileuse	921	36.2	Le rapport isotopique de l'oxygène	1012
32.3	La sédimentation pélagique siliceuse	922	36.3	Le rapport isotopique du carbone	1029
32.4	La sédimentation océanique : un témoin de la mobilité lithosphérique	924	36.4	Le rapport isotopique du strontium (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)	1034
32.5	Le contrôle climatique de la sédimentation pélagique : les fluctuations de la teneur en CaCO ₃ des carbonates pélagiques et les rythmes sédimentaires de type Milankovitch	925	36.5	Les éléments traces	1036
32.6	Les séries pélagiques alternantes	927	Chapitre 37 • Origine, premiers stades et crises de la vie sur Terre		1046
32.7	Les séries pélagiques anciennes	930	37.1	Les hypothèses sur les mécanismes et les lieux d'origine de la vie terrestre	1047
32.8	Le bilan de la sédimentation carbonatée marine	931	37.2	L'évolution de la biosphère : crises et radiations	1062
Chapitre 33 • Sédimentation de la matière organique		935	Chapitre 38 • Le Quaternaire et l'émergence de l'Homme		1078
33.1	La matière organique continentale	935	38.1	Chronologie et événements du Quaternaire	1078
33.2	La production de matière organique dans l'océan	936	38.2	Émergence de l'homme	1083
33.3	Les modalités de la conservation de la matière organique	938	38.3	Les industries humaines	1099
			Bibliographie et sites WEB		1103
			Index		1109

La présente édition est dédiée à la mémoire de Charles Pomerol qui fit tant pour que les jeunes apprennent et aiment la géologie et qui m'écrivait lors de la 9^e édition :

ÉLÉMENTS DE GÉOLOGIE

A Maurice Renard,
avec mes remerciements pour avoir fait bénéficier la ligne
d'une cure de jeunesse et mes vœux ardents
pour qu'il puisse, dans une vingtaine d'années,
le rajeunir pareillement grâce à la même amicale
collaboration d'un de ses continuateurs, assurant ainsi
aux "Éléments de géologie" une pérennité centenaire...
en ton amical hommage.

Pomerol

4. XI. 89

Maurice Renard

AVANT-PROPOS

Éléments de géologie, dont la première édition date de 1965 (sous la plume de Pierre Bellair et Charles Pomerol), a toujours été, au fil du temps, le miroir fidèle des évolutions majeures des Sciences de la Terre et de l'Univers. Consciente de la rapidité de la transformation des connaissances, de la nécessité qu'un ouvrage d'enseignement reste en prise directe sur les recherches en cours dans les laboratoires et afin de préparer l'avenir et d'assurer la pérennité de l'ouvrage, l'équipe rédactionnelle (Maurice Renard, Yves Lagabrielle, Erwan Martin et Marc de Rafélis) a souhaité s'adjoindre, dès cette édition, la collaboration de deux nouveaux collègues (Sylvie Leroy, IStEP, Sorbonne Université et Nicolas Coltice, PSL, École Normale Supérieure de Paris).

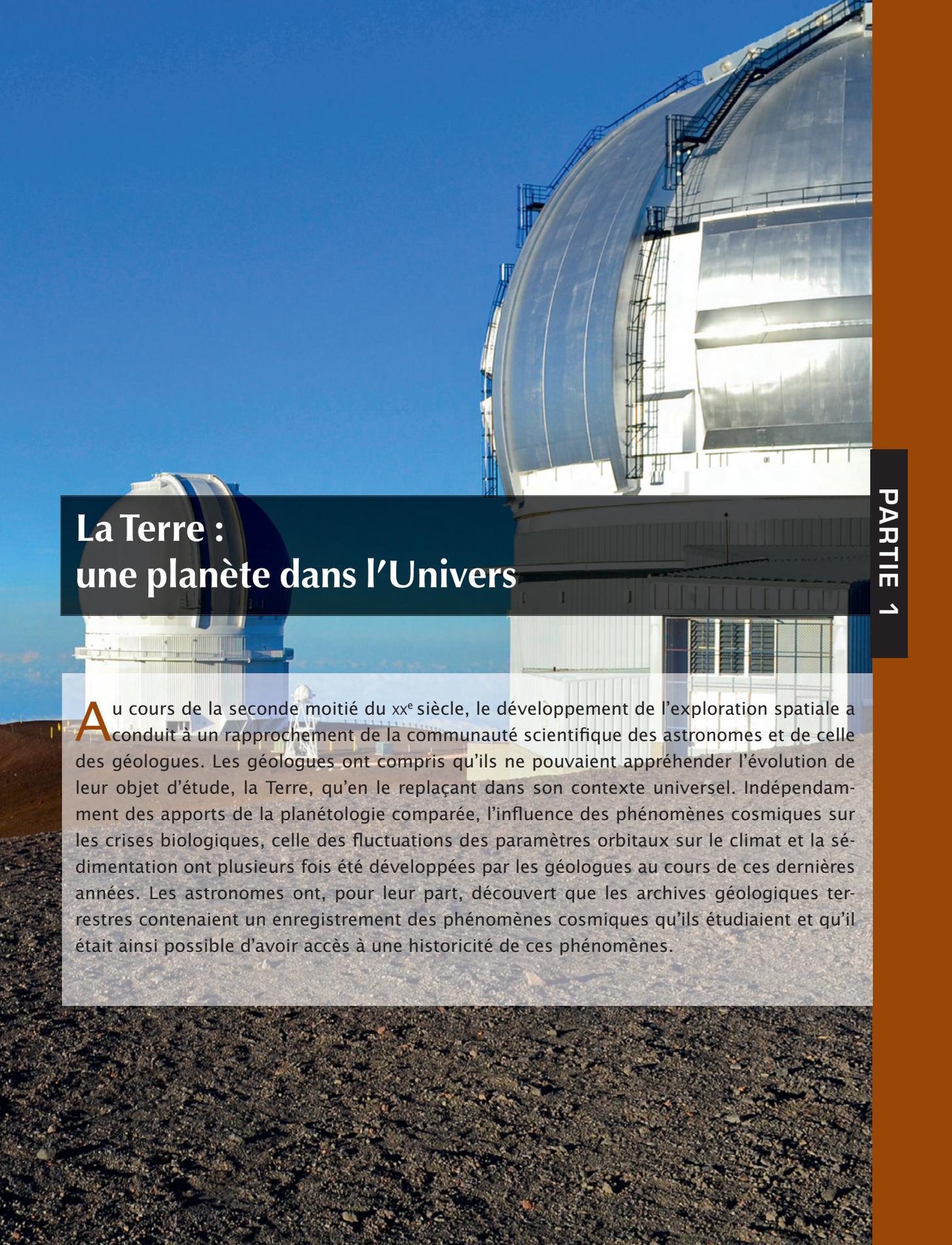
Notre ambition reste que ce manuel soit le livre « compagnon » de l'étudiant en Sciences de la Terre, l'accompagnant depuis sa première année de licence ou de classe préparatoire jusqu'à la préparation des concours (CAPES ou Agrégation) et ses premiers pas professionnels d'enseignant et/ou de chercheur (au cours de sa thèse). Nous avons donc conservé une rédaction permettant une lecture à différents niveaux de culture géologique. Les avancées des connaissances et des techniques, l'apport de l'expérimentation en Sciences de la Terre sont présentés tout en privilégiant les analyses du terrain et des objets géologiques (illustrés de plus par les reportages présentés en ligne sur le site de l'éditeur). Nous nous appuyons sur ces observations pour étayer les concepts et aboutir à une compréhension des phénomènes globaux montrant que la Terre est un système à multiples entrées.

L'iconographie, le plus souvent originale, a été réalisée par les auteurs avec l'aide talentueuse d'Alexandre Lethiers (IStEP, Sorbonne Université) et de Bernadette Coléno. Le suivi éditorial a été réalisé par Laetitia Héryn, Vanessa Beunèche et Nour Guezmir, nous tenons à les remercier chaleureusement pour leur travail minutieux.

Nous avons bénéficié des observations, critiques et conseils d'un grand nombre d'enseignants et de chercheurs, rencontrés au cours des années, dans les laboratoires, sur le terrain, dans le cadre d'associations ou au jury de l'agrégation. Leur disponibilité et leur empressement ont été constants pour mettre à notre disposition des résultats, des documents, des informations, pour nous montrer leur terrain ou pour relire nos manuscrits. Si les lecteurs reconnaissent une originalité et une attractivité à ce manuel, ces collègues et amis y seront pour beaucoup.

Dans la mesure du possible, les auteurs et les sources ont été cités pour chaque illustration. Néanmoins, au risque de commettre de fâcheux oublis, nous tenons à remercier de façon nominative les collègues des laboratoires de Brest, Clermont-Ferrand, Gif-sur-Yvette, Grenoble, La Réunion, Montpellier, Nantes, Nouméa, Orsay, Paris, Rennes et Strasbourg. Nous sommes ainsi particulièrement reconnaissants à P. d'Arco, J.P. Avouac, M. Ballèvre, F. Baudin, L. Bazalgette, C. Beltran, G. Bokelmann, L. Bougeois, S. Boulila, M. Brunel, G. Cabioch, S. Calmant, A. Chauvet, R. Cirio, I. Cojan, M. Daignières, E. Doerflinger, S. Dominguez, L. Emmanuel, X. Escartin, J. Ferrière, A. Finizola, C. Gorini, A. Gébelin, P. Gente, C. Guivel, B. Ildefonse, M. Jolivet, P. Labaume, L. Le Callonnec, M. Jentzen, S. Lallemand, N. Le Moigne, A. Letreguilly, J. Malavieille,

G. Manatschal, N. Mangold, H. Martin, R. Maury, R. Metge, F. Minoletti, J.P. Montagner, A. Nédélec, B. Pelletier, A. Peltier, A. Person, H. Philip, B. Pouyaud, G. Rousselle, M. Régnier, E. Robin, L. Segalen, Ph. Razin, J.-F. Ritz, J. Y. Royer, B. Senut, M. Séranne, P. Thommen, B. Villemant, B. Vrielynck et V. Zeitoun.

The background image shows a large astronomical observatory with several large, white, hemispherical domes. The domes are situated on a dark, rocky, and uneven terrain. The sky is a clear, bright blue. In the foreground, there is a dark, textured surface, possibly a road or a field of dark rocks. The overall scene is well-lit, suggesting a clear day.

La Terre : une planète dans l'Univers

Au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, le développement de l'exploration spatiale a conduit à un rapprochement de la communauté scientifique des astronomes et de celle des géologues. Les géologues ont compris qu'ils ne pouvaient appréhender l'évolution de leur objet d'étude, la Terre, qu'en le replaçant dans son contexte universel. Indépendamment des apports de la planétologie comparée, l'influence des phénomènes cosmiques sur les crises biologiques, celle des fluctuations des paramètres orbitaux sur le climat et la sédimentation ont plusieurs fois été développées par les géologues au cours de ces dernières années. Les astronomes ont, pour leur part, découvert que les archives géologiques terrestres contenaient un enregistrement des phénomènes cosmiques qu'ils étudiaient et qu'il était ainsi possible d'avoir accès à une historicité de ces phénomènes.

L'ARCHITECTURE DE L'UNIVERS

MOTS-CLÉS

- ▶ Année-lumière, unité astronomique, parsec.
- ▶ Galaxies, amas, super-amas, quasars et trous noirs.
- ▶ Effet Doppler, récession des galaxies, loi et constante de Hubble.
- ▶ Big Bang, inflation.
- ▶ Constante cosmologique, matière noire, WIMP (Weakly Interacting Massive Particles).
- ▶ Anomalie Pioneer, énergie noire.
- ▶ Rayonnement fossile (fond diffus cosmologique), COBE, WMAP, Planck.

En astronomie, la mesure de la distance est en fait le temps que met la lumière pour la parcourir ($v \approx 300\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$)¹. Ainsi, la Lune est à environ une seconde-lumière, le Soleil est à 8 minutes de la Terre et son diamètre est de l'ordre de 5 secondes-lumière. Toutefois à l'échelle de l'Univers la vitesse de la lumière est très faible et, du fait du temps de transit, les renseignements apportés sont anciens. La lumière est donc une sorte de machine à remonter le temps, c'est le fameux paradoxe « *Regarder loin, c'est regarder tôt* ».

Les objets les plus éloignés observés actuellement, par le télescope spatial Hubble lancé en 1990, sont situés à 14 milliards d'années-lumière (soit environ 90 % de l'âge de l'Univers). L'analyse de la lumière qu'ils ont émise représente la jeunesse de l'Univers. Ainsi l'observateur se trouve-t-il au sommet d'une « Montagne de temps » et de tous côtés son regard plonge dans le passé. Il n'existe donc pas de vision instantanée possible de l'Univers.

1. En fait 299 792,458 km/s

Encart 1.1 – Les unités de mesure en astronomie

Trois types d'unités de mesure de distance sont classiquement utilisés :

- l'année-lumière (al, soit $9,46 \cdot 10^{12}$ km) et ses sous multiples ;
- l'unité astronomique (UA) qui correspond à la distance moyenne de la Terre au Soleil (environ $150 \cdot 10^6$ km, en fait $149,6 \cdot 10^6$ km) ;

– le parsec (pc), l'unité la plus utilisée par les astronomes, qui est basée sur l'estimation de l'angle de parallaxe pour évaluer la distance des étoiles proches (*fig. 1.1*). C'est la distance telle qu'une unité astronomique est vue sous un angle d'une seconde. Un parsec est égal à 3,262 années lumières soit $3,08568 \cdot 10^{13}$ km.

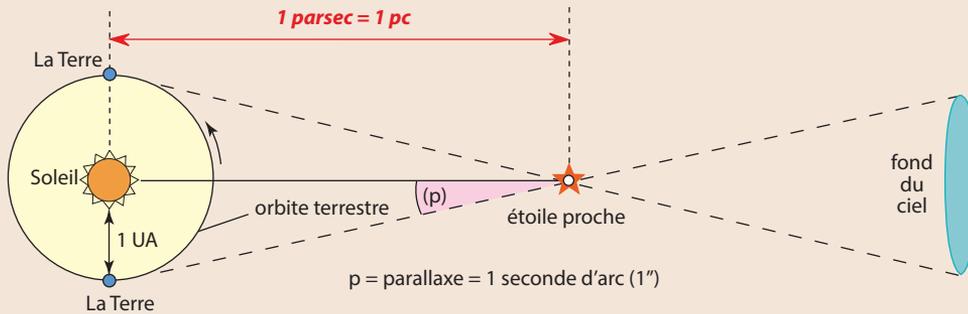


Figure 1.1 Le parsec : mesure de la distance des étoiles proches par estimation de l'angle de parallaxe.

Du fait de la rotation de la Terre autour du Soleil, les étoiles proches paraissent effectuer une révolution sur le « fond du ciel ». Deux observations, à 6 mois d'intervalle, permettront donc d'évaluer l'angle de parallaxe en

résultant. On peut donc définir le parsec comme la distance à laquelle il faudrait se placer pour observer le rayon de l'orbite terrestre (1 UA) sous un angle d'une seconde.

1.1 L'ARCHITECTURE DE L'UNIVERS

1.1.1 Les galaxies

L'observation du ciel nocturne montre un ruban qui s'étire comme un grand cercle autour de la sphère céleste et que l'on connaît depuis l'Antiquité sous le nom de Voie Lactée. En 1750, Thomas Wright suggéra que les étoiles étaient rassemblées en une sorte de « galette aplatie » ; le Système solaire étant situé à l'intérieur de cette galette, nous voyons depuis la Terre beaucoup plus de lumière quand nous regardons selon ce plan que dans les autres directions. Cette hypothèse fut par la suite confirmée et l'on pense aujourd'hui que la Voie Lactée est un disque aplati (*fig. 1.2*) d'un diamètre d'environ 100 000 al et d'une épaisseur de 6 000 al. Le Système solaire est à environ 30 000 al du centre du disque, un peu au « nord » du plan médian. Le disque est en rotation avec des vitesses pouvant atteindre $250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ et il présente de gigantesques bras spiraux. Le Soleil en fait le tour en environ 240 Ma.

La masse de notre Galaxie est évaluée à 100 milliards de masses solaires. La Galaxie est constituée d'étoiles (10^9 à 10^{11} étoiles), de gaz interstellaires (± 1 atome de gaz par cm^3) et de poussières qui représentent une masse non négligeable (1 à 2 % de la masse stellaire). Les étoiles sont très éloignées les unes des autres, ainsi par rapport au Soleil, il n'y a pas une étoile à moins de 3 années-lumière. Du point de vue stellaire, le ciel est « vide » et les probabilités de collision entre deux étoiles sont très faibles.

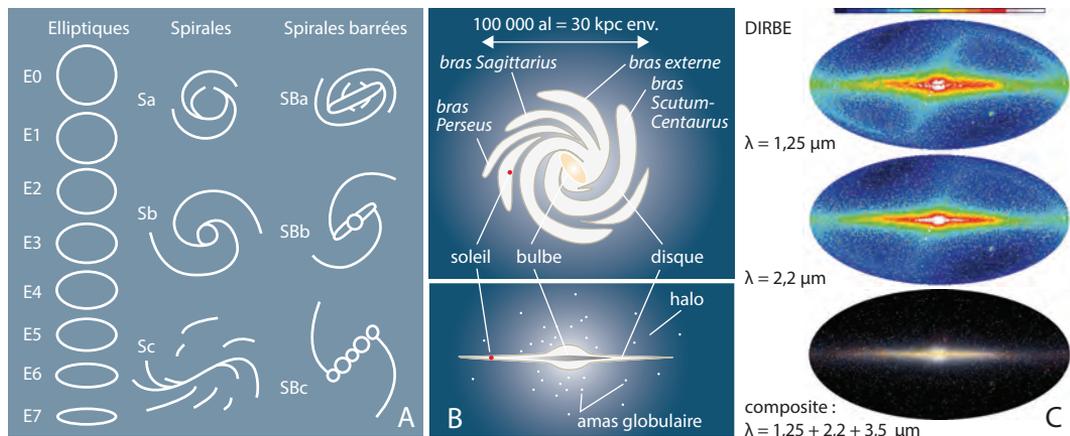


Figure 1.2 Les galaxies et notre galaxie, la Voie Lactée.

- A.** Représentation schématique de divers types de galaxies. Les galaxies elliptiques représentent 2/3 des galaxies.
- B.** La galaxie de la Voie Lactée (*Milky Way*) vue en plan et en coupe et situation de notre Soleil en position externe sur un des bras.
- C.** Le disque de la Voie Lactée et son bulbe central tels qu'ils furent perçus pour différentes longueurs d'onde par les photomètres infrarouges de l'instrument DIRBE (*Diffuse InfraRed Experiment*) porté par le satellite COBE (*Cosmic Background Explorer*) pour différentes longueurs d'ondes. COBE fut lancé en 1989 pour étudier le fond diffus cosmologique (rayonnement fossile, voir *fig. 1.6*).

On observe aussi des taches lumineuses étendues qu'on appelle « nébuleuses ». Ainsi la nébuleuse d'Andromède est mentionnée pour la première fois par l'astronome arabe Al-Soufi en 964. E. Kant est le premier, en 1755, à postuler que certaines nébuleuses pouvaient être des galaxies identiques à la nôtre (toutefois d'autres, comme la nébuleuse d'Orion, sont des masses gazeuses situées dans notre Galaxie).

Au XIX^e siècle, l'amélioration des télescopes met en évidence la forme elliptique ou spirale des nébuleuses mais il fallut attendre 1920 pour que E. Hubble parvienne à résoudre en étoiles individuelles la nébuleuse d'Andromède. De plus, il découvre dans les bras spiraux de cette nébuleuse des étoiles particulières qui présentent une variation périodique de la luminosité (ces étoiles sont connues dans notre Galaxie sous le nom de *Céphéides*). Cette découverte fut importante car quelques années plus tôt, des astronomes américains avaient montré qu'il existe une relation entre la périodicité de variation de la luminosité des Céphéides et leur luminosité absolue (puissance totale rayonnée par un objet astronomique dans toutes les directions). La brillance d'un objet tel que nous le percevons n'est pas déterminée par sa luminosité absolue mais par sa luminosité apparente (puissance rayonnée reçue par cm² sur le miroir d'un télescope). La luminosité apparente est fonction de la luminosité absolue et de la distance. Hubble mesura la luminosité apparente des Céphéides d'Andromède et, estimant leur luminosité absolue d'après leur période de variation, il put calculer leur éloignement (donc celui de la nébuleuse d'Andromède) à partir d'une loi simple où la luminosité absolue est inversement proportionnelle au carré de la distance. Il trouva la nébuleuse d'Andromède située à 900 000 al soit dix fois plus loin que l'objet le plus éloigné connu à l'intérieur de notre Galaxie. La position extra-galactique de la nébuleuse d'Andromède était donc établie.

Des calibrations nouvelles ont depuis augmenté la distance d'Andromède jusqu'à deux millions d'al, mais dès 1923 l'aspect plurigalactique de l'Univers était démontré.

L'Univers est donc constitué de plus de 100 milliards de galaxies (100 000 al. de diamètre environ) séparées par des distances moyennes de 1 000 000 al. Le nuage de Magellan est à 300 000 al, Andromède, nous l'avons vu, à 2 000 000 al. La distance intergalactique n'est donc pas énormément plus grande que la dimension des galaxies. « *Le ciel des galaxies n'est pas aussi vide que celui des étoiles* », aussi les collisions ne sont-elles pas rarissimes et il en résulte des projections de matière dans l'espace intergalactique. Il existe ainsi entre le nuage de Magellan et la Voie Lactée un pont de matière produit, il y a environ 200 millions d'années, quand les galaxies étaient plus proches.

Les galaxies sont les structures principales de l'Univers, c'est en quelque sorte des « usines à transformer la matière gazeuse en étoile ». Elles se répartissent en trois types principaux (fig. 1.2) :

- *les galaxies spirales* (1/4 des galaxies dont la Voie Lactée) en forme de disque aplati avec des bras spiraux émergeant du noyau central (fig. 1.4). Riches en gaz, les compressions résultant de la rotation de la galaxie provoquent la naissance de nouvelles étoiles au niveau du bras. Le noyau central peut avoir la forme d'un barreau. On parle alors de galaxie barrée ;
- *les galaxies elliptiques* présentent une symétrie elliptique ou sphérique (sphéroïde) sans structures évidentes mais avec divers degrés d'aplatissement. Elles représentent 2/3 des galaxies. La plupart des étoiles qui les composent sont très âgées (10 000 Ma). Comme ces galaxies sont appauvries en gaz, il ne peut pas se former de nouvelles étoiles. Les plus grandes galaxies connues (10^{13} masse solaire) sont de ce type. Elles sont souvent le siège d'émissions radio importantes, on parle alors de radiogalaxies. La grande luminosité du noyau de ces galaxies serait due à la présence de **quasars** (*quasi stellaire astronomical radiosource*), objets d'apparence stellaire, de très forte luminosité, dont le spectre représente un fort décalage vers le rouge. Ils pourraient résulter de la contraction gravitationnelle d'étoiles « supermassives » ;
- *les galaxies irrégulières*, qui représentent moins de 1/10 de toutes les galaxies, dans lesquelles plusieurs sous-classes peuvent être distinguées.

1.2 UNE ARCHITECTURE HIÉRARCHISÉE

Les galaxies ne se répartissent pas au hasard, elles ont tendance à se grouper en structures plus grandes : les *amas*. Ainsi notre Galaxie, la Voie Lactée, fait partie au même titre que la nébuleuse d'Andromède ou le nuage de Magellan, de l'*amas local* (une vingtaine de galaxies dans un rayon d'environ 5 millions d'années-lumière).

Il semble que les amas s'organisent eux-mêmes en structure d'ordre supérieur : « les *super-amas* » qui regrouperaient plusieurs milliers de galaxies dans un volume dont les dimensions sont de l'ordre de plusieurs dizaines de millions d'années-lumière. Ainsi l'amas local ferait partie du super-amas de la Vierge.

Encart 1.2 – Le catalogue Messier

Charles Messier publia en 1781 un catalogue intitulé « Nébuleuses et Amas d'étoiles ». Les astronomes utilisent encore la numérotation de Messier pour désigner les 103 objets décrits dans le catalogue. Ainsi, Andromède est appelé M 31, la constellation d'Orion, M 42 et la galaxie massive du super-amas de la Vierge, Messier 87.

La région centrale du super-amas est en général occupée par une galaxie très massive (plusieurs centaines de fois la masse d'une galaxie normale) et il semble que les autres galaxies gravitent autour d'elle. Toutefois, du fait de leur relative proximité et des forces d'attraction qu'elles exercent sur leurs voisines, les galaxies perturbent constamment leurs trajectoires et ont tendance à s'approcher du centre du super-amas. Pour certains astrophysiciens, ces galaxies monstrueuses hébergeraient un

« **trou noir** », au cœur des quasars, qui finirait par englober les autres galaxies mais les données sont loin d'être évidentes et le système est peut-être en équilibre : il y aurait autant de matière formée que de matière engloutie.

Encart 1.3 – trous noirs et quasars

Imaginé pour la première fois par Laplace, les trous noirs correspondraient à des structures si denses que même la lumière ne pourrait plus s'en échapper. Leur nature physique ne peut se comprendre que dans le cadre de la théorie de la relativité généralisée (Einstein). L'intense luminosité des quasars pourrait ainsi s'expliquer : la matière attirée, portée à des températures extrêmes, rayonnerait de façon très intense, avant de s'engouffrer dans le trou noir.

Le super-amas de la Vierge possède sa galaxie « monstrueuse » (Messier 87) située à 52 millions d'al de la Terre. L'existence d'un trou noir dans cette galaxie avait été suspectée par les observations spectrographiques du télescope spatial Hubble (*fig. 1.3B*) qui montraient l'existence d'un disque de gaz chaud et ionisé en rotation à une vitesse de 1,9 million de km·h⁻¹. Pour maintenir ce disque dans ces conditions, il faut une attraction gravitaire correspondant à une masse de 2 à 3 milliards de soleils qui pourrait être un trou noir super-massif (Sagittarius A*). L'existence de ce trou noir a été démontrée par Reinhard Genzel et Andrea Ghez qui ont constaté une très forte accélération des étoiles sur leur trajectoire liée à l'attraction gravitationnelle à proximité de la structure Sagittarius A*. Pour leurs travaux, ces deux chercheurs ont reçu, en compagnie de Roger Penrose, un théoricien du concept de trou noir, le prix Nobel de physique en 2020.

Il ne semble pas y avoir de structure d'ordre plus élevé, tout se passe comme si les galaxies « s'ignoraient » quand elles sont à plus de soixante millions d'années-lumière (ordre de grandeur des super-amas). La figure 1.3 résume les principales caractéristiques des différents objets constitutifs de l'Univers.

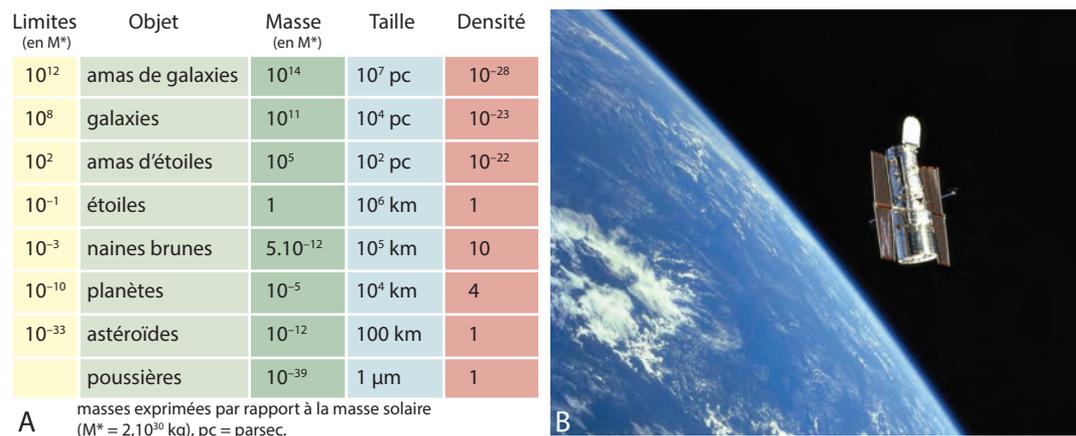


Figure 1.3 Les objets constitutifs de l'Univers.

A. Tableau des principales caractéristiques des objets formant l'Univers (*d'après Brahic, 1999*).

B. La mission Hubble (en anglais, *Hubble Space Telescope* ou HST) est une collaboration entre la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) et l'ESA (Agence spatiale européenne). Ce télescope a été lancé le 24 avril 1990 et mis sur orbite circulaire par la navette spatiale Discovery. Il effectue le tour de la Terre en environ 96 minutes. Hubble évolue à 600 km d'altitude, en dehors de l'atmosphère et peut donc faire des observations à très haute résolution de radiations qui seraient captées par l'atmosphère terrestre. C'est un télescope réflecteur à deux miroirs qui utilise deux panneaux solaires pour produire de l'électricité. Il a apporté de précieux résultats sur l'organisation et l'évolution de l'Univers, notamment sur son expansion (*fig. 1.4*).

Encart 1.4 – Le télescope spatial Hubble (fig. 1.3)

Lancé en 1990, ce télescope spatial, ainsi nommé en l'honneur de l'astronome Edwin Hubble (cf. infra) continue de fonctionner (le lancement d'un successeur, le James Webb Space Telescope, plusieurs fois reporté devrait avoir lieu en 2021). Hubble a subi plusieurs remises à niveau par les « mécanos de l'espace » des différentes navettes (1997, 1999, 2002 et 2009), après sa réparation initiale (1993, correction du défaut de courbure du miroir principal). Il permet des observations impossibles ou très difficiles à partir des observatoires terrestres notamment dans les domaines infrarouge et ultraviolet en s'affranchissant des perturbations atmosphériques.

Son apport, particulièrement dans l'étude des galaxies, du fonctionnement stellaire, des comètes et dans l'évaluation de l'âge de l'Univers, a été capital. Ainsi Hubble a fourni, en 1994 des images de la collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter. De même, la preuve que des planètes gravitaient autour d'étoiles autres que le Soleil a été obtenue pour la première fois avec Hubble. Au début de l'année 2000 on estimait qu'il avait étudié 13 670 objets et transmis 3 500 milliards d'octets d'informations qui ont été à la base de plusieurs milliers d'articles scientifiques (voir fig. 2.4b, une mosaïque réalisée à partir d'images de Hubble).

1.3 L'EXPANSION DE L'UNIVERS ET LE « BIG BANG »

La vision du ciel nocturne donne l'impression que l'Univers est immobile ; en réalité les étoiles se déplacent à des vitesses pouvant atteindre quelques centaines de kilomètres par seconde, ainsi une étoile rapide parcourt-elle 10 milliards de km en une année mais ceci ne représente que le millième de la distance qui nous sépare des étoiles les plus proches et leur position dans le ciel ne varie que très lentement. Les astronomes appellent « mouvement propre » le déplacement apparent des étoiles proches.

Notre connaissance du déplacement des objets célestes est basée sur une propriété, commune à tous les mouvements ondulatoires, appelée « effet Doppler ».

Encart 1.5 – L'effet Doppler

L'effet Doppler concerne la variation de la fréquence des ondes émises par une source en fonction de son déplacement. J.-C. Doppler, professeur de mathématiques à Prague semble avoir été le premier à noter ce phénomène en 1842, tant pour les ondes sonores que lumineuses.

Lorsque nous observons une onde sonore émise par une source au repos, l'intervalle de temps séparant la réception de 2 crêtes d'ondes successives (période) est le même que celui qui sépare leur émission par la source. Si la source s'éloigne, l'intervalle séparant deux réceptions sera plus grand que celui séparant deux émis-

sions, chaque « crête » devant parcourir un chemin plus long pour nous parvenir. Supposons une source lumineuse émettant un rayonnement de période T et s'éloignant de l'observateur à la vitesse V . Elle parcourt entre l'émission de deux crêtes une distance VT . Le temps nécessaire pour qu'une crête parvienne à l'observateur est donc accru de VT/c où c est la vitesse de la lumière. Le temps qui sépare la réception de deux crêtes successives est donc $T' = T + (VT/c)$. À l'émission la longueur d'onde de la lumière est $\lambda = cT$; à la réception, elle devient $\lambda = cT' = c[T + (VT/c)]$. Si la source se rapproche, V est remplacé par $-V$.

Il est facile d'en avoir une démonstration triviale pour les ondes sonores ; quand une voiture roule à régime constant le bruit du moteur paraît plus aigu (c'est-à-dire que sa période est plus petite et sa fréquence plus élevée) lorsqu'elle se rapproche d'un observateur que lorsqu'elle s'en éloigne.

Doppler pensait que ce phénomène pouvait expliquer les différences de couleurs des étoiles (les couleurs des étoiles s'éloignant de la Terre seraient déplacées vers le rouge tandis que celles des étoiles se rapprochant le seraient vers le bleu). En fait la couleur des étoiles dépend surtout de leur température de



Voir fig. 2.5

Partie I ■ La Terre : une planète dans l'Univers

surface. De plus dans le cas d'un effet Doppler, comme l'ensemble des raies du spectre est décalé, la couleur résultante ne subit pratiquement pas de modification.

L'importance de l'effet Doppler en astronomie ne se révéla que lorsqu'il fut appliqué à l'étude des raies spectrales individuelles des corps chimiques présents dans les objets célestes.

On observa alors que les spectres des galaxies étaient légèrement décalés vers le rouge ou vers le bleu. Ces observations, qui furent attribuées à l'effet Doppler, indiquaient que certaines nébuleuses se rapprochaient de la Terre (telle la nébuleuse d'Andromède avec une vitesse de $300 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) tandis que d'autres s'en éloignaient. En 1924 sur 41 galaxies étudiées, Hubble en observa 36 qui s'éloignaient (*fig. 1.4*) et 5 qui se rapprochaient. Dans un premier temps, on pensa qu'il s'agissait de vitesses relatives dues au mouvement propre du Système solaire (qui se rapprocherait de certaines galaxies et s'éloignerait d'autres) mais les observations se multipliant, il apparut que la grande majorité des galaxies (à l'exception de quelques nébuleuses « voisines » comme Andromède) s'éloignaient de la nôtre. Le fait que les galaxies semblent toutes s'éloigner de nous ne signifie nullement que notre Galaxie occupe une position centrale dans l'Univers. Tout observateur placé dans une autre quelconque galaxie aurait aussi l'impression que toutes les autres s'éloignent.

De plus, en 1929 Hubble nota que le décalage spectral des galaxies vers le rouge (donc leur vitesse) était proportionnel à leur distance à la Terre. La vitesse d'éloignement s'exprimant sous la forme :

$$V = H d$$

où d est la distance et H une constante dite constante de Hubble. V est exprimée en $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ et d en mégaparsecs (10^6 parsecs).

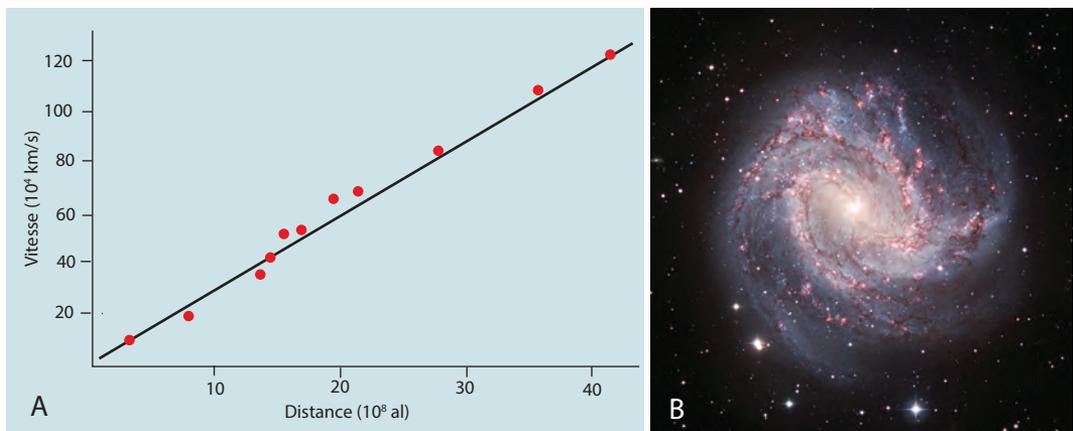


Figure 1.4 L'éloignement des galaxies : loi de Hubble.

A. La loi de Hubble relie la vitesse d'éloignement (récession) des galaxies et leur distance. Le calcul des vitesses est basé sur le décalage spectral vers le rouge (effet Doppler), celui de la distance sur l'intensité de la luminosité apparente. Cette loi nous amène au concept d'un Univers en expansion accélérée.

B. La galaxie Messier 83 se trouve dans la constellation Hydra à une distance d'environ 15 millions d'années-lumière de la Terre. C'est un lieu de fabrication active de nouvelles étoiles. Elle est deux fois plus petite que notre galaxie, la Voie Lactée. On y distingue des bras bien définis riches en jeunes étoiles et une région centrale, comprenant un disque et une « barre » de forme allongée (galaxie spirale barrée simple, voir *fig. 1.2*). Photographie produite par ESO, *European Southern Observatory* (l'ESO regroupe 15 nations et développe notamment des télescopes : NTT, VLT, ALMA) sur des sites situés dans le désert d'Atacama au Chili.

La première valeur de H trouvée par Hubble était $600 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$, cette valeur fut réduite d'abord à $200 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ puis à $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$. Actuellement un débat existe entre les partisans d'une échelle des distances courte ($80 \leq H \leq 100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$) et les partisans d'une échelle longue ($H = 50 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$). En 1994, un calcul basé sur les Céphéides de l'amas Virgo aboutit à $H = 87 \pm 7 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$.

Il semble donc qu'à partir d'une certaine distance, les galaxies fuient toutes et ce d'autant plus vite qu'elles sont plus éloignées (fig. 1.4). La proportionnalité entre distance et vitesse d'éloignement a été vérifiée jusqu'à des vitesses de $60\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (soit 20 % de la vitesse de la lumière). Nous arrivons donc à la vision d'un Univers en expansion à partir d'une "explosion initiale" communément appelée **Big Bang** (expression qui apparaît en 1950, à la suite d'une émission radio britannique où elle est formulée, de façon ironique, par un de ses adversaires, l'astronome Fred Hoyle). Notons que l'expansion de l'Univers n'a pas de centre. On perçoit l'expansion de la même façon quel que soit le lieu où l'on se place.

1.4 LES DIMENSIONS DE L'UNIVERS

Newton fut le premier à envisager ce problème en admettant que si la matière de l'Univers était également répartie dans une région *finie* elle tendrait à tomber vers le centre. Au contraire, si elle était répartie dans un espace *infini*, il n'y aurait pas de centre et elle pourrait alors se condenser en un nombre infini d'agrégats dispersés à travers l'Univers (agrégats qui, pour Newton, pouvaient être à l'origine du Soleil et des étoiles).

a) La constante cosmologique d'Einstein

Il n'y eut guère de progrès avant la formulation de la *théorie de la relativité générale* par Einstein. Notre vision actuelle de l'Univers repose sur deux principes :

- le principe d'universalité à savoir que les lois physiques sont les mêmes en tous les points de l'Univers ;
- le principe cosmologique qui stipule que l'univers est, à grande échelle, uniforme et isotrope.

Toutes les observations vérifient, pour le moment, ces deux principes. Ainsi la cartographie des 31 000 radio-sources les plus intenses (Gregory et Condon, 1991) ne montre aucun écart significatif à une répartition aléatoire. De même, les mesures du rayonnement fossile par le satellite *COBE* (*Cosmic Background Explorer*) ont montré une concordance avec la courbe du corps noir à 2,7 K (voir § 1.5 et fig. 1.6).

En 1917, Einstein essaya de trouver une solution de ses équations qui décrirait la géométrie spatio-temporelle de l'Univers dans sa totalité. Il rechercha une solution qui fut *homogène*, *isotrope* et malheureusement, conformément aux idées de l'époque, *stationnaire*. Afin de construire un modèle en accord avec ces hypothèses, il dut se résoudre à modifier ses équations en introduisant un terme dit « *constante cosmologique* », qui représente « l'énergie du vide » contrebalançant les forces d'attraction gravitationnelle à grande distance. Le modèle d'Einstein était vraiment stationnaire et le décalage spectral vers le rouge n'y était pas prévu. Les travaux d'Hubble sur les mouvements des galaxies orientèrent alors les théoriciens vers des modèles cosmologiques homogènes, isotropes mais non stationnaires, il n'y avait donc pas besoin de modifier les équations d'Einstein par une « *constante cosmologique* ».

En fait, dès 1922, le mathématicien russe Friedmann proposa une solution générale homogène, isotrope et non stationnaire des équations originales d'Einstein qui est à la base de la plupart des théories moderne. On peut donc considérer que dès 1922, Friedmann prédit ce que Hubble démontrera en 1929.

Le modèle d'expansion de l'Univers peut donc être assimilé à une compétition entre l'expansion qui disperse la matière et la gravité qui s'y oppose et rassemble la matière. Il existe ainsi une densité critique qui est de l'ordre de $10^{-29} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ à $5 \times 10^{-30} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, soit environ l'équivalent de 3 atomes d'hydrogène pour un volume de 1 000 litres. Selon que la densité de l'Univers sera ou non supérieure à cette densité critique, celui-ci s'effondrera sur lui-même au bout d'un certain temps (*Big Crunch*) ou continuera son expansion éternellement.

b) Les différents modèles de l'Univers : importance de la matière noire

Dans le cadre de la relativité générale, il existe une relation entre la géométrie de l'Univers et la densité puisque la matière tend à courber l'espace-temps. En simplifiant, on peut dire qu'il existe trois classes de modèles de Friedmann :

- 1) Si la densité est supérieure à la valeur critique, la gravitation recourbe l'Univers sur lui-même ; sa géométrie est sphérique et fermée. Dans ce cas, le champ de gravité est assez intense, pour mettre fin à l'expansion de l'Univers qui pourrait alors se contracter tandis que la densité de matière augmenterait. L'évolution de l'Univers pourrait alors être une succession de phases d'expansion (à partir du Big Bang) et de contraction (jusqu'au Big Crunch) ;
- 2) Si la densité est égale à la valeur critique, l'Univers est plat, la géométrie euclidienne et l'expansion éternelle mais avec un taux de plus en plus faible finissant par s'annuler ;
- 3) Si la densité moyenne de matière de l'Univers est inférieure à la valeur critique, l'Univers est hyperbolique et ouvert et, dans ce cas, l'expansion se poursuivra éternellement.

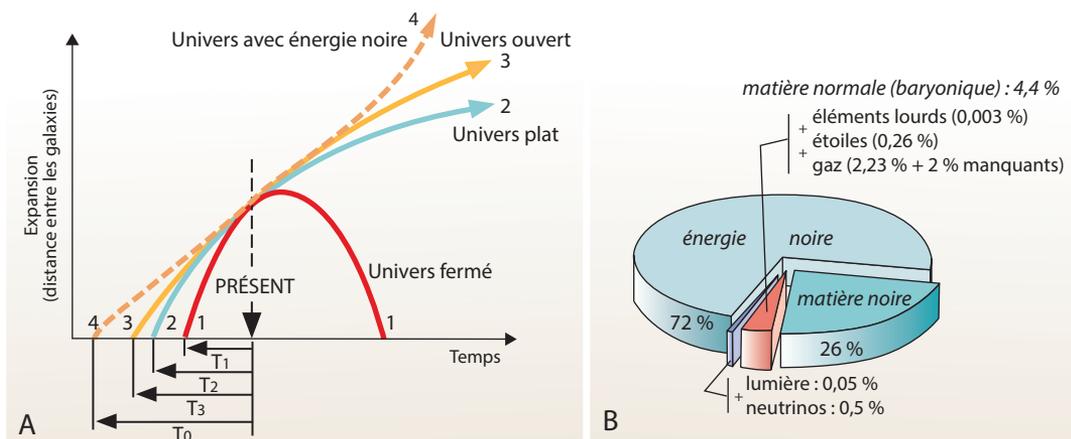


Figure 1.5 L'Univers : expansion et composition.

A. Le taux d'expansion de l'Univers que l'on peut assimiler à l'évolution de la distance séparant deux galaxies typiques est représenté (en unité arbitraire) en fonction du temps, pour quatre modèles cosmologiques possibles. Dans le cas d'un « Univers fermé », la densité est supérieure à la densité critique, l'expansion est dite elliptique ; elle prendra peut-être fin et sera suivie d'une phase de contraction (courbe 1). Dans le cas d'un « Univers plat », la densité est égale à la densité critique et l'expansion est parabolique (courbe 2), elle se poursuit éternellement mais à un taux de plus en plus faible qui tend à s'annuler pour des temps infinis. Dans le cas d'un « Univers ouvert », la densité est inférieure à la densité critique et l'expansion bien que se ralentissant, se poursuivra éternellement (courbe 3). Dans le cas où intervient l'énergie noire, il existe une force de répulsion à grande échelle qui force une expansion accélérée de l'Univers (courbe 4). Les courbes 1, 2 et 3 sont calculées avec les équations de champ d'Einstein, sans constante cosmologique et pour un Univers à dominance matérielle. T0, T1, T2 et T3 sont les âges respectifs de l'Univers correspondant aux différents modèles.

B. Composition de l'Univers en énergie et en matière. Parmi les 26 % de matière, seulement 4,4 % sont faits de matière baryonique, c'est-à-dire de noyaux d'atomes (fig. 2.1). Le reste de la matière est sous forme non baryonique, totalement inconnue, qui interagit néanmoins gravitationnellement avec le milieu, mais sans être faite d'atomes. Sa présence est toutefois nécessaire pour la formation des galaxies.

Il n'est pas aisé de choisir entre les différentes classes de modèles. Une première tentative peut être faite à partir de l'étude du mouvement des galaxies (fig. 1.5). Si l'Univers est fermé, la fuite des galaxies éloignées doit se ralentir. Les mesures sont très complexes mais il semble que le ralentissement des galaxies éloignées ne soit que minime, donc que l'Univers soit ouvert et doive poursuivre son expansion éternellement.

L'approche la plus fructueuse serait l'évaluation de la densité cosmique mais il est extrêmement difficile d'estimer la matière présente dans l'Univers car une grande partie est invisible et ne peut être décelée qu'à partir des perturbations gravitationnelles qu'elle engendre. Si l'on ne se fonde que sur la densité de la matière effectivement observée, la densité moyenne de l'Univers serait de l'ordre de $5 \times 10^{-32} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ et ne représenterait donc que le centième de la densité critique. L'Univers serait donc ouvert.

Une autre approche du problème, la mesure du deutérium par rapport à l'hydrogène léger, aboutit à la même conclusion. En effet, dans la phase de nucléosynthèse initiale, la formation du deutérium dépend de la densité de matière et les mesures conduisent à conclure que la densité présente de l'Univers est comprise entre 3 et $5 \times 10^{-31} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, valeur inférieure à la densité critique.

Toutefois, il est fort probable que la plus grande partie de la matière de l'Univers soit confinée dans des trous noirs ou qu'il existe un gaz extragalactique très dense (certains auteurs considèrent qu'on ne verrait que 10 à 20 % de la matière présente dans l'Univers, le reste correspondrait à de la matière « noire »). La notion de **matière noire**, particules invisibles de nature mystérieuse, est apparue à la fin des années 1970, afin de rendre compte de la rotation des galaxies spirales. Si l'on ne tient compte que de la matière visible, les forces de gravité ne sont pas suffisantes pour s'opposer à la force centrifuge et les étoiles externes devraient être expulsées. La matière noire viendrait compenser la force centrifuge, elle serait composée d'un nouveau type de particules, les *WIMP* (*Weakly Interacting Massive Particles*), qui n'émettent pas de lumière et interagissent peu avec la matière ordinaire.



Voir fig. 2.2

c) L'anomalie « Pioneer » : une mise en évidence de la matière noire ?

Les trajectoires des sondes spatiales conduisent, elle aussi, à s'interroger sur les fondements de la physique. Une force inconnue semble freiner les sondes lancées dans les années 1970. Ainsi, la sonde *Pioneer-10*, après avoir survolé Jupiter en 1973, poursuit sa route en direction d'une étoile, Aldébaran, qu'elle devrait atteindre dans environ 2 millions d'années. Depuis 1980, on a décelé des anomalies dans la trajectoire de cette sonde qui se déplace à plus de $12 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Elle est plus proche du Soleil (400 000 km) que ne le prévoyaient les calculs. Tout se passe comme si une force inconnue freinait l'engin (« anomalie Pioneer »). On a d'abord pensé à une erreur de calcul, mais *Pioneer-11*, lancé peu de temps après, semble présenter la même anomalie. En 1998, les ingénieurs concluaient qu'il ne pouvait s'agir d'une cause technique propre à la sonde. Les données de navigation d'autres sondes, telles *Galileo* et *Cassini*, ne mettent pas en évidence une telle anomalie du fait de problèmes internes aux engins qui ne permettent pas de mesurer de si petites anomalies. La force « anomalique » est 10 milliards de fois inférieure à l'accélération de la pesanteur terrestre.

Divers scénarios ont été envisagés pour expliquer l'anomalie *Pioneer*, mais le plus récent ferait intervenir la *matière noire*, matière invisible de l'Univers, déjà invoquée pour expliquer les anomalies de rotation des galaxies et dont on pensait qu'elle ne provoquait des anomalies aux lois de Newton qu'aux très grandes échelles. L'anomalie *Pioneer* pourrait être la première manifestation d'une altération de la gravité newtonienne à petite échelle. Dans ce cas la densité effective de l'Univers pourrait être supérieure à la densité critique. Le débat sur les anomalies Pioneer a été relancé par de nouvelles modélisations des trajets des sondes dans le cadre de la physique standard. Ces différents travaux synthétisés en 2012 attribuent les retards observés au fonctionnement de générateurs nucléaires que les sondes transportent. Ces générateurs émettraient des photons qui produiraient une force de recul suffisante pour expliquer le retard, par réflexion sur l'antenne de la sonde. Différentes équipes ont

proposé des projets de lancement d'une sonde équipée d'un micro-accéléromètre pour tester différentes hypothèses. Pour l'instant, ces projets n'ont pas été retenus par les différentes agences spatiales.

d) Une accélération de l'expansion ? L'énergie noire

Le débat est loin d'être clos car les données obtenues grâce au télescope spatial Hubble ont conduit deux équipes à postuler une accélération de l'expansion de l'Univers. Entre 2001 et 2003, onze supernovae de type Ia, très éloignées, ont été observées par le télescope spatial. La luminosité de ce type de supernovae est si forte qu'elles sont utilisées pour mesurer les distances dans l'Univers. La luminosité mesurée par le télescope spatial s'est révélée plus faible que celle attendue dans le cas d'un Univers sans accélération mais seulement cohérente avec une expansion en accélération. Ces observations confirment celles, plus ambiguës, effectuées en 1998 à partir de télescopes terrestres. L'accélération de l'expansion serait due à la présence d'une force répulsive à grande échelle, capable de surpasser l'attraction gravitationnelle existant entre les différents constituants de l'Univers (fig. 1.5). La nature de cette force répulsive qui repousse la matière reste énigmatique et on lui a donné le nom d'**énergie noire** ou d'**énergie sombre** (certains auteurs ont réutilisé le terme d'Einstein : « énergie positive du vide »).

L'Univers serait donc principalement formé (fig. 1.5 B) de :

- 4 % de matière visible (**matière « ordinaire » ou baryonique**, c'est-à-dire constituée de baryons : les protons et les neutrons) ;
- 22 % de **matière noire** (constituée de particules WIMP) qui n'émettent pas de lumière et interagissent peu avec la matière ordinaire) ;
- 72 % d'**énergie noire**.

Pendant, on considère actuellement que la part de matière « ordinaire » baryonique est sous-estimée car il existerait de la **matière « ordinaire » invisible**. En effet quand on compare les calculs des modèles théoriques aux mesures spectroscopiques basées sur l'Univers observable, il manque une quantité importante de baryons. Cette matière baryonique invisible serait présente sous forme de plasmas chauds ionisés au niveau des halos périgalactiques et des filaments intergalactiques. Dans ces plasmas les baryons sont dépourvus d'électrons, ce qui les rend invisibles par les techniques classiques de spectroscopie.

Enfin, l'existence de la force répulsive de l'énergie noire, qui accélère l'expansion de l'Univers, repose le problème de la constante cosmologique qu'Einstein avait supprimée de ses équations après la mise en évidence de la récession des galaxies par Hubble. En utilisant une constante légèrement supérieure à celle d'Einstein, on obtiendrait un cas de figure proche des observations actuelles.

Dans ce cas, l'Univers serait né dans un Big Bang suivi d'une expansion ralentie par la gravité, mais la force de répulsion à grande échelle aurait pris progressivement le dessus et l'Univers serait entré dans une phase d'expansion accélérée éternelle.

1.5 LE FOND COSMIQUE DE RAYONNEMENT RADIO OU RAYONNEMENT FOSSILE (FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE)

En 1964, deux radioastronomes Penzias et Wilson, en travaillant sur l'antenne du laboratoire de la Bell Telephone (construite pour assurer les télécommunications par satellites), cherchaient à mesurer l'intensité des ondes radio émises par notre Galaxie aux latitudes galactiques élevées (c'est-à-dire hors du plan de la Voie lactée). De telles mesures sont très délicates car l'émission radio est peu différente du *bruit de fond* électronique de l'antenne. Il était donc capital d'identifier le bruit électronique produit par le système récepteur. Dans ce but, ils développèrent une série d'expériences en réglant la



voir § 2.1.2



voir p. 9

réception sur une longueur d'onde relativement courte (7,35 cm) où le bruit radio produit par notre Galaxie devait être négligeable. Ils s'attendaient à une légère perturbation par l'atmosphère mais celle-ci devait être facilement identifiable car dépendante de la direction d'observation (proportionnelle à l'épaisseur de l'atmosphère dans cette direction, elle serait moins intense dans la direction du zénith que dans celle de l'horizon). À leur étonnement, ils détectèrent un bruit significatif à 7,35 cm beaucoup plus fort qu'ils ne l'attendaient et surtout indépendant de la direction d'observation et du temps (aussi bien à l'échelle de la journée qu'à celle de la variation saisonnière).

On se demanda donc si l'antenne n'était pas le siège d'un bruit propre plus important que prévu, on multiplia les précautions (démontant et nettoyant l'antenne car un couple de pigeons y avait niché et créé quelques « dégâts ») mais la diminution de la puissance du bruit observé ne fut que très faible.

Pour décrire leur enregistrement ils utilisèrent le vocabulaire familier des radio-ingénieurs qui consiste à traduire l'intensité du bruit radio en terme de température équivalente (c'est-à-dire la température des parois d'une enceinte à l'intérieur de laquelle le bruit radio aurait la même intensité que celui enregistré). Ils trouvèrent que la température, équivalente du bruit radio qu'il recevait, était de l'ordre de 3 K. Un peu par hasard, Penzias et Wilson (qui reçurent, pour ces travaux, le prix Nobel en 1978) venaient de faire une découverte aussi importante pour l'astronomie que celle du décalage spectral vers le rouge : **le rayonnement fossile**.

En effet, à la même époque, les théoriciens du Big Bang notamment Dicke et Peebles redécouvraient les calculs faits par Gamow (un élève de Friedmann) et ses collaborateurs en 1948, qui prévoient l'existence d'un fond de rayonnement, vestige des débuts de l'Univers, que l'expansion aurait réduit à une température de l'ordre de 3 K. Pour les théoriciens du Big Bang, l'existence aux premiers temps de l'Univers, d'un rayonnement d'une température équivalente très élevée et de longueur d'onde très courte, était nécessaire pour expliquer l'abondance de l'hydrogène (qui forme les 3/4 de l'Univers actuel, *fig. 2.2*). Ce rayonnement, ayant l'énergie suffisante, aurait détruit les noyaux plus lourds au fur et à mesure de leur formation. Il aurait, par la suite, survécu à l'expansion universelle mais sa température équivalente continuerait de décroître en fonction inverse de la taille de l'Univers (*fig. 1.6*). Il est surprenant que pendant plus de 15 ans, personne n'ait cherché à vérifier ces conclusions théoriques. Quoi qu'il en soit la découverte de Penzias et Wilson est capitale car elle met en évidence un phénomène prévu par la théorie (c'est sans aucun doute l'argument le plus fort en faveur de la théorie du Big Bang) et montre que **l'Univers est passé d'un état initial à « dominance radiative » dans lequel la majorité de l'énergie se trouvait sous forme de rayonnement à un état à « dominance matérielle » dans lequel la plus grande partie de l'énergie est contenue dans la masse des particules nucléaires**.

Les images transmises par le satellite COBE (lancé en 1989 pour étudier le rayonnement fossile) ont aussi fortement contribué à valider la théorie du Big Bang. Tout d'abord dès sa mise en service, on observa que le spectre de la lumière fossile correspondait point par point à celui d'un corps noir, ce que prévoyait la théorie (*fig. 1.6*).

Encart 1.6 – Le corps noir

C'est un objet théorique caractérisé par un parfait équilibre thermodynamique et une isolation totale vis-à-vis du milieu extérieur de telle sorte que son rayonnement ne dépende que de sa température. La théorie du Big Bang prévoit que l'Univers opaque originel correspond à un tel objet

En second lieu, COBE permet de répondre à une des interrogations majeures de la théorie : comment expliquer le passage d'un état absolument homogène (donc stable) à l'Univers hétérogène actuel ? C'est-à-dire comment rendre compte de la naissance des étoiles et des galaxies ? À partir de 300 milliards d'observations dans différentes longueurs d'onde, une carte de rayonnement fossile

(c'est-à-dire une carte de l'Univers environ 300 000 ans après le Big Bang) a pu être établie en 1992, mettant en évidence des fluctuations minimales de températures de l'ordre de $5 \cdot 10^{-6}$ degrés. Avec des fluctuations de cet ordre, la genèse des galaxies et des étoiles peut s'expliquer par la seule action de la force de gravitation (la théorie prévoyait des fluctuations de l'ordre de 10^{-6}). Une telle coïncidence entre prédictions et observations a provoqué un regain d'intérêt pour la théorie du Big Bang dans sa variante dite « théorie de l'inflation » : 10^{-35} seconde après l'instant initial, alors que l'expansion de l'Univers se déroule tranquillement, il va se produire une phase de super-expansion (super Big Bang, entre 10^{-35} et 10^{-32} s, l'Univers voit ses dimensions augmenter d'un facteur 10^{50}) qui va entraîner une grande homogénéité de l'ensemble. Le processus du Big Bang classique se continue et vers 300 000 ans le rayonnement fossile est émis tel que le satellite COBE a pu l'enregistrer. Il existait donc alors des inhomogénéités dans l'Univers avec des zones de concentration de matière séparées par des zones de moindre densité. Depuis COBE, des missions satellitaires (WMAP, Planck, BICEP2) et des observations de radiotélescopes ont permis de préciser la carte du fond diffus cosmologique (*fig. 1.6*).

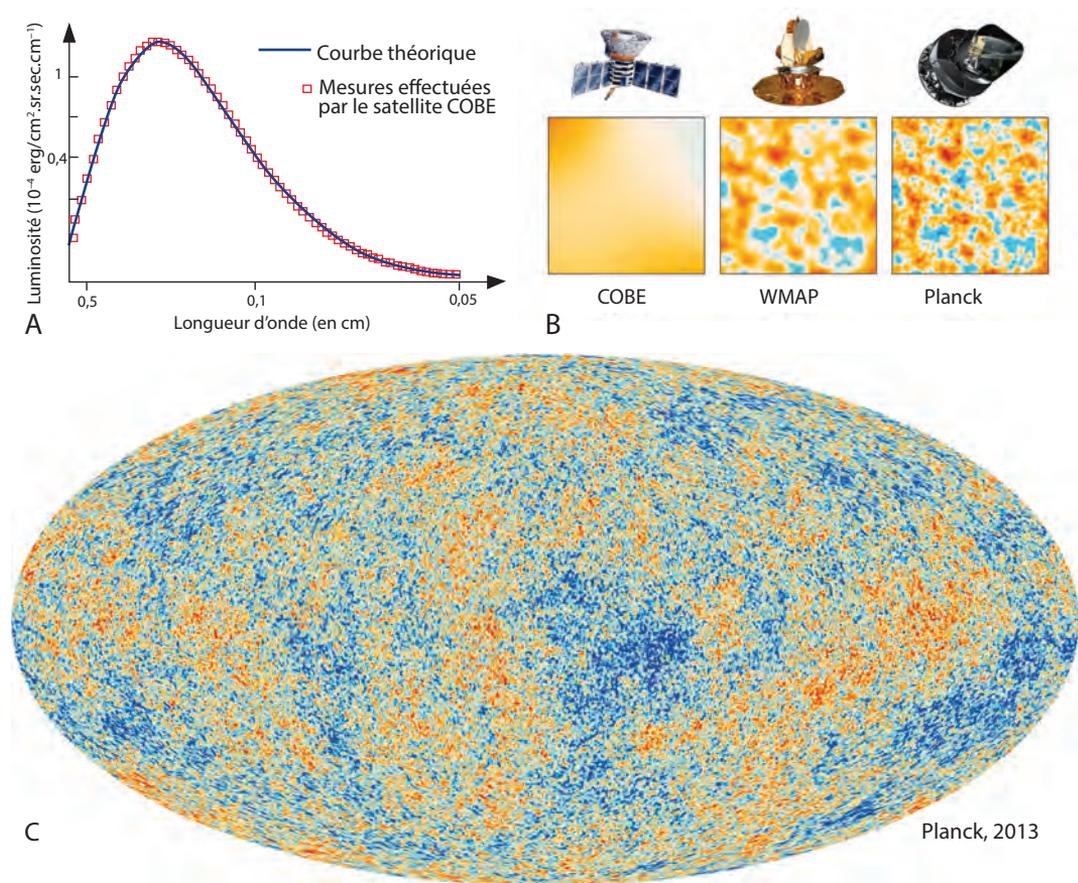


Figure 1.6 Le fond diffus cosmologique (rayonnement fossile).

A. Comparaison des mesures du rayonnement fossile effectué par le satellite COBE (carrés rouges) et du spectre du corps noir à 2,7 °K (courbe bleue). Cette figure montre que le rayonnement fossile suit exactement la loi du corps noir élaborée pour comprendre la thermodynamique.

B. Le fond diffus cosmologique : comparaison de la résolution de trois satellites principaux. Des cartes du fond diffus cosmologique sont produites par les radiotélescopes à terre et les satellites spatiaux, notamment le satellite américain WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) lancé en 2001 et le

satellite européen Planck lancé le 14 mai 2009 par une fusée Ariane 5. Planck avait comme objectif de dresser une carte 20 à 30 fois plus précise que celles de COBE et WMAP grâce à son instrument principal HFI refroidi à 0,1 Kelvin. La collecte des données par HFI s'est achevée en janvier 2012 après avoir épuisé l'hélium destiné à refroidir ses détecteurs (des bolomètres).

C. Carte du fond diffus cosmologique (ou rayonnement fossile). Cette carte publiée en 2013 par les équipes scientifiques de la mission Planck nous montre une image du ciel (rayonnements millimétriques) tel qu'il était 380 000 ans après le début de l'expansion. Les ondes de densité parcourant le fluide de l'Univers après l'inflation laissent leurs empreintes sous la forme de fluctuations de températures variables selon les directions de l'observation. Ces fluctuations sont représentées sur ces cartes du ciel sous forme de taches colorées.

1.6 L'ÂGE DE L'UNIVERS

Une estimation de l'âge de l'Univers (l'unité est le milliard d'années ou Ga) peut être obtenue par trois approches indépendantes : le mouvement des galaxies, l'âge des plus vieilles étoiles (à partir de l'analyse de leurs ressources énergétiques) et l'âge des plus vieux atomes (à partir des techniques de radioactivité).

a) Le mouvement des galaxies

Si les galaxies s'éloignent les unes des autres avec une vitesse (V) qui est proportionnelle à leur distance (d), (*Fig. 1.4*), il est possible de calculer le moment où elles ont dû être rassemblées dans le passé. En effet, le rapport $1/H = d/V$ représente le temps de récession des galaxies soit une approximation de l'âge de l'Univers. Suivant la valeur de la constante de Hubble (H) choisie, les différentes estimations sont comprises entre **15 et 20 Ga**.



voir p. 9

Les données sur l'amas de Virgo, relativement « proche » de la Terre, avaient abouti à des âges plus jeunes de l'ordre de $11,2 \pm 0,9$ Ga (1994), alors que des données sur des amas globulaires aboutissaient à $16,5 \pm 2$ Ga (1991). Ces différences ne sont actuellement pas expliquées par les astrophysiciens. Les données issues des observations du télescope spatial Hubble tendent aussi vers 16 Ga.

Pour montrer la difficulté du problème, il faut rappeler que durant les années trente et quarante, l'estimation de la constante de Hubble était beaucoup plus élevée (170 km/s/Mpc) qu'actuellement ($50 \leq H \leq 100$) et conduisait à des âges de 2 Ga soit beaucoup moins que ce que donnait la radioactivité pour l'âge des plus vieilles roches terrestres.

b) Le fonctionnement stellaire

L'âge des étoiles peut être estimé à partir de l'analyse des éléments chimiques qu'elles consomment pour assurer leur brillance. Toutes les étoiles n'ont pas la même durée de vie, les plus massives brillent plus mais ont une durée de vie plus courte. On admet que les étoiles se forment en groupes (amas d'étoiles) dans lesquels on trouve des étoiles de tous les types (des plus brillantes aux plus ternes), toutes nées ensemble au moment de la formation de l'amas. L'âge de l'amas est estimé d'après l'âge de la plus grosse des étoiles survivantes. Dans notre Galaxie, il existe des amas d'âges variés. Les plus vieux sont formés d'étoiles, dites de première génération (ou primitives), très pauvres en éléments chimiques lourds, sub-contemporaines de la formation de la Galaxie. Ils ont un âge compris entre **14 et 16 Ga**. Des recherches sur les galaxies voisines ont abouti au même ordre de grandeur. Comme, dans la théorie de l'expansion universelle, les galaxies sont censées apparaître très tôt (de l'ordre du milliard d'années) après l'explosion initiale, cet âge paraît une bonne approximation de l'âge de l'Univers.



Voir fig. 2.5

c) Les radio-isotopes

C'est une extension des techniques de la radiochronologie qui, appliquées aux roches terrestres, lunaires et aux météorites, conduit à un âge de 4,55 milliards d'années pour la formation du Système

solaire. On peut reprendre ces données et chercher à les extrapoler plus loin dans le passé. Prenons, par exemple, deux radio-isotopes de l'uranium (^{235}U et ^{238}U), qui présentent chacun une période longue mais sensiblement différente (1 milliard et 6,5 milliards d'années), comme leur taux de désintégration est différent, leur rapport de concentration varie au cours des temps. Le rapport $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ est actuellement de 137,8 il n'était que de l'ordre de 10 au début du Tertiaire (65 Ma) et de 3 à la naissance de la Terre. En extrapolant la courbe jusqu'à un rapport de 1, on obtient un âge de **15 Ga**. De même, on constate actuellement que l'isotope 187 de l'osmium est beaucoup plus abondant que l'isotope 186. Cet excès de ^{187}Os provient de la désintégration du rhénium (^{187}Re). Connaissant l'abondance cosmique et la période du ^{187}Re , il devient possible de calculer le temps nécessaire pour créer l'excès de ^{187}Os . On obtient alors un âge de **17 ± 4 Ga**. L'âge moyen de l'Univers, le plus communément admis actuellement, à partir des différentes techniques radiochronologiques, est de **15 ± 5 Ga**.

Ainsi trois approches indépendantes, basées sur des processus physico-chimiques différents, aboutissent à des âges concordants. Cette concordance est une présomption forte en faveur de la **théorie du Big Bang**. L'estimation la plus précise a été obtenue en 2015 à partir des données du satellite Planck (ESA) combinées à celles, plus anciennes, des satellites WMAP et COBE. On obtient un âge de **$13,798 \pm 0,037$ milliards d'années** (fig. 2.4).

À retenir

- L'Univers, qui présente une architecture hiérarchisée : galaxies (formation des étoiles), amas et super-amas, est une structure en expansion qui paraît constituée de seulement 4 % de matière baryonique visible, de 23 % de matière noire et de 73 % d'énergie noire. La présence de matière baryonique invisible (par les méthodes spectroscopiques classiques) a été détectée, son importance est en cours d'évaluation.
- L'Univers serait né à partir d'une explosion initiale, le Big Bang, suivie d'une expansion ralentie par la gravité. Ensuite la force de répulsion à grande échelle aurait pris progressivement le dessus et l'Univers serait entré dans une phase d'expansion accélérée éternelle.
- La découverte du rayonnement fossile (fond diffus cosmologique et la concordance des âges (environ 13,8 Ga) obtenus à partir de la récession des galaxies, du fonctionnement stellaire et des radio-isotopes sont des arguments forts en faveur de la théorie du Big Bang.

MOTS-CLÉS

- ▶ Particules élémentaires, modèle standard, quarks, leptons, bozons, nucléosynthèse, cycle de Bethe.
- ▶ Phases cosmique, stellaire, interstellaire et planétaire.
- ▶ Diagramme de Hertzsprung-Russell, phase T. Tauri, supernova, pulsar.

Une des forces de la théorie du Big Bang est de pouvoir expliquer assez fidèlement la proportion actuelle des éléments chimiques dans l'Univers à partir d'un modèle de synthèse des noyaux des éléments chimiques. Pour être valide, la théorie doit notamment expliquer trois données principales :

- L'hydrogène est l'élément le plus abondant (90 % des atomes de l'Univers sont de l'hydrogène) et moins d'un atome sur mille n'est ni de l'hydrogène ni de l'hélium (*fig. 2.2*).
- Il existe une décroissance progressive de l'abondance des éléments en fonction des numéros atomiques croissants.
- Trois éléments échappent à cette corrélation, le lithium, le béryllium et le bore qui, malgré leur petit numéro atomique, sont parmi les éléments les moins abondants de l'Univers (*fig. 2.2*).

2.1 LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE : PARTICULES, NOYAUX ET ATOMES

La physique des particules s'est développée au cours du XX^e siècle notamment grâce à l'étude des rayons cosmiques et surtout par l'analyse des expériences de collisions expérimentales réalisées dans les accélérateurs comme le LHC (Large Hadron Collider) du CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) à Genève¹. Pourquoi accélérer et faire entrer en collision des particules ? La formule d'Einstein $E = MC^2$ montre l'équivalence entre masse et énergie. Lorsque des particules entrent en collision, l'énergie qu'elles transportent est utilisée pour créer de nouvelles particules (dont la durée de vie est parfois très brève car elles sont souvent instables). Plus l'énergie disponible est élevée plus ces dernières seront lourdes et nombreuses. Pour classifier les centaines de types de particules ainsi observées et comprendre les liens et les interactions les reliant, une théorie a été élaborée dans les années 1960-1970 : Le **Modèle Standard** qui, s'il n'explique pas tout (cf. infra), a résisté jusqu'à maintenant à tous les tests expérimentaux. Le modèle standard suppose l'existence de douze

1. Pour plus d'informations, le lecteur pourra consulter l'excellent ouvrage collectif « Passeport pour les deux infinis », Dunod éd. 2016.

types de particules plus ou moins sensibles à quatre forces fondamentales transmises par quatre particules médiatrices ou **bosons** dont seules trois ont pu être mises en évidence (cf. infra).

2.1.1 Les forces fondamentales régissant l'univers

L'ensemble des phénomènes de l'univers peut être décrit grâce à quatre interactions ou forces fondamentales. Deux d'entre elles, la gravité et l'électromagnétisme nous sont familières, du fait de leur implication dans des processus de notre vie courante (chute des corps, électricité, magnétisme). Les deux autres, dites interactions « fortes » et « faibles » interviennent dans le monde de l'infiniment petit. L'interaction « forte » est responsable de la cohésion des noyaux atomiques. L'interaction « faible » gouverne les processus de désintégrations radioactives.

Chacune de ces forces est transmise par une ou plusieurs particules médiatrices (**bosons**) dont la masse gouverne la portée, plus ou moins grande, de l'interaction (plus leur masse est grande, plus la portée est courte, *tableau 2.1 et fig. 2.1*).

TABEAU 2.1 Les caractéristiques des forces fondamentales :

les quatre forces qui agissent sur les particules élémentaires sont classées par intensité décroissante par rapport à celle de la force « forte » prise arbitrairement comme unité.

Type	Intensité relative	Particules médiatrices (bosons)	Processus principaux dans lesquels ces forces sont impliquées
Force forte	1	Gluon	Cohésion des noyaux atomiques
Force électromagnétique	10^{-3}	Photon	Cortège électronique entourant le noyau
Force faible	10^{-5}	Boson Z^0 , W^+ , W^-	Désintégration radioactive bêta
Gravitation	10^{-38}	Graviton ? particule non encore observée	Chute des corps, astres, évolution des galaxies

2.1.2 Les particules élémentaires : Quarks et Leptons

On a découvert des centaines de types de particules sensibles à l'interaction « forte » regroupées sous le terme d'**hadrons** dont font partie les constituants des noyaux atomiques (**nucléons**) : les **protons** et les **neutrons**. La diversité des hadrons résulte du fait qu'ils sont constitués par la combinaison de constituants plus élémentaires les **quarks** qui sont maintenus ensemble par des gluons (responsables de l'interaction « forte »).

Il existe six types de quarks : les quarks u (up) et d (down) qui constituent les protons et les neutrons des noyaux atomiques, le quark « étrange » observé dans les rayons cosmiques et les quarks « charme », « bottom » et « top » observés dans les accélérateurs (*fig. 2.1*). À chaque quark correspond une antiparticule ou antiquark dont l'association constitue l'antimatière. Les quarks ont des charges électriques de $-1/3$ pour les quarks down (d) ou de $+2/3$ pour les quarks up (u).

Les quarks s'associent pour former les « particules composites » ou hadrons que l'on peut regrouper en deux types les **baryons** (pour les assemblages de trois quarks) et les **mésons** (pour les assemblages quark/antiquark). *Ainsi le proton (charge électrique +1) est un baryon constitué de deux quarks up (charge +2/3) et d'un quark down (charge -1/3) tandis que le neutron (charge électrique nulle) est un assemblage de deux quarks down et d'un quark up.*

Les **leptons** (*fig. 2.1*) sont aussi une famille de six particules élémentaires : l'**électron**, le **muon**, le **tau** et leurs trois **neutrinos** associés. Ces particules ont des propriétés voisines notamment elles ne sont pas sensibles à l'interaction forte.