

Éléments de géologie

Éléments de géologie

18^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)

Nicolas Coltice

Professeur des universités à l'École Normale Supérieure de Paris

Sylvie Leroy

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

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))

DUNOD

Crédits photographiques

p. 1 : le sommet du Mauna Kea, 4 205 m à Hawaï regroupe un ensemble d'observatoires internationaux © M. Lagabriele. p. 49 : vallée encaissée recoupant le socle de la chaîne himalayenne © S. Guillot. p. 235 : falaise côtière de Big Island, Hawaï, montrant les coulées des éruptions les plus récentes © M. Lagabriele. p. 321 : le Cervin. Le sommet appartient à la plaque apulienne et la base est européenne © B. Corre. p. 443 : Piton de la fournaise (Réunion) en octobre 2006 © A. Peltier. p. 601 : vue aérienne de la baie de Somme, en France, où les marées sculptent le littoral atlantique © M. Workman. p. 717 : baie de Baffin (Groenland) lors de la mission ArcticNet le 26 juillet 2014 à bord du NGCC Amundsen © C. Aubry/ Université Laval – Canada. p. 777 : panorama des terrains continentaux du Danien affleurant sur la colline d'Albas (Corbières, France) © D. Desmares/Sorbonne Université. p. 965 : la Scala dei Turchi en Sicile © M. de Rafèlis. Photo de couverture : le rocher du Lion de Sigiriya, baigné de soleil, au Sri Lanka © S. Figurnyi.



NOUS PROTÉGEONS LE DROIT D'AUTEUR :

Ce livre ne peut être reproduit ni utilisé à des fins d'entraînement de systèmes d'intelligence artificielle. La fouille de textes et de données est interdite conformément à l'article 4(3) de la Directive (UE) 2019/790.

Toute reproduction ou diffusion de cet ouvrage, même partielle, sans autorisation, est strictement interdite.

Le piratage porte atteinte au travail des auteurs et fragilise l'ensemble de la chaîne du livre.

En partageant ou reproduisant ce livre illégalement, vous mettez en danger celles et ceux qui le créent, le produisent et le diffusent.

© Dunod 2002, 2005, 2011, 2015, 2018, 2021, 2026 pour la 18^e édition

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

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff Cedex

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-087798-0

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos

Partie 1 – La Terre : une planète dans l'Univers

Chapitre 1 • La matière dans l'Univers

- 1.1 L'architecture de l'Univers 3
- 1.2 Le modèle du « Big Bang » 4
- 1.3 L'âge de l'Univers 7
- 1.4 Nucléosynthèse et évolution de l'Univers 8

Chapitre 2 • Le système solaire

- 2.1 Le système solaire dans l'Univers 18
- 2.2 La structure du système solaire 18
- 2.3 La naissance du système solaire 23
- 2.4 Le Soleil 29
- 2.5 Les différentes planètes 31

Partie 2 – La dynamique de la Terre solide : géophysique et géochimie globales

Chapitre 3 • Forme et structure de la Terre solide : géodésie et gravimétrie

- 3.1 Forme et surfaces remarquables
de la Terre : les apports de la géodésie 52
- 3.2 Les enveloppes externes de la terre solide :
croûte et manteau, lithosphère
et asthénosphère 56
- 3.3 La mesure de la pesanteur terrestre :
la gravimétrie 59
- 3.4 La représentation gravimétrique de la Terre :
l'ellipsoïde de référence et le géoïde 63
- 3.5 Les anomalies de la gravité 73
- 3.6 L'interprétation des anomalies
gravimétriques : isostasie et mouvements
verticaux de la lithosphère 76

Chapitre 4 • Structure du globe et mobilité de la lithosphère : sismologie et géomagnétisme

- 4.1 La sismologie 85
- 4.2 Le géomagnétisme 134

XI Chapitre 5 • La tectonique des plaques lithosphériques

- 5.1 La dérive des continents 157
- 5.2 L'expansion des fonds océaniques 161
- 5.3 La tectonique des plaques 163
- 5.4 L'analyse du mouvement des plaques :
notions de cinématique 168

Chapitre 6 • Composition et histoire de la Terre solide : géochimie globale et géochronologie

- 6.1 Structure interne et composition chimique
du globe : évolution des connaissances 186
- 6.2 La géochimie : objectifs et méthodes
d'études 192
- 6.3 La radiochronologie : dater
les événements géologiques 197
- 6.4 Réservoirs géochimiques, différenciation
mantellique et origine des continents 206

Chapitre 7 • Synthèse sur la dynamique globale : mobilité de la lithosphère et de l'asthénosphère

- 7.1 Deux régimes dynamiques bien différents 217
- 7.2 Lithosphère-asthénosphère 217
- 7.3 La lithosphère : une enveloppe rigide
visco-élasto-plastique 218
- 7.4 Le manteau asthénosphérique :
le fluage et la convection 223
- 7.5 Dynamique du manteau et mouvements
verticaux : la topographie dynamique 231
- 7.6 Supercontinents 232

Partie 3 – La dynamique de la lithosphère océanique

Chapitre 8 • Les océans : généralités et méthodes d'exploration

- 8.1 Les grandes provinces océaniques 236
- 8.2 Outils pour l'exploration des fonds
océaniques 241

Chapitre 9 • Plaines abyssales, dorsales, points chauds et bassins arrière-arc

- 9.1 Les plaines abyssales 252

Éléments de géologie

9.2	Les dorsales océaniques	254
9.3	Les îles océaniques, rides et points chauds	280
9.4	Les bassins océaniques marginaux ou arrière-arc	284

Chapitre 10 • Les marges continentales passives et actives

10.1	Les marges stables ou passives	289
10.2	Les marges actives	303

Partie 4 – La déformation de la lithosphère continentale

Chapitre 11 • La rhéologie des ensembles géologiques

11.1	Force et contrainte : le tenseur des contraintes	322
11.2	Déformation expérimentale	324
11.3	Relations contrainte-déformation	326
11.4	Déformation des ensembles géologiques	331
11.5	Conclusion	338

Chapitre 12 • Tectonique analytique : étude des objets déformés aux différentes échelles

12.1	La déformation cassante	341
12.2	Les plis	351
12.3	Chevauchements et nappes de charriage, rampes et duplex	357
12.4	Déformation des roches profondes	361
12.5	La représentation géométrique des objets tectoniques	369
12.6	Tectoniques superposées et héritage	371
12.7	Tectonique et morphologie	372

Chapitre 13 • Des bassins sédimentaires aux chaînes de montagne

13.1	Bassins et rifts	381
13.2	Les chaînes de subduction	388
13.3	Les chaînes d'obduction	394
13.4	Les chaînes de collision	401
13.5	Une chaîne dite intracontinentale : les Pyrénées	421
13.6	Un problème récurrent dans les chaînes de subduction-collision : l'exhumation des unités de haute pression	426
13.7	Tectonique de l'Europe préalpine	433
13.8	Ouverture de l'océan atlantique. Anciennes sutures océaniques et panache mantellique	438
13.9	Conclusion	439

Partie 5 – Les constituants endogènes des enveloppes solides de la Terre : roches ignées et roches métamorphiques

Chapitre 14 • Minéralogie

14.1	Caractéristiques et propriétés des minéraux	444
14.2	Les principaux minéraux	453

Chapitre 15 • Les magmas : origine et diversité

15.1	Le magmatisme sur Terre : répartition géodynamique et causes	466
15.2	Les processus conduisant à la grande variété des roches magmatiques	484
15.3	Le magmatisme au cours des périodes géologiques	498

Chapitre 16 • Les roches magmatiques : textures, classification et mise en place

16.1	Textures et classification des roches magmatiques	504
16.2	Les roches plutoniques	510
16.3	Les roches volcaniques	517

Chapitre 17 • Le métamorphisme

17.1	Notions principales, répartition du métamorphisme	563
17.2	Structures des roches métamorphiques	571
17.3	Les facteurs du métamorphisme	573
17.4	Évolution métamorphique et trajet P-T-t	576
17.5	Métamorphisme et géodynamique	586

Partie 6 – Les enveloppes fluides de la planète Terre : atmosphère et hydrosphère. Océanographie, hydrogéologie et géomorphologie

Chapitre 18 • L'atmosphère

18.1	Composition de l'atmosphère terrestre	602
18.2	Structure de l'atmosphère	603
18.3	Les nuages	606
18.4	Origine et évolution de l'atmosphère	608
18.5	Les circulations atmosphériques et la zonation climatique	613
18.6	Des dispositifs climatiques régionaux	616

Chapitre 19 • L'océan : propriétés physiques et chimiques de l'eau de mer

19.1	Un océan mondial ou des océans ?	622
19.2	Les propriétés de l'eau de mer	624
19.3	L'origine de l'eau sur Terre	626
19.4	La répartition des températures dans l'océan	630

19.5	La composition chimique de l'eau de mer	633	Chapitre 24 • Prévisions sur l'évolution du climat terrestre	762	
19.6	L'hydrothermalisme sous-marin	641			
19.7	Les circulations océaniques	646	24.1	Les instances politiques et scientifiques mondiales intervenant dans la lutte contre le changement climatique	763
19.8	L'eustatisme : les variations absolues du niveau marin et notion de niveau marin relatif	658	24.2.	Les prévisions du 5 ^e rapport du GIEC (2014)	764
Chapitre 20 • Les eaux continentales : notions d'hydrogéologie, de glaciologie et de géomorphologie			24.3	Les prévisions du 6 ^e rapport du GIEC (2023)	765
		664	24.4	L'évolution climatique de l'Europe : une forte variabilité géographique	771
20.1	Les eaux de surface	665	24.5	Une prévision à plus long terme : la sortie de l'interglaciaire actuel	773
20.2	Les eaux souterraines, éléments d'hydrogéologie	680			
20.3	Glaciologie	693	Partie 8 – Sédimentologie : roches et environnements sédimentaires		
20.4	Les ablations sans vecteurs organisés et l'évolution des versants	709			
Partie 7 – Les climats de la Terre			Chapitre 25 • L'altération des continents et la production des constituants des sédiments		
					778
Chapitre 21 • Le bilan thermique de la planète Terre			25.1	Les processus d'altération	779
		718	25.2	Les mécanismes de l'altération soustractive à l'échelle du minéral et de la roche	784
21.1	La Terre : un système thermique globalement en équilibre	718	25.3	Les altérations additives	795
21.2	Des sous-systèmes climatiques (surface terrestre vs. atmosphère) en déséquilibre radiatif	720	25.4	Influence du relief sur la répartition des types d'altérations (additives vs. soustractives)	797
21.3	Des déséquilibres énergétiques régionaux	721	25.5	Les sols	799
21.4	Les circulations atmosphériques et océaniques : une redistribution de l'énergie à la surface de la Terre	722	25.6	L'érosion des continents	802
Chapitre 22 • Le contrôle astronomique du climat : la théorie de Milankovitch			25.7	Le bilan des grands fleuves, transport particulaire vs. transport dissous : une image de l'érosion mondiale	803
		723	Chapitre 26 • Transport et sédimentation : figures et structures sédimentaires associées classification granulométrique des roches sédimentaires		
22.1	Le cycle des saisons	723			805
22.2	La théorie astronomique du climat ou théorie de Milankovitch	725	26.1	Le transport par les eaux	806
22.3	La dissymétrie climatique des deux hémisphères terrestres	731	26.2	Impact de l'hydrodynamisme sur les sédiments et figures sédimentaires associées aux modes de transport et de dépôt	815
Chapitre 23 • Les grandes étapes de l'histoire climatique de la Terre			26.3	La classification granulométrique des roches sédimentaires	828
		733	26.4	Le transport par le vent	832
23.1	Les méthodes de la paléoclimatologie	734	Chapitre 27 • Sédimentation et environnements continentaux		
23.2	Les fluctuations climatiques de premier ordre	737			839
23.3	Les fluctuations climatiques de second ordre	738	27.1	La sédimentation lacustre et margino-littorale (lagunes)	839
23.4	Les fluctuations climatiques de troisième ordre	744	27.2	La sédimentation fluviale	849
23.5	Les fluctuations climatiques de quatrième ordre	752	27.3	Le domaine fluvio-marin : estuaires et deltas	853
23.6	Synthèse des variations climatiques depuis le Mézozoïque	759			

Chapitre 28 • Sédimentation et environnements néritiques

28.1	La sédimentation carbonatée de plate-forme	860
28.2	La classification des roches carbonatées	869
28.3	Récifs et bioconstructions	874
28.4	Les plates-formes carbonatées actuelles	880
28.5	Modèles et profils de dépôt, analyse séquentielle	883
28.6	La sédimentation phosphatée	887

Chapitre 29 • Sédimentation gravitaire et environnements du talus

29.1	Les phénomènes gravitaires	890
29.2	Les séquences gravitaires	894
29.3	Les séries gravitaires	897

Chapitre 30 • Sédimentation et environnements pélagiques

30.1	La sédimentation pélagique carbonatée	905
30.2	La sédimentation pélagique argileuse	916
30.3	La sédimentation pélagique siliceuse	917
30.4	La mobilité lithosphérique : un contrôle de la sédimentation océanique	919
30.5	Le contrôle climatique de la sédimentation pélagique : les fluctuations de la teneur en CaCO ₃ des sédiments pélagiques et les rythmes sédimentaires de type Milankovitch	920
30.6	Les séries pélagiques alternantes	922
30.7	Les séries pélagiques anciennes	925
30.8	Le bilan de la sédimentation carbonatée marine	926

Chapitre 31 • Sédimentation de la matière organique

31.1	La matière organique continentale	930
31.2	La production de matière organique dans l'océan	931
31.3	Les modalités de la conservation de la matière organique	933
31.4	La caractérisation chimique de la matière organique sédimentaire	938
31.5	Les principales roches carbonées	939

Chapitre 32 • Du sédiment à la roche : la diagenèse

32.1	Les facteurs de la diagenèse	947
32.2	La diagenèse siliceuse	952
32.3	La diagenèse carbonatée	954

Partie 9 – Notions de stratigraphie : aperçu de l'histoire de la vie et de la Terre

Chapitre 33 • La stratigraphie : fondements et méthodes

33.1	Les principes de la stratigraphie	967
33.2	La lithostratigraphie	970
33.3	La biostratigraphie	973
33.4	La radiochronologie	977
33.5	Cyclostratigraphie, dendrochronologie et sclérochronologie, téphrochronologie, thermochronologie	978
33.6	La magnétostratigraphie	983
33.7	La chimiostratigraphie	983
33.8	La stratigraphie séquentielle : une approche synthétique de la stratigraphie	983
33.9	L'échelle stratigraphique	995

Chapitre 34 • Géochimie sédimentaire : chimiostratigraphie

34.1	Signal géochimique primaire vs. signal diagénétique	1001
34.2	Le rapport isotopique de l'oxygène	1002
34.3	Le rapport isotopique du carbone	1020
34.4	Le rapport isotopique du strontium (87Sr/86Sr)	1026
34.5	Les éléments traces	1028

Chapitre 35 • Origine, premiers stades et crises de la vie sur Terre

35.1	Les hypothèses sur les mécanismes et les lieux d'origine de la vie terrestre	1039
35.2	Les étapes de la vie primitive au Précambrien	1043
35.3	L'évolution de la biosphère phanérozoïque : crises et radiations	1053

Chapitre 36 • Le Quaternaire et l'émergence de l'Homme

36.1	Chronologie et événements du Quaternaire	1067
36.2	Émergence de l'homme	1072
36.3	L'évolution du genre Homo	1081
36.4	Essai de « phylogénie » de la lignée humaine	1088
36.5	Les industries humaines	1089

Bibliographie et sites WEB

Index

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 ce livre
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 mon amical hommage.

Pomerol

4.II.89

Maurice Renard

AVANT-PROPOS

Éléments de géologie a vu le jour en 1965, sous la plume de Pierre Bellair et Charles Pomerol. À partir de 1989, date de la 9^e édition, Charles Pomerol et Maurice Renard ont poursuivi l'aventure en duo jusqu'en 2000, faisant de l'ouvrage une référence pour l'enseignement de la géologie. Yves Lagabriele les a rejoints pour la 12^e édition, en 2000, apportant son expérience des domaines océaniques et des chaînes de montagnes. Il a contribué à une refonte complète de l'ouvrage dont Charles Pomerol est resté la cheville ouvrière jusqu'à la 14^e édition en 2011.

Nous sommes convaincus qu'un ouvrage d'enseignement doit rester en prise directe sur les recherches en cours dans les laboratoires. Ces dernières se traduisent par la multiplication rapide des données et des concepts dans toutes les disciplines des géosciences. Ceci nous a conduits, au cours des éditions successives, à élargir l'équipe rédactionnelle avec des experts scientifiques et pédagogiques couvrant les différents domaines de la géologie : Stéphane Guillot (14^e édition), Erwan Martin et Marc de Rafélis (depuis la 15^e édition), puis Nicolas Coltice et Sylvie Leroy (depuis la 17^e édition). Cette 18^e édition est celle du passage de témoins. M. Renard et Y. Lagabriele vont se retirer progressivement, laissant la charge à leurs compagnons d'écriture d'assurer l'avenir et la pérennité de l'ouvrage.

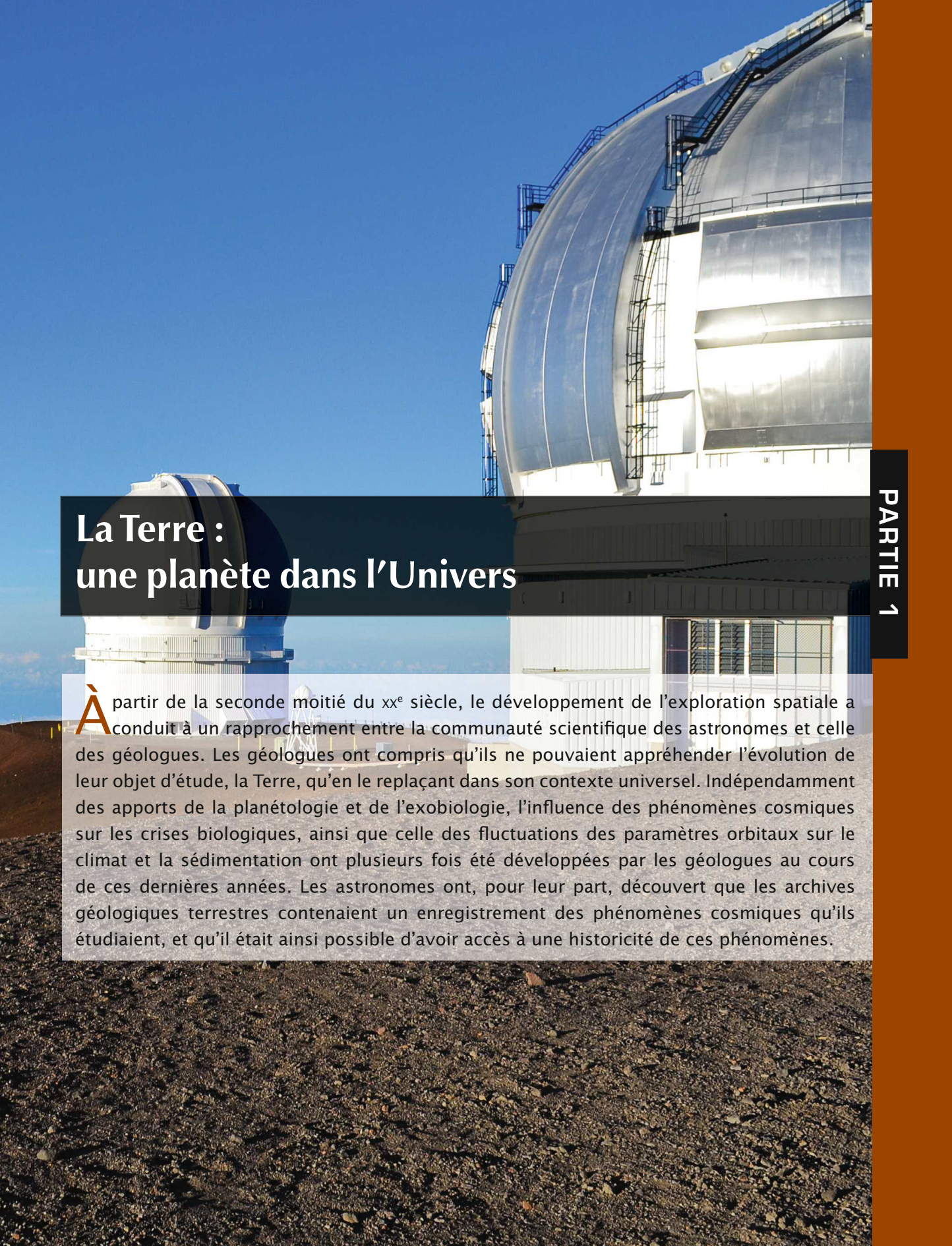
La présente édition a été profondément remaniée et rendue plus cohérente par le déplacement, la fusion et/ou la refonte de chapitres. Les contenus scientifiques ont été mis à jour et complétés au fil de l'ouvrage. L'ambition de l'équipe rédactionnelle reste qu'*Éléments de géologie* soit le livre « compagnon » de l'étudiant en Sciences de la Terre, depuis la première année de licence ou de classes préparatoires jusqu'à la préparation aux concours d'enseignement (CAPES ou agrégation de SVT) et les premiers pas professionnels d'enseignant ou de chercheur (au cours du doctorat). Nous avons donc conservé une rédaction permettant une lecture à différents niveaux de culture géologique. Les avancées des connaissances et des techniques ainsi que l'apport de l'expérimentation en Sciences de la Terre sont présentés tout en conservant la pertinence des analyses du terrain et des objets géologiques (illustrés de plus par les reportages en ligne). Nous nous appuyons sur ces observations pour étayer les concepts modernes et aboutir à une compréhension des phénomènes globaux décrivant la Terre comme un système à multiples entrées.

L'iconographie, abondante et originale, est l'un des atouts de cet ouvrage. La majorité des figures a été conçue par les auteurs avec pour objectif de synthétiser et de rendre accessible l'essentiel des informations pertinentes. Certaines illustrations ont été réalisées avec l'aide d'Alexandre Lethiers (ISTeP-CR2P, Sorbonne Université) et de Bernadette Coléno dont nous saluons ici la minutie et l'efficacité. Laetitia Jammet et Aleksandra Czarnecka ont assuré le suivi éditorial ; nous tenons à les remercier chaleureusement pour leur travail et leurs encouragements.

Nous avons bénéficié des observations, critiques et conseils d'un grand nombre d'étudiants, d'enseignants et de chercheurs, rencontrés au cours des années, au sein de nos universités, laboratoires, sur le terrain, dans le cadre d'associations ou au jury du CAPES et de l'agrégation SVT.

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 sont pour beaucoup.

Les auteurs



La Terre : une planète dans l'Univers

PARTIE 1

À partir de la seconde moitié du xx^e siècle, le développement de l'exploration spatiale a conduit à un rapprochement entre la communauté scientifique des astronomes et 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 et de l'exobiologie, l'influence des phénomènes cosmiques sur les crises biologiques, ainsi que 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.

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

MOTS-CLÉS

- ▶ Effet Doppler, récession des galaxies, loi et constante de Hubble.
- ▶ Big Bang, inflation.
- ▶ Constante cosmologique, matière noire, énergie noire.
- ▶ Nucléosynthèse, fusion nucléaire.
- ▶ Phases cosmique, stellaire, interstellaire et planétaire.
- ▶ Diagramme de Hertzsprung-Russell, phase T Tauri, supernova.

Le modèle du Big Bang fournit un cadre abouti pour expliquer la distribution actuelle des éléments chimiques dans l'Univers, grâce aux processus de nucléosynthèse primordiale survenus durant les premières minutes. Trois faits observationnels clés en attestent : l'abondance écrasante d'hydrogène (74 % en masse) et d'hélium (24 %), la décroissance rapide des éléments plus lourds en fonction de leur masse atomique, et la rareté anormale du lithium, du béryllium et du bore, ces derniers étant facilement détruits dans les étoiles.

Les progrès dans l'observation de l'espace permettent désormais de tester ces prédictions avec une précision inédite. Le télescope spatial James Webb, lancé en 2021, a révélé, en étudiant les plus vieilles galaxies, une composition chimique appauvrie en éléments lourds, conforme aux modèles.

Cette cohérence entre la théorie et les observations repose sur un principe fondamental : l'Univers évolue chimiquement. Les premières étoiles de l'Univers ont commencé à enrichir le milieu interstellaire en éléments lourds il y a plus de 13 milliards d'années. Leur étude, combinée aux modèles de nucléosynthèse stellaire, permet de retracer l'histoire complète de la matière, depuis les premiers noyaux jusqu'aux atomes complexes nécessaires à la vie.

Ce chapitre propose une vue d'ensemble de nos connaissances sur l'Univers, avant de décrire rapidement le modèle du Big Bang qui permet de donner un âge à notre monde. La deuxième moitié du chapitre est consacrée à la synthèse des éléments chimiques qui constitue la matière – la seule que nous soyons, à ce jour, capables d'appréhender.

1.1 L'ARCHITECTURE DE L'UNIVERS

L'Univers tel que nous le comprenons aujourd'hui est structuré en une hiérarchie complexe de systèmes emboîtés, allant des planètes et étoiles aux galaxies, amas et superamas, formant un vaste réseau cosmique (*fig. 1.1*). À grande échelle, l'Univers observable présente une structure filamentaire, souvent comparée à une « toile cosmique ». Ces filaments, composés de galaxies et de gaz intergalactique, relient entre eux des nœuds denses que sont les amas et superamas, tandis que d'immenses régions vides, les « vides cosmiques », séparent ces structures. Cette distribution résulte de l'effondrement gravitationnel de la matière après le Big Bang, amplifié par la présence de matière noire, qui constitue environ 26 % de l'Univers et qui agit comme un squelette invisible guidant la formation des galaxies.

La matière noire est une forme de matière non directement détectable par les instruments d'observation classiques, car elle n'émet, n'absorbe et ne réfléchit aucune lumière. Son existence est inférée à partir de ses effets gravitationnels : par exemple, la vitesse de rotation des galaxies reste élevée même loin de leur centre, ce qui suggère la présence d'une masse invisible supplémentaire. La matière noire est également nécessaire pour expliquer la stabilité des amas de galaxies et les fluctuations du fond diffus cosmologique. Elle interagit par gravitation, mais pas par les interactions électromagnétiques, forte ou faible. Sa nature exacte reste encore inconnue. Parmi ces inconnues qui structurent l'Univers, la matière noire est accompagnée de l'énergie noire (ou énergie sombre), qui représente environ 68 % de l'énergie totale de l'Univers. Elle est postulée pour expliquer l'observation, dès la fin des années 1990, d'une accélération de l'expansion de l'Univers. Contrairement à la matière (ordinaire ou noire), l'énergie noire semble exister partout et de manière uniforme dans l'espace. Elle exerce une force qui engendre une répulsion gravitationnelle à grande échelle, s'opposant à l'effet de la gravité.

Les interactions entre la gravité, la matière noire et l'énergie noire sont à l'origine de l'organisation en réseaux de l'Univers. Parmi ces structures, le superamas Laniakea (« horizon céleste immense » en hawaïen), identifié en 2014, représente une avancée importante. C'est le grand ensemble dans lequel nous nous trouvons. D'une étendue de 520 millions d'années-lumière, il englobe environ 100 000 galaxies, dont la nôtre, la Voie lactée (*fig. 1.1*). Laniakea est défini par le mouvement cohérent des galaxies vers un même point d'attraction gravitationnelle : le « Grand Attracteur », une concentration de masse située à environ 250 millions d'années-lumière.

Ces découvertes s'inscrivent dans un débat plus large sur la validité du principe cosmologique, qui postule que l'Univers est homogène et isotrope à très grande échelle. La détection de structures comme Laniakea, mais aussi du « Big Ring on the Sky » (un anneau de galaxies de 1,3 milliard d'années-lumière) ou du « Giant Arc » (1,2 milliard d'années-lumière), dont les tailles dépassent les limites théoriques admises, suggère que l'Univers pourrait être plus hétérogène que prévu.

L'architecture de l'Univers révèle des structures gigantesques, comme Laniakea, organisées par la gravité mais aussi par des énigmes persistantes telles que la matière noire ou l'énergie noire. Les futurs progrès en observation (avec des instruments comme le télescope Euclid) et en modélisation numérique permettront d'affiner la cartographie de l'Univers.

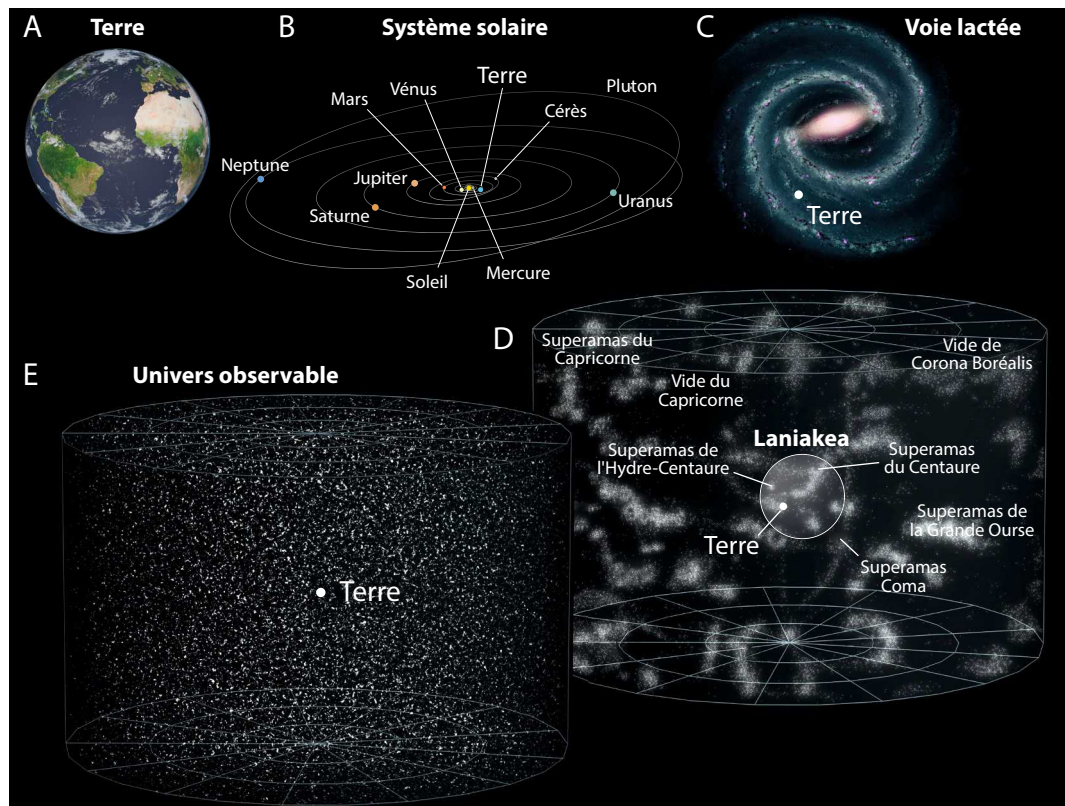


Figure 1.1 L'architecture cosmique : de la Terre (A) aux limites de l'Univers observable (E).

L'Univers est structuré par la matière et l'énergie visible mais aussi invisible. **A.** Le grain le plus fin est la planète (certaines ont été détectées sans étoile), puis le système planétaire, le nôtre étant le système solaire (**B**). Le système solaire fait partie d'une galaxie, la nôtre étant la Voie lactée (**C**). Les galaxies sont elles aussi organisées en amas et en superamas, et même en structures plus grandes, comme Laniakea.

1.2 LE MODÈLE DU « BIG BANG »

a) Observer l'expansion de l'Univers

La structure de l'Univers est dynamique et relève ainsi d'une histoire. Pour retracer cette évolution, nous avons l'observation de la matière et de ses mouvements. Même si le ciel nocturne donne l'impression que l'Univers est immobile, les étoiles se déplacent en réalité à des vitesses pouvant atteindre quelques centaines de kilomètres par seconde. Les astronomes appellent « mouvement propre » le déplacement apparent des étoiles proches. Notre connaissance du déplacement des objets célestes est basée sur le décalage vers le rouge de leur lumière. Cette propriété est analogue à l'« effet Doppler ». Le décalage vers le rouge n'est pas un effet Doppler au sens strict ; il résulte en réalité de l'étirement de l'espace entre l'émission et la réception du signal lumineux.

Encart 1.1 – 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 deux 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 émissions, 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 remplacée par $-V$.

Les ondes sonores nous donnent à ressentir l'effet Doppler : 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 que sa fréquence est 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 surface. De plus, dans le cas d'un effet Doppler, l'ensemble des raies du spectre étant 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 observe que les spectres des galaxies sont légèrement décalés vers le rouge ou vers le bleu. Ces observations sont attribuées à l'effet Doppler indiquant que certaines nébuleuses se rapprochent 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 éloignent. En 1924, sur 41 galaxies étudiées, Edwin Hubble en observa 36 qui s'éloignaient (*fig. 1.2*) et 5 qui se rapprochaient. Le fait que les galaxies semblent s'éloigner de nous ne signifie nullement que notre galaxie occupe une position centrale dans l'Univers. Tout observateur placé dans une autre galaxie quelconque aurait aussi l'impression que toutes les autres s'éloignent.

De plus, en 1929, Edwin 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'exprime 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). Le parsec, noté « pc », est l'unité de mesure stellaire et correspond à 3,26 années-lumière.

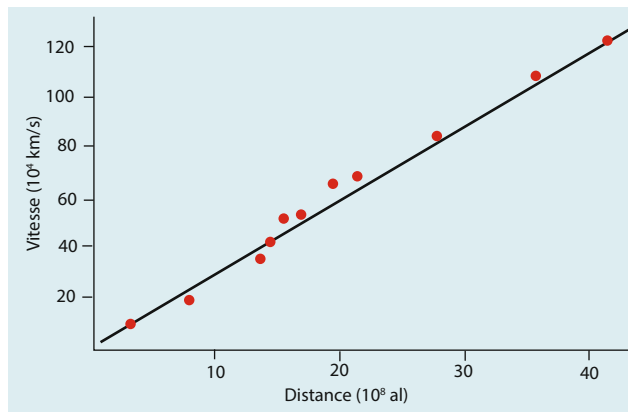


Figure 1.2 L'éloignement des galaxies : loi de Hubble.

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.

En 1994, un calcul basé sur les céphéides de l'amas Virgo aboutit à $H = 87 \pm 7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$. Depuis, d'autres types de mesures pointent vers une valeur plus proche de $70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$. 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. 1.2). 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 détracteurs, l'astronome Fred Hoyle).

b) 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 Hubble. La luminosité de ce type de supernovae est si forte que celles-ci 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. 1.3). La nature de cette force répulsive qui repousse la matière reste énigmatique : c'est ainsi que l'on a créé le concept d'énergie noire.

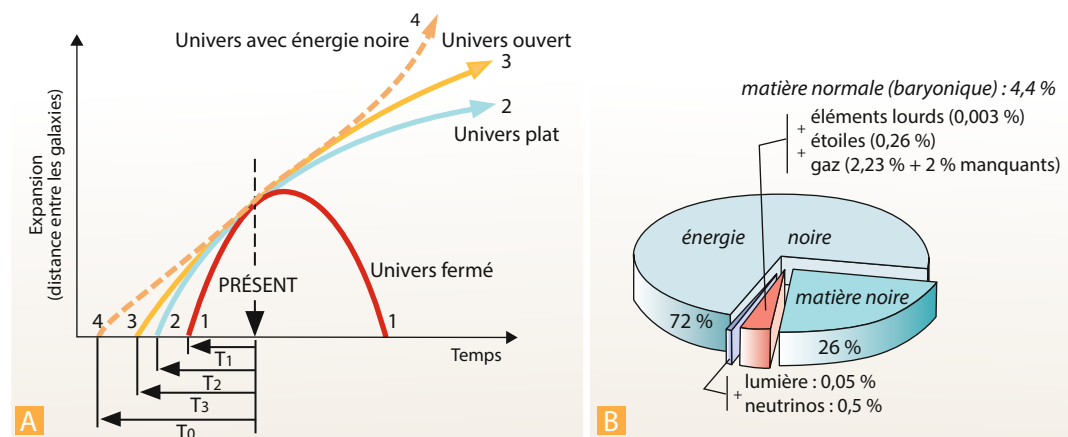


Figure 1.3 L'Univers : expansion et composition.

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. T_0 , T_1 , T_2 et T_3 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.

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.

1.3 L'ÂGE DE L'UNIVERS

Le modèle du Big Bang introduit le concept d'origine à notre Univers. Ce dernier aurait donc un âge. Pour l'estimer, les scientifiques ont développé principalement deux approches indépendantes : l'analyse du mouvement des galaxies et l'étude des étoiles les plus anciennes.

a) Le mouvement des galaxies

Nous venons de voir que l'observation du décalage vers le rouge des galaxies lointaines montre qu'elles s'éloignent les unes des autres à une vitesse proportionnelle à leur distance. Cette relation permet de remonter dans le temps jusqu'à l'instant où toutes les galaxies devaient être rassemblées en un même point, au moment du Big Bang. Dans la loi de Hubble, le rapport $1/H$ correspond à une première estimation de l'âge de l'Univers. Selon la valeur retenue pour H , cet âge se situe entre 13 et 15 Ga.

L'énergie noire accélère l'expansion, donc il est nécessaire d'avoir des informations sur sa structure dans l'Univers. Une solution pour obtenir ces données manquantes est d'avoir accès à la structure de l'Univers lors des premiers instants. Pour cela, les scientifiques utilisent le fond diffus cosmologique. Grâce aux satellites COBE, WMAP, puis Planck lancé en 2009, des cartes de plus en plus précises du fond diffus ont été réalisées, permettant d'estimer la densité d'énergie noire notamment. En 2020, l'équipe travaillant sur les résultats de Planck obtient un âge de l'Univers de $13,787 \pm 0,020$ milliards d'années (Ga).



Voir encart 1.2

Encart 1.2 – Le fond diffus cosmologique

En 1964, les radioastronomes Arno Penzias et Robert Wilson travaillent sur une antenne de télécommunications de Bell Telephone. Ils détectent un signal radio inattendu à une longueur d'onde de 7,35 cm, équivalent énergie à une température de 3 K. Ce signal est constant, quel que soit la direction ou le moment d'observation. Pensant initialement à un bruit de fond instrumental ou atmosphérique, ils découvrent en réalité un rayonnement cosmique d'origine inconnue. Simultanément, des théoriciens du Big Bang redécouvrent les travaux datant de 1948, qui prévoyaient l'existence d'un rayonnement fossile : un vestige thermique de l'Univers primordial, refroidi par l'expansion de l'Univers. Ce rayonnement, issu d'un Univers initialement très chaud et dense, devait avoir à cette époque une température d'environ 3 K. Penzias et Wilson venaient ainsi, sans le savoir, de confirmer une prédiction clé du modèle du Big Bang.

Le rayonnement fossile, aussi appelé « fond diffus cosmologique », témoigne de la transition de l'Univers d'un état dominé par le rayonnement à un état dominé par la matière, où l'énergie est majoritairement portée par les particules massives. Ce rayonnement a aussi empêché la formation d'éléments plus lourds que l'hélium dans les premières minutes de l'Univers en détruisant leurs noyaux. Cette découverte, couronnée par le prix Nobel en 1978, constitue l'un des piliers observationnels du modèle du Big Bang. Elle a été confirmée et précisée par les observations du satellite COBE (1989), qui a montré que ce rayonnement présente le spectre parfait d'un corps noir, comme prévu par la théorie. La mesure précise du fond diffus cosmologique reste aujourd'hui un outil fondamental pour comprendre l'histoire et la structure de l'Univers.



Voir partie 1.4

b) L'âge des plus vieilles étoiles

Chercher les plus vieilles étoiles que nous pouvons observer permet de donner un âge minimum de l'Univers. Pour ce faire, la détermination de la luminosité et de la masse de l'étoile permet d'estimer un âge. L'étoile HD 140283, surnommée « étoile Mathusalem », est l'une des plus vieilles connues, avec un âge estimé entre 12 et 13,7 Ga.

Il est parfois possible de dater les étoiles grâce à la radiochronologie, en mesurant l'abondance d'isotopes à partir de l'analyse fine des spectres de lumière. ^{232}Th et ^{238}U sont idéaux pour dater les plus vieilles étoiles, car leurs temps caractéristiques de décroissance radioactive sont proches de l'âge de l'Univers estimé par ailleurs (14,1 et 4,5 milliards d'années). Avec cette méthode, l'étoile CS31082-001 a été datée à 12,5 Ga par exemple. Ces âges sont cohérents avec les autres estimations de celui de l'Univers.

Pour terminer, depuis 2022, le télescope spatial James Webb a permis d'identifier des galaxies très lointaines contenant déjà des étoiles massives et évoluées, formées moins de 300 millions d'années après le Big Bang. Cela confirme que des structures complexes ont émergé très tôt dans l'histoire cosmique. Ces observations confortent les modèles actuels d'un Univers âgé de près de 13,8 Ga.

1.4 NUCLÉOSYNTÈSE ET ÉVOLUTION DE L'UNIVERS

Nous allons envisager comment la synthèse des différents noyaux a pu se réaliser au cours de l'évolution de l'Univers à partir de l'explosion initiale (Big Bang). Ce phénomène s'est déroulé en quatre étapes dans des milieux différents : le cosmos, les étoiles, le milieu interstellaire (fig. 1.4).

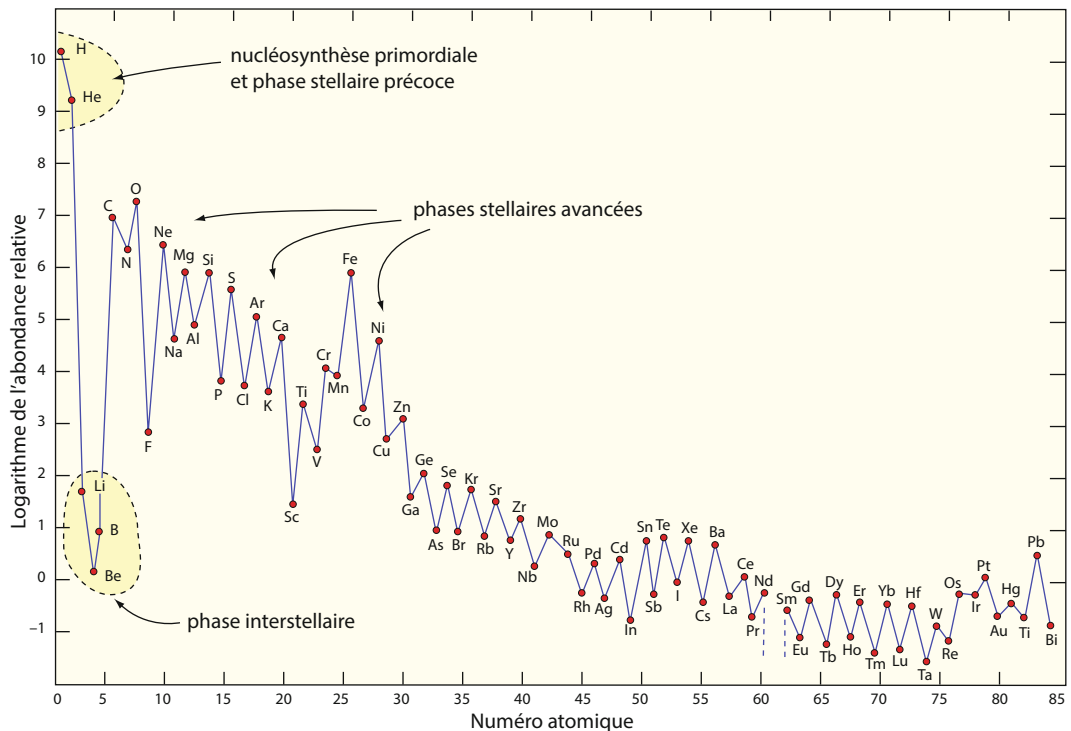


Figure 1.4 L'abondance relative des différents éléments chimiques et les principales phases de la nucléosynthèse.

1.4.1 La fusion nucléaire

La plupart de la matière visible de l'Univers est constituée d'atomes, eux-mêmes formés d'un noyau central contenant des nucléons (protons et neutrons), autour duquel gravitent des électrons. Le nombre de protons dans le noyau définit l'identité chimique de l'atome : c'est le numéro atomique (Z). Par exemple, un atome d'hydrogène possède un seul proton, et un atome d'hélium en possède deux. Le nombre total de nucléons (protons + neutrons) correspond au nombre de masse (A). Un même élément chimique peut exister sous plusieurs formes isotopiques qui partagent le même nombre de protons, mais qui diffèrent par leur nombre de neutrons. Les forces nucléaires qui assurent la cohésion des protons et des neutrons à l'intérieur du noyau sont extrêmement puissantes, bien plus que les forces électromagnétiques qui maintiennent les électrons autour du noyau. C'est pourquoi les réactions impliquant des transformations nucléaires, comme la fusion ou la fission, libèrent des quantités d'énergie largement supérieures aux réactions chimiques ordinaires.

Dans le contexte astrophysique, les réactions de fusion nucléaire sont fondamentales. Elles permettent la transformation des noyaux légers (comme l'hydrogène) en noyaux plus lourds (comme l'hélium, le carbone, l'oxygène, etc.), tout en libérant une énergie colossale qui alimente les étoiles.

Partons du noyau le plus simple : celui de l'hydrogène, constitué d'un seul proton. En lui ajoutant un neutron, on obtient un noyau un peu plus massif, mais toujours chargé positivement (+1). Il s'agit donc toujours d'un atome d'hydrogène, mais dans une version plus lourde : le deutérium, ou hydrogène lourd (masse = 2). Lorsque deux noyaux de deutérium fusionnent, ils peuvent former un noyau d'hélium, composé de deux protons et deux neutrons. Mais ce processus de fusion ne se fait pas facilement. La principale difficulté réside dans la production initiale du neutron et dans sa combinaison avec un proton pour former le deutérium.

À très haute température (plusieurs millions de degrés), certains protons peuvent capturer des électrons et se transformer en neutrons, permettant ainsi la formation du deutérium. Mais même dans ces conditions extrêmes, la fusion entre deux noyaux d'hydrogène reste peu efficace. C'est pourquoi le deutérium est très peu abondant dans l'Univers : on trouve environ 1 noyau de deutérium pour 100 à 1 000 noyaux d'hydrogène.

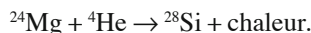
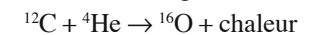
En revanche, le passage du deutérium à l'hélium se fait plus facilement. Le noyau d'hélium est très stable et joue un rôle fondamental dans la construction des éléments plus lourds. Par exemple, la fusion de trois noyaux d'hélium permet de former un noyau de carbone 12 (6 protons + 6 neutrons). De même, la fusion de quatre noyaux d'hélium conduit à un noyau d'oxygène 16. En combinant ces briques fondamentales (noyaux d'hélium, de carbone, d'oxygène et parfois de deutérium), il devient possible de former toute une diversité d'éléments chimiques plus complexes.

Ces processus sont représentés par les astrophysiciens sur des diagrammes protons/neutrons qui permettent de suivre les voies de nucléosynthèse dans les étoiles.



Voir partie 1.4.2

Chaque opération de fusion ou de capture neutronique correspond à une réaction nucléaire, qui peut être résumée par une équation de bilan. Par exemple :



La quantité d'énergie dégagée par les réactions nucléaires est considérable. De plus, ces dernières nécessitent des températures extrêmement élevées pour se produire (il faut que les noyaux soient suffisamment agités et énergétiques pour fusionner lors des collisions). Ainsi, une température de l'ordre du million de degrés est nécessaire pour amorcer la fusion de noyaux d'hydrogène, de 100 millions de degrés pour fusionner les noyaux d'hélium, et de 600 millions de degrés pour les noyaux de carbone et d'oxygène.

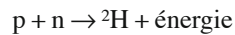
Toute la nucléosynthèse est régie par cet antagonisme : nécessité d'avoir un milieu suffisamment chaud pour que les réactions se produisent, mais aussi suffisamment froid pour que les structures nucléaires produites ne soient pas détruites.

1.4.2 La phase cosmique, ou nucléosynthèse primordiale

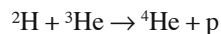
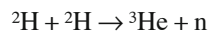
Nous savons encore peu de choses sur les toutes premières fractions de seconde qui ont suivi le Big Bang. Dans cet intervalle extrêmement bref, l'Univers était dans un état de température et de densité qu'il est difficile de concevoir. La matière telle que nous la connaissons, formée d'atomes, de noyaux, de particules liées, n'existait pas encore. Au lieu de cela, l'Univers était rempli d'un plasma extrêmement chaud, où régnaient une agitation violente et une densité énergétique intense. Protons, neutrons, électrons et photons s'y formaient, s'annihilaient et interagissaient en permanence (fig. 1.5).

Ce n'est qu'à partir d'environ 10^{-4} secondes après le Big Bang que l'Univers commence à se refroidir suffisamment pour que certains de ces composants deviennent relativement stables. Un gaz chaud de protons, de neutrons et de photons émerge alors. Mais à ce stade, les liaisons nucléaires formant les noyaux sont brisées par les photons très énergétiques. Il faut attendre que la température chute en dessous d'environ 1 milliard de degrés (soit à peu près 3 minutes après le Big Bang) pour que la densité d'énergie du rayonnement ne suffise plus à casser les noyaux formés (fig. 1.5). C'est à ce moment-là que débute véritablement ce que l'on appelle la « nucléosynthèse primordiale ».

Les premières étapes consistent en la formation de noyaux légers à partir des protons (p) et des neutrons (n) présents : le deutérium (^2H), une forme d'hydrogène contenant un neutron, puis l'hélium-3 (^3He) et l'hélium-4 (^4He), très stable, et, dans une moindre mesure, du lithium-7 (^7Li) et du béryllium-7 (^7Be), ce dernier se désintégrant ensuite en lithium. La réaction clé, qui marque le début de la chaîne, est la suivante :



Puis :



Mais cette chaîne de réactions s'arrête rapidement, car l'Univers continue à s'étendre et à se refroidir, ce qui réduit la fréquence des collisions suffisamment énergétiques. De plus, la formation de noyaux plus lourds (comme le carbone ou l'oxygène) nécessite des réactions entre trois noyaux simultanément (par exemple, trois noyaux d'hélium pour produire du carbone), ce qui est hautement improbable dans les conditions de densité et de température de l'Univers primordial. Ainsi, la nucléosynthèse primordiale s'arrête aux noyaux légers. Elle produit l'essentiel de la matière en 3 minutes et dure moins de 20 minutes, mais elle détermine une grande partie de la composition chimique de l'Univers. Aujourd'hui encore, les proportions relevées dans l'Univers observable d'environ 74 % d'hydrogène (^1H) et 24 % d'hélium-4 (^4He) en masse sont le résultat direct de ces premières réactions nucléaires. Le deutérium et le lithium, bien que présents en très faibles quantités, jouent un rôle crucial dans la validation des modèles cosmologiques.

La nucléosynthèse primordiale est le point d'entrée de la matière dans l'Univers, précédant et permettant les étapes ultérieures de formation des étoiles, où se poursuivra la fabrication des éléments plus lourds.

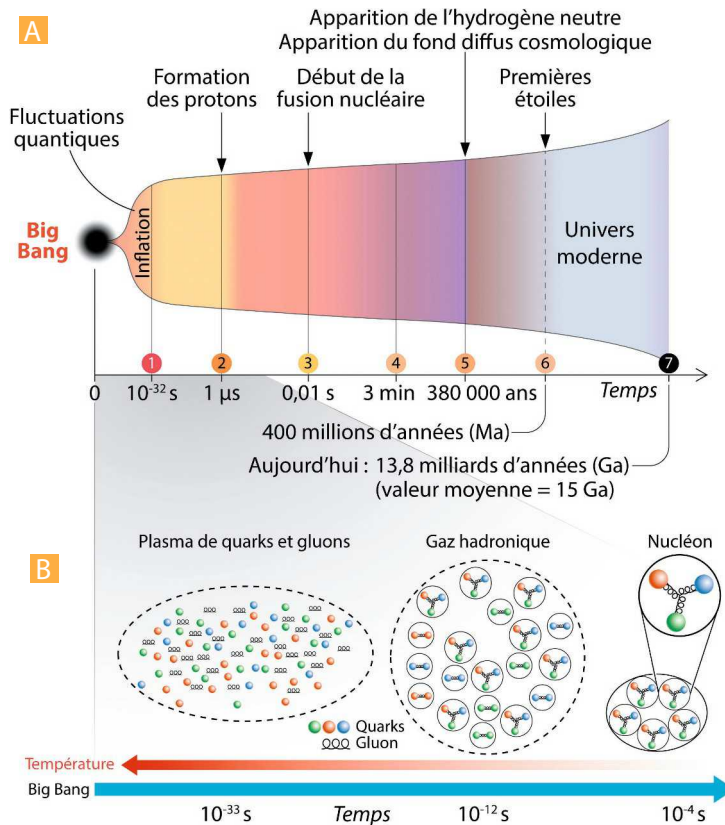


Figure 1.5

A. Une représentation simplifiée de l'évolution de l'Univers élaborée en tenant compte des découvertes des missions des satellites spatiaux et des radiotélescopes depuis les années 2000. On met en évidence les principales étapes de l'histoire très précoce comprenant notamment l'inflation jusqu'à 10⁻³² seconde après le Big Bang et l'apparition du fond cosmologique diffus à 380 000 ans. Avant cette date, l'Univers est opaque à cause des interactions constantes entre la matière et la lumière (photons).

B. L'évolution de la matière nucléaire en fonction de la température.

1.4.3. La phase stellaire

Une fois la nucléosynthèse primordiale terminée, l'Univers évolue en se refroidissant. Seuls les environnements très confinés ou ultra-énergétiques comme les étoiles ou les explosions permettent ensuite d'atteindre les conditions nécessaires à la poursuite de la nucléosynthèse.

a) Le rôle de la gravité

Lorsque la température chute suffisamment pour permettre la capture des électrons par les noyaux, l'Univers devient transparent au rayonnement (découplage matière-rayonnement). Dès lors, la pression du rayonnement ne suffit plus à contrebalancer la gravité, qui peut désormais exercer pleinement son effet structurant. Dans ce jeune Univers devenu un fluide relativement homogène, de légères surdensités de matière (résultant des fluctuations de densité primordiales) deviennent instables sous l'effet de la gravité : elles s'effondrent progressivement sur elles-mêmes, et elles donnent naissance aux premiers amas de matière qui deviennent des galaxies.

Les galaxies sont des structures cohérentes liées par la gravitation, qui échappent à l'expansion générale de l'Univers. À l'intérieur de ces galaxies, de nouveaux effondrements gravitationnels locaux donnent naissance à des étoiles.

Les étoiles sont de gigantesques réacteurs thermonucléaires. Leur formation résulte d'un équilibre dynamique : la gravité tend à comprimer la matière, ce qui accroît la pression et donc la température au cœur du nuage protostellaire. Des réactions de fusion nucléaire peuvent s'amorcer, dégageant une énergie considérable sous forme de chaleur et de lumière. Ce rayonnement exerce une pression qui s'oppose à la gravité. L'étoile entre alors dans une phase de stabilité relative, maintenue par l'équilibre entre la force gravitationnelle (contractante) et la pression de rayonnement (expansive). Ce mécanisme, fondamental pour comprendre la structure des étoiles, régit aussi leur évolution ultérieure, jusqu'à leur effondrement ou leur explosion, en fonction de leur masse.

b) Les différents types d'étoiles

Les astronomes ont l'habitude de classer les étoiles d'après l'analyse de la lumière qu'elles émettent. Cela permet de déterminer leur température de surface (couleur), la quantité d'énergie rayonnée (luminosité) et leur composition chimique (spectroscopie). On utilise classiquement un diagramme (diagramme de Hertzsprung-Russell, *fig. 1.6*) combinant la luminosité stellaire absolue et la couleur stellaire (à laquelle est associée une température superficielle). On constate, tout d'abord, que les différentes étoiles se regroupent préférentiellement dans certaines régions du graphe. Chaque région correspond à un type de production d'énergie.

La majorité des étoiles se place sur une diagonale que l'on nomme la « série principale ». De plus, la position des étoiles dans la série principale dépend de leur masse (les petites sont en bas vers le rouge, les grosses vers le violet). Pour assurer leur brillance, les étoiles de cette série transforment leur hydrogène en hélium. Ces étoiles restent dans la série principale tant qu'elles n'ont pas épuisé leur réserve d'hydrogène, ce qui peut prendre soit des milliards d'années pour les petites étoiles, soit seulement quelques millions d'années pour les géantes bleues. Le Soleil occupe une position intermédiaire, et l'on admet que sa durée d'appartenance à la séquence principale est d'environ 10 milliards d'années.

Un autre groupement d'étoiles se situe à droite dans la partie haute du graphe de la figure 1.6 : c'est le domaine des géantes et supergéantes rouges. Ces étoiles transforment les noyaux d'hélium en carbone et en oxygène. À gauche de ce domaine se trouve la branche horizontale : elle correspond à des étoiles plus évoluées qui consomment leur carbone ou leur oxygène, voire leur silicium. Au-delà se trouve le domaine des nébuleuses planétaires, puis la répartition des étoiles sur le graphe s'infléchit brusquement pour aboutir au domaine des naines blanches.

c) La nucléosynthèse par fusion au cœur des étoiles

L'histoire stellaire de la matière commence avec l'effondrement gravitationnel d'un nuage interstellaire froid (température entre 10 et 30 K) et relativement dense. Lorsque ce nuage atteint une masse critique (environ une masse solaire pour une densité de l'ordre de $10^{-18} \text{ kg.m}^{-3}$), il devient instable : c'est l'instabilité de Jeans, qui déclenche la fragmentation du nuage et sa contraction gravitationnelle. Cette phase marque la naissance d'une protoétoile, encore enfouie dans son cocon de gaz et de poussières. Elle entre alors dans la phase dite « T Tauri », caractérisée par une forte activité magnétique et par des jets de matière pouvant atteindre 100 km.s^{-1} .

Pendant cette phase, qui dure de quelques millions à une centaine de millions d'années, la jeune étoile présente une variabilité lumineuse typique, liée à des accrétions de matière irrégulières en provenance du disque circumstellaire. Ce disque présente une rotation différentielle propice à la formation ultérieure de planètes.

Lorsque la température au centre atteint environ 8 millions de kelvins pour une densité de l'ordre de $100\,000 \text{ kg.m}^{-3}$, les réactions de fusion peuvent débiter. Des effets quantiques permettent la fusion de deux protons en un noyau de deutérium : c'est la chaîne proton-proton (pp),

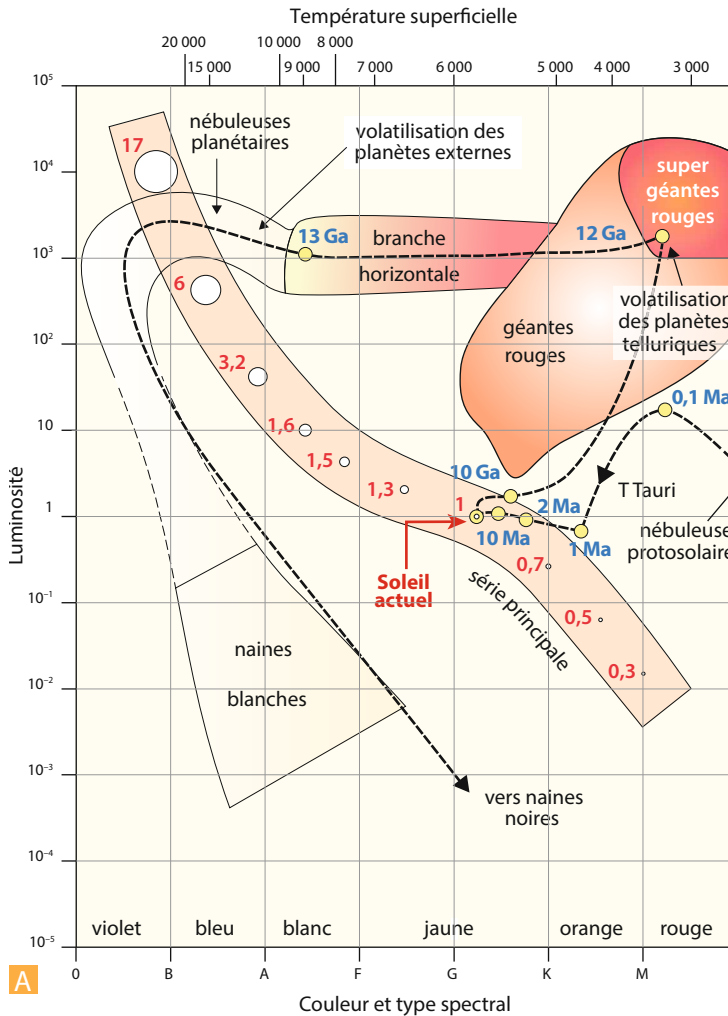


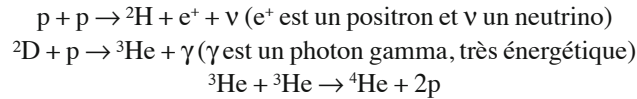
Figure 1.6 L'évolution des étoiles.

A. Diagramme de Hertzsprung-Russell. L'axe des ordonnées est gradué en luminosité stellaire absolue (exprimée par rapport à celle du Soleil, prise comme unité), celui des abscisses représente les couleurs « stellaires » auxquelles on peut associer une température de surface. La masse des étoiles de la série principale, en chiffres rouges, est exprimée par rapport à la masse du Soleil prise comme unité. On a représenté l'évolution du Soleil, passée et à venir, le long de la courbe en pointillés noirs. Les chiffres en bleu expriment le temps écoulé depuis la naissance du Soleil (en Ma et en Ga). Après la phase T Tauri, le Soleil fait partie de la série principale. On estime que la durée d'appartenance du Soleil à la série principale sera de l'ordre de 10 milliards d'années. Dans 5 milliards d'années, le Soleil devrait donc évoluer vers les géantes rouges (volatilisation des planètes internes), puis vers les nébuleuses planétaires (volatilisation des planètes externes), pour enfin s'éteindre lentement en évoluant vers la zone des naines blanches et des naines noires.

B. La nébuleuse du Crabe résulte de l'explosion d'une étoile massive en supernova, explosion qui fut rapportée par des astronomes chinois et japonais en 1054, car la lumière était visible en plein jour. D'énormes quantités de matière et d'énergie ont alors été éjectées dans l'espace, et ce processus dure encore. Des atomes d'oxygène et de soufre sont présents dans les débris. Un pulsar se trouve au centre de la nébuleuse et émet des vents d'électrons (couleur bleue). La couleur rouge est due à la fusion de l'hydrogène. Mosaïque réalisée à partir des données du télescope spatial Hubble de la NASA, lancé en 1990 (photo NASA/ESA/J. Hester and A. Loll, Arizona State Univ.).



dominante dans les étoiles de faible masse comme le Soleil. Cette chaîne comprend trois réactions principales :



Pour des températures au cœur de l'étoile supérieures à 17 millions de kelvins, le cycle CNO (carbone-azote-oxygène) devient prédominant. Ce cycle est d'autant plus efficace que la température est élevée. C'est pourquoi les étoiles plus massives ($>1,3$ masse solaire) consomment leur hydrogène beaucoup plus rapidement. La durée de vie sur la séquence principale (phase de combustion de l'hydrogène dans le cœur) constitue environ 90 % de la durée de vie d'une étoile. Pour une étoile de masse M , elle se calcule approximativement par : $t \approx 10^{10} \text{ ans} \times (M/M_{\odot})^{-2,5}$, où $M_{\odot}$ est la masse du Soleil.

Quand le cœur a épuisé l'hydrogène, il se contracte, car la production de rayonnement ne compense plus la gravité. Ainsi, la température croît fortement avec l'augmentation de la pression. La contraction du cœur conduit à l'allumage de la fusion de l'hélium, via le processus triple alpha : $3 {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$. L'enveloppe externe se dilate. Le rayon de l'étoile peut augmenter d'un facteur 100 et la luminosité d'un facteur 1 000. L'étoile entre dans la phase de géante rouge. Cette réaction possible à partir de 100 millions de kelvins ne pouvait pas se produire lors de la nucléosynthèse primordiale.

Les réactions de fusion nucléaire s'arrêtent au fer (Fe), car c'est l'élément dont le noyau a l'énergie de liaison par nucléon la plus élevée, ce qui signifie qu'aucune énergie n'est libérée en fusionnant des noyaux plus lourds. Les réactions de fusion qui opèrent dans les étoiles sont résumées dans des diagrammes protons/neutrons en *fig. 1.7*.

d) La nucléosynthèse par capture de neutrons au cours de l'évolution stellaire

La synthèse des éléments plus lourds que le fer se fait par un mécanisme différent des réactions précédentes : la capture des neutrons et des protons. Cela s'opère selon deux processus :

- le processus s (lent), actif dans les étoiles géantes, où les neutrons sont capturés à un rythme lent (un tous les 10 à 100 ans), laissant le temps aux noyaux instables de se désintégrer : il permet la formation des éléments jusqu'au bismuth (Bi), ainsi que celle de 50 % des éléments plus lourds que le fer ;
- le processus r (rapide), qui correspond à des flux de neutrons extrêmement intenses permettant aux noyaux de grossir plus rapidement que la désintégration : il permet la formation de noyaux très lourds. Les conditions de flux élevés sont rares dans l'Univers. Ces derniers se produisent lors des supernovae ou des fusions d'étoiles à neutrons. Une supernova correspond à l'effondrement gravitationnel brutal du cœur d'une étoile massive ($>8 M_{\odot}$) lorsque les réactions nucléaires s'arrêtent, produisant une onde de choc qui expulse les couches externes de l'étoile (*fig. 1.6*). Ce processus génère des conditions extrêmes (températures $> 10^9$ K) permettant la capture neutronique rapide par processus r, tout en laissant comme résidu compact une étoile à neutrons ou un trou noir ;
- les supernovae dispersent dans le milieu interstellaire d'importantes quantités d'éléments lourds, enrichissant les futures générations d'étoiles et de planètes. Cet enrichissement progressif de l'Univers en éléments lourds, aujourd'hui mesurable par la métallicité des étoiles, a cours depuis plus de 13 milliards d'années. Le système solaire, formé il y a 4,56 milliards d'années, contient environ 1,4 % d'éléments plus lourds que l'hélium.

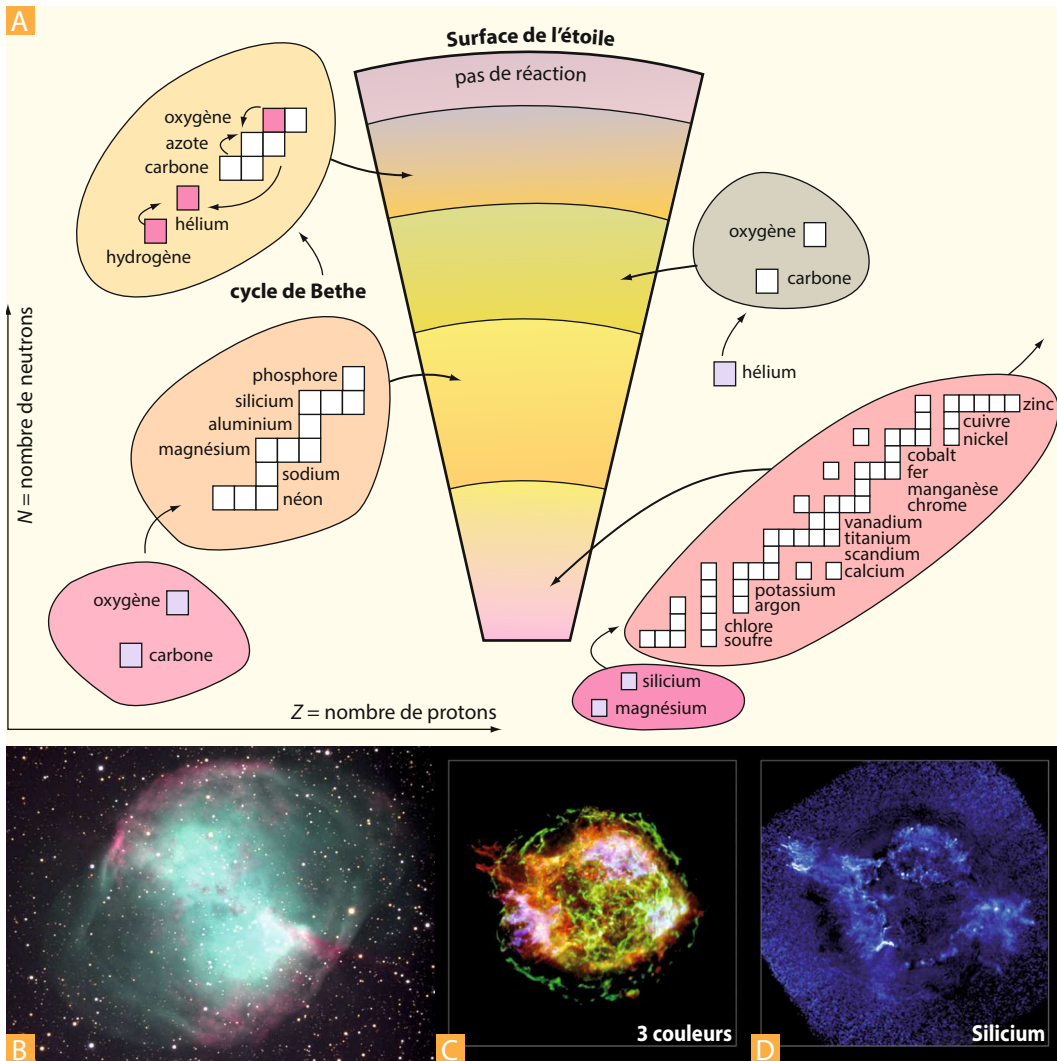


Figure 1.7 Les réactions nucléaires dans les étoiles.

A. Structure et réactions nucléaires à l'intérieur d'une étoile massive évoluée. L'étoile présente une structure en couches concentriques. Les réactions qui requièrent les plus hautes températures se déroulent en son centre, la surface étant trop froide pour être le lieu de réaction nucléaire. Les différentes réactions et les noyaux résultants sont représentés sur des diagrammes de Segré, protons/neutrons (nombre de neutrons, N , en ordonnée et nombre de protons, Z , en abscisse). Le cycle de Bethe (CNO) catalyse la transformation de H en He.

B. La nébuleuse planétaire de l'halète (Messier 27) est formée de gaz éjectés par l'étoile centrale très chaude, et excités par le rayonnement ultraviolet de cette étoile. L'éjection de matière intervient dans les dernières phases de la vie des étoiles, ce qui introduit dans le milieu interstellaire des atomes qu'elles synthétisent. Celui-ci s'enrichit ainsi en éléments lourds. Image NASA et *Hubble Heritage Team* (StScI/AURA).

C et D. Images en rayons X du reste de la supernova Cas A (constellation de Cassiopée). En C, chaque couleur correspond à une gamme différente d'énergie des rayons X, qui signent ainsi par ce spectre la présence de certains noyaux atomiques. En D, la couleur bleue a été isolée : elle correspond au spectre des noyaux de silicium éjectés dans l'explosion. Image du satellite américain Chandra (*photo NASA*).

Encart 1.3 – Le pic d'abondance du fer

Pour déclencher les réactions de fusion nucléaire conduisant à des éléments plus lourds que l'argon, il faut des températures telles qu'il se détruit presque autant de noyaux qu'il s'en fabrique. Seuls les noyaux les plus stables vont résister à ces cycles création/destruction ; parmi les éléments susceptibles d'être fabriqués, le fer présente le noyau le plus stable, ce qui explique sa surabondance (« pic du fer ») par rapport aux éléments voisins (*fig. 1.4*).

1.4.4. La phase interstellaire

La phase interstellaire joue aussi un rôle dans la nucléosynthèse de certains éléments légers. En effet, la production des éléments lors de la nucléosynthèse primordiale et stellaire laisse des lacunes : le lithium (Li), le béryllium (Be) et le bore (B) sont beaucoup moins abondants que ce que prédisent les modèles de nucléosynthèse primordiale et stellaire. Alors que l'hélium est produit en grande quantité dans l'Univers primordial, ces trois éléments sont environ 100 millions de fois moins abondants que lui. La raison est liée à leur faible stabilité nucléaire : dans les étoiles, les noyaux de Li, Be et B sont facilement détruits aux très hautes températures stellaires, et ne sont pas efficacement produits par les réactions de fusion discutées plus haut.

Leur formation principale a lieu dans le milieu interstellaire, grâce à la spallation cosmique. Les rayonnements cosmiques (principalement des flux de protons et noyaux d'hélium) très énergétiques qui parcourent la galaxie percutent les noyaux plus lourds présents dans le gaz interstellaire, comme ceux de carbone, azote et oxygène. Ces collisions violentes les fragmentent en noyaux plus légers, dont le lithium, le béryllium et le bore. Ce mécanisme est l'un des rares exemples où la nucléosynthèse se produit en dehors des étoiles.

Encart 1.4 – Les molécules organiques dans l'espace interstellaire

Le milieu interstellaire n'est pas vide complètement : il est parcouru par des poussières cosmiques et des molécules complexes. Ces poussières, issues de l'évolution stellaire (supernovae, vents d'étoiles géantes), sont principalement constituées de silicate ou de graphite. Elles sont souvent recouvertes de glace contenant de l'eau (H_2O), de l'ammoniac (NH_3), du méthane (CH_4) et d'autres composés organiques. Certaines pourraient inclure des structures complexes comme les porphyrines, présentes dans la chlorophylle et l'hémoglobine. À des températures très basses (inférieures à 50 K), l'hydrogène interagit avec des atomes de carbone, d'oxygène ou d'azote pour former des molécules simples, qui se fixent sur les grains de poussières. Le rayonnement cosmique fragmentant ces molécules induit de nouvelles réactions, enrichissant la complexité chimique du milieu.

Les progrès de la spectroscopie ont permis d'identifier plus de 300 molécules différentes, dont des chaînes carbonées, alcools, aldéhydes et acides aminés simples. Cette chimie repose essentiellement sur le carbone, tandis que le silicium joue un rôle très limité.

Les éléments CHON (carbone, hydrogène, oxygène, azote), essentiels à la vie, sont donc abondants dans ces nuages froids, suggérant une pré-organisation chimique de la matière bien avant la formation des planètes.

À retenir

- L'Univers, qui présente une architecture hiérarchisée (planètes, étoiles, galaxies, amas et superamas), est une structure en expansion qui paraît constituée de seulement 4 % de matière visible, de 26 % de matière noire et de 72 % d'énergie noire.
- 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.
- La théorie du « Big Bang » permet d'établir un modèle de synthèse des différents noyaux atomiques, cohérent avec l'abondance actuelle des éléments chimiques dans l'Univers et rendant compte des anomalies positives (pic du fer) ou négatives (faibles concentrations du lithium, du béryllium et du bore). Cette nucléosynthèse se déroule en quatre phases dans des milieux différents : le cosmos, les étoiles et le milieu interstellaire.

LE SYSTÈME SOLAIRE

MOTS-CLÉS

- Planètes, planètes naines, satellites, astéroïdes, météorites et comètes.
- Ceinture de Kuiper, nuage d'Oort.
- Chondrites, achondrites, météorites SNC.
- Soleil, planètes telluriques, planètes géantes, astéroïdes, planète d'Olbers.
- Accrétion et différenciation planétaire.
- Mercure, Vénus, Terre, Lune, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- Norite, KREEP, régolite.
- Conditions « d'habitabilité » d'une planète, eau et vie sur Mars.

2.1 LE SYSTÈME SOLAIRE DANS L'UNIVERS

Depuis l'Antiquité, la Voie lactée intrigue : ce ruban lumineux observable dans le ciel nocturne est aujourd'hui compris comme la projection du plan galactique de notre galaxie, un vaste disque d'étoiles, de gaz et de poussières. Dès 1750, Thomas Wright proposait l'idée d'une « galette d'étoiles » aplatie, une vision confirmée par les observations modernes.

La Voie lactée est un disque spiral d'environ 100 000 années-lumière (AL) de diamètre et 6 000 AL d'épaisseur. Le système solaire, situé à environ 30 000 AL du centre, orbite à une vitesse d'environ 250 km/s, complétant un tour galactique en 240 millions d'années. Le disque contient 200 à 400 milliards d'étoiles, un gaz interstellaire peu dense (~ 1 atome/cm³), et une fraction notable de poussières cosmiques. Malgré cette richesse, les étoiles sont très éloignées les unes des autres. Proxima du Centaure est l'étoile la plus proche de la nôtre et pourtant à 4,25 AL. L'Univers observable contient plus de 100 milliards de galaxies, chacune séparée de ses voisines par des distances de l'ordre de millions d'années-lumière. Pour autant, elles s'organisent en amas, eux-mêmes regroupés en superamas. Depuis 2014, nous savons que la Voie lactée appartient au superamas Laniakea (voir partie 1.1).

2.2 LA STRUCTURE DU SYSTÈME SOLAIRE

Nous ne présenterons ici qu'un bref résumé des connaissances issues de plusieurs siècles d'observations célestes et de calculs. En effet, le monde grec possédait déjà une astronomie très avancée : ainsi, Aristarque de Samos (vers 310-230 av. J.-C.) estimait que c'était le Soleil et non la Terre qui était le centre du système planétaire. Hipparque (Rhodes, vers 150 av. J.-C.) calcula, à quelques kilomètres près, la distance moyenne Terre-Lune (384 395 km). Cependant, l'héritage transmis par les Grecs correspond surtout aux travaux de Claude Ptolémée (II^e siècle après J.-C.). Malgré des conceptions erronées (Terre immobile et centre du système planétaire), il dressa des

éphémérides relativement exactes des planètes. Son « géocentrisme » imposait, cependant, que les planètes fassent périodiquement des retours en arrière sur leur orbite (épicycles).

Ces idées résistèrent à l'effondrement du monde grec et de l'Empire romain, et traversèrent l'obscurantisme du Moyen Âge pour devenir le credo cosmique de l'Église catholique (Dieu, concepteur de toute chose, avait créé un monde géocentrique dont la Terre immobile dans l'espace occupait le centre).

2.2.1 Les apports de Nicolas Copernic (1473-1543) et Johannes Kepler (1571-1630)

L'un des premiers à risquer de s'attaquer au « dogme » du géocentrisme fut un chanoine polonais, Nicolas Copernic, qui redécouvre l'héliocentrisme d'Aristarque et calcule les orbites (circulaires) des planètes. Il montre que l'apparente gravitation inverse des planètes lointaines est en fait un artefact d'observation, dû à l'orbite plus courte de la Terre. Il est cependant obligé d'ajouter un certain nombre d'épicycles aux orbites des planètes pour expliquer leurs divagations majeures.

Le système de Kepler fut explicité par Isaac Newton (1642-1727) qui posa les fondements de la mécanique et les appliqua à tous les corps se mouvant dans l'espace.

2.2.2 La synthèse des connaissances sur le système solaire

Le système solaire est structuré autour du Soleil (*fig. 2.1*). La masse de l'étoile représente à elle seule plus de 99,8 % de la masse totale du système. Il comprend aujourd'hui :

- 8 planètes majeures (Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune) ;
- 5 planètes naines officiellement reconnues (Pluton, Éris, Hauméa, Makémaké et Cérès) ;
- plus de 220 lunes connues (satellites naturels des planètes) ;
- une multitude de petits corps : astéroïdes, comètes, objets de la ceinture de Kuiper (TNOs), et objets du nuage d'Oort, tous formant un ensemble dynamique (*fig. 2.1*).

Si le Soleil était réduit à la taille de l'Arc de Triomphe placé à Paris, Pluton ne serait qu'un pamplemousse situé vers Tours, soulignant l'immensité du système. Les planètes orbitent autour du Soleil selon des trajectoires elliptiques presque circulaires, disposées presque toutes dans le même plan, appelé plan de l'écliptique. C'est dans ce plan que se produisent les éclipses du Soleil et de la Lune. Toutes les planètes tournent dans le même sens que la rotation solaire (sens direct, antihoraire vu du nord), sauf Vénus (rotation rétrograde lente) et Uranus (rotation fortement inclinée, presque sur le flanc). La vitesse orbitale diminue avec la distance au Soleil : Mercure boucle son orbite en 88 jours, alors que Neptune le fait en 165 ans. Pluton, bien que rétrogradée au rang de planète naine en 2006 par l'Union astronomique internationale (UAI), a une orbite très inclinée et excentrique, et met 248 ans à faire le tour du Soleil.

La loi de Bode, autrefois utilisée pour prédire la position des planètes, propose que chaque planète est environ deux fois plus éloignée que la précédente (*fig. 2.2*). Bien qu'inexacte dans le détail, cette règle a guidé la découverte de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter, là où aucune planète ne se trouvait. Plus loin, au-delà de Neptune, s'étend la ceinture de Kuiper, peuplée de petits corps glacés, dont Pluton est le représentant emblématique. Enfin, au-delà encore, se trouverait le nuage d'Oort, vaste réservoir hypothétique de comètes sur des orbites très éloignées.

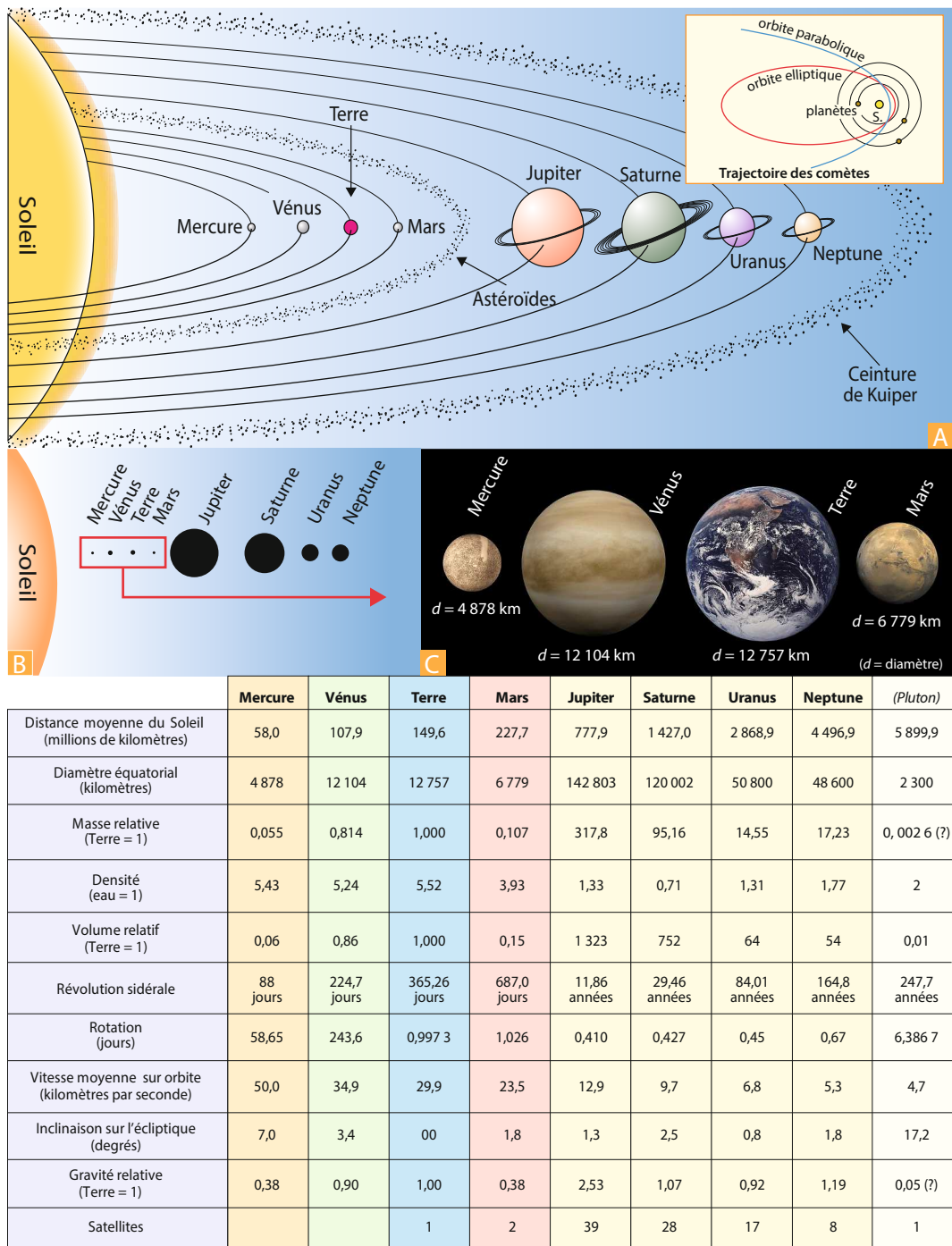


Figure 2.1 Le système solaire : schémas d'organisation et tableau des données principales.

A. Schéma de situation des orbites des planètes (ni les échelles des distances ni celles des dimensions des objets ne sont respectées). En cartouche en haut à droite : la trajectoire des comètes. Entre Mars et Jupiter gravite un essaim de petits corps célestes, les astéroïdes, dont le diamètre est inférieur à 1 km en général.

B. Schéma montrant les dimensions relatives des planètes.

C. Diamètres des planètes telluriques (*document NASA, modifié*).

Encart 2.1 – Planètes et plutoïdes : le statut de Pluton

Le statut de 9^e planète du système solaire de Pluton, découverte en 1930 par Clyde Tombaugh, fut remis en cause par la découverte ultérieure d'objets similaires comme Cérès, ou plus massifs comme Éris, en 2005, que son découvreur, M. E. Brown, présentait comme la 10^e planète. En fait, la notion de planète n'est pas évidente, et l'UAI a mis en place en 2004 une commission chargée de préciser cette notion : une planète est un astre en orbite autour d'une étoile (à condition de ne pas être lui-même une étoile) qui présente un diamètre (supérieur à 800 km) et une masse suffisants pour que les forces de gravité lui donnent une forme plus ou moins sphérique. Si cette définition permet de conserver parmi les planètes Pluton, dont le statut était périodiquement remis en cause car elle ne ressemble ni aux planètes telluriques ni aux planètes gazeuses, elle implique que d'autres corps du

système solaire puissent avoir ce rang. Ainsi, trois nouveaux candidats ont été proposés en août 2006 à l'assemblée de l'UAI : Cérès (corps de 950 km de diamètre, découvert en 1801 dans la ceinture des astéroïdes entre Mars et Jupiter, qui avait déjà été considéré comme une planète au XIX^e siècle), Charon (lune de Pluton de 1 200 km de diamètre découverte en 1978) et Xena (du nom de la série TV de science-fiction Xena, la guerrière, de 2 400 km de diamètre).

Finalement, l'UAI a opté pour une définition restrictive en rejetant Pluton ; le système solaire ne comporte donc plus que 8 planètes au sens strict. La ceinture de Kuiper, considérée jusqu'alors comme simplement formée de gros astéroïdes naviguant au-delà de l'orbite de Neptune, devient un anneau de « planètes naines » transneptuniennes, les plutoïdes, comportant Pluton, Charon et Xena.

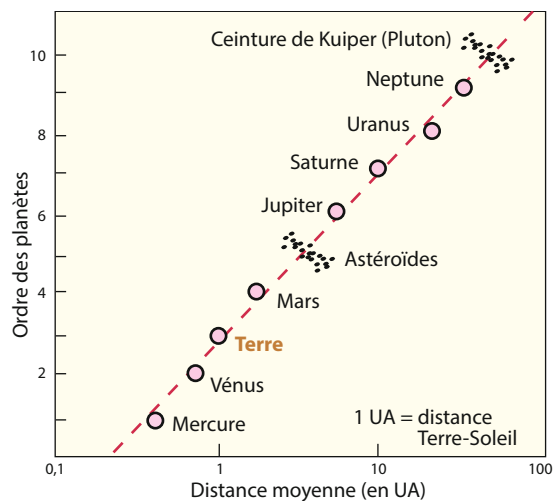


Figure 2.2 La loi de Bode

La distance au Soleil est exprimée en unités astronomiques (1 UA = distance Terre-Soleil). En fait, la loi de Bode n'est que très approximativement vérifiée. Elle a cependant joué un rôle important dans la découverte des astéroïdes de Neptune et de Pluton en stimulant la recherche de ces objets. Cette loi indique simplement que deux planètes ne peuvent pas être trop proches, sinon elles auraient été en compétition pour la capture des particules lors de la phase d'accrétion planétaire (voir chapitre 2.3.2).

Encart 2.2 – À la recherche de la « planète X » dite P9

L'année 2017 a vu les chercheurs de différents laboratoires se lancer dans la recherche d'une hypothétique nouvelle 9^e planète du système solaire (d'où la dénomination de P9) qui serait responsable d'anomalies de trajectoires d'une catégorie de planétoïdes transneptuniens (situés dans la ceinture de Kuiper) dont le premier découvert en 2003 (Sedna) est un corps de 1 000 km de diamètre. Ces planétoïdes dits « extrêmes » ou « détachés » ont des trajectoires inclinées par rapport à l'écliptique des planètes du système solaire et fortement étirées, qui maintiennent ces objets à des distances considérables du Soleil. Ainsi, Sedna ne s'en approche jamais à moins de 76 UA, soit plus du double de la distance Soleil-Neptune. L'analyse en 2014 des trajectoires de 13 de ces planétoïdes montre qu'elles ont toutes leur périhélie (point le plus proche du Soleil) situé dans le plan de l'écliptique, et que tous ces planétoïdes traversent ce plan du sud vers le nord. Beaucoup pensent que cette configuration n'est pas due au hasard, mais résulterait de l'influence d'une planète lointaine

5 à 20 fois plus massive que la Terre placée sur une orbite inclinée de 30° et très étirée qui ferait varier sa distance au Soleil de 200 à 350 UA jusqu'à 1 200 UA selon un rythme de 15 000 ans. Les modèles indiquent qu'aucune planète ne peut se former sur une orbite aussi inclinée et étirée que celle proposée pour P9. Si l'existence de P9 était démontrée, cette planète devrait s'être formée ailleurs. Pour certains, il pourrait s'agir d'une protoplanète éjectée de la région Jupiter-Neptune sous l'influence de forces gravitationnelles dans le système solaire naissant (3 à 5 millions d'années). Pour d'autres, il y aurait eu, à la même période, captation par le soleil d'une planète qui gravitait autour d'une autre étoile. On estime que, si la masse de P9 était supérieure à celle de Neptune, la première hypothèse ne serait pas fonctionnelle. On doit noter qu'une publication franco-canadienne (2017) semble remettre en cause l'argument principal en faveur de la recherche de la planète X : la configuration des orbites des 13 planétoïdes ne pourrait être en fait qu'un biais d'observation.

2.2.3 Le nuage d'Oort et les comètes

Contrairement à une idée répandue, la frontière du système solaire ne s'arrête ni à l'orbite de Pluton ni à la ceinture de Kuiper. Bien au-delà, à environ 50 000 unités astronomiques (soit presque une année-lumière [AL]), s'étend une région sphérique hypothétique peuplée de centaines de milliards de comètes : c'est le nuage d'Oort, du nom de l'astronome Jan Oort qui proposa son existence en 1950. Ce réservoir cométaire est un vestige du disque protoplanétaire primitif, composé de glaces et de roches qui n'ont jamais été intégrées dans des planètes.

Les objets du nuage d'Oort sont faiblement liés gravitationnellement au Soleil, et suivent de vastes orbites qui peuvent prendre des centaines de milliers d'années à se boucler. Des perturbations, comme le passage d'une étoile proche ou des interactions avec la marée galactique, peuvent déstabiliser certaines de ces comètes et les précipiter vers les régions internes du système solaire. Certaines, comme la célèbre comète de Halley, adoptent des trajectoires périodiques. Ces comètes peuvent s'approcher du Soleil jusqu'à plus de 1 000 fois la distance de Pluton, avant de repartir vers les confins du système solaire.

En se rapprochant du Soleil, leur surface glacée se sublime, libérant des jets de gaz et de poussières qui forment la chevelure et la queue cométaire, visibles depuis la Terre. Ces comètes sont d'importants témoins chimiques de la nébuleuse qui a donné naissance au Soleil et aux planètes. Parfois, l'une d'elles peut frapper la Terre. L'événement de Tunguska en 1908, en Sibérie, a vraisemblablement été causé par l'explosion d'un petit astéroïde ou d'une comète à quelques kilomètres d'altitude.

La mission *Rosetta* a marqué un jalon historique : après 10 ans de voyage, la sonde s'est mise en orbite autour de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, provenant de la ceinture de Kuiper, et y a déposé l'atterrisseur *Philae* le 12 novembre 2014, révélant une composition riche en glaces (H_2O , CO_2 , CO , CH_4 , NH_3) et en matière organique complexe, notamment des acides aminés simples.

Encart 2.3 – La comète de Halley

La comète de Halley, qui est de retour dans le ciel terrestre tous les 76 ans, est déjà figurée en 1077 sur la tapisserie de Bayeux (Calvados) dite de la reine Mathilde, qui relate la conquête de l'Angleterre en 1066 par Guillaume le Conquérant. Elle a été très bien étudiée lors de son survol par la sonde européenne *Giotto* en

mars 1986. Son noyau, de densité voisine de 1, d'environ 600 km³, très riche en eau, est évalué à $6 \cdot 10^{14}$ kg. Si ce noyau est représentatif de l'ensemble des comètes, la masse totale du nuage d'Oort serait alors supérieure à celle de l'ensemble des planètes du système solaire.

Encart 2.4 – Les exoplanètes

Le Soleil n'est pas le seul à posséder un cortège de planètes. Depuis la découverte, en 1995, d'une planète orbitant autour de l'étoile 51 Pegasi par Michel Mayor et Didier Queloz (prix Nobel 2019), l'astronomie a identifié à ce jour plus de 7 500 exoplanètes, réparties dans plusieurs milliers de systèmes planétaires. Ces planètes extrasolaires présentent une diversité étonnante, souvent très différente de celle observée dans notre propre système solaire. La première détectée, 51 Peg b, est une géante gazeuse chaude, semblable à Jupiter mais orbitant à seulement 7 millions de km de son étoile, avec une année de seulement 4,2 jours. Ce type de planète, nommé « Jupiter chaud », est emblématique des premières découvertes.

Les missions spatiales telles que *CoRoT*, *Kepler*, *TESS*, et désormais *JWST* (*James Webb Space Telescope*), permettent de détecter les exoplanètes et parfois d'analyser leur atmosphère. *JWST* a récemment identifié la présence de CO₂,

de vapeur d'eau, de méthane sur plusieurs exoplanètes.

On découvre aussi de nouveaux types de planètes, inconnus dans notre système solaire, comme les mini-Neptunes, de taille intermédiaire entre la Terre et Neptune, avec une enveloppe gazeuse épaisse. Leur abondance interroge sur les processus de formation planétaire.

Un système particulièrement fascinant est celui de Trappist-1, une étoile naine ultra-froide située à environ 40 années-lumière (AL). Sept planètes rocheuses gravitent autour d'elle, dont trois sont dans la zone d'habitabilité. *JWST* y cherche désormais des biosignatures. En 2019, la planète K2-18b, une super-Terre située à 110 AL, a révélé la présence de vapeur d'eau dans son atmosphère. En 2023, *JWST* y détecte également du méthane et du CO₂, signes possibles d'une activité biologique... ou d'une géochimie complexe encore mal comprise.

2.3 LA NAISSANCE DU SYSTÈME SOLAIRE

Depuis longtemps, les astronomes se sont demandé quelle pouvait être l'origine d'une structure aussi régulière que celle de notre système solaire. Buffon (1749) le premier en déduit une origine unique des planètes (matériau éjecté du Soleil à la suite d'une collision avec une comète).

Les différents scénarios se doivent de répondre à deux types de questions :

- le Soleil et le cortège planétaire sont-ils cogénétiques ?
- Le cortège planétaire s'est-il formé à partir de matière interstellaire (c'est-à-dire de composition universelle) ou de matière stellaire (c'est-à-dire de matière modifiée par le passage à l'intérieur d'une étoile) ?

2.3.1 L'âge du système solaire

a) L'apport de l'étude des météorites

L'étude détaillée des météorites a considérablement fait progresser nos connaissances sur les premiers moments du système solaire. Ces roches tombées du ciel, dont l'étude de quelques trajectoires semble



Voir chap. 6

indiquer qu'elles proviennent, pour la plupart, de la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, se divisent en plusieurs types (fig. 6.2). La majorité appartient au type chondrite ; elles sont ainsi nommées parce qu'elles contiennent des inclusions vitreuses silicatées (les chondres) de même nature chimique que le reste de la météorite mais qui témoignent d'un phénomène de fusion. Leur propriété principale est d'être des objets peu différenciés, c'est-à-dire qu'elles présentent une composition chimique voisine de celle de la couronne solaire et de la matière interstellaire (fig. 2.3). De ce fait, on pense que ces chondrites proviendraient de petits astéroïdes peu ou pas différenciés. Les autres types sont des objets différenciés présentant, comme la croûte terrestre (fig. 2.3), des compositions chimiques très différentes de celle de la couronne solaire. Il s'agit des achondrites de composition voisine de celle des basaltes terrestres et des météorites de fer, ou sidérites, qui sont des alliages fer-nickel. Les deux derniers types proviendraient d'astéroïdes ou de corps planétaires par un processus de différenciation identique à celui qui a pu se passer pour la Terre et les autres planètes (formation d'un noyau, un manteau et une croûte, fig. 3.2).

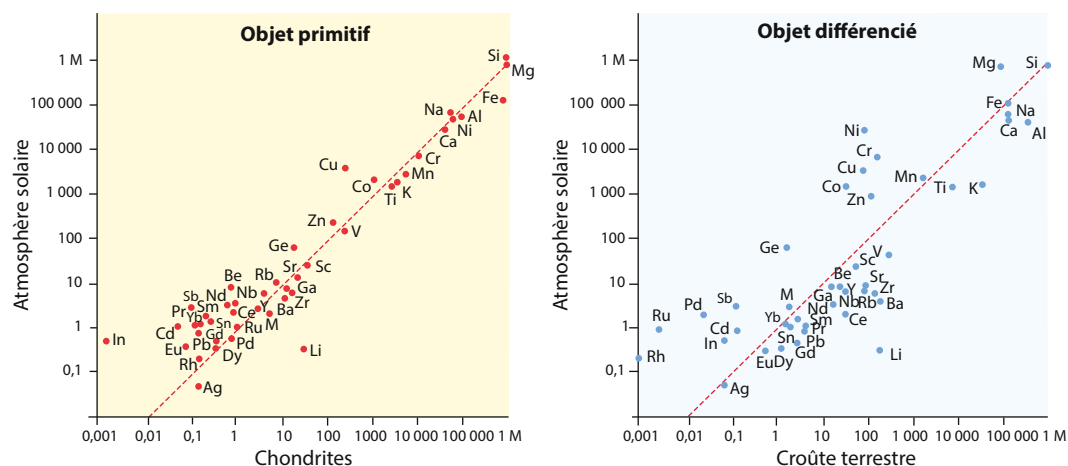


Figure 2.3 Comparaison de la composition chimique, par rapport à celle du Soleil, d'un objet primitif tel que les chondrites et d'un objet différencié tel que la croûte terrestre.

Dans le cas de la Terre, la ségrégation chimique entre noyau, manteau et croûte au cours de la différenciation a introduit des différences importantes dans la concentration relative des éléments.

Dans les météorites primitives, notamment les chondrites, on observe des inclusions minérales appelées CAI (*Calcium-Aluminium-rich Inclusions*), riches en éléments réfractaires. Ces inclusions se seraient formées par condensation à haute température dans le disque protosolaire, à partir du gaz nébulaire enrichi en éléments issus de générations antérieures d'étoiles. Les CAI sont considérées comme les premiers solides à s'être formés dans le système solaire, et leur datation permet de fixer un repère temporel absolu : l'origine du système solaire est ainsi placée à 4,5687 milliards d'années.

Les CAI sont datées par des méthodes radiométriques à haute précision. Il s'agit des couples :



mais aussi des chronomètres à radioactivités éteintes (voir partie suivante). On observe que ces inclusions présentent des âges très regroupés, ce qui témoigne d'un épisode bref de condensation dans le disque protoplanétaire interne, probablement sur quelques dizaines de milliers d'années.

En revanche, d'autres constituants des chondrites, comme les chondres, se sont formés plus tard, entre 1 et 3 millions d'années après les CAI. Cela reflète une chronologie interne dans les météorites, qui sont des assemblages de matériaux formés à des époques différentes dans le disque.

Les âges des météorites primitives entières (roches totales) ou des minéraux différenciés (comme dans les achondrites) obtenus par les couples isotopiques à longue période ($^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$, U/Pb , Th/Pb) donnent des valeurs moyennes autour de 4,52 à 4,54 Ga, représentant des étapes ultérieures : solidification des objets planétésimaux ou différenciation interne.

b) Les radioactivités éteintes

Une autre approche permet d'établir une chronologie précise des débuts du système solaire grâce aux radioactivités éteintes. Ces radionucléides à courte demi-vie, présents au moment de la formation du nuage protosolaire, ont aujourd'hui disparu, mais leur existence se déduit des anomalies isotopiques de leurs nucléides fils dans les météorites. Parmi les radionucléides identifiés figurent le ^{26}Al (demi-vie $7,4 \times 10^5$ ans), le ^{129}I ($1,7 \times 10^7$ ans), le ^{244}Pu (8×10^7 ans) ainsi que le ^{60}Fe ($1,5 \times 10^6$ ans), ce dernier témoignant d'un apport de matière par une ou plusieurs supernovas peu avant l'effondrement du nuage protosolaire.

La présence de ^{129}I est confirmée par des excès de ^{129}Xe dans certaines météorites, analysées par des techniques isotopiques précises qui ont aussi permis d'établir des âges relatifs entre météorites, avec pour référence la météorite Bjurböle. Ces âges couvrent une période d'environ 16 millions d'années, intervalle que certains modèles récents restreignent à 3 millions d'années.

La détection de ^{60}Fe et d'autres radionucléides à courte durée de vie au moment de la solidification des premiers solides indique que l'isolement du nuage protosolaire du milieu interstellaire, interrompant tout apport externe de radionucléides, a précédé de peu la formation des premiers planétésimaux. La phase de condensation et d'accrétion s'est donc déroulée rapidement, sur une échelle de quelques millions d'années, bien inférieure à l'âge total du système solaire.

À l'échelle de temps du système solaire, Soleil et planètes sont donc cogénétiques.

2.3.2 Un scénario de formation du système solaire

Les données isotopiques et les modèles astrophysiques permettent aujourd'hui de mieux comprendre les conditions ayant conduit à la formation du système solaire, en les replaçant dans le cadre dynamique des galaxies spirales dont fait partie la Voie lactée. Dans ce type de galaxie, la matière interstellaire (gaz, poussières, molécules) n'est pas répartie uniformément. Elle est en mouvement orbital autour du centre galactique, mais sa répartition est modulée par des ondes de densité formant les bras spiraux. Lorsqu'un nuage interstellaire traverse un bras spiral, il subit une compression gravitationnelle et mécanique. Cette compression peut déclencher son effondrement gravitationnel. C'est dans ces zones que la formation des étoiles est la plus intense.

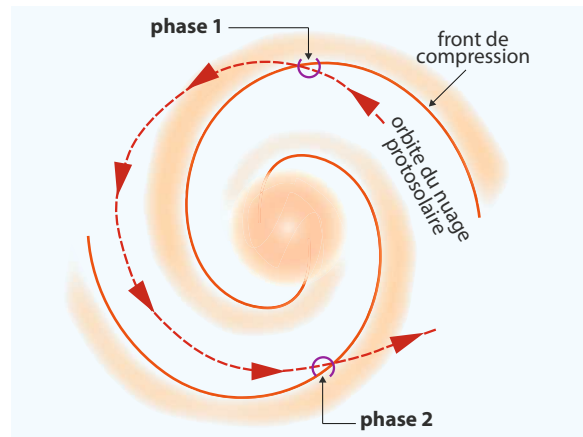
Le scénario retenu pour le nuage protosolaire est le suivant (fig. 2.4) :

- Premier passage dans un bras spiral : le nuage est fortement comprimé, mais il ne s'effondre pas encore. Il est enrichi en éléments lourds et instables issus des explosions d'étoiles massives proches. Cela inclut notamment des radionucléides comme ^{129}I ou ^{244}Pu , dont la présence dans les météorites primitives est un indice fort de cet enrichissement précoce.
- Phase inter-bras : pendant environ 100 millions d'années, le nuage circule dans une région moins dense de la galaxie. Les éléments instables commencent à se désintégrer (exemple : $^{129}\text{I} \rightarrow ^{129}\text{Xe}$).
- Deuxième passage dans un bras spiral : une nouvelle compression déclenche l'effondrement du nuage protosolaire et initie la formation du Soleil et de son disque protoplanétaire. Cette phase dure moins de 10 à 15 millions d'années, voire seulement quelques millions d'années selon certains modèles.

Ce modèle, désormais bien étayé, explique à la fois l'enrichissement isotopique initial du nuage protosolaire et le calendrier de désintégration des éléments à vie courte observé dans les météorites les plus anciennes du système solaire.

Figure 2.4 Trajet hypothétique du nuage protosolaire.

Au premier passage dans un bras galactique, le nuage est comprimé, mais il ne s'effondre pas. Il se charge cependant en atomes nouveaux (notamment en ^{129}I) issus de l'intense nucléosynthèse qui règne dans les bras galactiques. Au cours du voyage inter-bras, ^{129}I va se désintégrer en ^{129}Xe , et il n'en restera qu'une très faible quantité lors de la phase de condensation. Les calculs montrent, qu'entre les phases 1 et 2, il a dû s'écouler un temps de l'ordre de 100 Ma, ce qui est compatible avec le trajet proposé.



2.3.3 L'accrétion planétaire

Au cours de la phase de condensation du nuage protosolaire, la température décroît fortement, permettant la formation progressive de grains solides à partir du gaz interstellaire. Les expériences en laboratoire et les modèles thermodynamiques permettent de reconstituer la séquence de condensation des matériaux en fonction de la température (fig. 2.5). Vers 1 600 K, ce sont les matériaux les plus réfractaires qui se condensent en premier (notamment des oxydes d'aluminium, de calcium et de titane). En dessous de 1 400 K apparaissent des alliages métalliques, principalement à base de fer. Entre 1 200 et 400 K, ce sont les silicates qui se forment, puis à des températures encore plus basses (environ 200 K), ce sont les glaces d'eau, d'ammoniac, de méthane ou de dioxyde de carbone qui se déposent.

Du fait du gradient thermique radial dans le disque, la température décroît avec la distance à l'étoile. Ainsi, la composition chimique des grains varie : les matériaux réfractaires et métalliques dominent dans les régions internes du disque, tandis que les silicates et les composés volatils dominent dans les zones externes, au-delà de la « ligne des glaces ».

Au début du processus, les grains sont trop petits (de l'ordre du micromètre) pour que la gravité puisse jouer un rôle. Le passage de ces grains à des corps plus massifs, capables de croître gravitationnellement, reste débattu. Les modèles actuels suggèrent que le disque se comporte comme un fluide turbulent, dans lequel des vortex ou instabilités locales concentrent la matière. Cette concentration favorise la croissance rapide de galets centimétriques, puis de planétésimaux, par accrétion mutuelle. Il faut toutefois que ces objets résistent à la fragmentation par collision et à la migration vers l'étoile sous l'effet des forces de traînée (encart 2.5).

Quoi qu'il en soit, des corps planétaires finissent par se former, et s'échauffent rapidement, d'une part par la libération de l'énergie gravitationnelle liée à l'accrétion, et d'autre part par la désintégration d'isotopes radioactifs à courte période, tels que l' ^{26}Al . Cet échauffement provoque une fusion partielle de ces corps, ce qui permet leur différenciation interne : les matériaux lourds (fer, nickel) migrent vers le centre pour former un noyau, tandis que les silicates forment le manteau et la croûte. Ce processus sera détaillé au chapitre 7.2 (fig. 7.6). La différenciation s'effectue en quelques millions d'années pour les petits corps (comme les astéroïdes parents des météorites) et peut prendre jusqu'à 100 millions d'années pour des planètes de taille terrestre.

Deux processus physiques interviennent donc au cours de la formation du système solaire : l'effondrement gravitationnel et les collisions. Le premier, très rapide, semble prépondérant dans la formation du Soleil et des planètes géantes, tandis que les planètes internes (telluriques) se formeraient plutôt par agglomération, lors de collisions, de petits corps de moins de 20 km de diamètre (sortes de microplanètes : les planétoïdes).

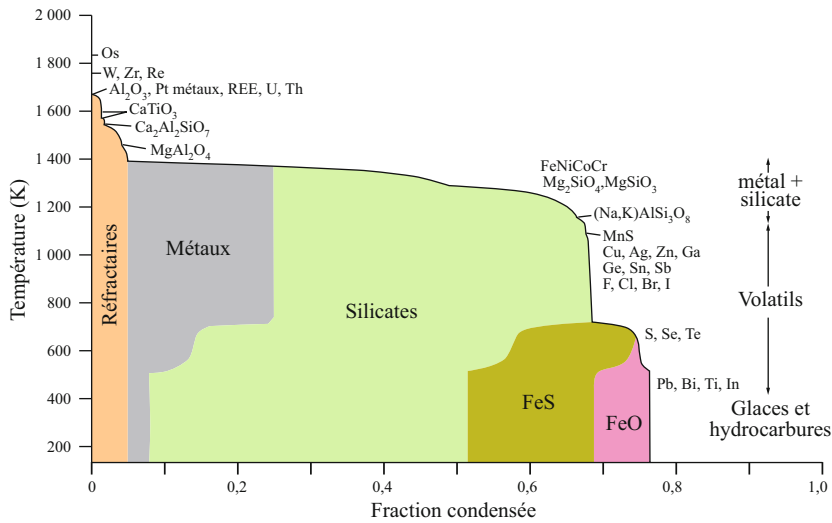


Figure 2.5 Séquence de condensation d'un gaz de composition solaire.

Encart 2.5 – Une modélisation numérique de l'accrétion progressive des planètes

Des simulations numériques ont été menées pour explorer les mécanismes d'accrétion planétaire à partir d'un disque initial peuplé de 100 planétoïdes de masse identique. Dans ce modèle, chaque corps suit une orbite elliptique autour du Soleil, dont les paramètres sont attribués de manière aléatoire. En raison de la diversité des trajectoires, de nombreuses collisions se produisent, conduisant à des fusions progressives, parfois à des captures gravitationnelles. Le système tend alors vers un état plus stable, au terme duquel seules quelques planètes subsistent sur des orbites devenues quasi régulières.

Dans une première version du modèle, simplifiée en deux dimensions (ce qui augmente les probabilités de collisions), l'essentiel de l'accrétion s'achève en 61 000 ans. Une version ultérieure, plus réaliste, intègre trois dimensions. Elle montre qu'à partir des 100 corps initiaux, il ne reste plus que 22 objets en orbite après 30 millions d'années (Ma), 11 après 79 Ma, et 6 au bout de 151 Ma. Ce type de simulation soutient l'hypothèse selon laquelle la Terre aurait pu atteindre sa taille actuelle en moins de 100 Ma, dans le cadre d'un processus chaotique mais convergent vers un petit nombre de corps planétaires stables.

Les images du sol lunaire révèlent une forte cratérisation, témoignage du bombardement météoritique intense qui a accompagné la fin de l'accrétion (fig. 2.6). Les cratères observés vont de quelques mètres à plus de 60 km de diamètre, et leurs impacts ont souvent généré des roches fondues. La fréquence des cratères diminue à mesure que leur taille augmente, et leur densité permet une datation relative des surfaces : plus un terrain est cratérisé, plus il est ancien. Les échantillons ramenés par les missions *Apollo* ont permis, par radiochronologie, de dater certaines régions. Les résultats montrent une décroissance marquée de la cratérisation entre 4,5 et 3,5 milliards d'années, indiquant que l'essentiel de l'accrétion planétaire s'est terminé vers 4,5 Ga, suivi d'une chute rapide du nombre de projectiles.

Sur Terre, les cratères d'impacts sont bien documentés mais beaucoup plus rares en raison de l'érosion et de l'activité géologique continue qui effacent les traces anciennes : seules ~ 10 % des roches présentes en surface ont plus 2 milliards d'années. Pourtant, on estime que le bombardement primitif de la Terre a été aussi intense que sur la Lune. Certains grands gisements métallifères du Précambrien, associés à des massifs ultrabasiques (de nature basaltique ou péridotitique), comme le Bushveld en Afrique du Sud (chrome, platine) ou le Sudbury au Canada (nickel, chrome), sont

interprétés comme les conséquences d'impacts géants. Leur géométrie et leurs structures de choc caractéristiques ne s'intègrent pas facilement dans le cadre tectonique régional, renforçant l'hypothèse d'une origine météoritique.

Encart 2.6 – Les météorites SNC trouvées sur Terre seraient d'origine martienne

Certaines météorites retrouvées sur Terre, les 8 météorites dites SNC (initiales des localités d'où proviennent 3 d'entre elles : Shergotty [Inde], Nakla [Égypte] et Chassigny [tombée le 3 octobre 1815, Haute-Marne]) présentent des compositions chimiques et isotopiques aberrantes (voisines de celles connues sur la planète Mars) et un âge de cristallisation très

jeune (1,3 milliard d'années), même si celui de Chassigny a été réévalué à un passé bien plus ancien. Certains pensent donc que la collision d'une grosse météorite avec la planète Mars a expulsé un fragment de la croûte martienne (à une vitesse supérieure à la vitesse d'échappement sur Mars, soit $5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) qui, au bout d'un voyage complexe, a fini par arriver sur Terre.

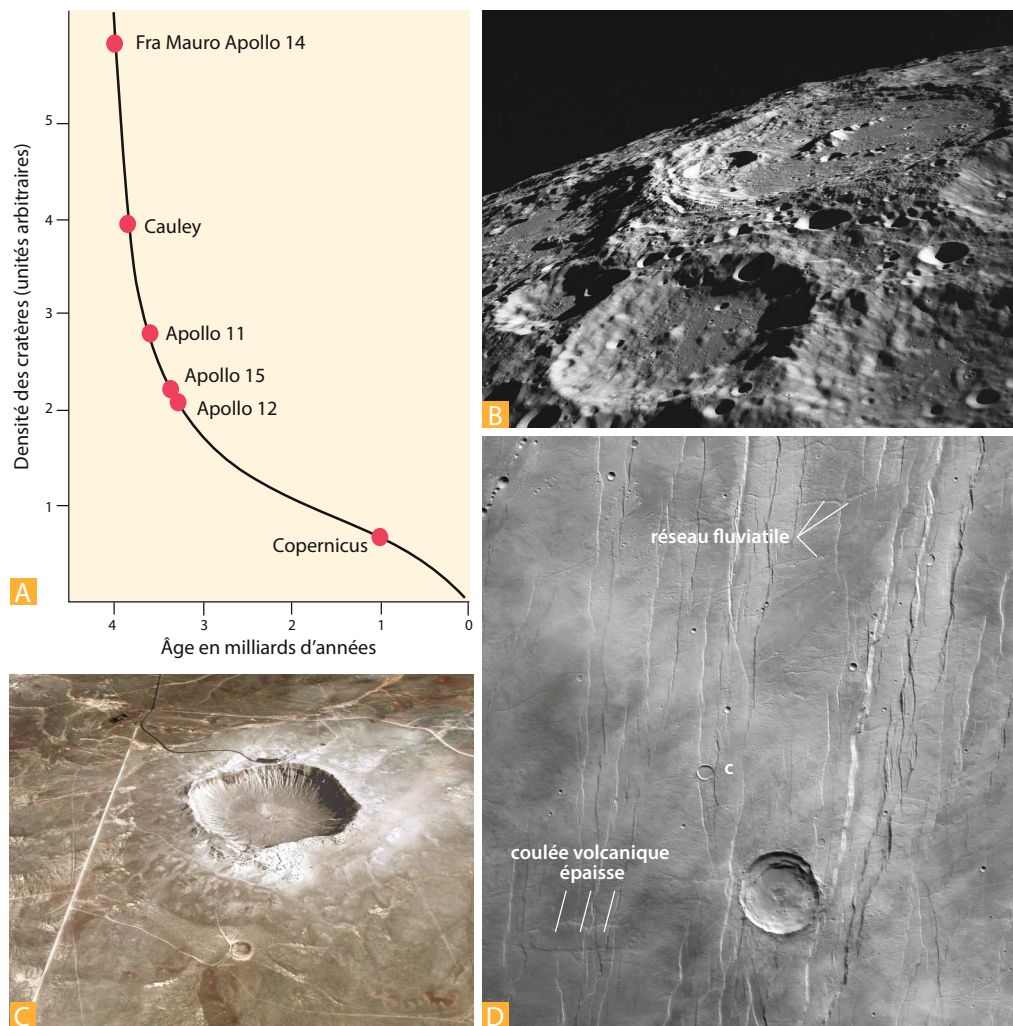


Figure 2.6 La cratérization dans le système solaire.

A. Densité des cratères en fonction de l'âge du sol lunaire. La densité décroît exponentiellement en fonction de l'âge de la région étudiée (*données issues des diverses missions Apollo*).

B. Cratérization intense de la Lune (*document NASA, mission Apollo 10*).

C. Un cratère d'impact sur la Terre : le Meteor Crater en Arizona (États-Unis). Ce cratère a un diamètre de 1 200 m, une profondeur de 190 m, et son bourrelet d'éjection mesure 30 m de hauteur. Il est dû à l'impact d'une météorite composée de nickel et de fer d'un diamètre de 27 m survenu il y a environ 50 000 ans sur le plateau Coconino Sandstone, d'âge permien. De nombreux fragments métalliques ont été recueillis autour du cratère. Des minéraux du métamorphisme de choc (coésite, stishovite) ont été découverts sur les parois du cratère (*photo : USGS*).

D. Cratérisation de Mars. Un recensement cartographique achevé en 2012 montre que Mars a reçu plus de 635 000 impacts de météorites de plus de 1 km de diamètre. Le cratère principal visible sur ce document a un diamètre d'environ 20 km. Il est situé sur le flanc sud du grand volcan Alba Patera, au nord du dôme de Tharsis (voir localisation et détails sur les figures 2.10 et 2.11) dont la pente ici est seulement de 1° à 2°. De nombreuses failles normales, parallèles et à faible rejet, appartiennent à un système tectonique extensif lié au gonflement de l'ensemble du dôme de Tharsis. Ces failles, qui délimitent des grabens de 100 m de profondeur, semblent recouper les bordures du cratère principal, mais un cratère plus petit (c) recoupe nettement une faille du réseau extensif. Une coulée volcanique épaisse se distingue en bas à gauche. Un réseau fluvial de vallées sinueuses peu profondes (20 m) se surimpose aux failles. Il est très probablement le résultat d'un écoulement rapide d'eau suite à la fonte récente de glaciers (*document Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique de Nantes, MOLA*).

Aujourd'hui, on estime encore à 50 000 tonnes/an le poids de matière météoritique reçu par la Terre, soit plus de 100 t par jour. L'impact d'une météorite de 10 km de diamètre (cratère de Chicxulub, au nord de la péninsule mexicaine du Yucatan) paraît une des causes essentielles de la crise biologique survenue à la limite Crétacé/Paléogène. Le centre de la France conserve les traces de deux météorites géantes, celles de Rochechouart (Haute-Vienne) et de Bizeneuille (Allier). D'un diamètre de 15 km, elles auraient creusé un cratère de 200 km de diamètre. Elles appartiendraient à une caténa (groupe de plusieurs météorites) ayant frappé la Terre vers 200 Ma et qui pourrait avoir contribué à la crise biologique de la limite Trias/Jurassique.

2.4 LE SOLEIL

À 150 millions de kilomètres de la Terre, le Soleil est une étoile de dimension modeste (environ 1 400 000 km), située dans un bras spiral de la galaxie, à 30 000 années-lumière du centre de cette dernière (*fig. 1.1*). Son rayon est de 695 000 km environ. Bien que constitué essentiellement d'hydrogène (73 %), d'hélium et de seulement 2 % d'autres éléments, son poids est de $2 \cdot 10^{30}$ kg, soit 330 000 fois celui de la Terre. Sa période de rotation, dans le sens direct, est de 26,9 jours à l'équateur, 35 jours aux pôles. Son axe de rotation est incliné de $82^{\circ}45'$ sur le plan de l'écliptique.

2.4.1 La structure du Soleil

Le Soleil possède un noyau central d'environ 250 000 km de rayon, où la température atteint 15 millions de degrés et où la densité est très élevée ($150\,000\text{ kg/m}^3$, contre $1\,408$ en moyenne pour le Soleil). C'est là que s'opère la fusion nucléaire, convertissant chaque seconde 600 millions de tonnes d'hydrogène en hélium, principalement via le cycle proton-proton.

Les photons produits par ces réactions mettent en moyenne un million d'années à traverser les couches internes du Soleil, alors que les neutrinos s'en échappent en quelques secondes.

De ce fait, la mesure du flux de neutrinos s'est fortement développée ces dernières années, car ils nous apportent directement des renseignements sur les conditions physiques du cœur des étoiles.

La lumière solaire atteint la Terre en 8 minutes, avec une intensité de $1\,370\text{ W/m}^2$ (constante solaire). Autour du noyau s'étend la zone radiative (jusqu'à $\sim 500\,000\text{ km}$ du centre), où l'énergie migre par rayonnement. Elle laisse place à une zone convective, dans laquelle l'énergie est transportée par mouvements de matière jusqu'à la surface (*fig. 2.7*). L'atmosphère solaire commence au-delà.

2.4.2 L'atmosphère solaire

L'atmosphère du Soleil, observable en lumière visible, débute avec la photosphère, fine couche de 300 km d'épaisseur où se forme la lumière solaire. Sa température décroît de 8 000 °C à 4 500 °C, donnant au Soleil sa couleur blanc-jaune. Elle est marquée par des taches sombres, zones froides où le champ magnétique est très intense.

Au-dessus se trouve la chromosphère, couche de 2 000 à 3 000 km, visible en rose vif lors des éclipses. Contrairement à la photosphère, sa température augmente avec l'altitude, atteignant 1 million de degrés à la base de la couronne solaire. La chromosphère est structurée par des spicules, colonnes de gaz de 1 000 km de diamètre, bordant des cellules de 40 000 km, formant un maillage complexe.

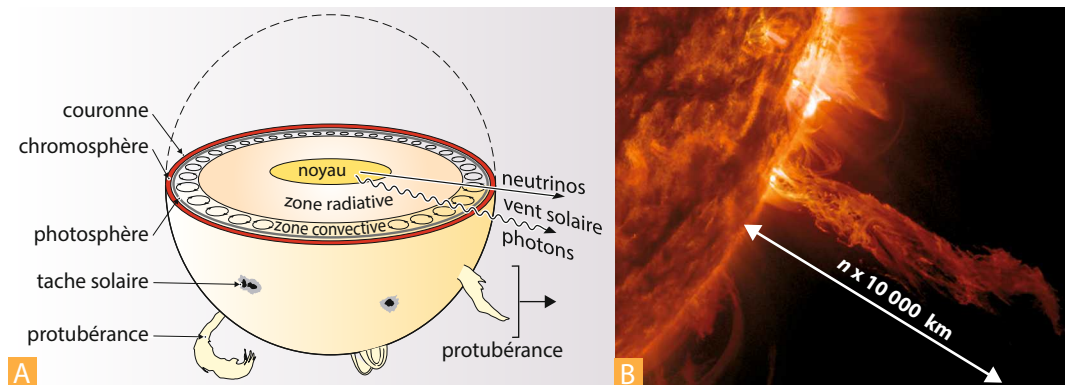


Figure 2.7 Le Soleil.

A. Structure interne.

B. Détail d'une protubérance (document NASA).

La partie la plus externe de l'atmosphère solaire, ou **couronne**, est observable lors des éclipses ou à l'aide d'un coronographe qui masque le disque solaire, et aujourd'hui par les sondes spatiales. Sa très haute température (3 millions de degrés alors que celle de la surface du Soleil n'est que de 6 000 degrés), longtemps énigmatique, s'explique par une dynamique qui naît à quelque 150 000 km sous la surface du Soleil, où se créent de puissantes concentrations magnétiques. En atteignant la couronne, les lignes de force des champs magnétiques peuvent produire des courts-circuits, sources de puissants courants électriques qui chauffent continuellement le plasma. La couronne interne est comprise entre 15 000 et 150 000 km au-dessus de la photosphère, et la couronne externe peut atteindre 10 rayons solaires, soit plus de 5 millions de kilomètres.

2.4.3 L'activité solaire

L'activité du Soleil varie selon un cycle de 11 ans, marqué par l'apparition de zones actives comme les taches, les éruptions et les protubérances. Ces phénomènes traduisent l'intensité variable du champ magnétique solaire (fig. 2.7).

À mi-parcours de sa vie (estimée à 10 milliards d'années), le Soleil épuisera dans 5 milliards d'années son hydrogène, deviendra une géante rouge, puis une naine blanche, après avoir expulsé ses couches externes et formé une nébuleuse planétaire.

Encart 2.7 – Taches, protubérances, tornades et éruptions solaires

Ces phénomènes traduisent l'activité magnétique du Soleil :

- Les taches solaires apparaissent à la surface de la photosphère là où émergent des boucles de champ magnétique. Leur nombre varie selon un cycle de 11 ans. Les plus petites ont la taille de la Terre, les plus grandes peuvent être cent fois plus vastes (*fig. 2.7*).
- Les tornades solaires sont des colonnes de gaz en rotation qui atteignent jusqu'à 500 000 km/h, capables d'endommager satellites et réseaux électriques.
- Les éruptions solaires, liées à des ondes de choc magnétiques, peuvent se propager à 1,5 million de km/h et produire des séismes solaires extrêmes. Elles causent aurores polaires et tempêtes magnétiques.
- Le vent solaire, alimenté par ces phénomènes, est un flux de protons, électrons et neutrinos projetés depuis la couronne à 400-800 km/s, emportant environ 1,6 million de tonnes de matière par seconde.
- Les protubérances sont des arches de gaz plus froid (~10 000 °C) issues de la chromosphère. Visibles lors des éclipses totales, elles peuvent s'élever jusqu'à 1 million de km avant de se dissiper.

2.5 LES DIFFÉRENTES PLANÈTES

Les planètes telluriques peuvent être considérées comme un résidu silicaté et métallique des planètes géantes (3 % de la masse), et leur évolution rend compte qu'elles sont, au contraire des planètes géantes, privées d'anneaux et de satellites, ce qui est le cas pour Mercure et Vénus. Les deux satellites de Mars (Phobos et Deimos) et celui de la Terre (la Lune) ont une tout autre origine et ont probablement été capturés ultérieurement dans le champ gravitationnel de ces planètes.

2.5.1 Accrétion et différenciation

La formation des planètes telluriques découle d'un double processus d'accrétion de matière solide dans le disque protoplanétaire et de différenciation interne sous l'effet de la chaleur dégagée. Initialement, de petits grains riches en silicates, métaux et minéraux réfractaires s'agrègent pour former des corps de taille centimétrique à kilométrique. Deux scénarios principaux sont aujourd'hui discutés pour rendre compte de la croissance rapide de ces embryons planétaires. Le modèle classique repose sur l'accrétion hiérarchique de planétésimaux (de plus en plus gros), mais il semble trop lent pour expliquer la formation de la Terre dans les délais imposés par les isotopes radioactifs à courte durée de vie comme ^{26}Al (demi-vie = 0,7 Ma) et le ^{60}Fe (demi-vie = 2,6 Ma). Le modèle alternatif de la « pebble accretion » propose que des cailloux (*pebbles*) millimétriques à centimétriques, bien couplés au gaz, sont efficacement capturés par des embryons en croissance rapide, formant des protoplanètes en moins d'un million d'années. Ce mécanisme pourrait cependant enrichir les planètes en volatils (dont l'eau), ce qui semble en contradiction avec la relative sécheresse des planètes internes, suggérant une accrétion tardive ou une filtration des *pebbles* hydratés par la migration de Jupiter.

Dans le modèle d'accrétion hiérarchique nommé Grand Tack, Jupiter jouerait un rôle clé en migrant d'abord vers le Soleil, puis vers l'extérieur sous l'effet de Saturne. Ce mouvement aurait limité l'apport d'objets riches en eau dans la zone interne, tout en sculptant la distribution des masses planétaires. L'apport d'eau sur Terre aurait alors eu lieu par des impacts tardifs de planétésimaux hydratés issus de la région des astéroïdes carbonés, riches en phyllosilicates, expliquant les signatures isotopiques de l'eau terrestre proches de celles des chondrites.

Lorsque les embryons atteignent une taille suffisante, la chaleur produite par les collisions, la compression gravitationnelle et la désintégration d'isotopes radioactifs comme l' ^{26}Al induit

une fusion partielle. La planète primitive se transforme en océan de magma, permettant la séparation des matériaux (et non des éléments) selon leur densité. Les métaux (fer, nickel, éléments sidérophiles) s'enfoncent rapidement vers le centre pour former un noyau métallique, tandis que les silicates forment le manteau. Durant cette phase, une fraction de l'eau présente peut être piégée dans les minéraux du manteau, mais une partie est aussi dégazée, contribuant à la formation d'une atmosphère primitive et éventuellement d'un océan en surface après condensation, lorsque les températures deviennent compatibles avec la stabilité de l'eau liquide.

Ce processus de différenciation thermique et chimique, enclenché dès les premiers millions d'années du système solaire, conditionne l'architecture interne des planètes telluriques et leur potentiel à conserver de l'eau en surface, condition essentielle à l'habitabilité.

2.5.2 Mercure

Mercure, la planète la plus proche du Soleil, a fait l'objet de plusieurs missions spatiales visant à mieux en comprendre la nature. Les données recueillies par *Mariner 10* (1974-1975) puis par *Messenger* (2011-2015) ont permis d'établir les principales caractéristiques de cette planète tellurique.

La structure interne de Mercure présente une particularité notable : son noyau métallique, principalement composé de fer et de nickel, occupe environ 85 % du rayon planétaire, une proportion beaucoup plus importante que pour les autres planètes telluriques. Ce noyau est en grande partie liquide, ce qui permet la génération d'un champ magnétique global, bien que son intensité soit environ 40 000 fois plus faible que celle de la Terre. Plusieurs hypothèses expliquent la faible quantité de silicates, notamment un impact géant primordial qui aurait éjecté une grande partie du manteau.

La surface est fortement cratérisée, rappelant celle de la Lune, mais elle comprend aussi des plaines basaltiques étendues, telles que le bassin Caloris (1 550 km de diamètre), ainsi que des formations géologiques uniques appelées « hollows », des dépressions brillantes d'origine encore mal comprise. Ces observations témoignent d'une activité géologique aujourd'hui éteinte. On distingue trois épisodes magmatiques majeurs : (1) un volcanisme précoce (4,1-3,8 milliards d'années) ayant créé des plaines lisses inter-cratères, (2) des coulées basaltiques plus récentes (~3,7 Ga) comblant notamment le bassin Caloris, et (3) une activité pyroclastique localisée autour de certains cratères, produisant des dépôts spectaculaires.

La tectonique de Mercure est dominée par un régime compressif global, matérialisé par un réseau étendu de failles inverses et d'escarpements lobés pouvant atteindre 1 000 km de long. Ces structures traduisent un refroidissement progressif et une contraction radiale de toute la planète estimée à environ 7 km. Cependant, les grabens observés dans le bassin Caloris, témoignent d'épisodes locaux et temporaires de tectonique en extension.

L'atmosphère de Mercure est ténue, avec une pression d'environ 10^{-12} bars, ce qui entraîne des variations thermiques extrêmes entre le jour (+450 °C) et la nuit (-180 °C). Des dépôts de glace d'eau ont été détectés dans les cratères polaires en permanence à l'ombre.

La mission *BepiColombo* (ESA/JAXA), en route vers Mercure avec une arrivée prévue fin 2026, devrait fournir des données complémentaires grâce à ses instruments haute résolution. L'orbiteur *MPO* étudiera en particulier la composition des unités géologiques et la dynamique crustale afin de mieux comprendre l'histoire thermique, tectonique et magnétique de la planète.

2.5.3 Vénus

Vénus est légèrement plus petite que la Terre, avec un rayon de 6 051 km, et présente une densité moyenne de 5 240 kg/m³. Sa rotation est rétrograde, c'est-à-dire qu'elle s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre vue depuis le pôle nord, ce qui fait que le Soleil s'y lève à l'ouest. La rotation vénusienne est très lente, avec une durée d'environ 243 jours terrestres, plus longue que sa période de révolution autour du Soleil, qui est de 224 jours. Vénus possède une atmosphère dense, avec une pression au sol environ 95 fois supérieure à celle de la Terre.

a) L'atmosphère vénusienne

L'atmosphère vénusienne, postérieure à la perte de son atmosphère primordiale riche en H et He, est aujourd'hui formée de 97 % de CO₂, de 3 % de N₂, de composés soufrés (1 000 ppm de H₂S et S), de 1 000 ppm d'H₂O, de 60 ppm d'oxygène, de traces de néon et d'argon. De cette atmosphère très épaisse résulte un effet de serre qui explique la température extrême au sol (en moyenne 460 °C), ainsi que la formation de sulfure de carbone (OCS) et d'acide sulfurique (H₂SO₄) qui se condensent dans les nuages avec d'autres gaz, lorsque la température diminue avec l'altitude (entre -40 °C et -80 °C à 80 km). Cette atmosphère provient du dégazage volcanique et des effets secondaires dus à la photolyse. C'est ainsi que l'oxygène proviendrait de la décomposition de l'eau et du CO₂, l'hydrogène trop léger échappant dans l'espace.

L'atmosphère de Vénus n'est pas aussi différente de celle de la Terre qu'il y paraît : c'est qu'en effet, sur cette dernière, le CO₂ a été dissous dans l'eau et combiné au calcium dans les carbonates. Si l'on calcule le rapport de CO₂ total et d'azote par rapport à un gramme de roche planétaire, on trouve en effet des proportions voisines pour les deux planètes.

Encart 2.8 – Des traces de vie sur Vénus : un emballement médiatique ?

En septembre 2020, la détection de phosphine (PH₃) dans les nuages de Vénus, interprétée comme un marqueur d'une activité bactérienne anaérobie, a déclenché un engouement médiatique autour de la présence de vie sur cette planète particulièrement inhospitalière.

Quelques mois plus tard, force est de constater que l'emballement médiatique était, pour le moins prématuré, car la « signature biologique » univoque de cette molécule, loin d'être prouvée, a été largement remise en cause.

b) La structure de Vénus

La surface de Vénus est mieux connue grâce aux missions spatiales, notamment les sondes américaines *Pioneer Venus* (1978), *Magellan* (1990-1994), et les missions soviétiques *Venera* (1960-1980). En utilisant le radar pour traverser l'atmosphère, *Magellan* a cartographié environ 98 % de la surface de la planète, révélant un relief globalement peu contrasté : environ 60 % de la surface présente un dénivelé inférieur à 1 000 mètres. Des régions plus élevées, telles qu'Ishtar Terra ou Aphrodite Terra, s'élèvent en moyenne de 2 000 mètres au-dessus des plaines, avec des sommets pouvant atteindre jusqu'à 10 000 mètres (Maxwell Montes, le point culminant de Vénus).

Les sondes *Venera* 9 à 14 ont transmis des images et réalisé des analyses de surface malgré les conditions extrêmes. Elles ont identifié des roches aux compositions proches des basaltes. Les études gravimétriques issues des orbiteurs confirment des contrastes de densité entre les hauts plateaux et les basses terres, indiquant des variations de composition de la croûte.

La structure interne de Vénus reste difficile à contraindre précisément, mais les modèles suggèrent qu'elle possède une différenciation interne semblable à celle de la Terre, avec un noyau métallique probablement constitué de fer-nickel. Le rayon estimé de ce noyau atteint environ 3 100 km, soit environ 50 % du rayon planétaire, ce qui est légèrement inférieur à la proportion du noyau terrestre. Il n'existe toutefois pas de champ magnétique global.

La surface présente de nombreuses structures tectoniques. Parmi les plus caractéristiques figurent les *tesserae*, régions très anciennes et fortement déformées occupant environ 8 % de la surface. Ces terrains sont composés de réseaux de crêtes et de failles entrecroisées, suggérant des épisodes intenses de compression et d'extension crustale. Ils témoignent d'une tectonique ancienne intense et différente d'une tectonique de plaques comme sur Terre.

Les *coronae* sont des formations circulaires, mesurant généralement entre 100 et 2 600 km de diamètre. Elles sont interprétées comme le résultat de remontées diapiriques de matériel chaud du manteau, provoquant un bombement de la lithosphère suivi d'un effondrement. Ces structures, souvent accompagnées de fractures radiales et concentriques, pourraient refléter un volcanisme de type point chaud, analogue aux panaches mantelliques terrestres. Certaines *coronae* pourraient également constituer des sites de délamination locale de la lithosphère, voire d'une forme de subduction localisée, bien que sans mouvement global de plaques comme sur Terre.

Malgré la difficulté observationnelle de mettre en évidence une tectonique active, plusieurs indices indiquent une activité géologique récente ou actuelle. Des variations morphologiques détectées entre différents survols de *Magellan* suggèrent des coulées de lave au moment de la mission spatiale. De plus, des fluctuations du dioxyde de soufre (SO_2) mesurées dans la haute atmosphère par *Pioneer* puis *Venus Express* suggèrent des éruptions volcaniques. Ces observations soutiennent l'idée d'un volcanisme actuel.

Les prochaines missions européennes et américaines, *EnVision* (ESA, lancement prévu vers 2031) et *VERITAS* (NASA, date repoussée après 2031), auront pour objectifs d'étudier en détail la structure interne, la composition de surface et les mécanismes géologiques de Vénus grâce à une imagerie radar de haute précision notamment.

2.5.4 La Terre et la Lune

Le détail de la structure de la Terre sera développé dans la partie II de l'ouvrage, où l'essentiel concernant l'évolution géochimique de la Terre est présenté à côté des apports des méthodes géophysiques (sismique, gravimétrie, paléomagnétisme). L'origine et l'évolution de l'atmosphère sont traitées en section 19.4, et celles de l'hydrosphère en section 21.3.

a) Caractères physiques et astronomiques de la Terre

La Terre peut être considérée comme un solide entouré d'une enveloppe liquide discontinue, l'hydrosphère, et d'une enveloppe gazeuse, l'atmosphère.

La situation dans le cortège des planètes du système solaire est moyenne tant au point de vue de la position (3°) que du volume (5°) et de la masse (5°). Jupiter est douze fois plus grosse, Mercure et Pluton sont nettement plus petites. La densité globale ($5\,500\text{ kg.m}^{-3}$) est forte ; aucune des petites planètes n'atteint ce chiffre (Mercure : $5\,400\text{ kg.m}^{-3}$; Vénus : $5\,200\text{ kg.m}^{-3}$; Mars : $3\,900\text{ kg.m}^{-3}$), et les grosses planètes, qui s'échelonnent de Neptune ($1\,600\text{ kg.m}^{-3}$) à Saturne (710 kg.m^{-3}), sont beaucoup moins denses. La Lune elle-même n'a qu'une densité de $3\,300\text{ kg.m}^{-3}$ (fig. 2.1).

La Lune est un corps sphérique légèrement aplati, de rayon moyen 1 735 km, soit environ quatre fois plus petit que celui de la Terre (volume $\approx 1/50$). Sa densité moyenne est inférieure à celle de la Terre, ce qui entraîne une pesanteur six fois plus faible ($g = 1,62\text{ m.s}^{-2}$). Elle orbite autour de la Terre à une distance moyenne de 384 400 km, en 27,3 jours (révolution sidérale), durée identique à celle de sa rotation sur elle-même. La Lune présente donc toujours la même face à notre planète. Cette synchronisation implique des nuits lunaires d'environ 14 jours, avec de forts écarts de température dus à l'absence d'atmosphère : de $+125^\circ\text{C}$ en journée à l'équateur à -175°C la nuit, notamment aux pôles. La distance Terre-Lune augmente d'environ 3,8 cm par an, ce qui allongera la période orbitale à 30 jours dans environ 100 millions d'années.

Encart 2.9 – La fenêtre « d'habitabilité »

Les conditions permettant l'installation de la vie sur une planète sont assez strictes. Ainsi, la Terre possède un thermostat climatique, basé en grande partie sur le cycle de l'eau (évaporation, condensation, formation de nuages), qui le permet. Si la Terre avait été située à 0,95 UA du Soleil, soit seulement 5 % plus près qu'elle l'est actuellement, tous les océans auraient déjà disparu (fig. 2.8). La zone d'« habitabilité » du système solaire est donc très réduite entre une frontière interne où les conditions deviennent trop chaudes et une frontière externe où elles deviennent trop froides (à 1,37 UA du Soleil, le CO_2 commence à geler dans la haute atmosphère).

Selon certains auteurs, la frontière interne avancerait aussi du fait de l'augmentation progressive de la luminosité solaire et atteindrait l'orbite terrestre dans environ 1,5 Ga. Toutefois, la notion d'habitabilité va au-delà de la seule distance à l'étoile. Elle dépend également de la composition et de la densité de l'atmosphère, de la présence d'eau et de composés volatils, de l'activité géologique (nécessaire pour recycler le carbone et maintenir un effet de serre modéré), ainsi que de la présence d'un champ magnétique, qui protège la surface des particules solaires et cosmiques.

Depuis l'Antiquité, la Lune est distinguée visuellement en régions claires (terres) et sombres (mers). En 1610, Galilée découvre ses cratères à l'aide d'une lunette. Les télescopes modernes ont révélé une surface cratérisée complexe, observable jusqu'à une résolution de 100 mètres.

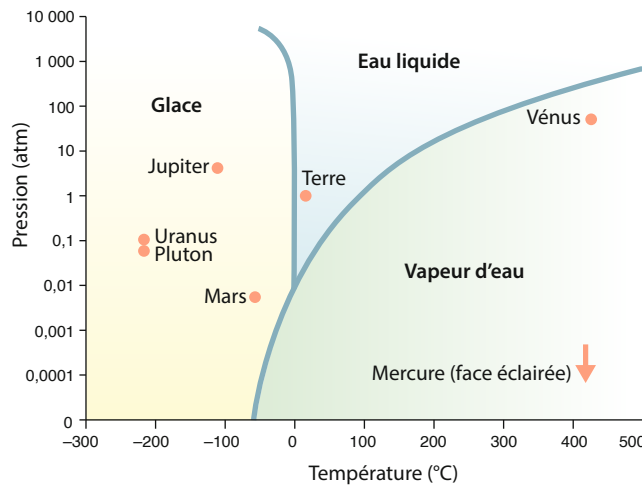


Figure 2.8 Diagramme de phase de l'eau en fonction de la température et de la pression et position des principales planètes du système solaire.

On voit que sur Mars, dans les conditions actuelles, l'eau ne peut être que sous forme de glace ou de vapeur (lors d'un réchauffement climatique ou volcanique).

b) La surface lunaire : les enseignements de l'exploration lunaire

Depuis les premières missions soviétiques (*Luna*, à partir de 1959) et américaines (*Apollo*, 1969-1972), la surface lunaire a été photographiée, cartographiée et échantillonnée. Douze astronautes ont rapporté 382 kg de roches, complétés par 130 g collectés par des engins *Luna*. Ces échantillons ont révélé trois grandes catégories de roches :

- les anorthosites, riches en feldspaths calciques, dominent les régions claires (terrains anciens, ou « terres ») et se sont formées entre 4,5 et 4 Ga, probablement lors de la cristallisation d'un océan magmatique primitif. Cette croûte différenciée flotte au-dessus d'un manteau plus dense, comme l'indiquent les données sismiques (discontinuité à ~60 km de profondeur) ;

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

- les basaltes, plus sombres, remplissent les mers : ils sont issus de coulées volcaniques fluides datées entre 3,9 et 3,1 Ga. Leur faible viscosité et l'absence d'atmosphère ont permis l'échappement des gaz volcaniques, accentuant l'aridité lunaire ;
- les norites KREEP, enrichies en potassium, terres rares et phosphore, sont caractéristiques de zones où la différenciation interne a été intense.

Encart 2.10 – L'origine des norites KREEP

Les norites KREEP ont une répartition très ponctuelle à la surface de la Lune (au niveau de pointements perçant les basaltes). Il semblerait donc qu'à une certaine période (après la formation de la croûte anorthosique), mais avant l'épanchement des basaltes lunaires qui recouvrent ces régions, il y ait eu une refonte partielle du matériel crustal anorthosique pour donner une lave de type norite. On ignore la source de la chaleur nécessaire à la fusion et la raison pour laquelle

les éruptions sont ainsi localisées. Pour certains, cela serait lié à un impact géant. Pour d'autres, les norites représenteraient non pas une fusion partielle des anorthosites, mais les derniers résidus d'un processus de cristallisation fractionnée. Au cours du refroidissement de la croûte lunaire, une couche de norite KREEP aurait fini par être mise en place sous la croûte anorthositique et aurait été mise au jour ultérieurement lors de la formation des cratères.

En décembre 2020, la mission chinoise *Chang'e 5* a permis de prélever 1,7 kg de roches dans Oceanus Procellarum. Les datations isotopiques (U-Pb, Ar-Ar) ont révélé un âge de $2,03 \pm 0,04$ milliards d'années, soit près de 1 milliard d'années plus récent que les basaltes d'Apollo. Ce volcanisme tardif suggère une activité magmatique prolongée, peut-être entretenue localement par des concentrations de chaleur résiduelle ou d'éléments radioactifs.

La surface lunaire est recouverte d'une couche meuble, le régolithe, épaisse de quelques mètres. Elle résulte de l'accumulation continue d'impacts de météorites, faute d'atmosphère protectrice. Le régolithe contient des fragments de roche, des particules vitrifiées par fusion, et est enrichi en éléments chimiques du vent solaire. Dans les cratères polaires, jamais exposés au Soleil, des dépôts de glace d'eau ont été détectés (sonde *Lunar Prospector*, 1998), probablement d'origine cométaire et piégés dans le régolithe.

Les données sismiques et gravimétriques indiquent :

- une croûte anorthositique d'environ 45-60 km d'épaisseur ;
- un manteau riche en pyroxènes et en olivine ;
- un noyau partiellement liquide, probablement composé d'un alliage fer-nickel avec du soufre, dont le rayon est estimé entre 330 et 360 km. Ce noyau représenterait environ 2 à 3 % de la masse lunaire, contre 30 % pour la Terre. L'absence de champ magnétique global actif aujourd'hui suggère que la dynamo lunaire s'est arrêtée il y a plus de 3 milliards d'années, bien que des roches montrent un magnétisme fossile indiquant qu'un champ global a existé entre 4,2 et 3,5 Ga.

Encart 2.11 – Une inhumation lunaire

Le 30 juillet 1999, après être restée en orbite autour de la Lune, la sonde *Lunar Prospector* a été envoyée percuter un cratère lunaire pour rechercher la vapeur d'eau, emportant dans sa chute les cendres d'Eugène Schoemaker (« inventeur » de la comète qui heurta Jupiter en 1994), premier Terrien inhumé dans l'espace.

c) Résumé de l'histoire géologique de la Lune

La Lune se serait formée il y a environ 4,5 milliards d'années à la suite d'un impact géant entre la Terre et un corps de la taille de Mars (appelé Theia). Ce choc a généré un corps partiellement fondu, donnant

naissance à un noyau métallique, un manteau et une croûte anorthositique issue d'un océan magmatique global.

Entre 4,4 et 3,8 Ga, un bombardement météoritique intense creuse de vastes bassins d'impact, certains dépassant 1 000 km de diamètre. De 3,8 à 1 Ga, une activité volcanique remplit ces bassins de coulées de basalte. Si la majorité de ces roches datent de 3,8 à 3 Ga, les échantillons de la mission Chang'e 5 (2020) montrent que le volcanisme s'est poursuivi jusqu'à $2,03 \pm 0,04$ Ga.

Depuis environ 1 milliard d'années, la Lune est quasiment inactive. Seuls quelques séismes lunaires subsistent, causés par les marées terrestres ou la dilatation thermique. L'intérieur est figé. Le noyau, de 330 à 360 km de rayon, est partiellement liquide, mais il ne génère plus de champ magnétique global.

La surface est recouverte d'un régolithe meuble (1-10 m), issu du cumul des impacts et du vent solaire.

d) Les relations Terre-Lune

L'histoire de la Lune s'achève à l'échelle géologique il y a environ 1 milliard d'années, au moment même où l'histoire terrestre devient plus lisible dans les archives rocheuses. Les plus anciennes roches terrestres datées atteignent un peu plus de 4 Ga, mais 97 % des roches de la croûte actuelle ont moins de 2 milliards d'années.

Les rapports isotopiques de l'oxygène dans les échantillons lunaires (*Apollo*, *Luna*, *Chang'e*) montrent que la Terre et la Lune proviennent d'une même région du disque protosolaire. Cela exclut un scénario de formation indépendante. Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer l'origine de la Lune : séparation par rotation rapide, capture gravitationnelle, formation conjointe. Aujourd'hui, l'hypothèse la plus largement acceptée est celle d'un impact géant, survenu il y a 4,5 Ga, entre la Terre en formation et un corps de taille martienne (souvent nommé Theia).

La collision aurait éjecté des matériaux du manteau supérieur et partiellement du projectile, formant un disque de débris à partir duquel la Lune s'est agrégée. Ce scénario explique :

- la composition isotopique très similaire des deux corps (O, Ti, Fe, Si) ;
- la déficience en volatils de la Lune ;
- la rotation rapide initiale de la Terre ;
- l'inclinaison de l'axe terrestre (obliquité actuelle $\approx 23,5^\circ$).

Des analyses récentes renforcent ce modèle. En 2014, la datation de l'échantillon 60025 (*Apollo 12*) a fourni un âge de 4,36 Ga (méthodes Pb-Pb et Sm-Nd), suggérant une formation différée de la croûte lunaire par rapport à l'impact. Les signatures isotopiques du fer et les rapports Fe/Mg des roches plutoniques riches en Mg issues des premières cristallisations lunaires sont quasiment identiques à ceux du manteau terrestre, suggérant que la Lune est majoritairement formée de matériau terrestre.

Depuis leur formation, les destins de la Terre et de la Lune sont liés. L'interaction gravitationnelle Terre-Lune génère des marées solides lunaires, ayant ralenti sa rotation jusqu'à une synchronisation avec sa révolution (rotation synchrone : 27 j 7 h 43 min). Elle produit en miroir des marées océaniques et crustales terrestres, qui freinent la rotation terrestre à un rythme de 1,6 ms par siècle, ce qui diminue le nombre de jours par an d'environ 1 jour tous les 50 millions d'années.

Cette dissipation d'énergie fait s'éloigner la Lune de 3,8 cm par an, mesurée précisément par réflectométrie laser. À terme, si aucun autre processus n'intervient, la Terre et la Lune pourraient atteindre un état de double rotation synchrone dans plusieurs dizaines de milliards d'années. La présence de la Lune stabilise également l'obliquité de la Terre. Les travaux de Laskar (1989) ont montré que, sans la Lune, l'influence gravitationnelle de Jupiter induirait des variations chaotiques de l'inclinaison terrestre, affectant fortement l'insolation et donc le climat. En amortissant ces fluctuations, la Lune joue un rôle indirect mais crucial dans la régularité des cycles climatiques (précession, excentricité, obliquité), tels que décrits par la théorie de Milankovitch.

Encart 2.12 – La surface lunaire s'est-elle déplacée par rapport à son axe de rotation ?

Depuis une vingtaine d'années, on connaît l'existence de deux régions lunaires présentant des indices de glace. L'originalité est que, bien qu'elles soient antipodales l'une de l'autre, elles ne se trouvent pas aux pôles actuels (régions les plus froides). Pour expliquer cette anomalie, des chercheurs ont postulé, en 2016, que les assises externes de la Lune avaient pu se décaler par rapport à son axe de près de 6 degrés au cours du premier milliard d'années, déplaçant ainsi, vers 3,5 Ga, ces zones glacées loin des pôles. Ce déplacement des assises superficielles lunaires serait dû à un changement dans la distribution des

masses suite à l'activité interne induisant des anomalies de densité dans certaines régions (bassin volcanique de l'Oceanus Procellarum). Si cette hypothèse se confirme, cela impliquerait qu'il y ait eu de l'eau présente précocement sur la Lune vers 4,5 Ga, alors que l'on pensait que l'eau y était apparue plus récemment suite aux impacts d'astéroïdes. On doit noter qu'un processus identique de déplacement des pôles par rapport aux assises superficielles a aussi été envisagé pour la Terre, notamment dans le cadre de la théorie « Terre boule de neige » (*Snowball Earth*, voir encart 4.20 et paragraphe 22.3.2).

2.5.5 Mars

Nos connaissances sur la planète Mars se sont considérablement accrues grâce aux orbiteurs américains *Mars Global Surveyor* (1997), *Mars Odyssey* (2001), au satellite européen *Mars Express* (2003) et au *Mars Reconnaissance Orbiter* (2006). Ils ont permis une cartographie fine, la détection de minéraux hydratés, de formations glaciaires souterraines et la reconnaissance d'une activité volcanique prolongée, notamment dans Elysium Planitia.

Dès 1997, la mission *Pathfinder* et le robot *Sojourner* avaient transmis environ 16 000 images et collecté des données sur l'atmosphère et la croûte. En 2004, les rovers *Spirit* et *Opportunity* ont confirmé la présence passée d'eau liquide et de minéraux comme les sulfates. *Spirit* a cessé d'émettre en 2010, et *Opportunity* en 2019 après 45 km parcourus.

Le rover *Curiosity*, lancé en 2011 et toujours actif dans le cratère Gale, analyse la géologie de Mars à l'aide d'un spectromètre laser (*ChemCam*) et d'un foreur. *Curiosity* a permis l'identification d'anciens lacs et rivières (3,5-3,8 Ga) avec minéraux hydratés et molécules organiques, prouvant que Mars a offert des conditions habitables. Le rover a permis de documenter la transition climatique vers l'aridité (dépôts sulfatés).

La mission *InSight* (NASA, 2018-2022) a permis une avancée dans la compréhension de l'intérieur martien. Elle a détecté 1 319 séismes, révélé une croûte de 25 à 40 km, un noyau liquide d'environ 1 830 km de rayon, et une couche fondue entre le noyau et le manteau. En 2024, *InSight* a identifié la présence d'eau en profondeur, probablement des roches hydratées (11,5-20 km).

En 2020, une conjonction favorable a permis le lancement de plusieurs missions :

- *Mars 2020* (NASA) a déployé le rover *Perseverance* le 18 février 2021 dans le cratère Jezero, ancien lac deltaïque. Il fore des carottes de roche, stockées en vue d'un retour sur Terre prévu vers 2033 par une mission conjointe NASA-ESA ;
- *Tianwen-1* (CNSA, Chine) a été lancée le 23 juillet 2020. L'astromobile *Zhurong* (240 kg), déposé le 15 mai 2021, a parcouru plus de 1 900 mètres avant d'entrer en sommeil fin 2022 ;
- *Emirates Mars Mission* (EMM), lancée par les Émirats arabes unis le 19 juillet 2020, a placé la sonde *Al Amal* en orbite le 9 février 2021 pour étudier le climat et la dynamique atmosphérique ;
- *ExoMars*, programme ESA-Roscosmos, a vu l'orbiteur *Trace Gas Orbiter* (TGO) entrer en service en 2016. Le rover *Rosalind Franklin*, reporté à 2028, pourra forer jusqu'à 2 m de profondeur pour rechercher des traces de vie.