

Maurice Renard • Yves Lagabrielle
Erwan Martin • Marc de Rafélis
avec la contribution de Sylvie Leroy et Nicolas Coltice

Éléments de géologie

17^e édition du « Pomerol »



DUNOD

Éléments de géologie

17^e édition

Maurice Renard

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

Yves Lagabrielle

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

Erwan Martin

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

Marc de Rafélis

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

Sylvie Leroy

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

Nicolas Coltice

Professeur des universités à l'École Normale Supérieure de Paris

DUNOD

Crédits photographiques

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

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



Pour aller plus loin et mettre toutes les chances de votre côté, des ressources complémentaires sont disponibles sur le site www.dunod.com.

Connectez-vous à la page de l'ouvrage (grâce aux menus déroulants, ou en saisissant le titre, l'auteur ou l'ISBN dans le champ de recherche de la page d'accueil).

Sur la page de l'ouvrage, sous la couverture, cliquez sur le lien « LES + EN LIGNE ».

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

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

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff Cedex

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083348-1

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

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

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos

PARTIE I – La Terre : une planète dans l'Univers

Chapitre 1 • L'architecture de l'Univers

- 1.1 L'architecture de l'Univers
- 1.2 Une architecture hiérarchisée
- 1.3 L'expansion de l'Univers et le « Big Bang »
- 1.4 Les dimensions de l'Univers
- 1.5 Le fond cosmique de rayonnement radio ou rayonnement fossile (fond diffus cosmologique)
- 1.6 L'âge de l'Univers

Chapitre 2 • La nucléosynthèse

- 2.1 La structure de la matière : particules, noyaux et atomes
- 2.2 Nucléosynthèse et évolution de l'Univers

Chapitre 3 • Le Système solaire

- 3.1 La structure du Système solaire
- 3.2 La naissance du Système solaire
- 3.3 Le Soleil
- 3.4 Les différentes planètes

PARTIE II – La dynamique de la Terre solide : géochimie et géophysique globales

Chapitre 4 • Forme et structure de la Terre solide : géodésie et gravimétrie

- 4.1 Forme et surfaces remarquables de la Terre : les apports de la géodésie
- 4.2 Les enveloppes externes de la terre solide : croûte et manteau, lithosphère et asthénosphère
- 4.3 La mesure de la pesanteur terrestre : la gravimétrie
- 4.4 La représentation gravimétrique de la Terre : L'ellipsoïde de référence et le géoïde

- IX 4.5 Les anomalies de la gravité
- 4.6 L'interprétation des anomalies gravimétriques : isostasie et mouvements verticaux de la lithosphère

Chapitre 5 • Composition et histoire de la Terre solide : géochimie globale et géochronologie

- 5.1 Structure interne et composition chimique du globe : évolution des connaissances
- 5.2 La géochimie : objectifs et méthodes d'études
- 5.3 La radiochronologie : dater les événements géologiques
- 5.4 Réservoirs géochimiques, différenciation mantellique et origine des continents

Chapitre 6 • Structure du globe et mobilité de la lithosphère : sismologie et géomagnétisme

- 6.1 La sismologie
- 6.2 Le géomagnétisme

Chapitre 7 • La tectonique des plaques lithosphériques

- 7.1 La dérive des continents
- 7.2 L'expansion des fonds océaniques
- 7.3 La tectonique des plaques
- 7.4 L'analyse du mouvement des plaques : notions de cinématique

Chapitre 8 • Synthèse sur la dynamique globale : mobilité de la lithosphère et de l'asthénosphère

- 8.1 Deux régimes dynamiques bien différents
- 8.2 Lithosphère-Asthénosphère-Mésosphère
- 8.3 La lithosphère : une enveloppe rigide visco-élastique
- 8.4 Le manteau asthénosphérique : le fluage plastique et la convection
- 8.5 Dynamique du manteau et mouvements verticaux : la topographie dynamique
- 8.6 Évolution des plaques au cours de l'histoire de la Terre

PARTIE III – La dynamique de la lithosphère océanique

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

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

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

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

Chapitre 11 • Les dorsales océaniques 279

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

Chapitre 12 • Les marges continentales et océaniques 307

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

PARTIE IV – La déformation de la lithosphère continentale

Chapitre 13 • La rhéologie des ensembles géologiques 340

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

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

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

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

Chapitre 15 • Des bassins sédimentaires aux chaînes de montagne 396

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

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

Chapitre 16 • Minéralogie 460

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

Chapitre 17 • Les magmas : origine et diversité 481

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

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

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

Chapitre 19 • Le métamorphisme 576

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

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

Chapitre 20 • Le bilan thermique de la planète Terre

616

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

Chapitre 21 • L'atmosphère

622

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

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

641

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

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

651

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

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

692

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

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

Chapitre 25 • Prévisions sur l'évolution du climat terrestre

721

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

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

731

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

PARTIE VII – Sédimentologie : roches et environnements sédimentaires

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

784

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

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

812

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

28.3	La classification granulométrique des roches sédimentaires	834	33.4	La caractérisation chimique de la matière organique sédimentaire	943
28.4	Le transport par le vent	839	33.5	Les principales roches carbonées	945
Chapitre 29 • Sédimentation et environnements continentaux			Chapitre 34 • Du sédiment à la roche : la diagenèse		952
29.1	La sédimentation lacustre et margino-littorale (lagunes)	846	34.1	Les facteurs de la diagenèse	952
29.2	La sédimentation fluviatile	856	34.2	La diagenèse siliceuse	957
29.3	Le domaine fluvio-marin : estuaires et deltas	860	34.3	La diagenèse carbonatée	959
Chapitre 30 • Sédimentation et environnements néritiques			PARTIE VIII – Notions de stratigraphie : aperçu de l'histoire de la vie et de la Terre		
30.1	La sédimentation carbonatée de plate-forme	867	Chapitre 35 • La stratigraphie et ses méthodes		972
30.2	La classification des roches carbonatées	875	35.1	Les principes de la stratigraphie	973
30.3	Récifs et bioconstructions	880	35.2	La lithostratigraphie	976
30.4	Les plates-formes carbonatées actuelles	886	35.3	La biostratigraphie	979
30.5	Modèles et profils de dépôt, analyse séquentielle	889	35.4	La radiochronologie	983
30.6	La sédimentation phosphatée	893	35.5	Cyclostratigraphie, dendrochronologie et sclérochronologie, téphrochronologie, thermochronologie	984
Chapitre 31 • Sédimentation gravitaire et environnements du talus			35.6	La magnétostratigraphie	988
31.1	Les phénomènes gravitaires	896	35.7	La chimiostratigraphie	989
31.2	Les séquences gravitaires	900	35.8	La stratigraphie séquentielle : une approche synthétique de la stratigraphie	989
31.3	Les séries gravitaires	903	35.9	L'échelle stratigraphique	1003
Chapitre 32 • Sédimentation et environnements pélagiques			Chapitre 36 • Géochimie sédimentaire : chimiostratigraphie		1010
32.1	La sédimentation pélagique carbonatée	911	36.1	Signal géochimique primaire vs. signal diagénétique	1011
32.2	La sédimentation pélagique argileuse	921	36.2	Le rapport isotopique de l'oxygène	1012
32.3	La sédimentation pélagique siliceuse	922	36.3	Le rapport isotopique du carbone	1029
32.4	La sédimentation océanique : un témoin de la mobilité lithosphérique	924	36.4	Le rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	1034
32.5	Le contrôle climatique de la sédimentation pélagique : les fluctuations de la teneur en CaCO_3 des carbonates pélagiques et les rythmes sédimentaires de type Milankovitch	925	36.5	Les éléments traces	1036
32.6	Les séries pélagiques alternantes	927	Chapitre 37 • Origine, premiers stades et crises de la vie sur Terre		1046
32.7	Les séries pélagiques anciennes	930	37.1	Les hypothèses sur les mécanismes et les lieux d'origine de la vie terrestre	1047
32.8	Le bilan de la sédimentation carbonatée marine	931	37.2	L'évolution de la biosphère : crises et radiations	1062
Chapitre 33 • Sédimentation de la matière organique			Chapitre 38 • Le Quaternaire et l'émergence de l'Homme		1078
33.1	La matière organique continentale	935	38.1	Chronologie et événements du Quaternaire	1078
33.2	La production de matière organique dans l'océan	936	38.2	Émergence de l'homme	1083
33.3	Les modalités de la conservation de la matière organique	938	38.3	Les industries humaines	1099
			Bibliographie et sites WEB		1103
			Index		1109

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

ÉLÉMENTS DE GÉOLOGIE

A Maurice Renard,
avec mes remerciements pour avoir fait bénéficier le 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.XI.89

Maurice Renard

AVANT-PROPOS

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

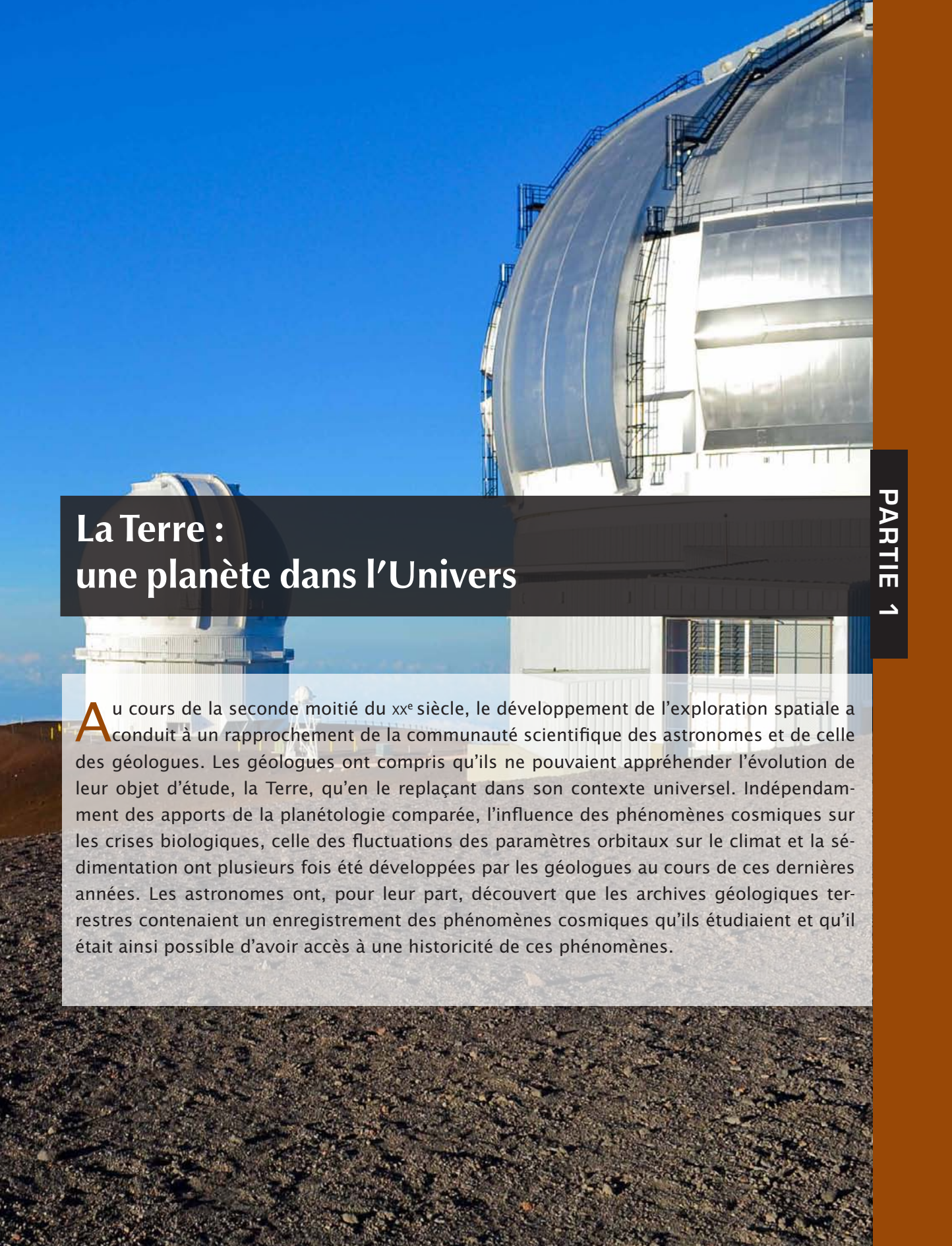
Notre ambition reste que ce manuel soit le livre « compagnon » de l'étudiant en Sciences de la Terre, l'accompagnant depuis sa première année de licence ou de classe préparatoire jusqu'à la préparation des concours (CAPES ou Agrégation) et ses premiers pas professionnels d'enseignant et/ou de chercheur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

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

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

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

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



La Terre : une planète dans l'Univers

PARTIE 1

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

L'ARCHITECTURE DE L'UNIVERS

MOTS-CLÉS

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

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

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

1. En fait 299 792,458 km/s

Encart 1.1 – Les unités de mesure en astronomie

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

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

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

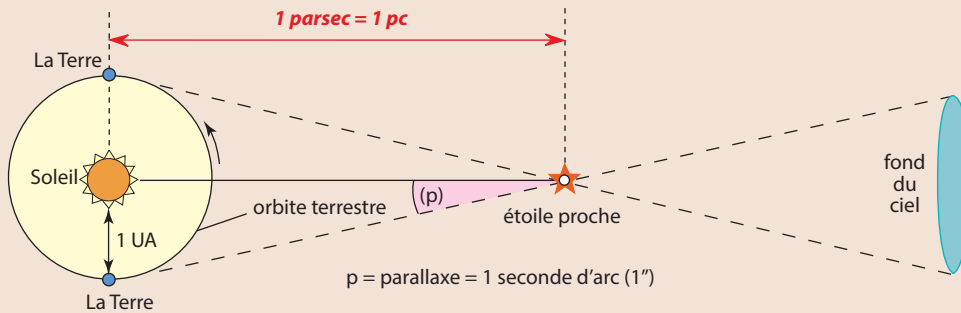


Figure 1.1 Le parsec : mesure de la distance des étoiles proches par estimation de l'angle de parallaxe.

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

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

1.1 L'ARCHITECTURE DE L'UNIVERS

1.1.1 Les galaxies

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

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

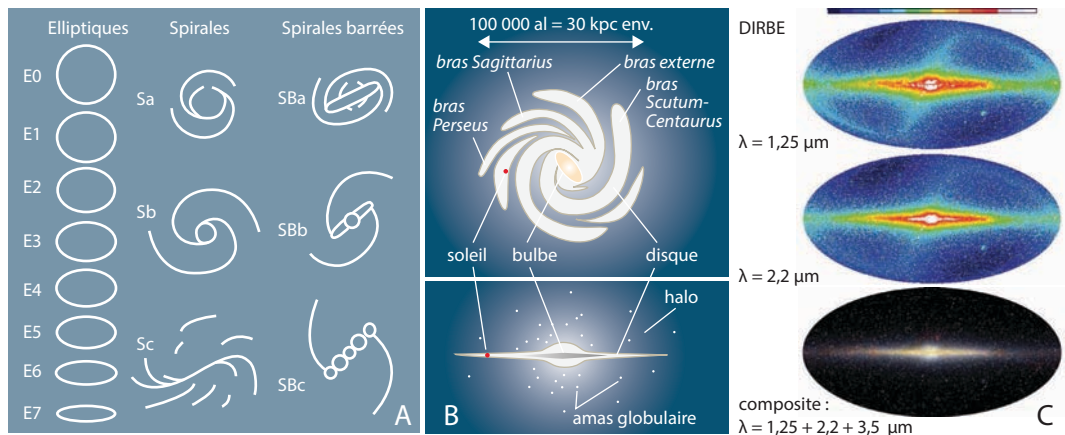


Figure 1.2 Les galaxies et notre galaxie, la Voie Lactée.

A. Représentation schématique de divers types de galaxies. Les galaxies elliptiques représentent 2/3 des galaxies.

B. La galaxie de la Voie Lactée (*Milky Way*) vue en plan et en coupe et situation de notre Soleil en position externe sur un des bras.

C. Le disque de la Voie Lactée et son bulbe central tels qu'ils furent perçus pour différentes longueurs d'onde par les photomètres infrarouges de l'instrument DIRBE (*Diffuse InfraRed Experiment*) porté par le satellite COBE (*Cosmic Background Explorer*) pour différentes longueurs d'ondes. COBE fut lancé en 1989 pour étudier le fond diffus cosmologique (rayonnement fossile, voir fig. 1.6).

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

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

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

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

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

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

1.2 UNE ARCHITECTURE HIÉRARCHISÉE

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

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

Encart 1.2 – Le catalogue Messier

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

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

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

Encart 1.3 – trous noirs et quasars

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

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

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

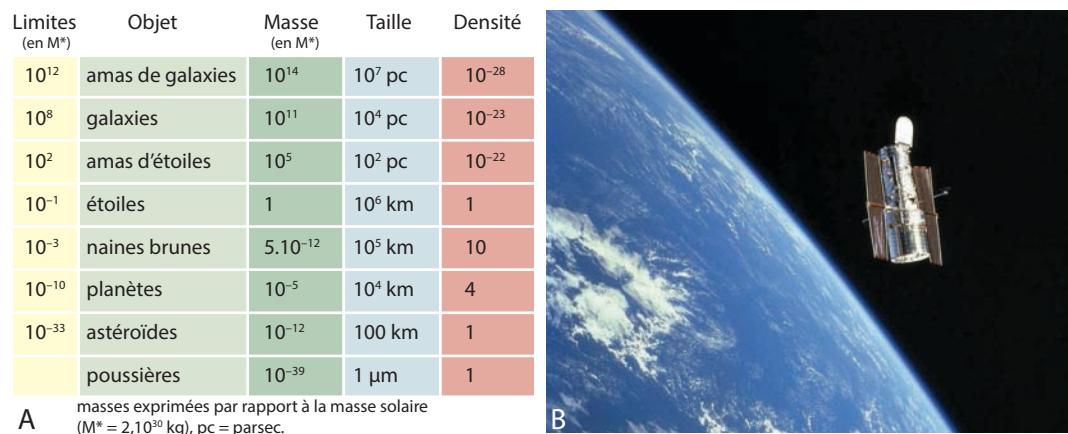


Figure 1.3 Les objets constitutifs de l'Univers.

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

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

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

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

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

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

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

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

Encart 1.5 – L'effet Doppler

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

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

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

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

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



Voir fig. 2.5

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

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

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

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

$$V = H d$$

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

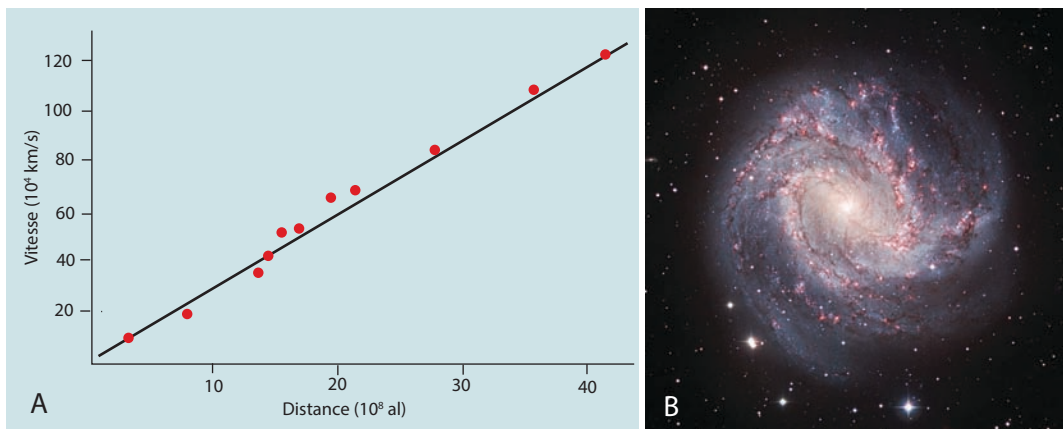


Figure 1.4 L'éloignement des galaxies : loi de Hubble.

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

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

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

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

1.4 LES DIMENSIONS DE L'UNIVERS

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

a) La constante cosmologique d'Einstein

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

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

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

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

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

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

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

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

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

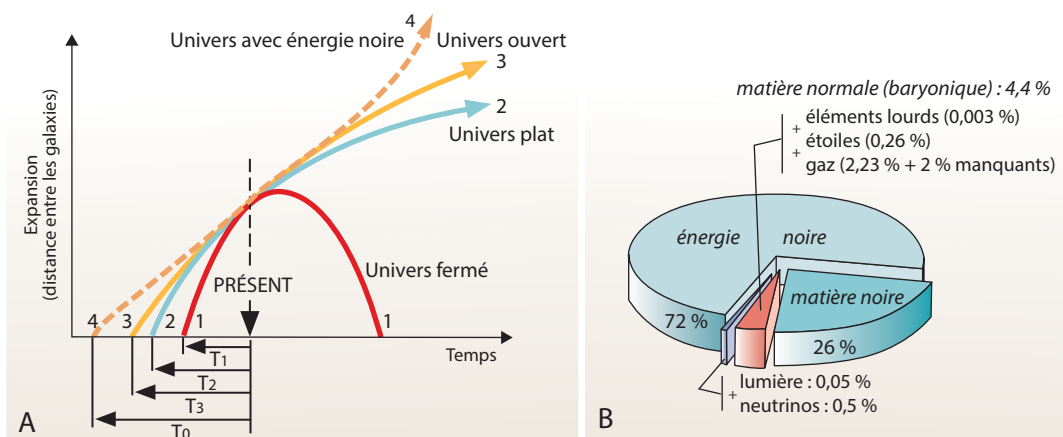


Figure 1.5 L'Univers : expansion et composition.

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

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

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

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

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

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



Voir fig. 2.2

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



voir § 2.1.2



voir p. 9

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

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

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

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

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

Encart 1.6 – Le corps noir

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

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

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

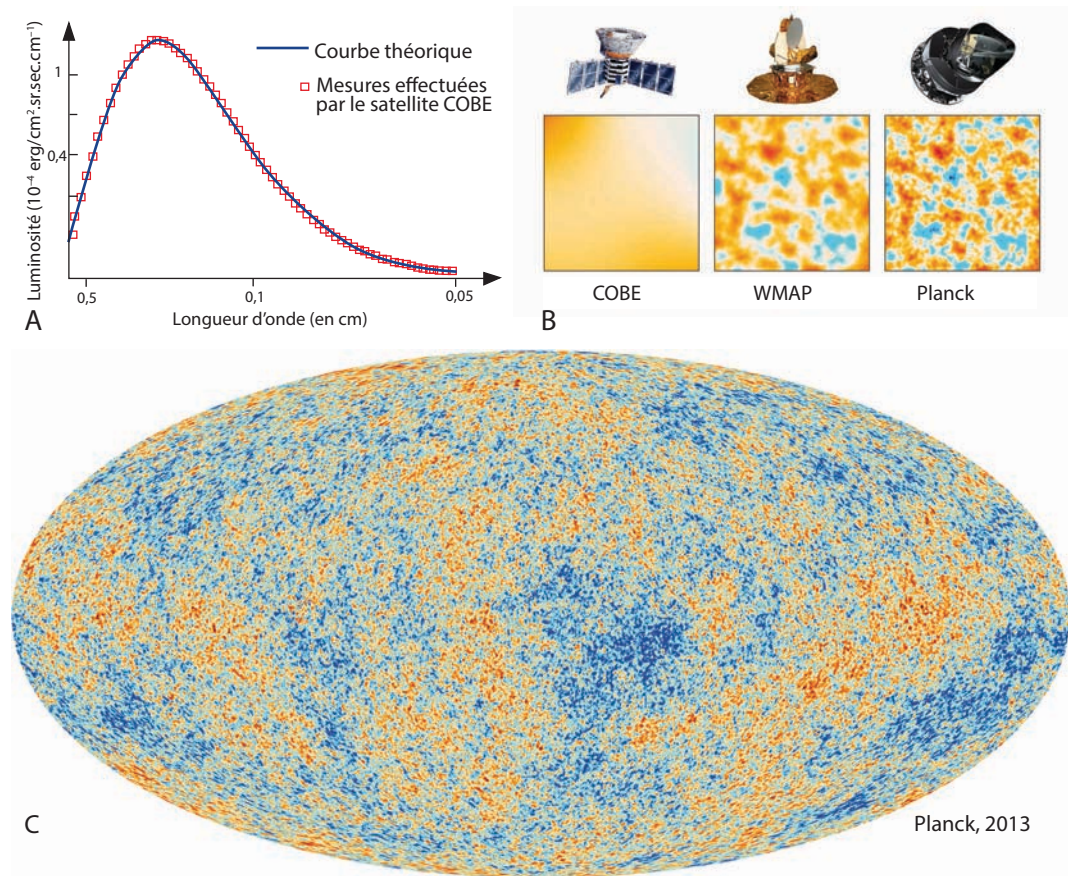


Figure 1.6 Le fond diffus cosmologique (rayonnement fossile).

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

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

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

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

1.6 L'ÂGE DE L'UNIVERS

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

a) Le mouvement des galaxies

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

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

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

b) Le fonctionnement stellaire

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

c) Les radio-isotopes

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



voir p. 9



Voir fig. 2.5

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

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

À retenir

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

MOTS-CLÉS

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

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

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

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

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

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

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

2.1.1 Les forces fondamentales régissant l'univers

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

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

TABEAU 2.1 Les caractéristiques des forces fondamentales :

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

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

2.1.2 Les particules élémentaires : Quarks et Leptons

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

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

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

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

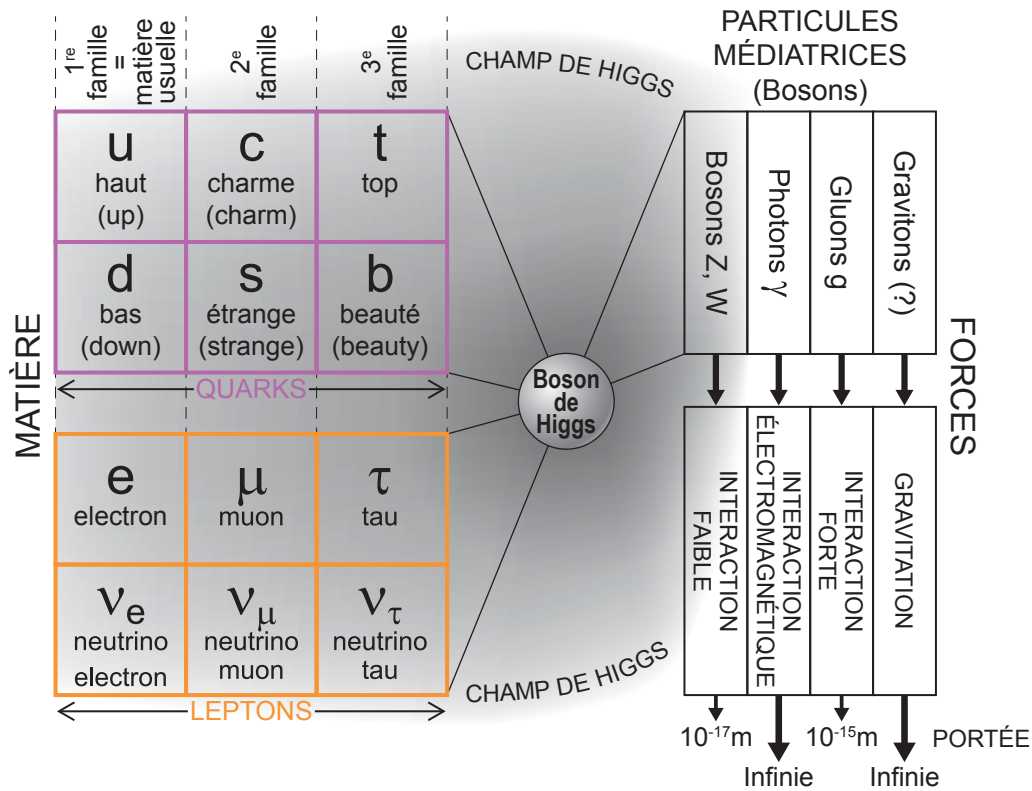


Figure 2.1 Le modèle standard.

Représentation des familles de particules constituant la matière et des forces mises en jeu dans l'Univers ainsi que leurs particules médiatrices. La matière « usuelle » est constituée des deux types de quarks et de leptons de la colonne de gauche. Le boson de Higgs (mis en évidence en 2012) et le champ de Higgs sont au cœur du modèle : la masse inertielle d'une particule résulterait de son degré d'interaction avec le champ de Higgs.

L'électron a été la première particule élémentaire découverte (1897), elle est stable et de charge électrique opposée à celle du proton (tableau 2.2). Le muon a les mêmes propriétés que l'électron hormis sa masse qui est 207 fois plus élevée. Il en est de même du tau qui est encore plus massif. Les neutrinos sont des particules élémentaires neutres produites lors de désintégrations causées par l'interaction faible telle la radioactivité bêta des noyaux atomiques instables. Leur masse, comparée à celle des autres particules, est très faible ce qui fait que l'on a longtemps pensé, à tort, que leur masse était nulle. **Quark up, quark down, électron et neutrino associé à l'électron sont les constituants élémentaires stables de la matière « usuelle »**, parfois dite « ordinaire » ou baryonique en référence aux particules qui la constitue.

Dans l'univers actuel, les populations de quarks et d'électrons sont sensiblement égales (un peu moins d'une unité par m³, en fait, il y a 1,7 quark U et 0,8 quark D pour chaque électron). L'abondance des neutrinos est mal connue mais il semble qu'elle soit du même ordre que celle des photons qui sont les éléments les plus abondants (environ 400 par cm³) et qui proviennent, pour la plupart, du rayonnement « fossile » (fig. 1.6). Il convient de rappeler que la matière « usuelle » ne représente qu'une faible part de la masse de l'Univers (fig. 1.5), la majeure partie est représentée par la matière noire.

2.1.3 Le modèle standard

Les six types de quarks et de leptons forment l'ensemble des douze particules du modèle standard (fig. 2.1). Les particules sont classées dans un tableau à double entrée à trois colonnes (ou familles) comportant chacune quatre lignes correspondant à quatre types de particules. Dans chaque ligne les particules ont des propriétés communes et sont classées par ordre de masse croissante. La première colonne (famille, à gauche du tableau) regroupe les deux quarks et les deux leptons (électron et neutrino associé) qui forment la matière usuelle actuelle. Les particules médiatrices des interactions fondamentales sont présentées sur la droite du graphique avec la portée de chacune des interactions.

La grande réussite de la théorie du modèle standard est d'avoir unifié l'interaction électromagnétique et l'interaction faible (force électrofaible). Cependant le modèle standard n'est pas la « théorie du tout » mais simplement la théorie du « presque tout ». La gravité n'est pas intégrée au modèle (les gravitons n'ont pas encore été détectés). Une étape importante a toutefois été réalisée en 2012 par la détection dans l'expérience ATLAS du CERN d'une particule, **le boson de Higgs** (ou du moins la détection des particules lourdes résultant de sa dissociation), vecteur du champ de Higgs. La masse inertielle d'une particule résulterait de son degré d'interaction avec le champ de Higgs. Ainsi, une particule sans interaction avec le champ de Higgs, comme le photon, a une masse nulle. Inversement, plus cette interaction est importante, plus la particule est « lourde ». Le champ de Higgs affecterait toutes les autres particules élémentaires (même le neutrino qui a une masse non nulle contrairement à ce qui a longtemps été pensé). L'absence de masse du photon explique la portée infinie de la force électromagnétique et la masse des bosons Z et W, qui interagissent avec le champ de Higgs, explique la portée très limitée de la force faible. De même la masse nulle des photons explique pourquoi ils se déplacent dans le vide à une vitesse (299 792 458 m/s) qu'aucune particule massive ne peut atteindre.

2.1.4 Les noyaux et les atomes

Ainsi que nous l'avons vu plus haut, les quarks, maintenus ensemble par des gluons (responsables de l'interaction « forte »), s'associent pour constituer des nucléons : protons (*deux quarks u et d'un quark d*) et neutrons (*deux quarks d et d'un quark u*). Dans l'univers il existe autant de protons (charge +1) que d'électrons (charge -1) et cinq fois plus de protons que de neutrons (la majorité des neutrons existants étant incorporés dans les noyaux d'hélium (fig. 2.2 et 2.6))

TABEAU
2.2

Les caractéristiques des composants de la matière usuelle :

On doit noter que l'électron est une particule élémentaire tandis que les nucléons, proton et neutron sont des particules composites formées par l'assemblage de quarks. L'essentiel de la masse du proton et du neutron ne provient pas de la masse des quarks (seulement une dizaine de MeV/c² pour le proton) mais de l'énergie des gluons qui maintiennent ces quarks ensemble

Les masses sont exprimées en kg et en MeV/c² qui est une unité d'énergie reliée à la masse par la formule $E = MC^2$.

	Électron	Proton	Neutron
Masse	9,11·10 ⁻³¹ kg 0,511 MeV/c ²	1,67·10 ⁻²⁷ kg 938 MeV/c ²	1,68·10 ⁻²⁷ kg 938 MeV/c ²
Charge électrique	-1	+1	0

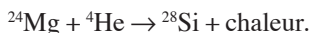
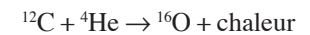
Encart 2.1 – La matière est-elle stable ?

Il se pourrait que les quarks aient une durée de vie limitée quoique très longue (de l'ordre de 10^{32} années). La matière, elle-même, ne serait donc pas stable. Dans cette hypothèse, la Terre perdrait environ 1 g tous les 20 000 ans et le Soleil près de 20 g par an.

Les nucléons se regroupent en noyaux (*fig. 2.3*) qui captent des électrons pour former des atomes. Le nombre d'électrons est égal au nombre de protons, il définit le numéro atomique (1 pour l'hydrogène, 2 pour l'hélium, etc.) et commande les propriétés chimiques de l'élément. Les forces de liaisons des nucléons (forces nucléaires) sont énormément plus grandes que celles qui relient noyaux et électrons (forces électromagnétiques).

Partant du noyau le plus simple, celui de l'hydrogène (1 proton), si l'on ajoute un neutron, on obtient un nouveau noyau dont la charge est toujours + 1 (il s'agit toujours de l'élément chimique hydrogène) mais sa masse est + 2 (c'est un isotope de l'hydrogène, on l'appelle hydrogène lourd ou deutérium). En fusionnant 2 noyaux de deutérium, on fabrique un noyau d'hélium (2 protons + 2 neutrons). En fait, la difficulté réside dans la façon de fabriquer le neutron et de l'injecter dans le noyau d'hydrogène. Quand l'hydrogène est porté à une température de quelques millions de degrés, un certain nombre de protons, en capturant des électrons, se transforment en neutrons. La formation de deutérium résulte donc, en fait, de la réunion de 2 hydrogènes dans des conditions de température très élevées. Même dans ces conditions, cette fusion est très difficile, aussi l'abondance du deutérium est très faible dans la nature (1/100 à 1/1 000 de celle de l'hydrogène) d'autant plus que le passage du deutérium à l'hélium est relativement facile. Ce dernier, extrêmement robuste, constitue la structure principale permettant de bâtir des noyaux plus complexes (*fig. 2.6*). La structure formée par la réunion de 2 noyaux d'hélium (charge + 4, masse 8) n'est pas stable mais la fusion de 3 noyaux (six protons et six neutrons) conduit à une structure de charge + 6 et de masse 12 correspondant au carbone (^{12}C). De même la fusion de 4 noyaux d'hélium conduit à l'oxygène (^{16}O). En combinant la structure hélium, les « superstructures » carbone et oxygène et, en y ajoutant éventuellement le deutérium, on peut fabriquer tout une série de nouveaux éléments. Classiquement, les astrophysiciens représentent ces évolutions sur un diagramme protons/neutrons (*fig. 2.6*).

Chaque opération de fusion ou de capture neutronique est une réaction nucléaire qui peut se résumer comme une équation de bilan telle que :



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

2.2 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, les planètes (*fig. 2.2*).

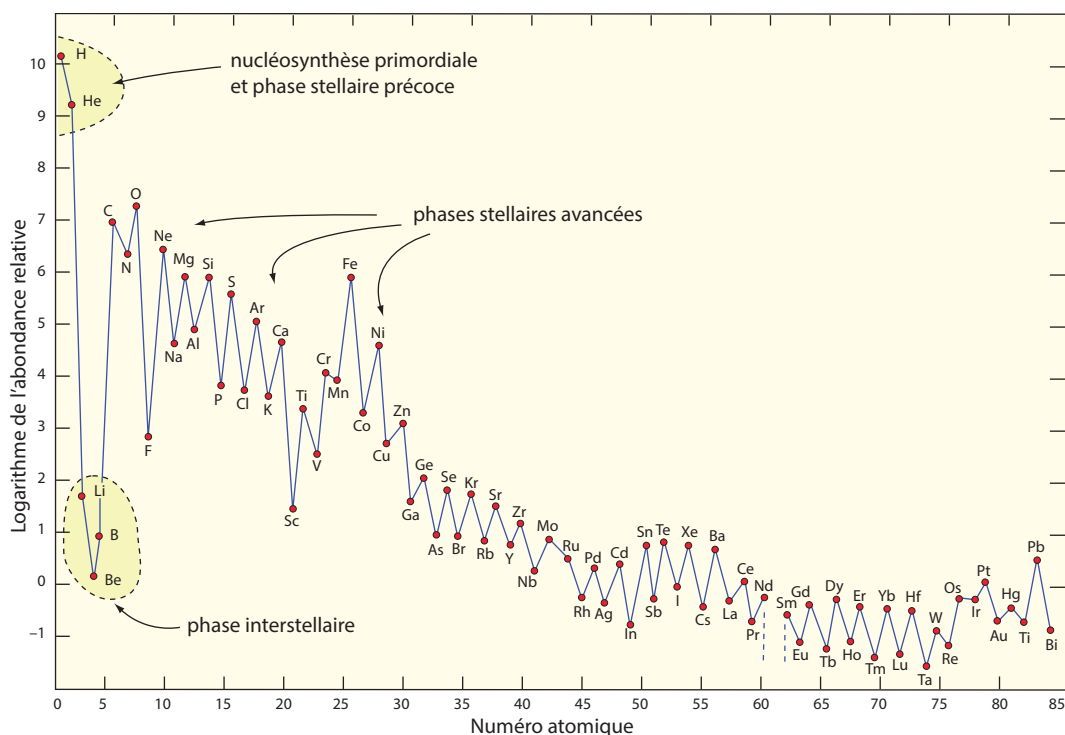


Figure 2.2 Abondance relative des différents éléments chimiques et les principales phases de la nucléosynthèse.

2.2.1 La phase cosmique ou nucléosynthèse primordiale

On ne sait que peu de chose sur les événements qui se sont déroulés au cours de la première seconde suivant le « Big Bang ». Dans la matière nucléaire « normale » les quarks ne sont jamais libres, ils sont liés par trois (confinés) sous l'action des gluons. Cependant la théorie de l'interaction forte prédit que si la température augmente suffisamment, l'agitation thermique prend le dessus sur les forces de cohésion nucléaire et les noyaux se vaporisent en donnant un gaz d'hadrons constitués de protons, de neutrons et d'autres particules de même type, constituées de quarks et/ou d'antiquarks (fig. 2.3). Si la température continue d'augmenter (au-dessus de mille milliards de degrés) les hadrons eux-mêmes se disloquent et l'on obtient un nouvel état de la matière : le **plasma de quarks et de gluons** (QGP pour l'acronyme anglais) où les quarks et gluons sont déconfinés.

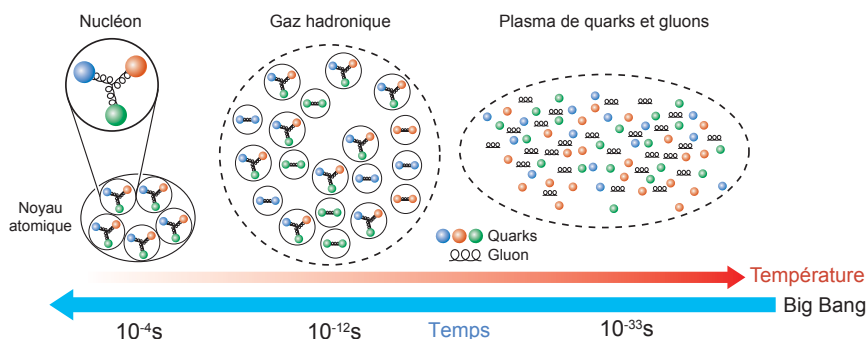


Figure 2.3 L'évolution de la matière nucléaire en fonction de la température.

L'évolution inverse se serait produite dans l'univers au cours des 10^{-4} secondes suivant le Big Bang.

On pense que les premiers instants de l'Univers correspondraient à l'évolution inverse. Le QGP existerait vers 10^{-33} seconde après le Big Bang, la transition du QGP vers le gaz hadronique se serait produite après 10^{-12} seconde. Du fait des températures extrêmes, il y a une agitation intense dans le gaz hadronique, les collisions d'hadron sont nombreuses et il en résulte parfois, vers 10^{-4} seconde, la formation de noyaux de deutérium qui ont une durée de vie très brève car ils sont pratiquement détruits immédiatement par les photons très énergétiques.

Cette phase primordiale de 10^{-32} seconde après le Big Bang est appelée *phase d'inflation*. Elle est caractérisée par l'existence de fluctuations quantiques qui ont généré deux types d'ondes, les ondes gravitationnelles et les ondes de densité (fig. 2.4). En 2014, les scientifiques de l'observatoire BICEP2 ont annoncé avoir déterminé une polarisation dans la lumière du fond diffus cosmologique, qui serait un enregistrement fossile, dans la lumière de l'Univers actuel, des effets des ondes gravitationnelles dues à l'inflation. Dans la même année, les scientifiques travaillant autour des données du satellite Planck, dont la mission est la cartographie du fond diffus cosmologique, ripostaient en avançant que les effets d'artefacts dus à des poussières cosmiques n'avaient pas été pris en compte par l'équipe de BICEP2. Cette polémique illustre l'énorme intérêt et les enjeux considérables de ces recherches sur l'origine du cosmos.

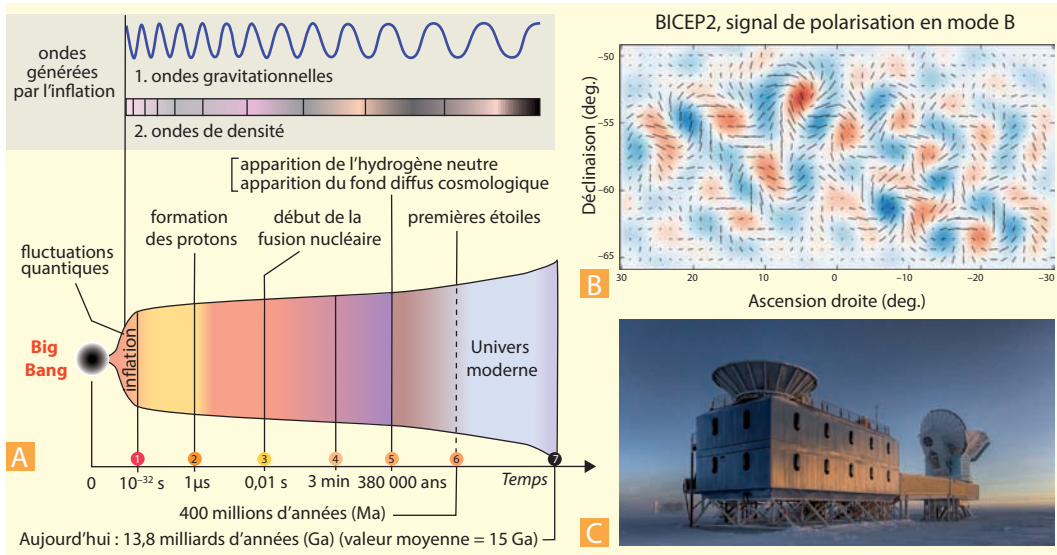


Figure 2.4 L'inflation et le fond diffus cosmologique.

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 (modifiée d'après un document BICEP2, 2014). 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). L'inflation est un événement très violent qui a généré par fluctuations quantiques des ondes gravitationnelles et de densité, comme le prévoyait la théorie de la relativité générale. Ces ondes sont amplifiées par l'inflation. Les fluctuations de la distribution de la matière par les ondes gravitationnelles ont laissé des empreintes sur les radiations du fond diffus cosmologique.

B. Début 2014, la polarisation de la lumière du fond diffus aurait été mise en évidence par le radiotélescope BICEP2, situé en Antarctique, qui a scruté 1 % du ciel durant 600 jours à l'aide de 512 antennes. Cette carte de l'Univers montre la polarisation en mode B résultant d'une empreinte des ondes gravitationnelles sur les radiations du fond diffus. Les régions en rouge vibrent dans le sens des aiguilles d'une montre, les régions en bleu vibrent en sens inverse (document BICEP2). Ces résultats sont remis en cause par les équipes de la mission Planck (voir fig. 1.6), qui estiment que des artefacts dus à la polarisation par les poussières stellaires pourraient avoir été enregistrés fournissant un signal dont l'interprétation est donc erronée.

C. Vue d'un des bâtiments du radiotélescope BICEP2 (document BICEP2).

Au bout d'une seconde, la température est tombée aux environs du milliard de degrés (grâce à l'expansion, la chaleur est évacuée) et l'énergie des particules devient comparable à celle qui lie les nucléons. Le nombre et la durée de vie des deutérons deviennent plus importants. Ils peuvent capturer des protons et des neutrons pour former des noyaux à 3 ou 4 nucléons (*fig. 2.3*). Ainsi, au bout de quelques minutes, l'Univers est formé d'une population abondante de noyaux d'hydrogène et de ^4He , de populations beaucoup plus faibles de deutérium, de ^3He et de ^7Li (*fig. 2.2*). Cette intense période de création nucléaire porte le nom de « **nucléosynthèse primordiale** ».

Encart 2.2 – La première crise de croissance de l'Univers

La nucléosynthèse primordiale va rapidement s'arrêter car d'une part le noyau ^4He est une structure stable mais « fermée » qui ne s'associe pas facilement et d'autre part la température a beaucoup trop décliné pour que les fusions nucléaires puissent se produire. L'Univers vit sa première crise de croissance, elle durera environ un million d'années, le temps que la température baisse suffisamment (jusqu'à quelques milliers de degrés) pour qu'on quitte le domaine du nucléaire pour entrer dans celui de l'électromagnétisme.

L'évolution de l'Univers ne reprend que lorsque, la baisse de la température aidant, les protons sont capables de capturer un électron pour former des atomes d'hydrogène. Ces atomes ont des durées de vie brèves car ils sont soumis à un bombardement photonique intense. La température diminuant, les photons deviennent moins énergétiques et la population d'atomes augmente. Vers 3 000 °K, l'Univers est formé d'atomes d'hydrogène et d'hélium tandis que, pratiquement d'une façon contemporaine, les atomes d'hydrogène se sont associés deux par deux pour former des molécules (molécules et atomes naissent donc en même temps).

Encart 2.3 – La seconde crise de l'Univers : l'émission du rayonnement fossile

L'Univers entre alors dans une deuxième crise car la molécule d'hydrogène est aussi une structure « fermée » qui ne s'associe que très difficilement. Pourtant, malgré cette crise, la capture des électrons par les protons représente une étape importante dans l'évolution de l'Univers. En effet, les électrons libres représentaient une « entrave » au passage de la lumière. Leur capture progressive va rendre l'Univers « transparent », c'est de cette période (environ 300 000 ans après le Big Bang) que date le « **rayonnement fossile** », ou fond diffus cosmologique, tel que les satellites COBE, WMAP et Planck ont pu l'enregistrer (*fig. 1.6*).

L'énergie contenue dans la matière de l'Univers va alors devenir prépondérante par rapport à celle du rayonnement.

2.2.2 La phase stellaire

L'évolution de l'Univers semble compromise, la température diminue, il n'y a en présence que des structures « fermées » qui, du fait de l'expansion, s'éloignent de plus en plus les unes des autres ; les probabilités d'association deviennent donc de plus en plus faibles.

a) Le rôle de la gravité

Un nouveau phénomène va relancer le système, c'est la gravité. La capture des électrons, en rendant l'Univers « transparent » permet à la gravitation de vaincre la pression de la matière et du rayonnement. Dans cette sorte de « fluide homogène » qu'est alors l'Univers, vont se produire des agrégations gravitationnelles et des masses de matières vont se condenser pour donner naissance aux galaxies.

Les galaxies apparaissent donc comme des systèmes liés (par les forces gravitationnelles) qui échappent à l'expansion et au refroidissement universel. En leur sein, de nouvelles condensations de la matière gazeuse vont se produire en donnant naissance aux étoiles. Les étoiles sont de gigantesques réacteurs nucléaires produisant l'énergie nécessaire à leur activité lumineuse. À leur niveau, les

phénomènes gravitationnels provoquent une élévation de température permettant le déclenchement des réactions nucléaires (fusion des noyaux atomiques) qui à leur tour dégagent de la chaleur.

Encart 2.4 – La formation des Galaxies

Le mécanisme de formation des galaxies est encore très mal connu ; pour certains, il pourrait s'agir d'une fragmentation progressive (fluide universel → superamas → amas → galaxie → étoiles), pour d'autres, se formerait d'abord des groupes d'étoiles qui se réuniraient ultérieurement en galaxies puis en amas et en super-amas.

b) Les différents types d'étoiles

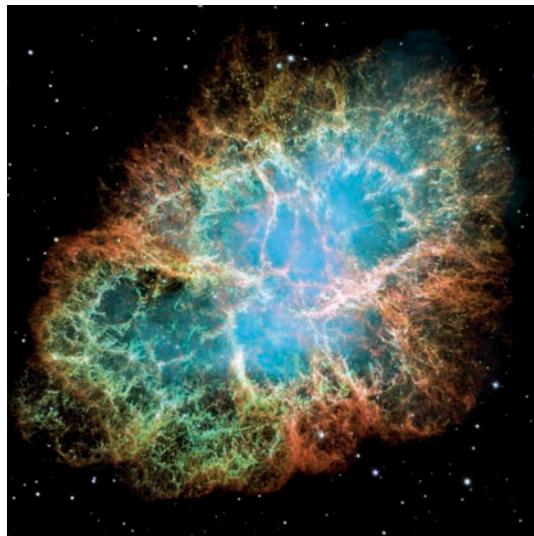
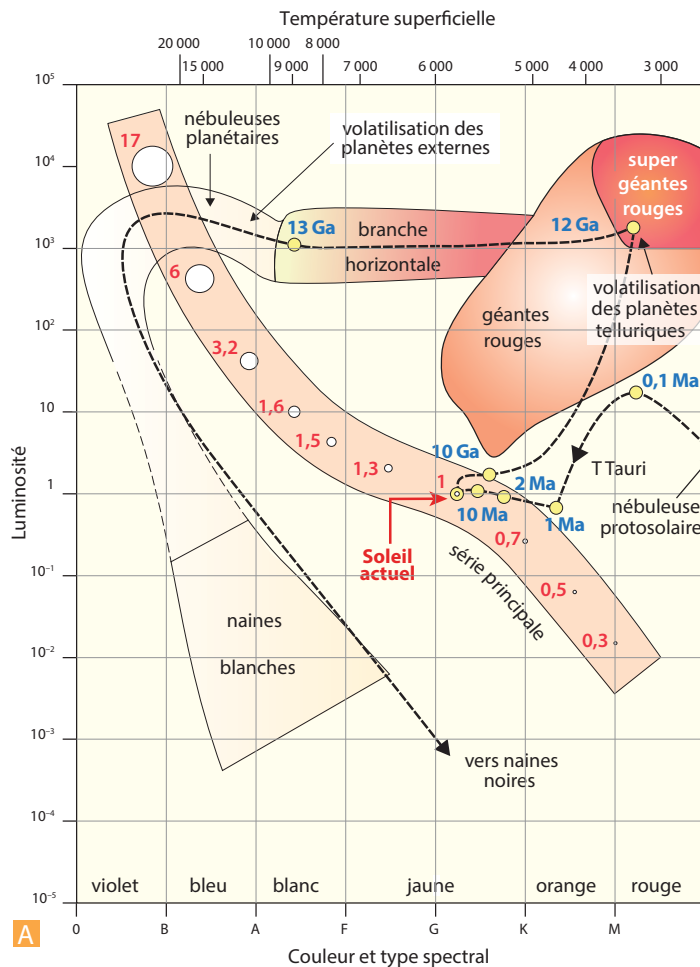
Les astronomes ont l'habitude de classer les étoiles d'après l'analyse de la lumière qu'elles émettent. Ceci permet de déterminer leur température de surface (couleur), la quantité d'énergie rayonnée (luminosité) et leur composition chimique (spectroscopie). On utilise classiquement, un diagramme (**diagramme de Hertzsprung-Russell**, *fig. 2.5*) 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 placent sur une diagonale qu'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, cela 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 série 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 2.5, c'est le domaine des géantes et supergéantes rouges. Ces étoiles transforment les noyaux d'hélium en carbone et oxygène. À gauche de ce domaine, se trouve la branche horizontale qui correspond à des étoiles plus évoluées qui consomment leur carbone ou leur oxygène voire leur silicium. Au-delà, se situe le domaine des nébuleuses planétaires puis la répartition des étoiles sur le graphique fait un brusque coude pour aboutir au domaine des naines blanches.

c) L'évolution des étoiles et la nucléosynthèse

À la suite de l'effondrement et de la contraction du nuage de matière interstellaire qui leur a donné naissance, la température augmente et les étoiles naissantes émettent d'abord des rayonnements radio puis infrarouges. Dans ces nouvelles conditions les produits issus de la phase cosmique deviennent instables, le nombre et l'énergie des photons augmentent, les molécules se fragmentent en atomes qui perdent leurs électrons périphériques. Les collisions entre toutes ces particules deviennent fréquentes, d'infrarouge la lumière passe au rouge (l'étoile devient visible) puis, suivant sa masse, elle vire au jaune ou au bleu. Cette première phase de l'évolution des étoiles est appelée **phase T. Tauri** ; elle est brève, dans le cas du Soleil, elle a duré au maximum 15 Ma (*fig. 2.5*). La température augmente jusqu'à ce que le cœur de l'étoile approche 15 millions de degrés. Dans ces conditions la nucléosynthèse peut reprendre, les noyaux d'hydrogène vont de nouveau s'unir pour donner du deutérium, de l'hélium 3 et de l'hélium 4. Pour les mêmes raisons que dans la nucléosynthèse primordiale, la complexité nucléaire n'ira pas plus loin mais les réactions nucléaires mises en jeu suffisent à couvrir les besoins énergétiques de l'étoile qui s'installe dans un état « stationnaire » (elle appartient alors à la série principale, son rayon ne se modifie plus, sa couleur est stable). C'est le cas du Soleil depuis 4,5 milliards d'années et cette situation devrait durer encore environ 5 milliards d'années (*fig. 2.5*).



Quand l'étoile a épuisé, en son cœur, ses réserves d'hydrogène, pour compenser ses dépenses énergétiques, elle se contracte de nouveau et la température reprend son ascension. Les collisions particulières sont nombreuses, mais les structures provenant de la rencontre de deux noyaux d'hélium ne sont pas stables et se dissocient immédiatement ; en revanche si un troisième noyau percute cette structure « fugace », on obtient un noyau stable de carbone. On peut se demander pourquoi une telle structure ne s'est pas réalisée au cours de la nucléosynthèse primordiale. Cela provient du fait que la probabilité de rencontre de trois noyaux est très faible. Au cours de la nucléosynthèse primordiale, les conditions de température nécessaires à cette synthèse n'ont été réalisées que pendant un très court moment, tandis que la durée de la phase stellaire permet ce type de rencontre. Une nouvelle phase de fusion nucléaire s'amorce qui va subvenir aux besoins énergétiques de l'étoile, la contraction se ralentit, sa couleur vire au rouge tandis que son atmosphère subit une expansion importante qui traduit, sans doute, la différenciation chimique entre le centre (hélium et carbone) et la surface (hydrogène). L'étoile acquiert une structure en couches concentriques (*fig. 2.6*). Au centre les températures permettent la transformation d'He en C et O, au-delà la transformation de H en He tandis que la surface trop froide est hors du domaine des réactions nucléaires. C'est le stade des **géantes rouges** (*fig. 2.5*).

Encart 2.5 – Le rôle catalytique du carbone

Indépendamment du rôle prépondérant que jouera, ultérieurement, le carbone dans la constitution des molécules complexes, la présence de celui-ci est capitale pour la suite de la nucléosynthèse car il catalyse et accélère la transformation hydrogène-hélium (**cycle de Bethe**) en permettant de « sauter » l'étape deutérium (*fig. 2.6*). Un noyau de carbone capture successivement quatre protons du milieu ambiant, lors de la quatrième adjonction la structure se brise en donnant 1 noyau d'hélium et 1 noyau de carbone (2 protons ont été transformés en neutrons). Cette action catalytique du carbone nécessite de très fortes températures et ne peut se dérouler que dans les étoiles massives.

Une fois l'hélium épuisé au cœur de l'étoile, la contraction va reprendre, la température augmente de nouveau et le carbone devient le nouveau « combustible » stellaire. De sa fusion naissent des éléments nouveaux tels que le néon, le sodium, l'aluminium, le silicium, le phosphore et le soufre. Nous avons alors atteint des températures de l'ordre du milliard de degrés. Dans ces conditions, les réactions au centre de l'étoile produisent de plus en plus de neutrinos, particules qui s'échappent facilement (beaucoup plus facilement que les photons) de l'étoile. Cette production de neutrinos augmente la déperdition énergétique et provoque des contractions de plus en plus rapides des couches extérieures de l'étoile.

Après l'épuisement du carbone survient la fusion, entre 2 et 5 milliards de degrés, du néon, de l'oxygène puis du silicium. L'étoile a alors une structure complexe (*fig. 2.6*). Du fait de la production croissante de neutrinos, ces phases sont de plus en plus courtes. En quelques milliers d'années, les noyaux intermédiaires (de Si jusqu'au groupe des métaux tels Fe, Ni, Cr, Zn...) sont engendrés et vont conduire, par une longue chaîne de captures neutroniques jusqu'aux noyaux les plus lourds.

L'évolution nucléaire semble pouvoir aller à son terme, mais les températures internes de l'étoile avoisinent alors les 5 milliards de degrés et l'énergie thermique risque de dépasser l'énergie de liaison des nucléons. Les structures nucléaires nouvellement formées risquent donc d'être détruites. Cependant, la déperdition énergétique de l'étoile est alors très forte (en grande partie à cause de l'évacuation des neutrinos) et pour compenser cela, elle se contracte de plus en plus rapidement. Il en résulte, au bout d'une suite de phénomènes complexes, une gigantesque explosion (c'est le stade **supernova**) qui évacue la masse stellaire dans l'espace, où elle se refroidit, et dissémine ainsi les éléments lourds synthétisés (*fig. 2.5 et 2.6*).

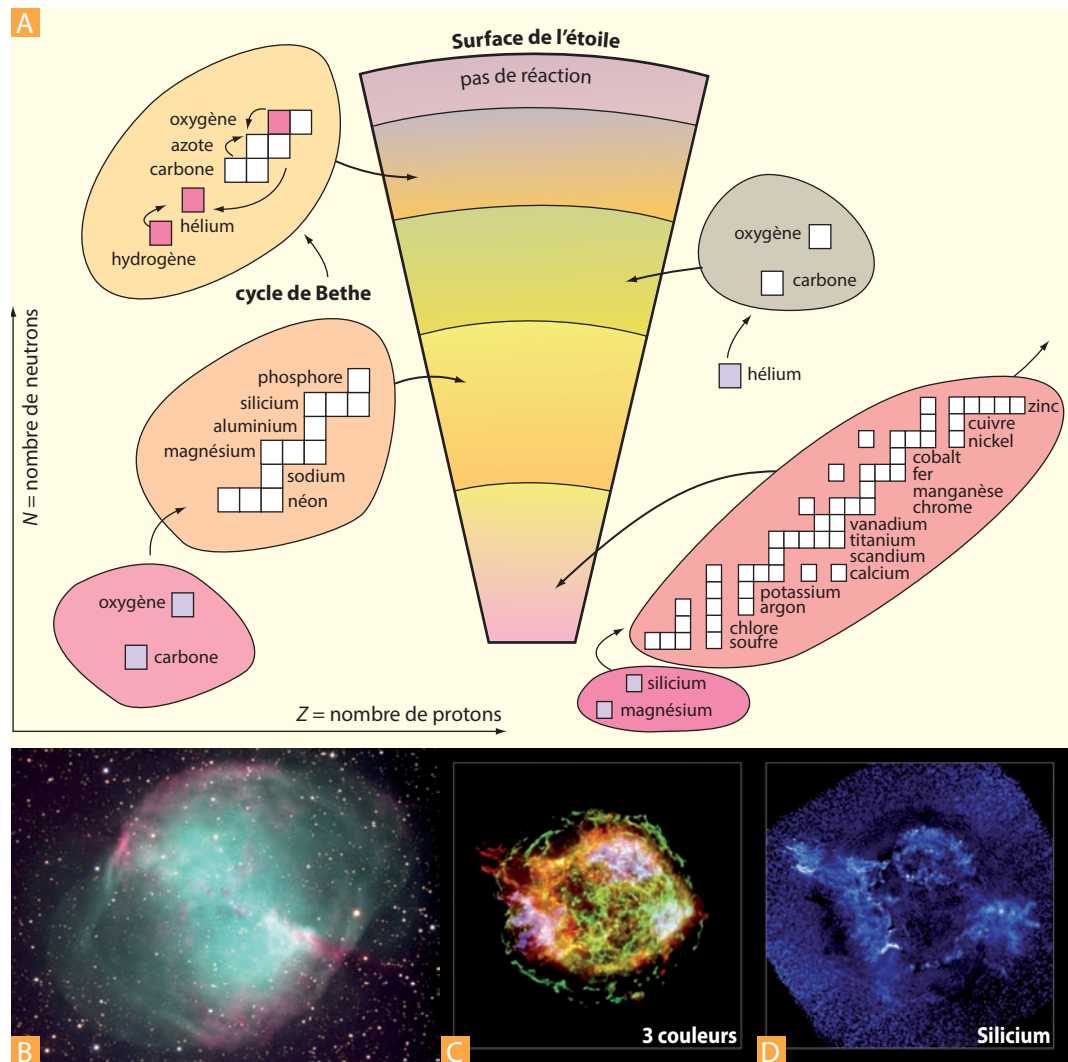


Figure 2.6 Les réactions nucléaires dans les étoiles.

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 au centre de l'étoile, 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'haltere (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 des atomes synthétisés par l'étoile dans le milieu interstellaire. 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*).

L'explosion de la supernova a, en quelque sorte, protégé de la destruction, les noyaux lourds nouvellement synthétisés. Cette libération d'atomes lourds va jouer un rôle accélérateur pour la suite de l'évolution nucléaire en augmentant l'opacité du gaz galactique. Une matière opaque se condense plus facilement qu'une matière transparente, il en résulte que le taux de formation d'étoiles aux dépens du gaz galactiques augmente.

Encart 2.6 – 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. 2.2*).

Après l'explosion, il reste un résidu stellaire, correspondant au cœur de l'étoile qui s'est replié sur lui-même, qu'on nomme étoile à neutrons (la densité γ est très forte, les structures nucléaires ont éclaté et il ne reste au cœur de l'étoile que des neutrons liés par la force de gravité). Ces structures portent aussi le nom de « **pulsars** » car elles émettent une lumière intermittente (seuls les pôles magnétiques émettent de la lumière d'où l'aspect intermittent de l'émission du fait de la rotation du pulsar, suivant un axe incliné par rapport à l'axe magnétique). Il se pourrait que, dans certains cas, le résidu stellaire devenant encore plus dense, on passe alors à un « trou noir ».

Dans le cas des étoiles de petite taille (telles que le Soleil), l'évolution est moins brutale (*fig. 2.5*). Après la phase géante rouge, elles libèrent les produits de la nucléosynthèse au cours du stade nébuleuse planétaire dont la matière nébulaire correspond aux couches externes de l'étoile. Le cœur se refroidit progressivement en devenant une naine blanche, puis une naine noire lorsqu'elle a épuisé sa chaleur interne.

2.2.3 La phase interstellaire

La radioastronomie a mis en évidence l'existence de poussières interstellaires qui remplissent l'espace. La connaissance de leur structure est en pleine évolution. Les premiers modèles (grains de graphite) se sont compliqués par adjonction de pellicule de glaces contenant divers éléments et, peut-être même, des structures organiques comme les porphyrines dont l'importance biologique pourrait alors être considérable si cette découverte se confirme.

Encart 2.7 – Les principales molécules interstellaires identifiées

2 atomes : H_2 , CH^+ , C_2 , CN , CO , CS , OH , NO , NS , SO , SiO , SiS , HCl , PN
3 atomes : H_2O , C_2H , HCN , HNC , HCO^+ , HCS^+ , NH_2^+ , H_2S , HNO , OCS , SO_2 , HOC^+ , SiC_2 , H_3^+
4 atomes : NH_3 , H_2CO , H_2CS , $HNCO$, $HNCS$, C_3H , C_3O , C_3N , C_2H_2 , $HOCO^+$, $HCNH^+$, $HSCC$, $HsiCC$
5 atomes : CH_4 , C_4H , CH_2NH , CH_2CO , NH_2CN , $HCOOH$, HC_3N , C_3H_2 , SiH_4 , CH_4 , CH_2CN
6 atomes : CH_3OH , CH_3CO , CH_3CN , CH_3SH , NH_2CHO , H_2CCH_2 , C_5H
7 atomes : CH_3NH_2 , CH_3C_2H , CH_3CHO , CH_2CHCN , HC_5N , $CH_2(CN)_2$
8 atomes : CH_3COOH , CH_3C_3N , $HCOOCH_3$
9 atomes : CH_3CH_2OH , $(CH_3)_2O$, CH_3CH_2CN , HC_7N , C_2H_5OH , C_2H_5CN
10 atomes : CH_3C_5N
11 atomes : HC_9N
13 atomes : $HC_{11}N$

Ces poussières correspondent aux restes des supernovae et des nébuleuses planétaires qui se sont largement répandus et dont la température est tombée à quelques dizaines de degrés absolus. De nouveau,



Voir encart 2.7

nous sommes dans le domaine de l'électromagnétisme ; il y a fabrication d'atomes à partir des noyaux, et l'hydrogène va jouer un rôle primordial en se combinant avec les atomes lourds pour former des molécules complexes (eau, ammoniac, méthane et hydrocarbures) qui se trouvent sous forme d'une pellicule de glace sur les poussières. Le rayonnement cosmique fragmente les molécules présentes dans les couches de glace et crée ainsi des possibilités de nouvelles recombinaisons. Les progrès de la spectroscopie ont mis en évidence une surprenante complexité des molécules interstellaires. On y constate le rôle prépondérant du carbone (un seul composé à base de silicium a été découvert), les éléments C, H, O, N sont présents dans le milieu interstellaire et l'on y trouve (malgré les conditions peu favorables) des molécules organiques fragiles qui semblent pouvoir être les premiers maillons vers l'apparition de la vie.

La phase interstellaire ne se limite pas à la fabrication de molécules complexes, elle joue aussi un rôle dans la nucléosynthèse. Dans les étapes précédentes, nous avons sauté certains éléments en passant directement de l'hélium au carbone. Il manque **le lithium, le béryllium et le bore** qui sont, parmi les noyaux légers, les éléments les moins abondants de l'Univers ; **ils devraient être presque aussi abondants que l'hélium, or ils sont 10^8 fois moins abondants** (fig. 2.2). Ces noyaux sont très fragiles et ne résistent pas aux conditions réalisées dans les étoiles. Ils ne sont fabriqués que tardivement, dans le milieu interstellaire, sous l'influence des rayons cosmiques qui fragmentent les noyaux d'oxygène, d'azote et de carbone.

C'est un des processus les plus lents de l'Univers ce qui explique la très faible abondance de ces trois noyaux (Li, Be, B).

2.2.4 La phase planétaire

Malgré la présence de molécules complexes, le milieu interstellaire n'est pas un milieu très favorable à la poursuite de l'évolution moléculaire. Il présente trois inconvénients majeurs, le froid (qui limite la réactivité des molécules), les distances (le pourcentage de rencontres donc de recombinaisons de structures est faible), la présence de rayonnements cosmiques et ultra-violets (qui détruisent les molécules fragiles). Pour que l'évolution moléculaire se poursuive il faut un milieu dense, qui favorise les contacts, un milieu protecteur, et un milieu à température modérée qui accélère les réactions sans détruire les molécules fragiles. Ces conditions sont réalisées dans les planètes. Ce sont des structures liées gravitationnellement à une étoile qui apporte, par son rayonnement, une partie de l'énergie nécessaire à une température correcte. Le reste de l'énergie provient de la chaleur initiale de la planète qui est due aux réactions nucléaires et au bombardement météoritique. De plus, si sa masse est suffisante, la planète retient les gaz et une atmosphère se constitue. Sur les planètes, il y a donc des possibilités de recombinaisons multiples. Dans ce cadre, l'eau joue un rôle capital par son pouvoir de dissolution. Sa concentration sur la planète Terre (la « Planète Bleue ») n'est sans doute pas étrangère à la réalisation des suites de phénomènes complexes qui, par la possibilité d'autoduplication des molécules organiques, ont conduit à l'apparition de la vie.

Une étape importante est la réalisation de structures photosensibles (du type chlorophylle) capables de capter l'énergie solaire et de la transformer en énergie chimique. Nous quittons alors le domaine de l'évolution chimique pour celui de l'évolution des cellules et des organismes telle que nous la connaissons depuis les travaux de Darwin.

À retenir

- La théorie du « Big Bang » permet d'établir un modèle de synthèse des différents noyaux atomiques qui est cohérent avec l'abondance actuelle des éléments chimiques dans l'Univers et qui rend 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, le milieu interstellaire et les planètes.

MOTS-CLÉS

- Lois de Kepler, loi de Bode.
- Planètes, plutoïdes, satellites, astéroïdes, météorites et comètes.
- Ceinture de Kuiper, nuage d'Oort.
- Accrétion et différenciation planétaire.
- 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.

3.1 LA STRUCTURE DU SYSTÈME SOLAIRE

Nous ne présenterons ici qu'un bref résumé des connaissances qui résultent 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-il que **c'était le Soleil et non la Terre qui est 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, 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).

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

L'un des premiers à risquer à s'attaquer au « dogme » du géocentrisme fut un chanoine polonais, Nicolas Copernic qui redécouvrit l'héliocentrisme d'Aristarque et calcula 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.

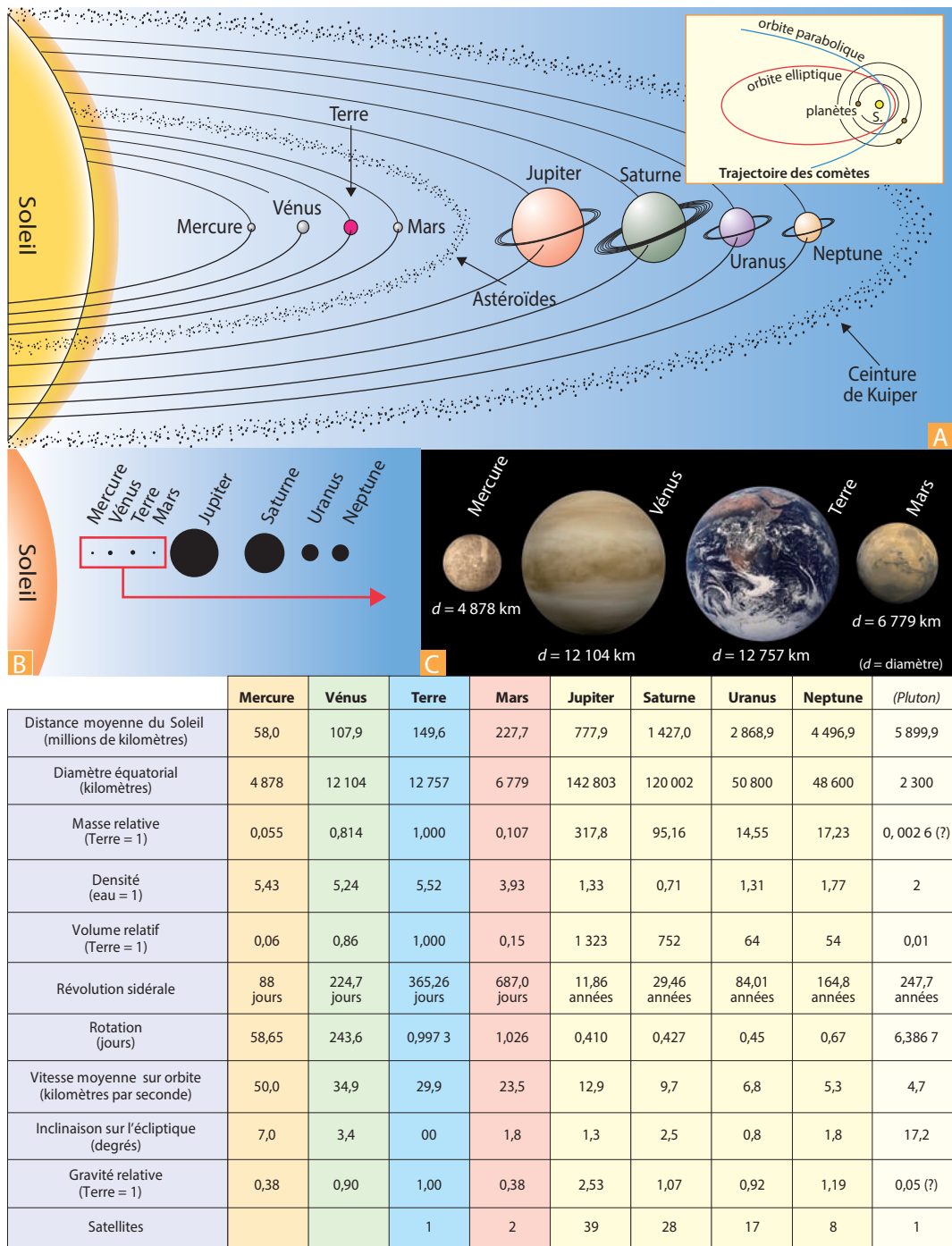


Figure 3.1 Le Système solaire : schémas d'organisation et tableau des données principales.

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*).

Le système copernicien fut amélioré par Johannes Kepler (1571-1630) qui put utiliser la documentation accumulée par l'astronome danois Tycho Brahé (1546-1601). Il montre que les planètes décrivent des orbites elliptiques (dont le Soleil occupe un des foyers) et que les corps célestes accélèrent en s'approchant du Soleil et ralentissent en s'en éloignant (**1^{re} et 2^e loi**). En démontrant que les vitesses des planètes varient sur leurs orbites, il prouve que les épicycles de Ptolémée n'étaient qu'illusion. Il formule, plus tard (Les harmonies du monde), une **troisième loi** : le carré des périodes de révolution des planètes est proportionnel au cube du grand axe de leur orbite. Connaissant les périodes respectives de la Terre (365 j) et de Mars (687 j), il détermine que Mars est situé à 1,523 unité astronomique du Soleil (la valeur de l'unité astronomique, soit la distance Terre-Soleil, ne fut déterminée réellement qu'en 1962, elle est légèrement inférieure à 150 millions de km). De plus, il pressent l'existence de la gravité en supposant qu'une force unique commande le mouvement des planètes. Bien que la légende ait surtout retenu les avatars de son contemporain italien, Galilée (1564-1642), qui par ses observations remettait aussi en cause le géocentrisme, le sort de Kepler ne fut pas meilleur : il fut excommunié et mourut dans la misère.

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.

3.1.2 La synthèse des connaissances sur le Système solaire

Nos connaissances peuvent se résumer ainsi :

- Le Système solaire est une communauté ordonnée qui comprend 8 ou 9 planètes, suivant le statut que l'on donne à Pluton, 73 satellites, des myriades d'astéroïdes, de comètes et autres petits corps célestes (fig. 3.1). En tant qu'étoile, le Soleil n'est pas très gros, mais comparé aux planètes, il est gigantesque. Si le Soleil avait les dimensions de l'Arc de Triomphe et était situé place Charles-de-Gaulle, Pluton serait un pamplemousse non loin de Tours.

Encart 3.1 – 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 Cérés ou plus massif comme Eris/Xena 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'Union Astronomique Internationale (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 la condition de 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 : *Ceres* (corps de 950 km de diamètre, découvert en 1801 dans la ceinture des astéroïdes entre Mars et Jupiter, qui fut déjà 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 princesse 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 navigant au-delà de l'orbite de Neptune, devient un anneau de « planètes naines » transneptuniennes, les plutoïdes, comportant Pluton, Charon et Xena.

- Les planètes tournent autour du Soleil sur des orbites elliptiques qui sont presque des cercles. Ces orbites sont pratiquement toutes situées dans un même plan (**écliptique**), perpendiculaire à l'axe de rotation du Soleil. Ce plan est ainsi nommé parce que les éclipses de Lune et de Soleil ne se produisent que lorsque la Lune se trouve dans ce plan.
- La période de révolution des planètes autour du Soleil dépend de leur distance au Soleil, les plus éloignées tournent le plus lentement (Mercure : 0,24 année, Pluton : 248,4 années). Leur mouvement orbital est régulé, elles accélèrent lorsqu'elles se rapprochent du Soleil, elles ralentissent lorsqu'elles s'en éloignent. Les révolutions se font toutes dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même.
- La rotation des planètes sur elles-mêmes s'effectue suivant un axe sub-perpendiculaire au plan de l'écliptique. La rotation se fait dans le même sens que la révolution (sauf pour Vénus et Uranus qui tournent en sens inverse).

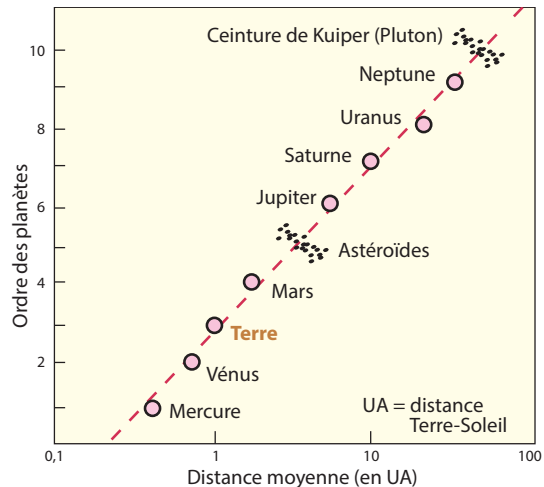
Encart 3.2 – Le basculement d'Uranus

Uranus est couché sur son orbite. Son axe de rotation se situe presque dans le plan de son orbite au lieu d'être quasi perpendiculaire à l'écliptique, comme les autres planètes. On a longtemps pensé que cela était le résultat d'une collision majeure avec une protoplanète de la taille de la Terre à la fin de la formation d'Uranus. Une modélisation de l'Institut de mécanique céleste de Paris (2010) propose un mécanisme sans collision : résonance avec un satellite massif aujourd'hui disparu, qui aurait fait basculer l'axe de rotation d'Uranus lors de la formation du Système solaire.

- De plus, la distance entre les planètes obéit à une loi simple (**loi de Bode**) : chaque planète est deux fois plus éloignée du Soleil que sa voisine intérieure. Toutefois entre Mars et Jupiter, il n'existe pas de planète à l'endroit prévu par la loi de Bode mais une multitude de petits objets célestes : les Astéroïdes (fig. 3.2). De même la « 9^e planète » de la loi Bode est maintenant considérée comme un ensemble d'objets transneptuniens (dont le prototype est Pluton) appelé **ceinture de Kuiper**.

Figure 3.2 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 fig. 3.3).



Encart 3.3 – 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 loin-

taine 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 d'environ à 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.

3.1.3 Le nuage d'Oort et les comètes

La frontière du Système solaire ne se situe pas à l'orbite de Pluton (ceinture de Kuiper) ; aux confins du Système solaire, il existe un nuage de comètes (le **nuage d'Oort**, du nom de l'astronome hollandais Jan H. Oort qui émit l'hypothèse de son existence en 1950) où plus de 100 milliards de comètes (morceaux de roches et glaces) circuleraient dans une région sphérique de l'espace, d'environ une année-lumière (50 000 UA), centrée sur le Soleil. Soumises à une très faible attraction solaire, elles mettraient des milliers d'années à parcourir d'immenses orbites. De temps à autre, une perturbation du champ de gravitation (due, par exemple, au passage d'une étoile à proximité) en arrache certaines et les précipite en direction du Soleil. Une partie, telle la célèbre comète de Halley, parcourt alors de longues orbites englobant le Soleil. Le nuage d'Oort est un reliquat du disque protoplanétaire (voir le paragraphe 3.2).

Encart 3.4 – 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.

Les comètes qui gravitent autour du Soleil s'en éloignent d'environ 1 500 fois plus que Pluton (fig. 3.1). Pour comparaison on doit rappeler que l'étoile la plus proche du Soleil est 6 000 fois plus lointaine que Pluton. En se rapprochant du Soleil, les comètes s'échauffent, leurs cristaux de glace se

volatilisent et elles laissent une traînée de poussières derrière elles. Ces comètes représentent les vestiges de la nébuleuse protosolaire (fig. 3.3). Certaines peuvent s'écraser sur la Terre, une telle catastrophe s'est produite, en 1908, en Sibérie dans la région de Tunguska. Selon les premières études, l'événement de Tunguska correspondrait à l'explosion, à une altitude de 5-10 km, d'un astéroïde de type comète, mais des analyses des sols et des arbres sous le centre de l'explosion semblent alimenter l'hypothèse de la chute d'une météorite pierreuse.



Voir fig. 37.2

La sonde Rosetta s'est mise en orbite autour de la comète 67P Churyumov-Gerasimenko après un voyage dans l'espace qui a duré 10 ans. Elle a largué le module Philae qui s'est posé sur la surface englacée de la comète le 12 octobre 2014 (voir chapitre 37.1.3).

En 2013, la désintégration d'une météorite de plus de dix tonnes faisait 500 blessés légers dans la ville de Tcheliabinsk. L'onde de choc a soufflé les vitres et les portes des immeubles de cette ville industrielle de l'Oural.



Voir
chap. 37.2.9

Un dérèglement gravitationnel dans la région du nuage d'Oort, suivi d'une chute de bolides, est évoqué pour expliquer l'anomalie positive en iridium et la crise biologique de la limite Crétacé/Tertiaire il y a 65 Ma.

Encart 3.5 – Les exoplanètes : existe-t-il d'autres systèmes solaires ?

Le Soleil, n'est pas la seule étoile à posséder un système planétaire. Depuis la découverte en 1995, par les astronomes suisses Mayor et Queyloz, à partir d'une méthode spectrométrique, d'une planète en orbite autour de l'étoile 51 Pégase (à environ 40 al de la Terre), plus de 4 000 **planètes extra-solaires ou exoplanètes** ont été identifiées. Ces planètes paraissent pour le moment très différentes de celles du Système solaire (la planète de Pégase 51, qui a une masse égale à la moitié de celle de Jupiter, n'est située qu'à 7 millions de km de l'étoile et effectue sa révolution en seulement 4,2 jours).

Ces recherches sont délicates car ces objets sont quasi invisibles (la planète a un éclat 10 milliards de fois plus faible que l'étoile autour de laquelle elle gravite) et l'on ne peut qu'utiliser des méthodes indirectes comme l'étude des perturbations gravitationnelles provoquées par la planète sur le mouvement de l'étoile. De ce fait, on n'est actuellement capable que de détecter des planètes de taille importante. Des missions de satellites ont été développées par différentes agences pour avancer dans notre connaissance des exo-Terres possibles. Le télescope spatial COROT (CNES-CNRS) et des pays partenaires comprend une caméra à 4 CCD hypersensibles, et scrute, pendant plus de 6 mois, le même champ d'étoiles. Le télescope spatial Kepler, de la NASA, a été lancé en 2009. Il utilise la méthode des transits (étude des variations de luminosité dues à un corps en rotation devant une étoile). En 2013, Kepler a découvert 134 planètes dans un échantillon de 145 000 étoiles.

Pour la première fois en mars 2005, le rayonnement de deux exoplanètes, HD 209458b (dans la Constellation de Pégase à 153 al) et TrES-1 (Constellation de la Lyre à 489 al) a pu être analysé et des températures respectives de 850 °C et 780 °C ont pu être calculées. L'espoir de connaître la nature chimique de ces planètes, que l'on pense proche de celle de Jupiter, ne paraît plus utopique.

Dans la Voie lactée, un système planétaire de 7 planètes de taille terrestre gravitant autour de l'étoile Trappist 1 (étoile de la constellation du Verseau, située à 39 années-lumière de la Terre) a été étudié à partir de 2015. Trappist 1 est une étoile naine plus froide que le Soleil, les planètes sont plus proches de l'étoile que la Terre ne l'est du Soleil (20 à 90 fois) et présentent des rotations synchrones (montrant toujours la même face à l'étoile). Au moins 3 des planètes ont des insulations et des températures moyennes compatibles avec l'existence d'eau liquide en surface pour une large gamme de compositions atmosphériques.

En 2019, de la vapeur d'eau a été mise en évidence dans l'atmosphère la planète K2-18b, une super-Terre (huit fois plus massive que la Terre pour un rayon deux fois plus grand), située à quelque 110 années-lumière de notre planète. La révolution de K2-18b autour de « son Soleil » est de 33 jours, à une distance de 21 millions de km (soit moins que la distance Soleil-Mercure, ce qui paraît exclure la présence d'eau liquide à sa surface).

3.2 LA NAISSANCE DU SYSTÈME SOLAIRE

Depuis longtemps, les astronomes se sont demandés quelle pouvait être l'origine d'une structure aussi régulière. 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) ?

3.2.1 Les différents modèles

Les différents scénarios peuvent être regroupés en quatre modèles.

a) Premier modèle

Le Soleil et les planètes sont nés, en même temps, à partir d'un même nuage de matière interstellaire. Cette théorie qui avait déjà été imaginée par Kant en 1755, fut indépendamment développée par Laplace en 1796 ; l'objet céleste initial hypothétique est, de ce fait, appelé « Nébuleuse protosolaire de Laplace ». Elle résulterait de la fragmentation d'un nuage interstellaire. Il s'agit donc d'une masse de gaz et de poussières en rotation rapide qui prend la forme d'un disque aplati. Les éléments non volatils se condensent et s'agglomèrent pour donner naissance aux planètes dans les régions plus froides (plus externes) du disque tandis que le centre se contracte et devient le Soleil (fig. 3.3). De très nombreux travaux actuels se rattachent à ce modèle.

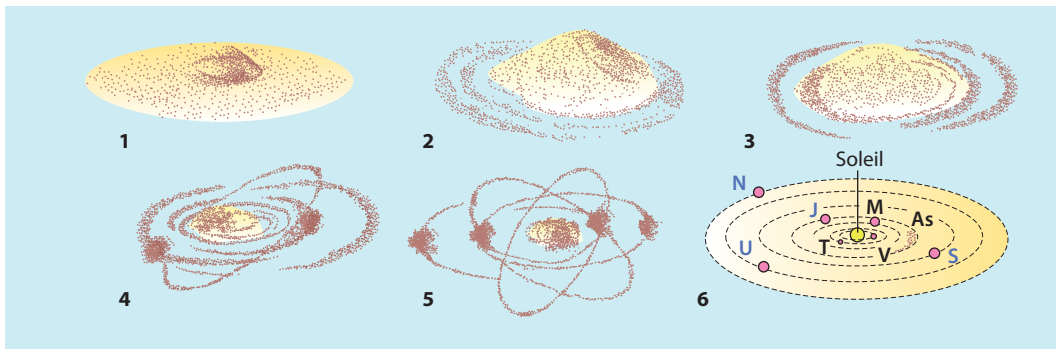


Figure 3.3 Un scénario envisagé pour la naissance du Système solaire : l'effondrement d'un nuage interstellaire (nébuleuse protosolaire de Laplace) en rotation.

Les lettres correspondent aux initiales des planètes. Comparer avec la figure 3.4. Diverses modélisations ont montré qu'il faudrait 5 à 10 Ma pour passer du stade 1 au stade 5 et ensuite, environ 100 Ma, pour passer au stade 6.

b) Second modèle

Le cortège planétaire provient de la transformation d'un nuage interstellaire mais celui-ci a été capturé (par gravité ou du fait du champ magnétique suivant les différents scénarios) par le Soleil après sa formation. Soleil et planètes ne sont donc pas cogénétiques.

c) Troisième modèle

À sa naissance, le Soleil faisait partie d'un système stellaire binaire (comme il en existe beaucoup dans l'Univers) mais l'étoile compagne s'est désintégrée ; sa matière s'est répandue dans l'espace et une partie a été capturée par le Soleil en donnant naissance à une nébuleuse. Dans cette théorie, très en vogue dans les années quarante, le Soleil et les planètes sont donc constitués de matière stellaire et sont aussi cogénétiques.

d) Quatrième modèle

Au cours des mouvements célestes une étoile serait passée à une proximité suffisante du Soleil pour que celui-ci provoque à la surface de l'étoile des phénomènes de marée éjectant de la matière qui serait mise en orbite autour de celui-ci (fig. 3.4). Dans ce type de scénario, la matière des planètes est donc d'origine stellaire mais il n'existe aucun lien génétique entre le Soleil et les planètes.

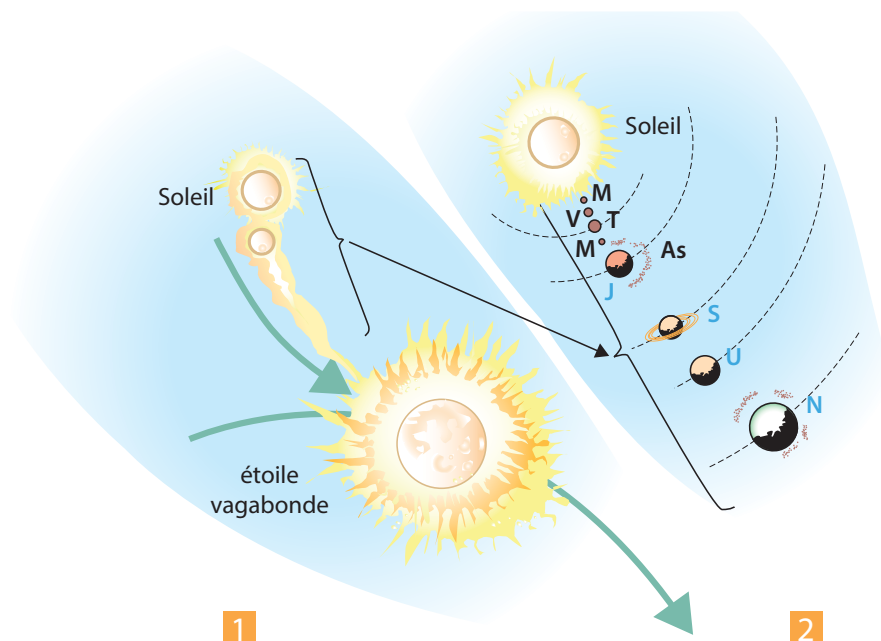


Figure 3.4 Un scénario « catastrophique » envisagé pour la naissance du Système solaire.

Capture (1) par une étoile vagabonde de matière stellaire émise au voisinage du Soleil. En se refroidissant (2) le filament de matière donne naissance aux planètes. Ce scénario reprend l'idée de Buffon (1749) en remplaçant la comète par une étoile (les lettres correspondent aux initiales des planètes).

3.2.2 L'origine de la matière dans le Système solaire

Deux types d'arguments peuvent nous permettre de tester la validité des différents modèles : les abondances isotopiques et élémentaires et les mesures d'âges.

Si nous regardons (tableau 3.1) les abondances relatives d'éléments fragiles, qui résistent mal aux conditions régnant dans les étoiles (deutérium et lithium), par rapport aux éléments résistants (hydrogène, fer, silicium), on constate que le cortège planétaire et la matière interstellaire présentent des compositions voisines. Les scénarios faisant intervenir de la matière stellaire (modèles 3 et 4) doivent donc être rejetés.