

JESSICA UZEL • JACQUES BOUFFETTE

# GÉOLOGIE *à colorier*

200 schémas à colorier et légender

DUNOD



# SOURCES ICONOGRAPHIQUES

**Figures 1.5, 1.7B, 1.10, 1.12A, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.13, 2.14, 2.16, 2.17, 3.1B, 3.6, 3.7B, 3.9, 3.12, 3.13, 3.14, 3.19, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26B, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34A, 3.34B, 3.35, 3.36, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40, 3.42, 3.43, 3.44, 3.45A, 3.46, 3.47, 3.48, 3.49, 3.50, 3.51, 3.52, 3.53, 4.1, 4.2, 4.3B, 4.4, 4.5, 4.6, 4.8, 4.14B, 4.16, 4.17, 4.19, 4.20, 4.22, 4.23, 4.24A, 4.26, 5.1, 5.2, 5.3, 5.5B, 5.8, 5.9, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.23 (encart), 5.24, 5.28, 5.29, 5.31, 5.32, 5.35, 5.36, 5.42, 5.43, 5.48B, 6.1A, 6.4, 6.6 :** modifiées de *Éléments de Géologie* – le « Pomerol », M. Renard, Y. Lagabrielle, E. Martin et M. de Rafélis, Dunod, 2021. **Figures 1.2, 1.12B, 2.15, 3.54, 4.9, 4.10, 4.11, 4.18, 4.20, 5.13, 5.22, 5.37A, 5.39, 5.42, 5.44, 6.13 :** modifiées de *Comprendre et enseigner la planète Terre*, J.M. Caron, A. Gauthier, J.M. Lardeaux, A. Schaaf, J. Ulysse et J. Wozniak, Ophrys, 2004. **Figures 4.26, 5.10, 5.22, 5.25, 5.26, 5.27, 5.30, 5.32, 5.33, 5.34, 5.36, 5.37A, 5.37B, 5.38, 5.40, 5.45, 5.46, 6.7 :** modifiées de *Géologie : Géodynamique, pétrologie, études de terrain*, D. Jaujard, Maloine, 2015. **Figures 3.4, 3.5, 5.6 :** modifiées de *Géosciences : la dynamique du système Terre*, C. Robert et R. Bousquet, Belin, 2013. **Figure 1.9 :** modifiée de *Sciences de la Terre et de l'Univers*, A. Brahic, M. Hoffert, R. Maury, A. Schaaf et M. Tardy, Vuibert, 2006. **Figure 1.5 :** modifiée de *Planétologie, géologie des planètes et des satellites*, C. Sotin, O. Grasset et G. Tobin, Dunod, 2009. **Figure 3.15 :** modifiée de *Maxifiches Géologie*, L. Emmanuel, M. de Rafélis, A. Pasco-Giannoni, Dunod, 2014. **Figure 5.17 :** modifiée de *Métamorphisme et géodynamique, Cours, Exercices corrigés, 16 planches couleurs*, C. Nicollet, Dunod, 2017. **Figure 6.12 :** modifiée de *Géologie sédimentaire. Bassins, environnements de dépôts, formation du pétrole*, B. Biju-Duval, Technip, 1999. **Figure 5.20 :** modifiée de Y. Lagabrielle et S. Leroy (2005). Le visage sous-marin de la Terre : Éléments de Géologie océanique. Commission de la Carte Géologique du Monde. **Figure 1.4, 1.13B :** © NASA. **Figure 1.6 :** modifiée de K. Dyalynas, S. Krimigis, D. Mitchell *et al.* (2017). The bubble-like shape of the heliosphere observed by Voyager and Cassini. *Nature Astronomy* 1, 0115 (2017). **Figure 1.7A :** modifiée de <https://guy-chaumeton.pagesperso-orange.fr/scphysiques2010/tsph01.htm>. **Figure 1.8 :** modifiée de T. Henning and D. Semenov (2013). *Chemistry in Protoplanetary Disks*. *Chemical Reviews*, 113(12), 9016–9042. **Figure 1.11 (courbe d'apparition probable de la vie) :** modifiée de J.W. Schopf (2001). Cradle of life: The discovery of Earth's earliest fossils. Princeton University Press. **Figure 1.12B :** modifiée de Martin H., 2008. <http://www.exobiologie.fr/index.php/vulgarisation/geologievulgarisation/lenvironnement-de-la-terre-primitive-larcheen-et-lhadeen/> **Figure 1.15 (tectonique archéenne) :** modifiée de H. Martin, D.L. Pinti (2011). Archean Eon. In: Gargaud M. *et al.* (eds) *Encyclopedia of Astrobiology*. Springer, Berlin, Heidelberg. **Figure 2.8 :** modifiée de Wang, A. *et al.* (2012). <http://funwithkrill.blogspot.com/2012/09/seawater-chemistry-north-atlantic-vs.html> et de Le Calvé, O. (2004) <http://lecalve.univ-tln.fr/oceno/fiches/fiche4D.htm> **Figure 2.15 :** modifiée de J.F. Moyen (2007). <http://jfmoyen.free.fr/IMG/pdf/extrait-atmo.pdf> ; de D.L. Pinti (2005). The origin and evolution of the oceans. In *Lectures in astrobiology* (pp. 83-112). Springer, Berlin, Heidelberg ; et de B. Marty (2001). Origine et évolution précoce de l'atmosphère terrestre. Pages 197–216 de: M. Gargaud, D. Despois, J.P. Pariset. *L'environnement de la Terre Primitive. L'origine de la vie sur la Terre et dans l'Univers*. Bordeaux : Presses Universitaires de Bordeaux. **Figure 3.10 :** modifiée de R. Wyns (2002). Climat, eustatisme, tectonique: quels contrôles pour l'altération continentale? Exemple des séquences d'altération cénozoïques en France. *Bulletin d'information des géologues du bassin de Paris*, 39(2), 5-16. **Figure 3.11 :** modifiée de J.H. Taylor (1968). Principles of lithogenesis. Vol. I. **Figure 3.16 :** modifiée de S. Jain (2014). Streams. In: *Fundamentals of Physical Geology*. Springer Geology. Springer, New Delhi. **Figure 3.17 :** modifiée de R.J. Lillie (2015). Beauty from the Beast: Plate Tectonics and the Landscapes of the Pacific Northwest, Wells Creek Publishers. **Figure 3.18 :** modifiée de V. Rime, A. Sommaruga, M. Schori *et al.* (2019). Tectonics of the Neuchâtel Jura Mountains: insights from mapping and forward modelling. *Swiss Journal of Geosciences*, 112, 563–578. **Figure 3.34C :** modifiée de R. Mathieu, J.P. Bellier, B. Granier (2011). Manuel de micropaléontologie. Association « Carnets de Géologie ». **Figure 3.41 :** modifiée de T. Nalpas (unpublished) ; et de S. Riahi, M. Soussi, D. Stow (2021). Sedimentological and stratigraphic constraints on Oligo – Miocene deposition in the Mogod Mountains, northern Tunisia: new insights for paleogeographic evolution of North Africa passive margin. *International Journal of Earth Sciences*, 110(2), 653-688. **Figure 4.3A :** modifiée de Ministry of Building and Urban Development, Iran Strong Motion Network (ISMN) © Building and Housing Research Center. **Figure 4.6 :** modifiée de *Géophysique*, J. Dubois, M. Diament, J.P. Cogné, Dunod, 2011 ; et de J. Lei and D. Zhao (2006). A new insight into the Hawaiian plume. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3-4), 438-453. **Figure 4.7 :** modifiée de J.F. Moyen (2001). <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/geotherme-profond.xml> **Figure 4.24B :** modifiée de M. Jeambrun, D. Giot, R. Boullier *et al.* (1973). Carte géologique détaillée de la France. 693. Clermont-Ferrand. Bureau de recherches géologiques et minières. **Figure 5.6 :** modifiée de <https://www.svtice-hatier.fr/document/evacuation-de-la-chaaleur-au-niveau-de-la-surface-de-la-terre> **Figure 5.12 :** modifiée de N. Chamot-Rooke et A. Rabaute. *La Tectonique des Plaques depuis l'Espace* (2006). Commission de la Carte Géologique du Monde. **Figure 5.16 :** modifiée de C. Nicollet <http://christian.nicollet.free.fr/page/TectoCassante/tectocassante.html> **Figure 5.32 :** modifiée de J. Brun et P. Choukroune (1981). Déformation progressive et structures crustales. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, 23(3), 177-193. **Figure 5.34 :** modifiée de C. Nicollet <http://christian.nicollet.free.fr/page/Figures/limites-du-metamorphisme.html> **Figure 5.35 :** modifiée de S. Schwartz, J.M. Lardeaux, S. Guillot, P. Tricart (2000). Diversité du métamorphisme éclogitique dans le massif ophiolitique du Monviso (Alpes occidentales, Italie). *Geodinamica Acta*, 13:2-3, 169-188. **Figure 5.37A :** modifiée de J. Gaillardet (2000). <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/td-cycle-du-carbone2.xml> **Figure 5.37B :** modifiée de Deep Carbon Observatory: A Decade of Discovery (2019). Washington, DC: Deep Carbon Observatory Secretariat. **Figure 5.41 :** modifiée de R.D. Müller, W.R. Roest, J.Y. Royer, L.M. Gahagan, J.G. Sclater (1997). Digital isochrons of the world's ocean floor. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B2), 3211-3214. **Figure 5.47 :** modifiée de C.J. Hawkesworth, B. Dhuime, A.B. Pietranik, P.A. Cawood, A.I. Kemp, C.D. Storey (2010). The generation and evolution of the continental crust. *Journal of the Geological Society*, 167(2), 229-248. **Figure 5.48A :** modifiée de J.H. Bédard (2006). A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archean crust and subcontinental lithospheric mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 1188-1214. **Figure 6.1B :** modifiée de Nomade, S. (2019). <https://www.cea.fr/multimedia/Lists/StaticFiles/clefs/science-histoire/comment-la-terre-s-est-elle-peuplee.html> **Figure 6.3 :** © Finnish Meteorological Institute (Finlande). **Figure 6.9 :** modifiée de P. Mathews (2018). Réalités industrielles, L'économie de l'or © Annales des Mines. **Figure 6.10 :** modifiée de J.D.N. Winter (2001). An introduction to igneous and metamorphic petrology. Prentice Hall, Sydney, 697. **Figure 6.15 :** modifiée de E. Hurlig, V. Cermak, V. Cermak, R. Haanel, V. Zui (1992). Geothermal atlas of Europe. Germany: Haack. **Autres ressources consultées :** *Système solaire, systèmes stellaires*, T. Encrenaz, Dunod, 2005. *La Terre, une planète singulière*, R. Trompette, Belin, 2004. *La mesure du temps dans l'histoire de la Terre*, P. de Wever, L. Labrousse, D. Raymond, A. Schaaf, Vuibert, 2005. *Le Soleil, la Terre... la vie. La quête des origines*, M. Gargaud, H. Martin, P. López-García, Belin, 2009. *Géologie, les fondamentaux*, A.S. Krémeur, A. Vincent, N. Coltice, Fluorescences, Dunod, 2019. *Le grand Atlas de l'astronomie*, J. Audouze, G. Israël, Encyclopedia Universalis, 1996. *Encyclopedia of Geology*, S. Elias, D. Alderton, Elsevier Academic Press, 2005. *Les Météorites*, B. Zanda, Carnets d'Histoire naturelle, Bordas, 1996.

© Dunod, 2021

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-081545-6

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

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

# TABLE DES MATIÈRES

Sources iconographiques.....	2
Introduction.....	7
Remerciements.....	8

## Partie 1

### La Terre : une planète dans l'Univers

1.1. L'architecture de l'Univers.....	10	1.9. La différenciation terrestre .....	23
1.2. L'organisation du Système solaire .....	12	1.10. La différenciation planétaire : éléments compatibles et incompatibles.....	24
1.3. La structure et la dynamique actuelle du Soleil .....	14	1.11. La Terre primitive (Hadéen et Archéen) .....	25
1.4. Les planètes géantes et les planètes telluriques.....	16	1.12. Les roches de l'Archéen .....	26
1.5. Les planètes naines, les petits corps et les satellites .....	18	1.13. La Terre, une planète habitable .....	27
1.6. Les limites du Système solaire .....	19	1.14. Le calendrier cosmique (1) – Les 11 premiers mois .....	28
1.7. Origine et évolution du Soleil.....	20	1.15. Le calendrier cosmique (2) – Décembre .....	29
1.8. L'accrétion planétaire .....	22	1.16. Le calendrier cosmique (3) – La dernière journée.....	30

## Partie 2

### Les enveloppes fluides externes de la Terre

2.1. La structure actuelle de l'atmosphère et le bilan radiatif de la Terre....	32	2.10. Un dispositif climatique régional: le phénomène El Niño .....	44
2.2. La dynamique de l'atmosphère terrestre .....	34	2.11. Les eaux continentales.....	45
2.3. L'hydrosphère et les propriétés de l'eau.....	35	2.12. La lecture d'une carte météorologique.....	46
2.4. Les circulations océaniques: les courants de surface.....	36	2.13. La théorie climatique de Milankovitch .....	47
2.5. La répartition des températures océaniques dans l'océan Atlantique .	38	2.14. Les contrôles du climat terrestre: un bilan .....	48
2.6. La répartition des salinités océaniques.....	39	2.15. L'évolution de l'atmosphère, de la formation de la Terre à l'actuel .....	49
2.7. L'O <sub>2</sub> et le CO <sub>2</sub> dissous dans l'eau de mer .....	40	2.16. Les paléoclimats – Greenhouse et Icehouse .....	50
2.8. La structure actuelle d'une colonne océanique.....	42	2.17. Les prévisions sur l'évolution du climat .....	52
2.9. La circulation thermo-haline .....	43		

## Partie 3

### Forme et reliefs de la Terre, mémoires d'une planète dynamique

3.1. La forme de la Terre : première approche .....	54	3.28. Figures et structures associées à un courant unidirectionnel .....	82
3.2. La gravité et le champ de gravitation terrestre.....	55	3.29. La zonation hydrodynamique d'une plate-forme continentale.....	83
3.3. Champ de gravitation et champ de pesanteur.....	56	3.30. La précipitation des carbonates en milieu marin.....	84
3.4. Le géoïde et l'ellipsoïde international de référence.....	57	3.31. Les différentes morphologies de plates-formes carbonatées .....	85
3.5. Les anomalies gravimétriques .....	58	3.32. Les récifs et la sédimentation récifale.....	86
3.6. Les anomalies du géoïde.....	59	3.33. Les modèles de faciès de plates-formes carbonatées .....	87
3.7. La géodésie et les satellites : GPS et DORIS .....	60	3.34. La sédimentation pélagique carbonatée - Lysocline, CCD et ACD .....	88
3.8. Altération chimique, altération mécanique et érosion des roches .....	61	3.35. L'environnement de la sédimentation gravitaire.....	89
3.9. Le diagramme de Goldschmidt .....	62	3.36. Les courants de turbidité et la séquence de Bouma .....	90
3.10. Les paramètres de contrôle des altérations: climat et tectonique.....	63	3.37. La répartition actuelle des dépôts océaniques.....	91
3.11. Altération chimique des minéraux silicatés et climats .....	64	3.38. La sédimentation océanique, un témoin de la mobilité lithosphérique	92
3.12. Les profils d'altération soustractive .....	66	3.39. Formation et évolution des bassins sédimentaires .....	93
3.13. La formation des sols .....	67	3.40. Les bassins sédimentaires associés à des zones de divergence .....	94
3.14. Facteurs de modelé des paysages: ruissellement et érosion fluviale .....	68	3.41. Les bassins sédimentaires associés à des zones de convergence.....	95
3.15. Facteurs de modelé des paysages: érosion karstique .....	69	3.42. Les bassins sédimentaires intracratoniques .....	96
3.16. Facteurs de modelé des paysages: la lithologie.....	70	3.43. Les principes de la stratigraphie .....	97
3.17. Facteurs de modelé des paysages: la tectonique (les failles) .....	71	3.44. La biostratigraphie .....	98
3.18. Facteurs de modelé des paysages: la tectonique (les plis).....	72	3.45. La chronologie relative .....	99
3.19. Facteurs de modelé des paysages: le climat (reliefs glaciaires).....	73	3.46. La radiochronologie .....	100
3.20. Les paysages granitiques .....	74	3.47. La chiostratigraphie .....	102
3.21. Les classifications des roches sédimentaires .....	75	3.48. La cyclostratigraphie .....	103
3.22. Les classifications des roches carbonatées .....	76	3.49. La stratigraphie séquentielle: fondements théoriques .....	104
3.23. Transport par les eaux courantes et sédimentation des particules.....	77	3.50. La stratigraphie séquentielle: méthode.....	105
3.24. La sédimentation et les environnements fluviatiles.....	78	3.51. Les fluctuations eustatiques et leurs paramètres de contrôle .....	106
3.25. L'érosion et les apports sédimentaires océaniques.....	79	3.52. Échelle temporelle des inversions de polarité géomagnétiques (GPTS)...	107
3.26. Le domaine fluvio-marin: estuaires et deltas .....	80	3.53. Les crises biologiques .....	108
3.27. Les environnements de sédimentation océaniques.....	81	3.54. Repères relatifs et absolus dans l'histoire géologique de la Terre.....	109

## Partie 4

### La Terre interne : des observations aux modèles

4.1. Séismes et mécanismes au foyer.....	111	4.14. La diversité des roches volcaniques .....	124
4.2. Intensité et magnitude sismiques.....	112	4.15. La diversité des roches plutoniques .....	125
4.3. Ondes sismiques et sismogrammes.....	113	4.16. La classification des roches magmatiques .....	126
4.4. La propagation des ondes sismiques .....	114	4.17. La classification des roches mantelliques .....	127
4.5. Les modèles sismiques de la Terre.....	115	4.18. Croûtes terrestres continentale et océanique - Le modèle ophiolitique..	128
4.6. Les hétérogénéités des modèles sismiques: la tomographie sismique..	116	4.19. La transition océan-continent: marges passives et actives.....	130
4.7. Le géotherme terrestre.....	117	4.20. Le manteau terrestre inaccessible.....	131
4.8. Composition chimique et densité des enveloppes terrestres .....	118	4.21. Une notion fondamentale: la lithosphère .....	132
4.9. Rayons ioniques et structures cristallines .....	119	4.22. Le noyau terrestre .....	133
4.10. Les systèmes cristallins.....	120	4.23. Le champ magnétique et son origine.....	134
4.11. Les principaux silicates .....	121	4.24. La fossilisation du champ magnétique terrestre.....	135
4.12. Les minéraux non silicatés.....	122	4.25. La structure interne de la Terre : un bilan.....	136
4.13. Les textures des roches magmatiques.....	123	4.26. La densité de la Terre et les mouvements verticaux isostasiques.....	138

## Partie 5

### La Terre, une planète dynamique

5.1. La répartition globale des séismes et des volcans.....	142	5.12. Contraintes, déformations et rhéologie.....	154
5.2. Les modèles de plaques lithosphériques .....	143	5.13. Les failles, un exemple de déformation discontinue.....	156
5.3. Limites de plaques et reliefs actuels de la Terre .....	144	5.14. Les plis, un exemple de déformation continue.....	157
5.4. Les indices historiques de la mobilité horizontale des continents – Théorie de la « dérive des continents ».....	145	5.15. D'autres marqueurs de déformation continue: les fabriques planaires (schistosités) et linéaires (linéations).....	158
5.5. La mobilité horizontale des continents: marqueurs modernes.....	146	5.16. D'autres marqueurs de la déformation: les fentes de tension et les stylolithes .....	160
5.6. La répartition globale du flux thermique .....	147	5.17. Déformations et chronologie relative.....	161
5.7. Origine de la chaleur interne et mode de transferts thermiques.....	148	5.18. Les failles transformantes et la géométrie eulérienne .....	162
5.8. La convection dans le manteau.....	150	5.19. Les dorsales océaniques actives: pétrologie .....	163
5.9. Les modèles de convection du manteau.....	151	5.20. Les dorsales océaniques actives: morphologies et dynamiques comparées.....	164
5.10. Les grands contextes géodynamiques.....	152		
5.11. Les mouvements relatifs et absolus des plaques .....	153		

5.21. Origine du magma émis au niveau des dorsales – Les laves MORB.....	166	5.35. Les histoires tectoniques et thermiques enregistrées	
5.22. La subsidence thermique de la lithosphère – Du volcan à l'atoll .....	167	par les roches métamorphiques.....	180
5.23. Couche D'' et origine des points chauds primaires – Les laves OIB.....	168	5.36. Conséquences thermiques de la collision : le magmatisme .....	181
5.24. La diversité des points chauds .....	169	5.37. Un exemple de cycle chimique – Le cycle du carbone.....	182
5.25. Les caractéristiques morphologiques et mécaniques		5.38. Les cycles interne et externe des eaux terrestres.....	184
d'une zone de subduction.....	170	5.39. La Terre actuelle, machine thermique .....	185
5.26. Le métamorphisme et la métasomatose en zone de subduction.....	171	5.40. Origine des magmas en fonction du contexte géodynamique: un bilan..	186
5.27. Le magmatisme des zones de subduction .....	172	5.41. La carte de l'âge des fonds océaniques.....	187
5.28. La diversité des zones de subduction .....	173	5.42. Les faciès et séries métamorphiques .....	188
5.29. L'obduction: exemple de l'ophiolite d'Oman .....	174	5.43. Les différents types de volcans: un bilan.....	189
5.30. La collision continentale .....	175	5.44. La Terre en douze minéraux .....	190
5.31. Tectonique tangentielle, nappes de charriage, fenêtres et klippen.....	176	5.45. Les cycles interne et externe des roches: un bilan.....	191
5.32. Tectonique décrochante – Les zones de cisaillement.....	177	5.46. Le cycle de Wilson ou la « valse des continents » .....	192
5.33. Les conséquences gravitaires de la collision.....	178	5.47. La formation de la croûte continentale.....	194
5.34. Les conséquences thermiques de la collision		5.48. Une tectonique archéenne particulière: la sagduction .....	195
– Métamorphismes PI-TI puis HT-PI .....	179		

## Partie 6

### La Terre, une planète habitée par l'Homme

6.1. Apparition et migrations du genre <i>Homo</i> .....	198	6.10. Un exemple de ressource naturelle formée	
6.2. Les cyclones, des événements météorologiques majeurs .....	200	par des processus magmatiques .....	209
6.3. Des événements extrêmes en France – Les épisodes cévenols		6.11. Un exemple de ressource naturelle formée	
et méditerranéens .....	201	par des processus hydrothermaux océaniques.....	210
6.4. Les glissements de terrain, un exemple de mouvement de terrain.....	202	6.12. Ressource énergétique fossile: matière organique et préservation.....	211
6.5. Les risques sismiques.....	203	6.13. Maturation de la matière organique: le pétrole et le gaz.....	212
6.6. Les dynamismes éruptifs.....	204	6.14. Maturation de la matière organique: le charbon .....	213
6.7. Les risques naturels et la géodynamique terrestre .....	206	6.15. Ressource énergétique renouvelable: la géothermie.....	214
6.8. Le facteur anthropique dans le risque naturel:		<b>Réponses</b> .....	215
exemple du barrage de Malpasset .....	207	<b>Index</b> .....	222
6.9. Un exemple de ressource naturelle formée			
par des processus sédimentaires.....	208		

# INTRODUCTION

*En hommage à Jean-Michel Caron.*

Les géosciences, anciennement appelées géologie, visent à comprendre l'origine et le fonctionnement de notre planète: la Terre. Celle-ci fascine depuis la plus lointaine Antiquité (voir par exemple les travaux d'Ératosthène, qui a réalisé la première estimation du périmètre de la Terre au III<sup>e</sup> siècle avant J.-C.). Aujourd'hui, l'aventure spatiale et ses multiples applications ainsi que d'autres techniques récentes (ex.: GPS, système altimétrique DORIS, presses multi-enclumes...) permettent encore des avancées majeures dans la compréhension des processus animant notre planète vivante, et cela à toutes les échelles. Les géosciences intègrent également le facteur temps, de la mesure de la durée des phénomènes géologiques à celle des étapes de la formation de la Terre. Elles s'intéressent ainsi à des phénomènes s'exprimant de l'échelle de quelques années (ex.: phénomène El Niño) à l'échelle de plusieurs milliards d'années (ex.: différenciation terrestre).

En appliquant le principe (que l'on prête à Bonaparte) selon lequel *un bon croquis vaut mieux qu'un long discours*, cet ouvrage propose une expérience d'apprentissage active: colorier les dessins proposés vous aidera à mémoriser durablement la forme et l'emplacement de chaque élément illustré, écrire les légendes des dessins dans les espaces prévus et les comparer avec les réponses en fin d'ouvrage vous permettra de retenir les termes scientifiques (avec la bonne orthographe !), et ce,

beaucoup plus durablement qu'en regardant simplement un schéma dans un manuel. La connexion unique entre la main, les yeux et l'esprit fait de ce livre de géologie à colorier un outil d'étude à la fois efficace et ludique.

Cet ouvrage s'adresse d'abord aux étudiants de Licence et des classes préparatoires BCPST qui souhaitent consolider leurs savoirs. Il aidera aussi les candidats aux concours du CAPES et de l'Agrégation en leur suggérant des schémas-clés. Enfin, il intègre des éléments des nouveaux programmes de Sciences et de la Vie et de la Terre (SVT) et d'Enseignement Scientifique mis en place en Seconde, Première et Terminale depuis 2019. Il s'adresse à ce titre également aux enseignants du secondaire.

## Comment ce livre est organisé

Comprenant plus de 200 dessins, ce livre est divisé en six parties. Il commence par resituer la place de la Terre dans l'Univers, puis il décrit la dynamique actuelle de ses enveloppes fluides externes. Poursuivant par l'étude de la forme et des reliefs de la Terre solide, il dévoile la Terre profonde inaccessible et sa dynamique. Enfin, sont traitées les interactions entre l'Homme et la planète. Chaque partie illustre les notions fondamentales à acquérir au niveau Licence. Lorsque cela s'y prête, des schémas-bilans plus complexes sont proposés en fin de partie. En parcourant ce livre, vous gagnerez donc à

la fois une compréhension claire des géosciences et une appréciation plus générale de la planète Terre.

## Comment utiliser ce livre

Ce livre est conçu pour aider les étudiants et les professionnels à réviser les structures et processus essentiels en géosciences. Soulignons bien ici que cet ouvrage est un outil de révisions, qui doit bien sûr être utilisé en complément d'autres ressources détaillant l'ensemble des notions scientifiques plus en profondeur (cours de Licence, livres classiques tels que *Éléments de Géologie*, Dunod 2021...).

Les traits de légende pointent chaque notion importante à intégrer. La majorité des légendes à compléter sont fournies dans le texte d'accompagnement des dessins (ou dans les autres dessins vers lesquels le lecteur est renvoyé). Néanmoins, ce livre étant un outil de révisions, le lecteur devra parfois faire également appel à ses connaissances propres (ex.: appellations géographiques).

### Choix des couleurs

Vous obtiendrez un meilleur rendu visuel en utilisant pour vos coloriages des crayons de couleur plutôt que des feutres et en variant les tons sombres et clairs. Dans la mesure du possible, utilisez la même couleur pour les objets identiques (ex.: manteau en vert, croûte en marron, hydrosphère en bleu...), de sorte qu'une fois tous les dessins terminés, vous puissiez les utiliser comme références visuelles.

En géosciences, des couleurs conventionnelles internationales s'appliquent aux grandes périodes géologiques: jaune (Néogène), orange (Paléogène), vert (Crétacé), bleu (Jurassique), violet (Trias), etc. Des nuances de couleurs caractéristiques des séries

et des étages géologiques existent également. Ainsi, plus la couleur est sombre, plus l'âge est ancien: vert clair (Crétacé supérieur), vert foncé (Crétacé inférieur). Nous vous invitons donc à vous référer à la **Charte Chronostratigraphique Internationale** qui

figure en intérieur de couverture et à conserver cette cohérence de couleurs pour les dessins illustrant des âges géologiques.

Par ailleurs, un rappel des unités figure sous forme de tableaux en page de couverture.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier ici un certain nombre de collègues géologues pour leur aide précieuse sur cet ouvrage, en particulier, Annick Chauvin pour la planétologie et la sismologie, Philippe Steer pour la sismologie, Olivier Dauteuil pour la géodésie, Pierre Gautier pour la rhéologie et la tectonique, Michel Ballèvre pour le métamorphisme et la tectonique, Didier Néraudeau pour la paléontologie, Erwan Martin pour le volcanisme, Cécile Robin. Nous remercions également Céliane Barbier et

Jean-Philippe Tanguy, enseignants du second degré, pour leur investissement et leurs avis éclairés. Nous remercions également les relecteurs plus ponctuels, mais dont les conseils ont été tout aussi précieux: Marine Roy, Lucie Pihuit, Rémi Coltat, Aurélie Wahl et Nicolas Saspiturry. Enfin, nous sommes particulièrement reconnaissants à Yves Lagabrielle sans qui ce projet n'aurait pas vu le jour, et qui a grandement contribué à améliorer les versions préliminaires de ce manuscrit.

Les schémas présentés dans cet ouvrage sont pour partie issus de *Éléments de Géologie*, dont les auteurs nous ont gracieusement permis l'utilisation: toute notre gratitude va également vers eux. Nous tenons à remercier Vanessa Beunèche pour son travail minutieux. Nous remercions également Laëtitia Héryn qui nous a accompagnés tout au long de l'écriture de cet ouvrage.

## **Partie 1**

# **LA TERRE : UNE PLANÈTE DANS L'UNIVERS**



## 1.1. L'ARCHITECTURE DE L'UNIVERS

Notre Univers peut être décrit par différents systèmes hiérarchiques (A, B, C, D, E ci-contre). Ainsi, N. Copernic (vers 1513) intégra notre planète Terre et son satellite (A), la Lune, dans un système centré sur le Soleil autour duquel orbitent huit planètes et deux ceintures d'astéroïdes (**Système solaire** (B), © 1.2). De même, le système **ε-Eridani** est formé d'une étoile (située à 10,5 a.l.\* du Soleil) autour de laquelle deux **exoplanètes** (planètes situées en dehors du Système solaire) et deux ceintures d'astéroïdes sont en orbite. Dès 1750, T. Wright proposa une organisation en ensembles appelés **galaxies**. La galaxie à laquelle notre étoile, le Soleil, appartient s'appelle la **Voie lactée** (C). Les étoiles

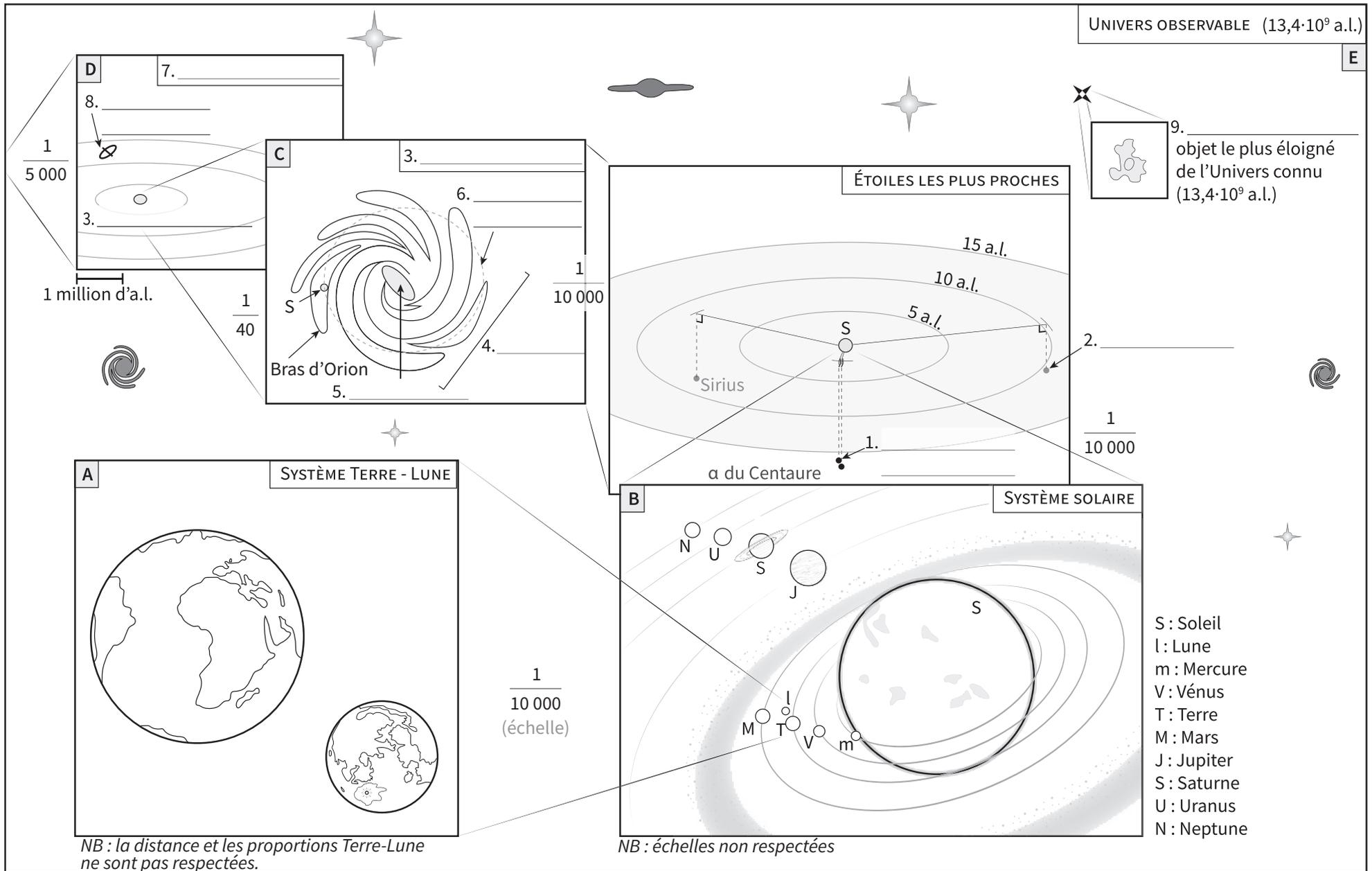
y sont très éloignées les unes des autres : Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil est située à 4,244 a.l. La Voie lactée a la forme d'un disque en rotation autour d'un bulbe central. Dans son plan équatorial, la majeure partie des étoiles s'assemblent en grands bras spiraux. Dans le **bras d'Orion**, le Soleil occupe une position médiane. Il réalise une révolution complète autour du bulbe galactique en une **année-galactique** (environ 240 Ma). On estime qu'il existe plus de 100 milliards de galaxies au sein de l'Univers, séparées par des distances moyennes de 1 million d'a.l. Ces galaxies présentent des formes variées (spirales, spirales barrées ou elliptiques).

Un degré supérieur de hiérarchisation de l'Univers correspond au regroupement des galaxies en structures plus grandes appelées **amas de galaxies** (D). Ainsi, la Voie lactée est associée à une vingtaine de galaxies (dont la galaxie d'Andromède), formant l'**Amas local**. Son rayon est d'environ 5 millions d'a.l.

Un dernier niveau de hiérarchisation est proposé par certains chercheurs : le **superamas**, regroupant des amas de galaxies. Notre Amas local appartient au superamas **Laniakea**. Les objets de l'Univers les plus éloignés actuellement observés sont situés à **13,4 · 10<sup>9</sup> a.l.** de la Terre (galaxie GN-z11).

---

\* Voir les tableaux des unités en page de couverture.





## 1.2. L'ORGANISATION DU SYSTÈME SOLAIRE

Les limites du Système solaire sont actuellement discutées (© 1.6) : limite externe du **nuage de Oort** (limite de la **zone d'influence gravitationnelle du Soleil** située entre 50 000 et 100 000 au) ou **héliopause** (limite de l'**héliosphère** distante de « seulement » 122 au : © 1.3). L'Union Astronomique Internationale définit depuis 2006 deux grandes catégories d'objets dans le Système solaire :

### 1 Les corps en rotation autour du Soleil

#### a. Les planètes

Elles répondent à trois critères :

1. elles sont **en orbite autour d'une étoile** ;
2. elles possèdent une masse suffisante pour que leur gravité propre les maintienne en **équilibre hydrostatique**, d'où leur forme quasi sphérique ;
3. elles ont éliminé tout **corps « rival »** se déplaçant sur leur orbite ou sur une orbite proche. Le Système solaire comporte huit planètes :  **Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune**.

#### b. Les planètes naines

Elles ne remplissent pas le troisième critère définissant les planètes. La plus célèbre est **Pluton**, autrefois considérée comme une planète. On peut également citer ses « voisins » **Hauméa** et **Makémaké**, également objets transneptuniens de la **ceinture de Kuiper**, ainsi que **Cérés** (situé entre Mars et Jupiter).

#### c. Les petits corps

Ils rassemblent tous les autres corps célestes en orbite autour du Soleil. Ce sont par exemple :

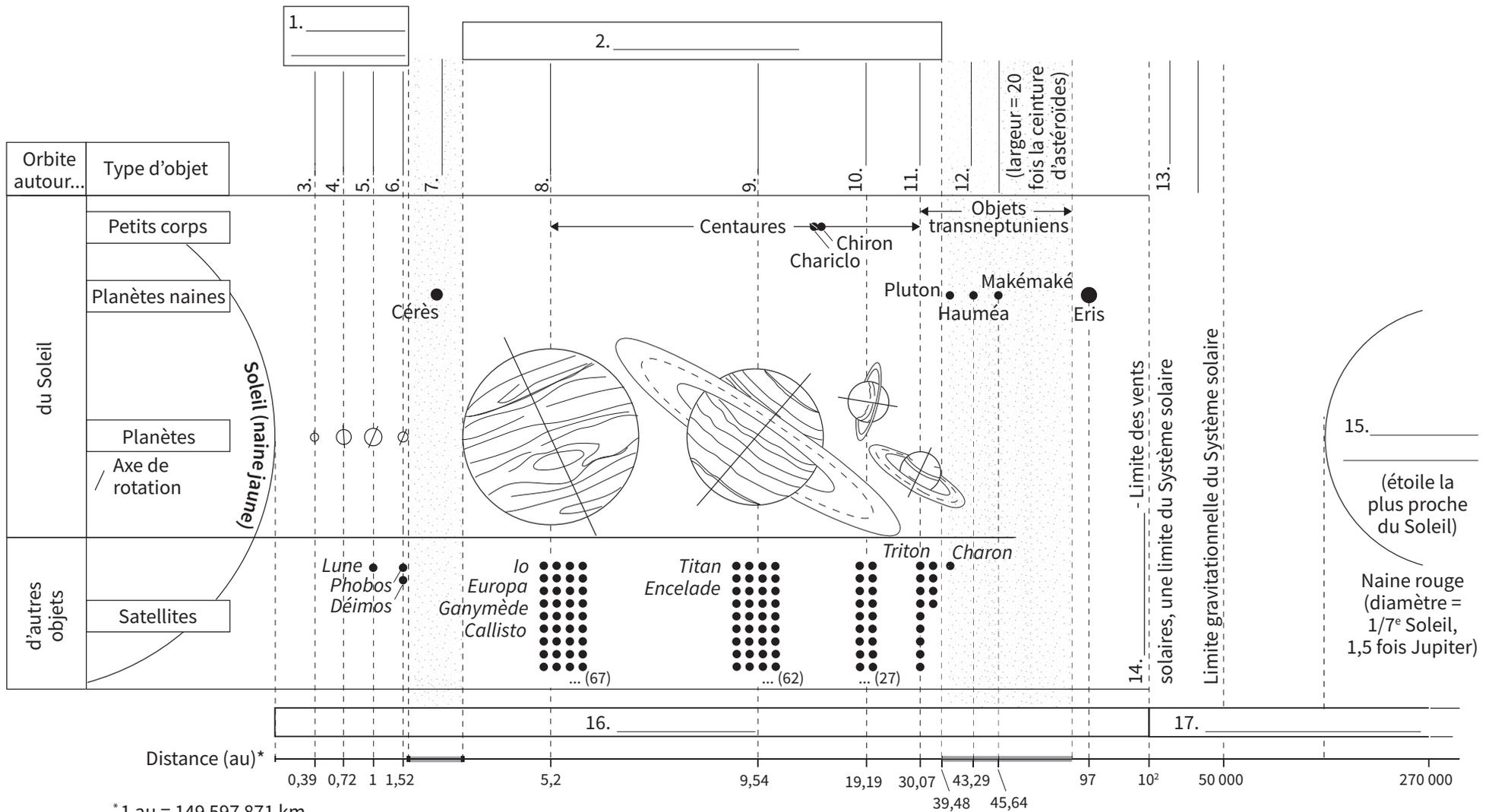
- les **comètes**, formées de roches et de glace et avec une activité cométaire, c'est-à-dire développant autour d'un noyau solide une faible atmosphère due à la sublimation des éléments glacés contenus dans le noyau à l'approche du Soleil (ex. : comètes de West et de Halley...);
- les **astéroïdes**, formés de roche et de glace et sans activité cométaire. Ils sont principalement localisés au sein de la **ceinture d'astéroïdes** (ex. : Éros, Hungaria...);

- les **centaures**, petits corps glacés gravitant entre Jupiter et Neptune. Parmi eux, citons Chariclo ou Chiron.

### 2 Les satellites, corps en rotation autour d'autres objets du Système solaire

Ils gravitent autour de planètes (la Lune autour de la Terre, Phobos et Deimos autour de Mars...), de planètes naines (Charon autour de Pluton) ou de petits corps (anneaux autour du centaure Chariclo).

L'organisation ici décrite dans le Système solaire commence à être identifiée ailleurs dans la Voie lactée. Ainsi, depuis les années 2000, deux exoplanètes et deux ceintures d'astéroïdes ont déjà été découvertes en rotation autour de l'**étoile ε-Eridani** (© 1.1).



\* 1 au = 149 597 871 km  
(unité astronomique, distance Terre - Soleil)

Remarque : seule l'échelle de taille des planètes est respectée

## 1.3. LA STRUCTURE ET LA DYNAMIQUE ACTUELLE DU SOLEIL

Le Soleil représente 99,854% de la masse du Système solaire. Il est en **équilibre hydrostatique**, c'est-à-dire qu'en tout point le bilan des forces (gravitationnelle, axifuge, de pression...) est nul. On calcule ainsi une surface d'équilibre, séparant les enveloppes internes et externes solaires et correspondant à un rayon solaire  $R_s$  environ 110 fois supérieur au rayon terrestre.

Voici les principales caractéristiques des enveloppes qui constituent la structure solaire.

### 1 Les enveloppes internes

Elles sont constituées essentiellement d'hélium (He) et d'hydrogène (H), et caractérisées par des températures et pressions si fortes que la matière est sous forme de **plasma** chaud (électrons et protons).

#### a. Noyau (rayon $0,3 R_s$ )

La température, estimée à  $15,5 \cdot 10^6$  K, permet aux noyaux d'hydrogène d'atteindre des vitesses cinétiques suffisantes pour fusionner et former des noyaux d'hélium. Ces réactions de **fusion thermonucléaire** impliquent l'hydrogène  $^1\text{H}$ , le deutérium D (ou  $^2\text{H}$ ) et les héliums  $^3\text{He}$  et  $^4\text{He}$ . Elles engendrent des neutrinos  $\nu_0$  (2%) et des photons  $\gamma$  (98%).

Les neutrinos sont expulsés du Soleil en deux secondes, alors que les photons atteignent les enveloppes externes après plusieurs millions d'années en raison de la forte densité du plasma solaire.

#### b. Zone radiative (limite externe à $0,7 R_s$ du centre de l'étoile)

Entre  $8 \cdot 10^6$  et  $2 \cdot 10^6$  K, le transfert de l'énergie photonique s'y fait par **rayonnement** (© 5.7).

#### c. Zone convective (limitée par la surface externe de l'étoile)

Le transfert de l'énergie photonique s'y fait par **convection** (© 5.7). Cette zone est le lieu d'origine du **champ magnétique solaire**.

Puisque les photons émis au niveau du noyau interagissent avec la matière, l'intérieur du Soleil est opaque et invisible. Seule sa couche superficielle (enveloppes externes) est visible. La limite des domaines invisible et visible est assimilée à la limite des enveloppes internes et externes.

### 2 Les enveloppes externes

#### a. Photosphère (épaisseur de quelques centaines de kilomètres)

C'est la zone d'émission des photons après leur traversée des enveloppes internes. Sa température est

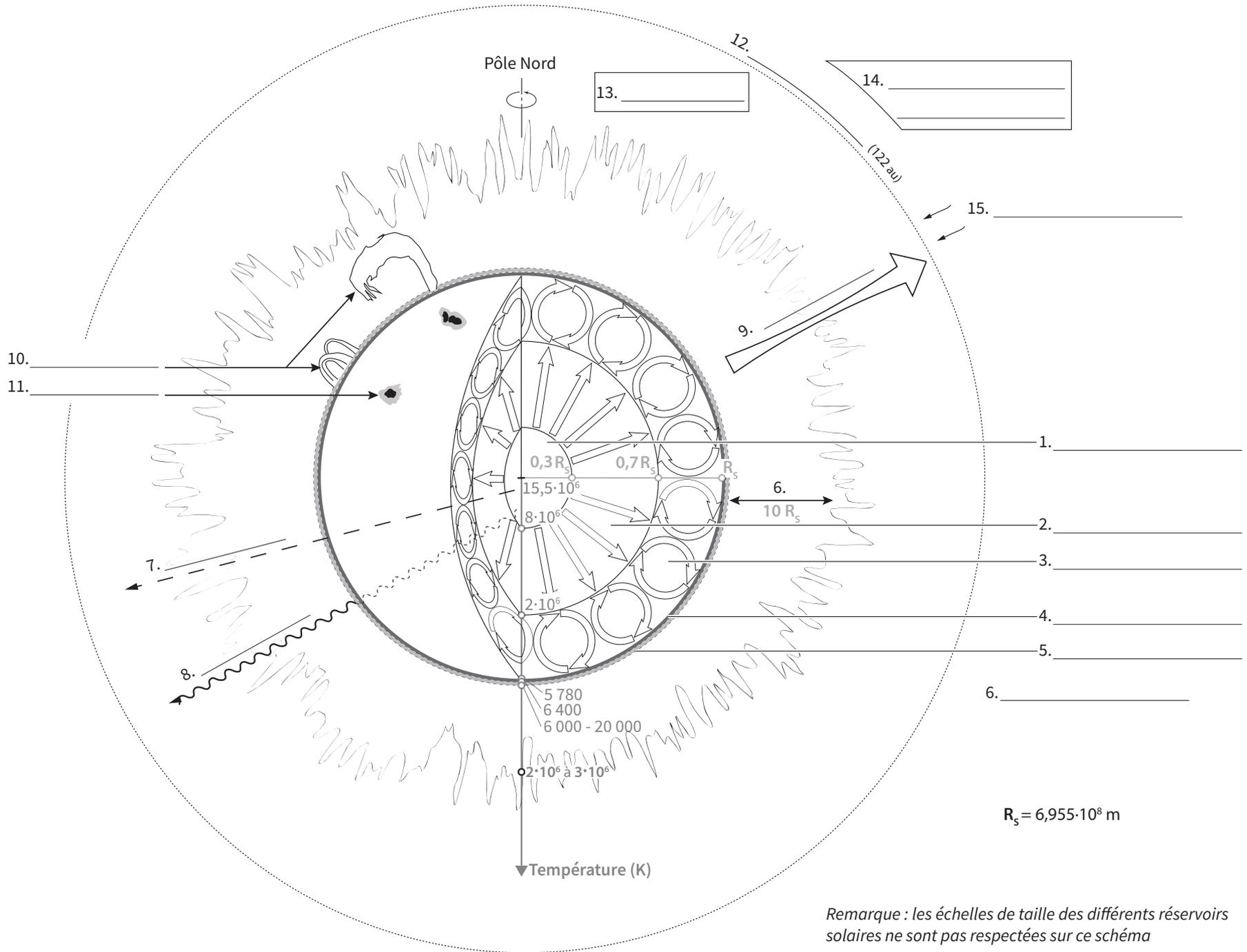
de l'ordre de 6000 K. Des **taches sombres** sur la surface solaire, plus froides (3500 K), sont liées au champ magnétique solaire (0,3 T, soit 10 000 fois la valeur terrestre). Son plasma peu dense peut être projeté sur plusieurs milliers de kilomètres formant des **protubérances**.

#### b. Chromosphère (épaisseur d'environ 3000 km)

Visible lors d'une éclipse totale de Soleil, sa température atteint 20 000 K.

#### c. Couronne solaire (épaisseur allant jusqu'à $10 R_s$ )

Elle est formée d'un plasma très chaud (atteignant  $2$  à  $3 \cdot 10^6$  K), ce qui permet à des particules, essentiellement des protons et des électrons, d'atteindre une vitesse d'agitation supérieure à la vitesse de libération solaire et de s'échapper sous forme de **vent solaire**. L'**héliopause** sépare l'**héliosphère**, zone d'influence du vent solaire, et le **milieu interstellaire**, parcouru par le **flux interstellaire** (© 1.6).





## 1.4. LES PLANÈTES GÉANTES ET LES PLANÈTES TELLURIQUES

Lors de la formation du Système solaire il y a environ 4,56 Ga (© 1.8), l'**accrétion** au sein du disque circumstellaire concentre les parties rocheuses des planètes. Chaque planète baigne initialement dans une **atmosphère primordiale** dont la composition est proche de celle de la nébuleuse primordiale (H + He<sub>2</sub> à 99%).

Puis une proportion plus ou moins importante des éléments légers atmosphériques est chassée vers les parties externes du disque protosolaire selon :

1. la taille des **noyaux rocheux** formés, et donc l'intensité du **champ de gravitation** (© 3.2);
2. l'intensité de l'action des **vents solaires** (© 1.3), parfois limitée par l'intensité d'un **champ magnétique** planétaire;

3. la température surfacique liée à la distance au Soleil.

Les atmosphères primordiales des planètes telluriques sont alors presque entièrement balayées pour s'accumuler autour des planètes géantes, formant leurs atmosphères actuelles.

Au niveau des planètes telluriques, une phase de différenciation (volcanisme intense) est responsable de la mise en place d'une **atmosphère secondaire**, toujours en place autour de Mars et Vénus. L'**atmosphère terrestre** connaît de plus une évolution spécifique aboutissant à l'**atmosphère moderne actuelle** (© 2.15). Quant à Mercure, on a longtemps pensé que, du fait de sa proximité avec le Soleil et

de sa petite taille, donc de sa très faible gravité, elle était dépourvue d'atmosphère. Les sondes *Mariner 10* (1974) et *Messenger* (2011) ont pourtant révélé l'existence d'une atmosphère ténue ( $< 10^{-6}$  Pa alors que l'atmosphère terrestre est de l'ordre  $10^6$  Pa) formée d'H et He<sub>2</sub> (résidus de l'atmosphère primordiale). Le sodium Na, étonnamment abondant, proviendrait de la radioactivité des éléments de la croûte mercurienne. L'eau H<sub>2</sub>O, présente en traces dans cette atmosphère, et le dioxygène O<sub>2</sub> résulteraient de réactions chimiques entre l'hydrogène issu du vent solaire et l'oxygène contenu dans certains minéraux de la surface de Mercure.