

**TOUT EN  
FICHES**

**MÉMO VISUEL DE  
GÉOLOGIE**

**3<sup>e</sup> ÉDITION**

**Yves Lagabrielle**

Directeur de recherche CNRS à l'UMR 6118 Géosciences-Rennes, université de Rennes 1

**René Maury**

Professeur émérite à l'université de Bretagne occidentale, Brest

**Maurice Renard**

Professeur émérite à l'ISTEP, Faculté des sciences et ingénierie Pierre et Marie Curie,  
Sorbonne Université, Paris

**DUNOD**

Illustration de couverture : © howamo-istock. com

Uniformisation des illustrations et mise en page des fiches : Bernadette Coléno

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

© Dunod, 2013, 2017, 2022

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

ISBN 978-2-10-084279-7

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

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

# Table des matières

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| Avant-propos                 | XI  |
| Comment utiliser cet ouvrage | XII |

## Partie 1 La Terre, une planète dans l'Univers

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Fiche 1  | Le système solaire   | 2  |
| Fiche 2  | Le Soleil  | 3  |
| Fiche 3  | Accrétion planétaire et différenciation des assises terrestres | 4  |
| Fiche 4  | Les météorites   | 5  |
| Fiche 5  | Cratères d'impact et impactites                                | 6  |
| Fiche 6  | La géologie de Mars  | 7  |
| Fiche 7  | La Terre à l'Hadéen  | 8  |
| Fiche 8  | Les magmatismes archéens                                       | 9  |
| Fiche 9  | Les cratons et la croissance continentale                      | 10 |
| Fiche 10 | Les modèles de croissance des continents                       | 11 |
| Fiche 11 | Évolution de la croûte continentale                            | 12 |

## Partie 2 Hydrosphère et atmosphère terrestres

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Fiche 12 | L'hydrosphère et les propriétés de l'eau                               | 14 |
| Fiche 13 | L'enveloppe gazeuse : l'atmosphère terrestre                           | 15 |
| Fiche 14 | Le bilan thermique de la Terre   | 16 |
| Fiche 15 | Les déséquilibres thermiques régionaux                                 | 17 |
| Fiche 16 | Circulations atmosphériques et zonation climatique terrestre           | 18 |
| Fiche 17 | Un dispositif climatique régional : la mousson                         | 19 |
| Fiche 18 | Les saisons et leur durée  | 20 |
| Fiche 19 | Propriétés et composition de l'eau de mer, origine de la salinité      | 21 |
| Fiche 20 | Les circulations océaniques (1) : spirale d'Ekman et upwellings        | 22 |
| Fiche 21 | Les circulations océaniques (2) : courants de surface et tapis roulant | 23 |
| Fiche 22 | <i>El Niño</i> : l'oscillation australe                                | 24 |
| Fiche 23 | La répartition des températures dans l'océan                           | 25 |

## Table des matières

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Fiche 24 | La répartition des salinités dans l'océan  | 26 |
| Fiche 25 | Les gaz dissous dans l'eau de mer et la ZOM  | 27 |
| Fiche 26 | Circulation thermo-haline, circulation haline  | 28 |
| Fiche 27 | Les isotopes stables de l'oxygène : comportements dans les eaux et les glaces                | 29 |
| Fiche 28 | Les isotopes stables de l'oxygène dans les carbonates : un paléothermomètre ambigu           | 30 |
| Fiche 29 | Données isotopiques sur le climat et la paléocéanographie du Crétacé sup à l'actuel          | 31 |
| Fiche 30 | La théorie astronomique du climat (théorie de Milankovitch)                                  | 32 |
| Fiche 31 | La stratigraphie isotopique du Quaternaire : les stades isotopiques                          | 33 |
| Fiche 32 | Fluctuations du rapport isotopique de l'oxygène et théorie de Milankovitch                   | 34 |
| Fiche 33 | Les rapports isotopiques de l'oxygène dans les glaces des calottes polaires                  | 35 |
| Fiche 34 | Les contrôles du climat terrestre  | 36 |
| Fiche 35 | Les fluctuations climatiques de second ordre   | 37 |
| Fiche 36 | Les fluctuations climatiques de 3 <sup>e</sup> ordre : la glaciation du Würm                 | 38 |
| Fiche 37 | Les fluctuations climatiques de 3 <sup>e</sup> ordre : les événements hautes fréquences      | 39 |
| Fiche 38 | Les fluctuations climatiques de 4 <sup>e</sup> ordre : les événements rapides                | 40 |
| Fiche 39 | Évolution des températures moyennes terrestres depuis le Mésozoïque                          | 41 |
| Fiche 40 | Prévisions sur l'évolution du climat terrestre   | 42 |
| Fiche 41 | Les géographies prédictives pour des taux de CO <sub>2</sub> double ou quadruple de l'actuel | 43 |

### Partie 3 Sédimentologie

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Fiche 42 | La « machine » sédimentaire terrestre  | 46 |
| Fiche 43 | Les processus d'altération – Diagramme de Goldschmidt                                | 47 |
| Fiche 44 | Les argiles  | 48 |
| Fiche 45 | Altérations et climats   | 49 |
| Fiche 46 | Les profils d'altération : biostase et rhexistasie                                   | 50 |
| Fiche 47 | Altérations et apports particuliers à l'océan  | 51 |
| Fiche 48 | Transport et sédimentation des particules  | 52 |
| Fiche 49 | Structures sédimentaires associées à un courant unidirectionnel                      | 53 |
| Fiche 50 | Structures sédimentaires liées aux vagues. Zonation hydrodynamique de la plate-forme | 54 |
| Fiche 51 | Structures et figures sédimentaires (marées, courants et bioturbation)               | 55 |
| Fiche 52 | Classification granulométrique des roches sédimentaires                              | 56 |
| Fiche 53 | Sédimentation et environnements fluviaux   | 57 |
| Fiche 54 | Le domaine fluvio-marin : estuaires et deltas  | 58 |
| Fiche 55 | Sédimentation chimique : minéraux et roches évaporitiques                            | 59 |

# Table des matières

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Fiche 56 | Les environnements océaniques et les différents types de plates-formes              | 60 |
| Fiche 57 | La précipitation des carbonates en milieu marin                                     | 61 |
| Fiche 58 | La minéralogie des carbonates sédimentaires   | 62 |
| Fiche 59 | Classification des roches carbonatées : classification de Folk                      | 63 |
| Fiche 60 | Classification des roches carbonatées : classification de Dunham                    | 64 |
| Fiche 61 | Les producteurs carbonatés néritiques :<br>les associations Heterozoan et Photozoan | 65 |
| Fiche 62 | Récifs et sédimentation récifale  | 66 |
| Fiche 63 | Les modèles de faciès des plates-formes   | 67 |
| Fiche 64 | Un exemple actuel de rampe carbonatée : le sud du Golfe Persique                    | 68 |
| Fiche 65 | Un exemple actuel de haut-fond carbonaté : le Grand Banc des Bahamas                | 69 |
| Fiche 66 | La sédimentation pélagique : lysocline et CCD                                       | 70 |
| Fiche 67 | Les producteurs de minéraux biogènes du domaine pélagique                           | 71 |
| Fiche 68 | Répartition des différents types de sédiments dans l'océan actuel                   | 72 |
| Fiche 69 | Le contrôle climatique de la sédimentation pélagique                                | 73 |
| Fiche 70 | Sédimentation océanique, mobilité lithosphérique et fluctuations de la CCD          | 74 |
| Fiche 71 | Bilan de la sédimentation carbonatée marine   | 75 |
| Fiche 72 | La diagenèse  | 76 |
| Fiche 73 | Dolomies et dolomitisation  | 77 |
| Fiche 74 | L'environnement de la sédimentation gravitaire                                      | 78 |
| Fiche 75 | Les courants de turbidité   | 79 |
| Fiche 76 | Les séquences turbiditiques : Bouma et Lowe   | 80 |
| Fiche 77 | Le modèle du cône sous-marin  | 81 |
| Fiche 78 | Les faciès gravitaires de Mutti   | 82 |

## Partie 4 Stratigraphie

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Fiche 79 | Principes de la stratigraphie : notions de biozone et chronozone | 84 |
| Fiche 80 | La radiochronologie  | 85 |
| Fiche 81 | La chimiostratigraphie   | 86 |
| Fiche 82 | Le rapport isotopique du carbone                                 | 87 |
| Fiche 83 | La cyclostratigraphie  | 88 |
| Fiche 84 | La stratigraphie séquentielle                                    | 89 |
| Fiche 85 | Les fluctuations eustatiques : La courbe de Vail                 | 90 |
| Fiche 86 | L'échelle stratigraphique internationale (1)                     | 91 |
| Fiche 87 | L'échelle stratigraphique internationale (2)                     | 92 |
| Fiche 88 | Les grandes crises du monde vivant : la crise Crétacé/Tertiaire  | 93 |
| Fiche 89 | Quelques fossiles stratigraphiques du Primaire                   | 94 |
| Fiche 90 | Quelques fossiles stratigraphiques du Méso-Cénozoïque            | 95 |

# Table des matières

|          |                            |    |
|----------|----------------------------|----|
| Fiche 91 | L'évolution de l'Homme (1) | 96 |
| Fiche 92 | L'évolution de l'Homme (2) | 97 |
| Fiche 93 | L'origine de la vie        | 98 |

## Partie 5 Structure de la Terre et géodynamique globale

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Fiche 94  | L'attraction universelle et la masse de la Terre                        | 100 |
| Fiche 95  | Les formes de la Terre  | 101 |
| Fiche 96  | Représenter le globe : les projections                                  | 102 |
| Fiche 97  | Densité et composition chimique des enveloppes de la Terre              | 103 |
| Fiche 98  | Séismes et ondes sismiques  | 104 |
| Fiche 99  | Enregistrement et localisation des séismes                              | 105 |
| Fiche 100 | Trajet et vitesse des rais sismiques                                    | 106 |
| Fiche 101 | Propagation des ondes sismiques dans le globe terrestre                 | 107 |
| Fiche 102 | Les apports de la sismologie, un modèle de Terre sphérique              | 108 |
| Fiche 103 | La lithosphère et la zone à moindre vitesse                             | 109 |
| Fiche 104 | Lithosphère et asthénosphère  | 110 |
| Fiche 105 | Dynamique de la lithosphère   | 111 |
| Fiche 106 | Le cycle de la lithosphère océanique                                    | 112 |
| Fiche 107 | La croûte terrestre : continents et océans                              | 113 |
| Fiche 108 | Le champ magnétique terrestre   | 114 |
| Fiche 109 | Le noyau terrestre. La fossilisation du champ magnétique                | 115 |
| Fiche 110 | Le paléomagnétisme et la mobilité continentale                          | 116 |
| Fiche 111 | Les inversions du champ magnétique terrestre, les anomalies magnétiques | 117 |
| Fiche 112 | Anomalies magnétiques : l'âge de la lithosphère océanique               | 118 |
| Fiche 113 | Carte de l'âge des fonds océaniques                                     | 119 |
| Fiche 114 | Le champ de pesanteur terrestre : la gravimétrie                        | 120 |
| Fiche 115 | L'isostasie   | 121 |
| Fiche 116 | Le champ de pesanteur terrestre, le géoïde                              | 122 |
| Fiche 117 | Le flux thermique et la convection du manteau                           | 123 |
| Fiche 118 | Les modèles de convection du manteau                                    | 124 |
| Fiche 119 | Les panaches mantelliques et les points chauds                          | 125 |
| Fiche 120 | Les panaches et la convection du manteau inférieur                      | 126 |
| Fiche 121 | La magnitude des séismes  | 127 |
| Fiche 122 | Les mécanismes au foyer des séismes                                     | 128 |
| Fiche 123 | Les séismes et la géodynamique  | 129 |
| Fiche 124 | La sismicité mondiale : limites des plaques lithosphériques             | 130 |
| Fiche 125 | Les modèles de plaques lithosphériques                                  | 131 |
| Fiche 126 | Principe de la tectonique des plaques                                   | 132 |

# Table des matières

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Fiche 127 | Cinématique des plaques : exemples                                 | 133 |
| Fiche 128 | Les mouvements absolus des plaques                                 | 134 |
| Fiche 129 | Les satellites et la géodynamique                                  | 135 |
| Fiche 130 | Tectonique globale et production de nouvelle lithosphère océanique | 136 |

## Partie 6 La déformation de la lithosphère

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Fiche 131 | Comportement des roches durant la déformation : la rhéologie | 138 |
| Fiche 132 | Contraintes et déformation                                   | 139 |
| Fiche 133 | Tectonique souple : les plis                                 | 140 |
| Fiche 134 | Les plissements : signification dynamique                    | 141 |
| Fiche 135 | Tectonique cassante : les failles                            | 142 |
| Fiche 136 | Schistosité et foliation                                     | 143 |
| Fiche 137 | La microtectonique : les indicateurs cinématiques            | 144 |
| Fiche 138 | Plis et failles : la croissance des prismes tectoniques      | 145 |
| Fiche 139 | Rhéologie de la lithosphère continentale                     | 146 |
| Fiche 140 | Les nappes de charriage                                      | 147 |
| Fiche 141 | Les rifts continentaux                                       | 148 |
| Fiche 142 | Les chaînes de montagne                                      | 149 |
| Fiche 143 | L'obduction : la nappe de Semail (Oman)                      | 150 |
| Fiche 144 | La Cordillère des Andes                                      | 151 |
| Fiche 145 | Des Alpes à l'Himalaya                                       | 152 |
| Fiche 146 | Les Alpes occidentales                                       | 153 |
| Fiche 147 | Les Alpes : histoire d'un océan                              | 154 |
| Fiche 148 | Les Pyrénées   | 155 |
| Fiche 149 | La chaîne varisque en Europe                                 | 156 |
| Fiche 150 | Le modelé des paysages                                       | 157 |
| Fiche 151 | Lithologie et climat : facteurs de modelé des paysages       | 158 |
| Fiche 152 | Tectonique et paysages : les plis                            | 159 |
| Fiche 153 | Tectonique et paysages : les failles actives                 | 160 |
| Fiche 154 | Tectonique et sédimentation : flyschs et molasses            | 161 |
| Fiche 155 | Les bassins sédimentaires                                    | 162 |

## Partie 7 La géodynamique des océans

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Fiche 156 | Les outils de l'exploration océanique                               | 164 |
| Fiche 157 | Morphologie des fonds océaniques : marges continentales et dorsales | 165 |
| Fiche 158 | Genèse des marges passives  | 166 |
| Fiche 159 | Les marges passives volcaniques et non volcaniques                  | 167 |

## Table des matières

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Fiche 160 | Les marges actives   | 168 |
| Fiche 161 | La subduction océanique : processus tectoniques            | 169 |
| Fiche 162 | Subduction et bassins arrière-arcs                         | 170 |
| Fiche 163 | L'accrétion océanique : les dorsales                       | 171 |
| Fiche 164 | Les dorsales rapides                                       | 172 |
| Fiche 165 | Les dorsales lentes  | 173 |
| Fiche 166 | La segmentation des dorsales et les failles transformantes | 174 |
| Fiche 167 | Les océans Atlantique et Indien                            | 175 |
| Fiche 168 | L'océan Pacifique  | 176 |
| Fiche 169 | Histoire de l'océan mondial depuis 180 Ma                  | 177 |
| Fiche 170 | Tectonique globale et eustatisme                           | 178 |

### Partie 8 Roches et minéraux endogènes

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Fiche 171 | Rayons ioniques et structures minérales                    | 180 |
| Fiche 172 | Éléments compatibles et incompatibles                      | 181 |
| Fiche 173 | Classification structurale des silicates                   | 182 |
| Fiche 174 | Les principaux silicates                                   | 183 |
| Fiche 175 | Les minéraux non silicatés                                 | 184 |
| Fiche 176 | Les facteurs du métamorphisme                              | 185 |
| Fiche 177 | Les minéraux, marqueurs du métamorphisme                   | 186 |
| Fiche 178 | Faciès et gradients métamorphiques                         | 187 |
| Fiche 179 | Les chemins P-T-t des roches métamorphiques                | 188 |
| Fiche 180 | Le métamorphisme alpin de haute pression-basse température | 189 |
| Fiche 181 | La classification courante des roches magmatiques          | 190 |
| Fiche 182 | La nomenclature chimique des roches volcaniques            | 191 |
| Fiche 183 | Les textures des roches volcaniques                        | 192 |
| Fiche 184 | Les textures des roches plutoniques                        | 193 |
| Fiche 185 | Les roches du manteau                                      | 194 |
| Fiche 186 | Les basaltes   | 195 |
| Fiche 187 | Les andésites  | 196 |
| Fiche 188 | Les granitoïdes  | 197 |
| Fiche 189 | Rhyolites, trachytes et phonolites                         | 198 |

### Partie 9 Les magmas : mise en place et origine

|           |                                      |     |
|-----------|--------------------------------------|-----|
| Fiche 190 | Les magmas et leurs propriétés       | 200 |
| Fiche 191 | Les coulées basaltiques subaériennes | 201 |
| Fiche 192 | Le volcanisme sous-marin profond     | 202 |

# Table des matières

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Fiche 193 | Les éruptions hydromagmatiques                                       | 203 |
| Fiche 194 | Les explosions subaériennes verticales                               | 204 |
| Fiche 195 | Les coulées pyroclastiques   | 205 |
| Fiche 196 | Les grands types de volcans  | 206 |
| Fiche 197 | Les volcans boucliers  | 207 |
| Fiche 198 | Les grandes caldeiras et les ignimbrites                             | 208 |
| Fiche 199 | Les volcans du Massif Central  | 209 |
| Fiche 200 | Un grand volcan composite : le Cantal                                | 210 |
| Fiche 201 | La Chaîne des Puys et son histoire                                   | 211 |
| Fiche 202 | Le volcanisme de l'Islande   | 212 |
| Fiche 203 | Le volcanisme d'Hawaii   | 213 |
| Fiche 204 | Intrusions et extrusions volcaniques                                 | 214 |
| Fiche 205 | La mise en place des granitoïdes                                     | 215 |
| Fiche 206 | La composition chimique du manteau                                   | 216 |
| Fiche 207 | La fusion partielle du manteau                                       | 217 |
| Fiche 208 | La signature géochimique des basaltes : les éléments en traces       | 218 |
| Fiche 209 | La signature géochimique des basaltes : les isotopes de Sr, Nd et Pb | 219 |
| Fiche 210 | Structure et fonctionnement d'un réservoir magmatique                | 220 |
| Fiche 211 | Principe de la cristallisation fractionnée                           | 221 |
| Fiche 212 | Les modalités de la cristallisation fractionnée                      | 222 |
| Fiche 213 | Les mélanges magmatiques   | 223 |
| Fiche 214 | La contamination crustale  | 224 |
| Fiche 215 | L'hydrothermalisme océanique   | 225 |
| Fiche 216 | Les grandes provinces magmatiques                                    | 226 |
| Fiche 217 | Le volcanisme des marges passives                                    | 227 |
| Fiche 218 | Les sources des magmas des points chauds                             | 228 |
| Fiche 219 | Du volcan à l'atoll en Polynésie                                     | 229 |
| Fiche 220 | La diversité des basaltes océaniques                                 | 230 |
| Fiche 221 | Les arcs volcaniques   | 231 |
| Fiche 222 | Les spécificités des magmas d'arc                                    | 232 |
| Fiche 223 | Les origines des magmas d'arc  | 233 |
| Fiche 224 | L'arc des Petites Antilles   | 234 |
| Fiche 225 | Le magmatisme post-subduction  | 235 |
| Fiche 226 | Le magmatisme lié aux fenêtres asthénosphériques                     | 236 |
| Fiche 227 | La fusion de la croûte océanique                                     | 237 |
| Fiche 228 | Le recyclage profond de la lithosphère océanique                     | 238 |
| Fiche 229 | La fusion de la croûte continentale                                  | 239 |
| Fiche 230 | L'eau dans le manteau : ses origines et ses rôles                    | 240 |

# Table des matières

---

## Partie 10 Aléas et ressources énergétiques

|                         |                                 |     |
|-------------------------|---------------------------------|-----|
| Fiche 231               | Aléas sismiques et tsunamis     | 242 |
| Fiche 232               | Les risques volcaniques         | 243 |
| Fiche 233               | Évènements climatiques extrêmes | 244 |
| Fiche 234               | Le pétrole                      | 245 |
| Fiche 235               | Le charbon                      | 246 |
| Fiche 236               | La géothermie                   | 247 |
| Index                   |                                 | 248 |
| Crédits photographiques |                                 | 252 |

## Avant-propos

Cet ouvrage a pour ambition d'offrir à un large public d'étudiants et d'enseignants-chercheurs un aperçu des connaissances relatives à notre planète Terre : son origine, son histoire, les matériaux qui la composent et les mouvements qui animent ses enveloppes profondes et superficielles. Il a été préparé par des chercheurs-enseignants, anciens membres du jury de l'agrégation de sciences de la vie et de la Terre, ayant la volonté de produire un ouvrage équilibré dans lequel les disciplines de la géologie sont traitées à égalité.

D'un seul coup d'œil, fiche après fiche, le lecteur trouvera l'essentiel des données fondamentales nécessaires à sa progression dans la découverte des disciplines qui composent les Sciences de la Terre : géophysique, tectonique, pétrologie-géochimie, sédimentologie, stratigraphie, paléontologie, géomorphologie, paléoclimatologie...

Chaque fiche propose les schémas fondamentaux qui illustrent de façon simple les données, les concepts et les hypothèses les plus récents. Des photographies ponctuent les fiches d'éléments concrets indispensables pour une science de terrain. De nombreux dessins, entièrement réalisés par les auteurs, constituent des documents de synthèse originaux. Afin d'assurer la cohérence de l'ouvrage, l'ensemble des illustrations a été harmonisé par Alexandre Lethiers et par Bernadette Coléno qui a également assuré la mise en page des fiches.

Ce Mémo Visuel de Géologie s'adresse d'abord aux étudiants de Licence (L1 à L3), mais sera également utile aux étudiants en Master. Il accompagnera les candidats aux concours de recrutement de l'enseignement secondaire et les élèves des classes préparatoires BCPST. Il sera utile également à un public d'enseignants et de chercheurs désireux d'accéder à un panorama complet des géosciences et plus simplement à tous les amateurs de géologie.

Les auteurs remercient vivement les collègues qui leur ont fourni des documents photographiques et iconographiques, et notamment :

Arnaud Agranier, Michel Ballèvre, Jacques-Marie Bardintzeff, Jean-Alix Barrat, Claire Bassoulet, Arnaud Blais, Sylvain Blais, Françoise Boudier, Martial Caroff, François Chauvet, Gilles Chazot, Delphine Desmares, Laurent Emmanuel, Camille Clerc, Carole Cordier, Vincent Courtillot, Anne Delplanque, Anne Deschamps, Laurent Geoffroy, Stéphane Guillot, Marc-André Gutscher, Thierry Juteau, Serge Lallemand, Laurence Le Callonnec, Nicolas Le Moigne, Anne-Marie Marabal, Fabrice Minoletti, Pierre Nehlig, Christian Nicolle, Carlos Pallares, Michel Pichavant, Gaëlle Prouteau, Marc de Rafélis, Sidonie Révillon, Jean-François Ritz, Isabelle Rouget, Brigitte Senut, Bruno Vrielynck, Valérie Zeitoun.

# Comment utiliser cet ouvrage

## Partie 1 La Terre, une planète dans l'Univers



Collision de deux galaxies. Les galaxies des Antennes (NGC 4038 / 4039), à 62 millions d'années-lumière de la Terre, sont entrées en collision il y a plus de 100 Ma, et celle-ci se poursuit actuellement. Les énormes nuages bleus et rouges correspondent à des gaz interstellaires chauffés, et les zones blanches et dorées à des amas stellaires, dont certains sont en cours de formation (NASA, ESA, STScI, DuPasquier et B. Whitmore).

## 10 parties

Les grandes disciplines des Sciences de la Terre

### 236 fiches

Les notions essentielles du cours pour réviser rapidement

### Plus de

1 000 schémas et photos en couleur pour illustrer chaque notion importante

### Et aussi...

- De nombreuses cartes de situations, globales ou régionales
- Un index complet

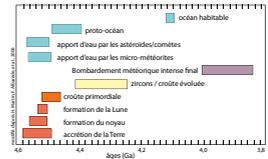
## fiche 7

### La Terre à l'Hadéen

Les témoins directs de l'Hadéen (> 4 Ga) sont très rares : orthogneiss d'Acasta, Canada (4,03 Ga) et zircons des Jack Hills, Australie (âge maximal U-Pb 4,40 Ga). Les autres renseignements sur cette période proviennent d'études isotopiques ( $^{18}\text{O}$ - $^{16}\text{O}$ ,  $^{26}\text{Al}$ - $^{27}\text{Al}$ ,  $^{54}\text{Cr}$ - $^{52}\text{Cr}$ ,  $^{142}\text{Sm}$ - $^{144}\text{Nd}$ ) sur les roches terrestres anciennes comparées aux météorites et aux roches lunaires.



Orthogneiss d'Acasta (métagranodiorite de type TTG)



#### Les principaux événements géologiques de l'Hadéen

**Zircons zonés des Jack Hills**  
Les plus vieux minéraux terrestres connus sont des témoins de croûte continentale remaniés dans des sédiments rubanés riches en fer (Banded Iron Formations, BIF). Leur composition isotopique indique des interactions avec l'eau. Tailles : 0,1 à 0,3 mm.



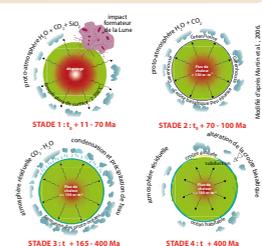
Les quatre principales étapes de l'évolution de la Terre à l'Hadéen. L'âge conventionnel de sa formation ( $t_0$ ) est fixé à 4,568 Ga ; il est postérieur à ceux de la plupart des chondrites.

**Stade 1.** L'accrétion et le bombardement (**impact formateur de la Lune**) s'accompagnent d'un flux de chaleur très élevé. Le dégagement intense et l'apport externe d'eau (météorites) conduisent à l'apparition d'une **proto-atmosphère**, alors que le **noyau** se forme.

**Stade 2.** Le flux de chaleur demeure très élevé et la proto-atmosphère très épaisse provoque un effet de serre (**greenhouse**). L'océan magmatique se refroidit et une **croûte basaltique** apparaît.

**Stade 3.** La condensation de l'eau conduit à la formation des **proto-océans**. Les premiers éléments de **croûte continentale** apparaissent (zircons).

**Stade 4.** Apparition de phénomènes similaires aux modernes : **formation de croûte continentale, subduction, altération de la croûte basaltique**. L'océan devient habitable, mais l'intense **bombardement météoritique tardif** fera disparaître vers 4 Ga la plupart des témoins de ces processus.

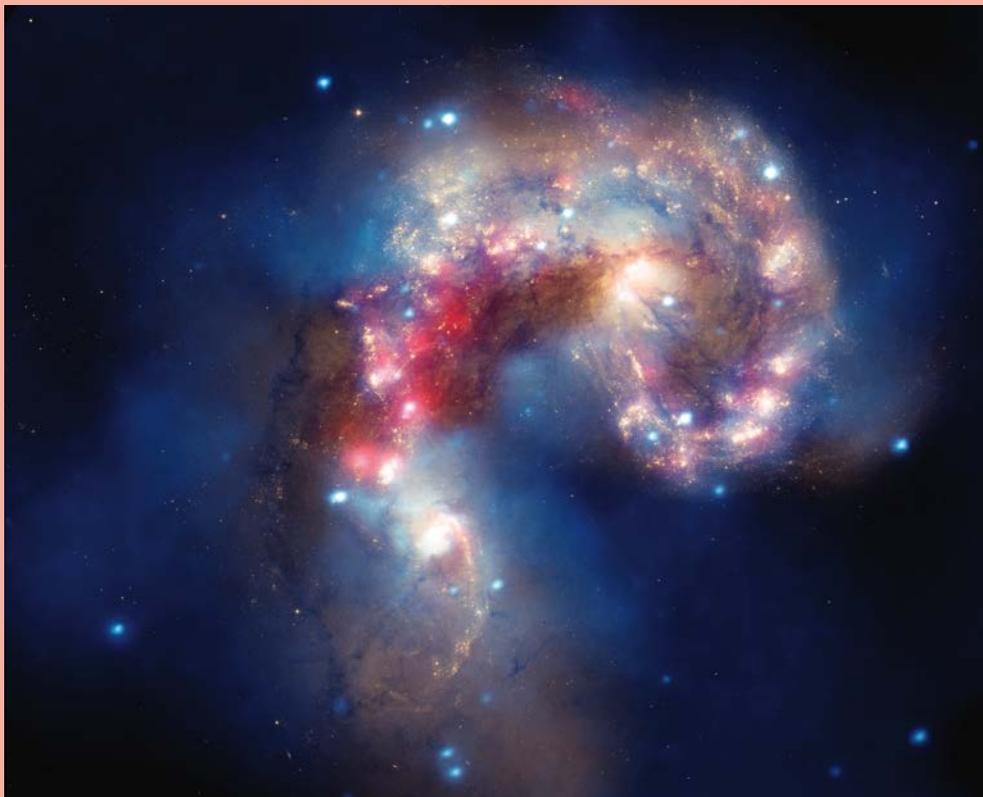


Partie

1

# La Terre, une planète dans l'Univers

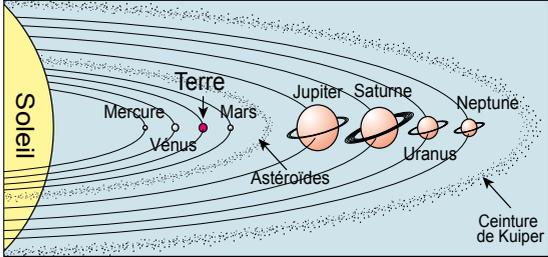
---



Collision de deux galaxies. Les galaxies des Antennes (NGC 4 038 /4 039), à 62 millions d'années-lumière de la Terre, sont entrées en collision il y a plus de 100 Ma, et celle-ci se poursuit actuellement. Les énormes nuages bleus et rouges correspondent à des gaz interstellaires chauds, et les zones blanches et dorées à des amas stellaires, dont certains sont en cours de formation

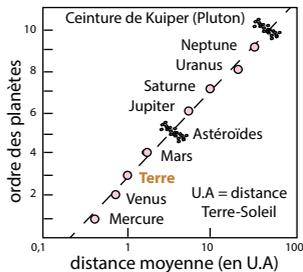
(© NASA, ESA, STScI, J. DePasquale et B. Whitmore).

# Le système solaire



La période de révolution des planètes dépend de leur distance au Soleil (Mercure : 0,24 an et Neptune : 164 ans). La rotation des planètes sur elles-mêmes s'effectue suivant un axe sub-perpendiculaire à l'écliptique. La rotation se fait dans le même sens que la révolution (sauf pour Vénus et Uranus).

Le **système solaire** est une communauté ordonnée de huit planètes (Pluton a perdu son statut de planète en 2006) qui tournent autour d'une étoile (le Soleil) selon des orbites elliptiques pratiquement situées dans un même plan (écliptique).

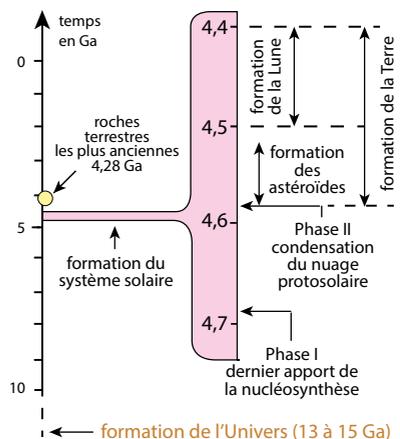


La ceinture d'astéroïdes sépare deux zones du système solaire, celle des planètes telluriques, petites et denses (roches et métaux) et celle des planètes géantes (gazeuses). Lors de la formation, l'accrétion (fiche 3) a dû être prépondérante dans la première zone alors que dominait l'effondrement gravitationnel dans la seconde.

### Loi de Bode

Chaque planète est deux fois plus éloignée du Soleil que sa voisine intérieure (U.A : unité astronomique = distance Terre-Soleil soit environ 150 millions de km.).

## ► La formation du système solaire

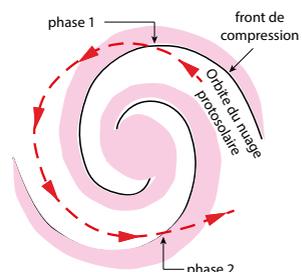


### L'âge du système solaire

Datée de 4,55 Ga, sa formation (condensation, accrétion et différenciation) est un phénomène rapide ( $\pm 200$  Ma) par rapport à l'histoire de l'Univers (Ga = milliard d'années ; Ma = million d'années).

### Processus de formation du système solaire

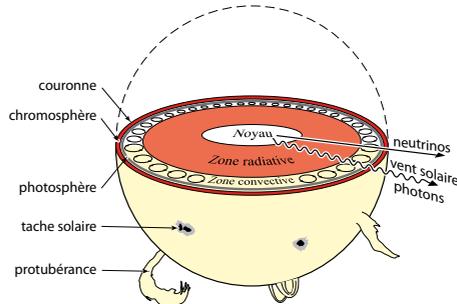
La durée de formation correspond au temps de transit du nuage protosolaire de matière interstellaire (fiche 2) dans les bras de la galaxie. La formation comporte deux phases :



**Phase I :** Lors du passage dans le premier bras, le nuage protosolaire est comprimé mais ne s'effondre pas. Il se charge en atomes issus de l'intense nucléosynthèse qui règne dans le bras.

**Phase II :** Lors du passage dans le second bras galactique, environ 100 Ma plus tard, il y a condensation du nuage protosolaire avec formation du Soleil et de son cortège planétaire.

Étoile de dimension modeste (695 000 km de rayon), située dans un bras spiral à 30 000 années-lumière du centre de la galaxie, le Soleil est constitué essentiellement d'hydrogène et d'hélium (seulement 2 % d'autres éléments). Son poids est estimé à  $2 \cdot 10^{30}$  kg (330 000 fois celui de la Terre). Sa période de rotation est de 26,9 jours à l'équateur et 35 jours au pôle selon un axe incliné de  $82^{\circ}45'$  sur le plan de l'écliptique.

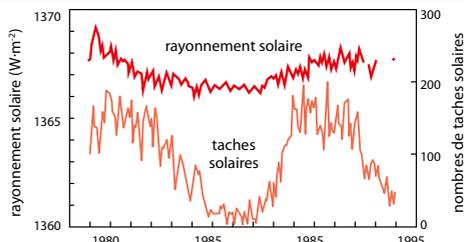


**La structure du Soleil**

Le noyau (250 000 km de rayon, 15 millions de degrés) a une densité de 150. L'atmosphère solaire comprend :

- la photosphère (300 km d'épaisseur,  $8\,000^{\circ}\text{C}$  à  $4\,500^{\circ}\text{C}$ ) qui est siège du champ magnétique et émettrice des photons ;
- la chromosphère (2 500 km d'épaisseur) où la température croît avec l'altitude jusqu'à un million de degrés ;
- la couronne (seule la partie interne est représentée, la partie externe peut s'étendre sur 5 millions de km) dont la très haute température (3 millions de  $^{\circ}\text{C}$ ) est liée à des phénomènes magnétiques, qui, produisant des courts-circuits, réchauffent le plasma.

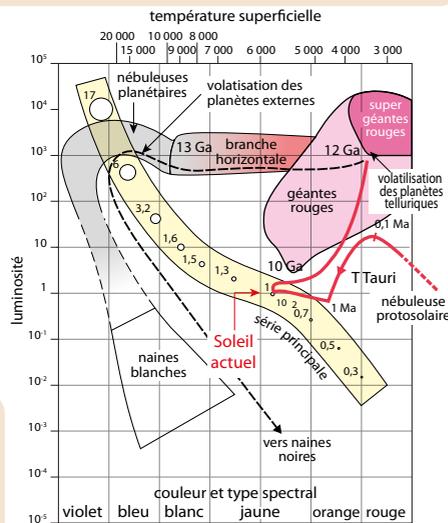
L'énergie provient de la transformation d'hydrogène en hélium et deutérium par deux réactions : le cycle proton-proton (réaction principale dans le cas du Soleil) et le cycle proton-oxygène-azote (cycle de Bethe) où le carbone est un catalyseur. Les photons émis dans le noyau sont réabsorbés et réémis de très nombreuses fois et n'atteignent, de ce fait, la surface qu'au bout d'un million d'années.



**L'activité solaire**

Variant selon un cycle de 11 ans, elle est responsable des fluctuations haute fréquence du climat terrestre. Le nombre de centres actifs (taches solaires) se corrèle à la fluctuation du rayonnement solaire (voir fiches 34 et 38).

Après la phase initiale T Tauri, le Soleil est entré dans un état stationnaire au bout de 1 à 2 Ma. Cette situation sur la série principale durera 10 Ga (soit encore 5 Ga). Après épuisement de son hydrogène, il évoluera vers les géantes rouges (l'augmentation de température provoquera la volatilisation des planètes telluriques vers 12 Ga puis vers les nébuleuses planétaires avec volatilisation des planètes externes vers 13 Ga). Le Soleil s'éteindra ensuite progressivement en évoluant vers les naines blanches et noires.



**Le diagramme de Hertzsprung-Russell et l'évolution du Soleil**

On classe les étoiles en fonction de leur luminosité et de leur couleur spectrale. La majorité se situe sur la série principale (luminosités et masses (chiffres sur la série principale) sont exprimées par rapport au Soleil).

# Accrétion planétaire et différenciation des assises terrestres

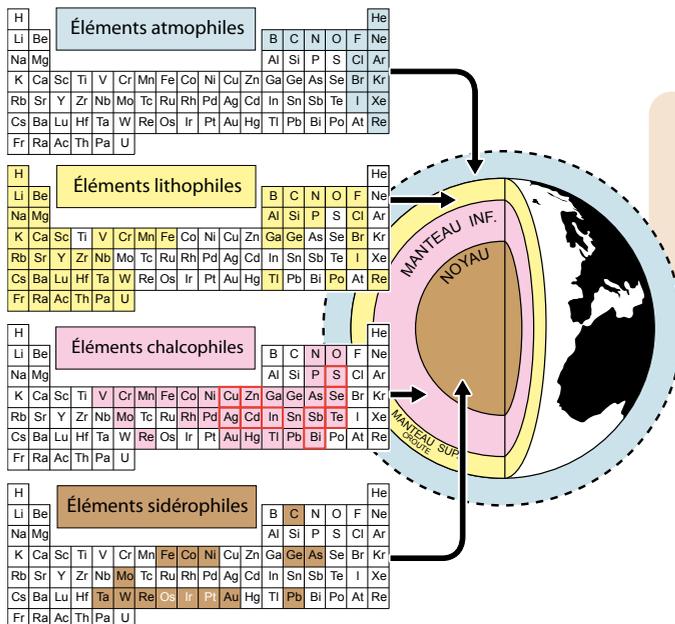
Le Soleil et le cortège planétaire sont cogéniques (voir météorites, fiche 4) et dérivent de matière interstellaire car les planètes contiennent des éléments (Li, D) ne résistant pas aux conditions stellaires.

### Le modèle de Kant (1755) et Laplace (1799)

La nébuleuse protosolaire (fragmentation d'un nuage de matière interstellaire) entre en rotation et prend la forme d'un disque aplati. Les éléments non volatils se condensent et s'agglomèrent pour donner naissance aux planètes dans les régions externes, plus froides, du disque. Le centre devient le Soleil en se contractant. Selon les modèles numériques actuels, on passe du disque protosolaire à un petit nombre de planétoïdes à orbites non régulées en 5 à 10 Ma et aux planètes à orbites régulées en 100 Ma.

Lors de la phase de condensation, la température du nuage protosolaire décroît fortement et des grains solides se condensent à partir du gaz. Vers 1 600 °Kelvin, ce sont d'abord les matériaux réfractaires (oxydes), à partir de 1 400 °K les alliages de fer, puis les silicates (entre 1 200 et 400 °K) et enfin les éléments volatils à basse température, les glaces apparaissent vers 200 °K. De plus, la température étant plus chaude vers l'étoile qu'à la périphérie du disque, la composition des grains varie en fonction de la distance à l'étoile, les réfractaires et les métaux sont dans la partie interne (planètes telluriques) et les éléments volatils dans la partie externe (planètes gazeuses) du disque (fiche 1).

Les condensats s'agglomèrent en objets planétaires qui se réchauffent du fait d'une part de l'énergie gravitationnelle libérée lors de l'agglomération et d'autre part de la désintégration d'isotopes radioactifs. Il en résulte une fusion et une homogénéisation des corps planétaires en formation. Il se produit, ensuite, un lent refroidissement au cours duquel les éléments chimiques se combinent en minéraux qui, sous l'action des forces de gravité, subissent une ségrégation pour former le *noyau*, le *manteau* et la *croûte*, en donnant naissance à une **planète différenciée**.



### La géodynamique chimique

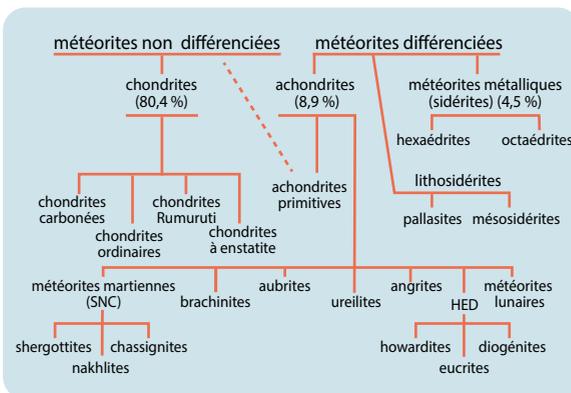
Goldschmidt (1954) a mis en évidence une relation entre les grandes familles géochimiques et les mégastructures terrestres (atmosphère, lithosphère, manteau et noyau).

**La répartition des éléments chimiques dans les enveloppes terrestres.** Certains éléments se retrouvent dans différents groupes tandis que d'autres appartiennent à une seule famille. Ainsi les éléments entourés de rouge sont exclusivement chalcophiles et Os, Ir et Pt (lettres blanches) strictement sidérophiles.

# Les météorites

Les météorites proviennent de la ceinture d'astéroïdes, de la Lune ou de Mars. Les grands astéroïdes ayant subi une différenciation rapide, leurs fragments constituent des analogues de la croûte (**eucriotes**), du manteau (**achondrites**), du noyau (**météorites métalliques** ou sidérites) et même de la couche D' (**lithosidérites**) des planètes telluriques.

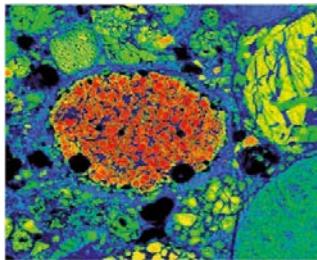
Les **chondrites**, les plus fréquentes, sont les plus primitives. Elles doivent leur nom aux sphérules (chondres) qui les constituent et représenteraient des gouttes de liquides formées lors des premières collisions. Les **chondrites carbonées**, peu courantes (4,7 %), sont les plus anciennes (4,65-4,55 Ga). Elles ont subi une condensation à basse température et sont riches en eau. Leur composition est utilisée comme référence dans les travaux de géochimie (fiche 202).



**Classification simplifiée des météorites**



**Chondrite carbonée d'Axtell, Texas**



### Distribution hétérogène du Mg dans une chondrite

Les teneurs décroissantes du rouge (chondre central 1 mm) au bleu et au noir témoignent de l'hétérogénéité des globules accrétés.

**La météorite Erg Chech 02** (4,565 Ga), décrite par Barrat *et al.*, (2021) est née 1,8 Ma seulement après la formation du système solaire. De composition andésitique, elle résulte de la fusion partielle (25 %) d'une chondrite.



### Section de l'octaédrite El Capitan, Nouveau Mexique

Deux alliages Fe-Ni (kamacite et taenite) forment les figures de Widmanstätten.



### Pallasite de Brahin, Russie (5 x 3 cm)

Matrice métallique de type octaédrite entourant de grands cristaux d'olivine.

## Cratères d'impact et impactites

Les **cratères d'impact météoritiques** sont une caractéristique majeure des surfaces planétaires. Sur Terre, ils sont assez rares en raison de l'activité tectonique et de l'érosion. Les deux plus grands, Vredeford (Afrique du Sud, 300 km de diamètre, 2,02 Ga) et Sudbury (Canada, 250 km, 1,85 Ga) sont d'âge Protérozoïque. Le troisième, Chicxulub (Yucatan, Mexique, 180 km, 65 Ma) est probablement **responsable de la crise Crétacé-Tertiaire** (fiche 88). Le plus grand des cratères cénozoïques est celui de Popigai (Sibérie, 100 km, 36 Ma). Celui de Rochechouart (Limousin, 21 km, 201 Ma) ne vient qu'au 40<sup>e</sup> rang.



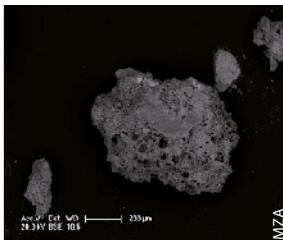
**Cratère de Kamil, Egypte**  
(< 5 000 ans)

Il est dû à l'impact à 45° et 3,5 km·s<sup>-1</sup> d'une sidérite de 1,3 m de diamètre pesant 9 tonnes. Son diamètre est de 45 m, sa profondeur de 16 m, et son rempart est exhaussé de 3 m. Il est entouré d'un anneau bréchrhique de 50 m de diamètre et de projections radiales en étoile de 350 m de long. Photos © Museo Nazionale dell'Antartide, Siena.



**Fragment de la météorite de Kamil**

(sidérite de type ataxite, Ni = 19,8 %)



**Verre d'impact siliceux vacuolaire de Kamil**



**Impactite fondue (melt rock) vacuolaire de Babaudus, Rochechouart**



**Brèche d'impact (suévite) de Montoume, Rochechouart**  
(partie fondue rougeâtre)

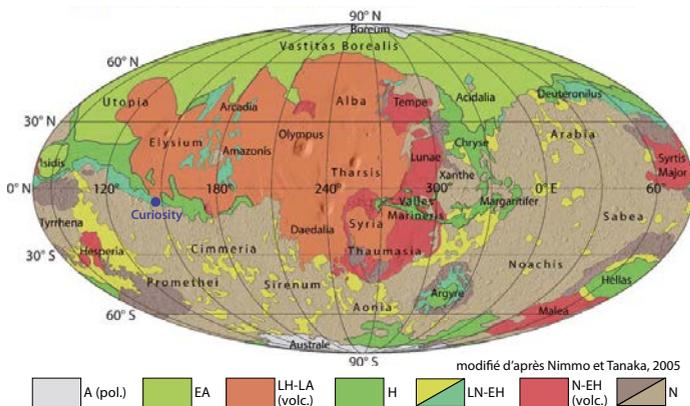


**Tectite du Laos** (« indochinite »)

**Critères d'identification des impactites.** Ils incluent la présence de minéraux de haute pression : **coésite**, **stishovite** (fiche 178), **diamant** (Popigai) ; **de roches fondues (melt rocks)** associées à des brèches d'impact (**suévites**) contenant des parties fondues et des cônes de pression (**shatter cones**) ; et **de tectites**, verres siliceux contaminés en Ni et Co, projetés à grande distance du cratère (« moldavites » du Ries, « australites », « indochinites »).

# La géologie de Mars

Elle est connue grâce à plus de 15 missions d'exploration (survol, orbiteurs, atterrisseurs, robots mobiles), de 1964 (Mariner 4) à 2021 (Perseverance). On distingue trois grandes périodes.



### Carte géologique simplifiée de Mars

**Noachien** (N) : 4,6 à 3,7 Ga ; **Hespérien** (H) inférieur (EH) et supérieur (LH) : 3,7 à 3,1-2,9 Ga ; **Amazonien** (A) inférieur (EA) et supérieur (LA) : moins de 3,1-2,9 Ga. Les dépôts polaires (pol.) sont lités et les laves (volc.) très abondantes.

Le **Noachien** est marqué par un grand bombardement météoritique tardif (comme sur Terre) suivi d'un important volcanisme très fluide et de la formation de vallées fluviales ramifiées associée à des processus d'altération (phyllosilicates).

L'activité volcanique décline pendant l'**Hespérien** alors que l'érosion (chenaux de débâcles) et l'altération se poursuivent.

L'**Amazonien** est marqué par une reprise de l'activité volcanique (Mons Olympus) perdurant peut-être jusqu'à l'actuel (plaine d'Elysium), et la formation de ravines récentes et des calottes actuelles.



### La météorite martienne de Tissint (Maroc)

C'est la chute la plus récente observée (juillet 2011). Il s'agit d'une shergottite picritique riche en verre contenant des gaz atmosphériques martiens.



### Strates sédimentaires d'origine fluviale présumée du mont central (Aeolis Mons) du cratère de Gale, site d'arrivée de Curiosity.

Elles contiennent des sulfates et des argiles de type smectite, de même que celles du cratère Jezero, site d'arrivée de l'astromobile Perseverance (2021).



### Le volcan bouclier Mons Olympus, point culminant de Mars (21 229 m)

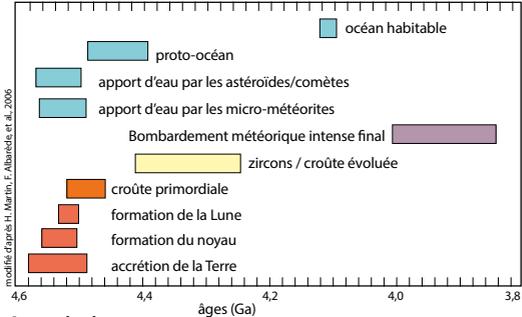
Plus de 100 météorites martiennes ou SNC (shergottites-nakhlites-chassignites) sont connues. Leurs compositions isotopiques sont spécifiques et elles sont plus jeunes que les autres achondrites (4,3 à 0,15 Ga). Les shergottites ont une composition dominante de basalte tholéiitique primitif. Leur diversité témoigne d'une pétrogenèse complexe à partir du manteau martien, plus riche en fer que le terrestre.

# La Terre à l'Hadéen

Les témoins directs de l'Hadéen (> 4 Ga) sont très rares : orthogneiss d'Acasta, Canada (4,03 Ga) et zircons des Jack Hills, Australie (âge maximal U-Pb 4,40 Ga). Les autres renseignements sur cette période proviennent d'études isotopiques ( $^{17}\text{O}-^{18}\text{O}$ ,  $^{26}\text{Al}-^{26}\text{Mg}$ ,  $^{182}\text{Hf}-^{182}\text{W}$ ,  $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ ) sur les roches terrestres anciennes comparées aux météorites et aux roches lunaires.



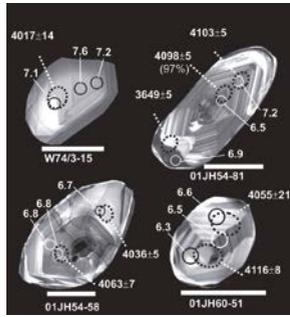
**Orthogneiss d'Acasta**  
(métagranodiorite de type TTG)



## Les principaux événements géologiques de l'Hadéen

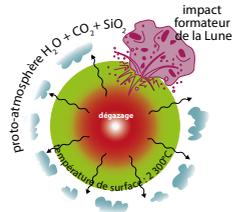
### Zircons zonés des Jack Hills

Les plus vieux minéraux terrestres connus sont des témoins de croûte continentale remaniés dans des sédiments rubanés riches en fer (*Banded Iron Formations*, BIF). Leur composition isotopique indique des interactions avec l'eau. Tailles : 0,1 à 0,3 mm.

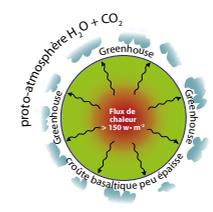


**Les quatre principales étapes de l'évolution de la Terre à l'Hadéen.** L'âge conventionnel de sa formation ( $t_0$ ) est fixé à 4,568 Ga ; il est postérieur à ceux de la plupart des chondrites.

**Stade 1.** L'accréation et le bombardement (**impact formateur de la Lune**) s'accompagnent d'un flux de chaleur très élevé. Le dégazage intense et l'apport externe d'eau (météorites) conduisent à l'apparition d'une **proto-atmosphère**, alors que le manteau est liquide (**océan magmatique**) et que le **noyau** se forme.



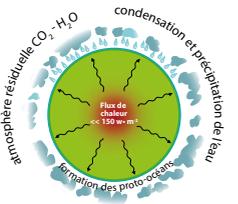
**STADE 1 :  $t_0 + 11 - 70$  Ma**



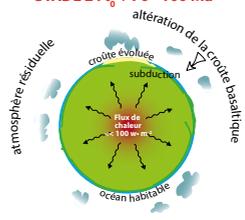
**STADE 2 :  $t_0 + 70 - 100$  Ma**

**Stade 2.** Le flux de chaleur demeure très élevé et la proto-atmosphère très épaisse provoque un effet de serre (**greenhouse**). L'océan magmatique se refroidit et une **croûte basaltique** apparaît.

**Stade 3.** La condensation de l'eau conduit à la formation des **proto-océans**. Les premiers éléments de **croûte continentale** apparaissent (zircons).



**STADE 3 :  $t_0 + 165 - 400$  Ma**



**STADE 4 :  $t_0 + 400$  Ma**

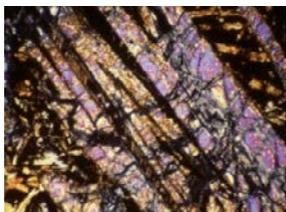
**Stade 4.** Apparition de processus similaires aux modernes : **formation de croûte continentale**, **subduction**, **altération de la croûte basaltique**. L'océan devient habitable, mais l'intense **bombardement météoritique tardif** fera disparaître vers 4 Ga la plupart des témoins de ces processus.

Modifié d'après Martin et al., 2006.

# Les magmatismes archéens

Certains magmas archéens (4-2,5 Ga) sont des basaltes tholéiitiques (Thol.) proches des MORB modernes. Les **komatiïtes** (Kom.), ultramafiques, sont par contre typiques des ceintures de roches vertes archéennes ; celles de type Barberton (B) sont pauvres en Al, Y et Yb par rapport au type Munro (M).

Les TTG (**tonalites-trondhjemites-granodiorites**), proches des adakites modernes, sont les granitoïdes de loin les plus courants. Leurs rapports Sr/Y et La/Yb sont supérieurs à ceux des granites calco-alcalins qui apparaissent au Protérozoïque.



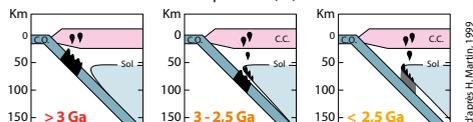
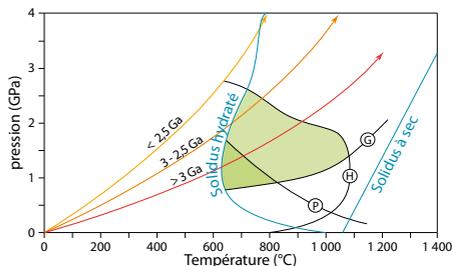
**Komatiïte de type Barberton à olivine « spinifex »**  
(4 x 3 mm, LPNA)



**Orthogneiss plissé de Finlande, dérivé d'un granitoïde de type TTG**

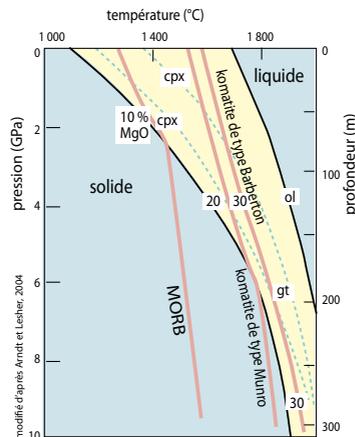
| Maj. (%)                         | Kom.-M | Kom.-B | Thol. | TTG   |
|----------------------------------|--------|--------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                 | 45,0   | 47,1   | 50,1  | 69,79 |
| TiO <sub>2</sub>                 | 0,34   | 0,24   | 1,45  | 0,34  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 6,70   | 4,04   | 13,03 | 15,56 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T | 11,20  | 12,80  | 15,69 | 3,12  |
| MnO                              | 0,17   | 0,22   | 0,26  | 0,05  |
| MgO                              | 29,4   | 29,6   | 5,51  | 1,18  |
| CaO                              | 6,30   | 5,44   | 11,70 | 3,19  |
| Na <sub>2</sub> O                | 0,30   | 0,46   | 1,27  | 4,88  |
| K <sub>2</sub> O                 | 0,09   | 0,09   | 0,86  | 1,76  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>    | 0,00   | 0,05   | 0,14  | 0,13  |
| Traces (ppm)                     |        |        |       |       |
| La                               | 0,32   | 0,65   | 6,98  | 32    |
| Nb                               | 0,6    | 0,5    | 6,1   | 10    |
| Sr                               | 21     | 23     | 137   | 454   |
| Y                                | 7      | 4      | 29    | 7,5   |
| Yb                               | 0,66   | 0,40   | 2,3   | 0,55  |

**Analyses moyennes de roches archéennes**



**Origine des TTG.** Elles dérivent, comme les adakites modernes, de la **fusion hydratée, entre 650 et 1 050 °C, de basaltes subduits** transformés en amphibolites à hornblende (H), grenat (G), avec ou sans plagioclase (P). Elles apparaissent dès l'Hadéen (Acasta) et constituent la quasi-totalité des granitoïdes archéens.

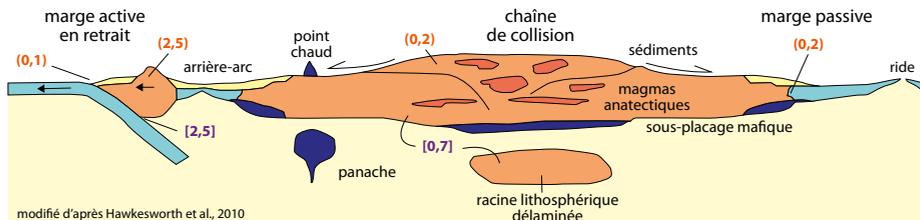
La **diminution progressive des gradients géothermiques** les fait disparaître au Protérozoïque au profit des granites calco-alcalins, issus de basaltes dérivant de la fusion du manteau des arcs volcaniques.



**Diagramme P-T de fusion du manteau péridotitique à sec**

La formation des komatiïtes nécessite des températures de fusion **supérieures de 200 à 300 °C à celles des MORB**. Elles sont rendues possibles par les gradients géothermiques très élevés à l'Archéen. Les différences entre les deux types sont explicables par la présence de davantage de grenat dans la source des komatiïtes de type Barberton.

# Les cratons et la croissance continentale



modifié d'après Hawkesworth et al., 2010

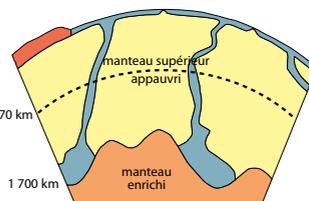
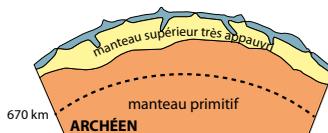
## Bilan de la croissance continentale actuelle

Il est équilibré d'après les estimations récentes : 3,1 km<sup>3</sup>/an d'addition (en rouge, entre parenthèses), 3,2 km<sup>3</sup>/an de disparition dans le manteau (en violet, entre crochets). Il faut donc rechercher dans le passé les origines de la croissance des continents.



### Orthogneiss icartien du Trégor (2 Ga)

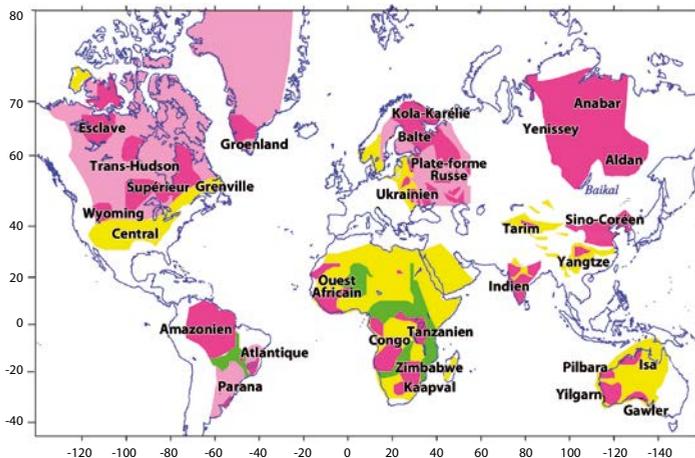
Ce sont les plus vieilles roches de la France métropolitaine, déformées au Cadomien (610 Ma).



modifié d'après Foley et al., 2003

### Schéma simplifié de l'évolution du manteau, source ultime de la croûte continentale

L'important appauvrissement du manteau supérieur archéen s'est atténué en raison du recyclage profond par la subduction, mais le manteau primitif a progressivement disparu.



■ Archéen ■ Protérozoïque inférieur ■ Protérozoïque moyen-supérieur ■ Chaînes protérozoïques supérieures

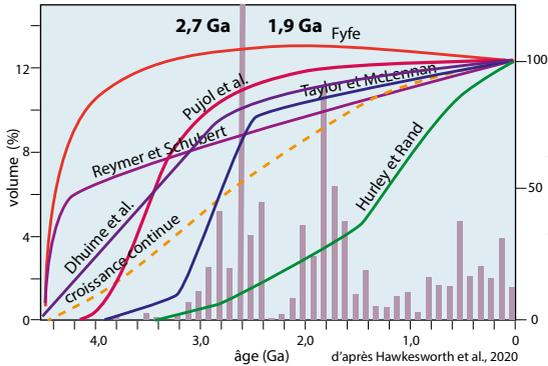
modifié d'après Artemieva et Mooney, 2001

### Carte simplifiée des cratons précambriens

Le cœur des continents est composé par les noyaux archéens des cratons, qui ne représentent cependant que 7 % de la croûte continentale. Ils sont entourés de plus vastes terrains protérozoïques, auxquels se sont accrétées par la suite les chaînes calédoniennes, hercyniennes et alpines (non individualisées). L'ensemble du schéma suggère un maximum de croissance antérieur à 2 Ga (Protérozoïque moyen), avant que le régime « équilibré » de la tectonique des plaques moderne ne se mette en place.

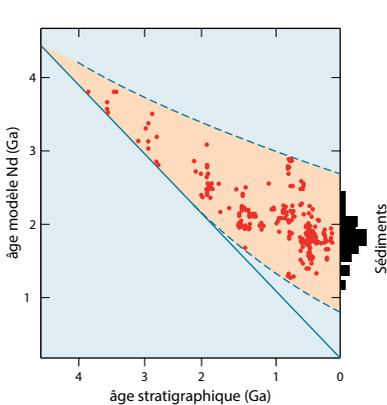
# Les modèles de croissance des continents

Les nombreuses datations récentes (méthode U-Pb sur zircons) conduisent à invalider les modèles impliquant la croissance récente de la croûte continentale (Hurley et Rand, 1969), sa croissance importante à l'Hadéen (Fyfe, 1978 ; Reymer et Schubert, 1984) ou enfin sa croissance continue.



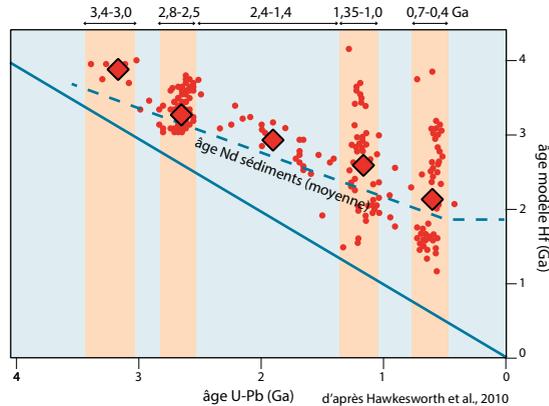
**Les principaux modèles de croissance des continents**  
Les histogrammes se réfèrent aux âges de 7 000 zircons détritiques.

Le **modèle de croissance maximale à la fin de l'Archéen et au Protérozoïque** proposé par Taylor et McLennan (1985) est compatible avec les âges des cratons (fiche 9) et ceux des zircons détritiques, dont les pics de fréquence principaux correspondent aux âges des **supercontinents précambriens** Superia/Slavia (2,7 Ga) et Nuna (1,9 Ga). Ceux des supercontinents plus récents (Rodinia, Pangée) apparaissent moins clairement. Les modèles plus récents de Dhuime et al. (2012) et de Pujol et al. (2013) proposent une croissance un peu plus ancienne (la moitié du volume de la croûte aurait existé à 3,5 Ga).



### Âges stratigraphiques et âges-modèles (Nd) des sédiments continentaux

En l'absence d'héritage détritique de roches plus anciennes, ils devraient être identiques. **Leur divergence croissante à partir de l'Archéen reflète la formation de la croûte continentale.**

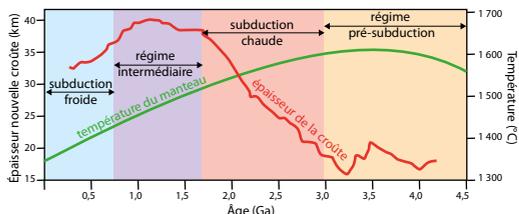


### Âges U-Pb et âges-modèles Hf des zircons des sédiments australiens

Ces minéraux ayant un rapport Lu/Hf très faible, leur rapport isotopique  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  est très voisin de sa valeur initiale. Les âges-modèles de ces zircons s'écartent progressivement au cours du temps de leurs âges U-Pb mesurés. Leurs âges moyens sont en accord avec la corrélation obtenue pour le Nd des sédiments. **Ils indiquent une forte croissance à partir de 3 Ga.**

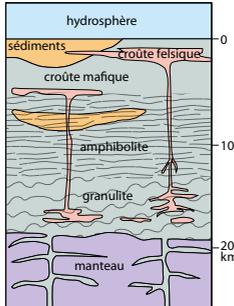
# Évolution de la croûte continentale

Après la phase initiale très courte (< 100 Ma) d'accrétion et de différenciation noyau-manteau, quatre phases de formation de la croûte continentale sont distinguées : en régime pré-subduction (Hadéen-Archéen ancien, 4,5-3,0 Ga) ; en régime de subduction chaude (3,0-1,7 Ga) ; en régime intermédiaire (1,7-0,8 Ga, Protérozoïque) pendant lequel se combinent les deux types de subduction ; et enfin, en régime de subduction « froide » moderne (< 0,8 Ga). Alors que la température du manteau diminue régulièrement et que l'épaisseur crustale totale augmente, la vitesse de croissance de la croûte continentale est maximale à la fin de l'Archéen et au Protérozoïque, lors de la mise en place des TTG (fiches 8 et 9).

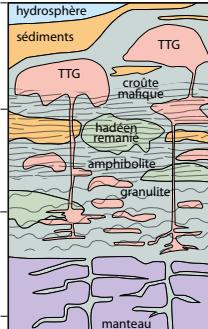


**Les étapes de l'évolution de la croûte continentale**  
d'après Hawkesworth et al. (2016)

### Croûte hadéenne



### Croûte archéenne

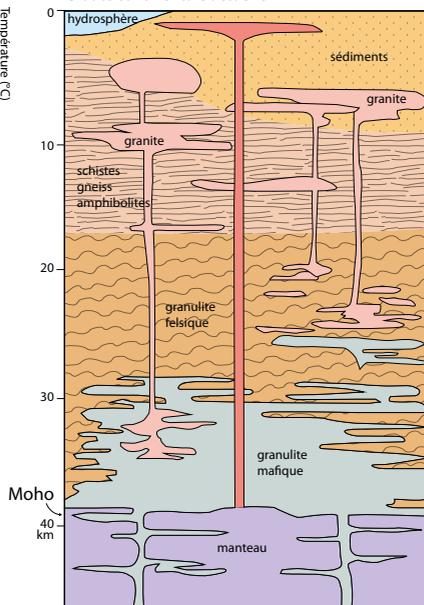


### Croûte hadéenne et croûte archéenne : épaisseurs et lithologies comparées

La croûte continentale hadéenne, peu épaisse (20 km) est à dominante metabasaltique ; les rares faciès felsiques (fiche 7) dérivent de la fusion partielle de sa base. L'essentiel sera détruit par le bombardement météoritique final.

La croûte archéenne comporte des fragments hadéens metabasaltiques remaniés et s'épaissit par intrusion de TTG liées aux subductions chaudes (fiche 8) qui construisent progressivement les cratons (fiche 9).

### Croûte continentale actuelle



La croûte continentale actuelle est surtout felsique, sauf sa partie inférieure granulitique. Elle a été considérablement épaissie (40 km) par les TTG puis par les granites liés aux subductions « froides » modernes (fiche 223) et les accumulations sédimentaires. Son taux de croissance est toutefois inférieur à celui de l'étape protérozoïque, et exactement compensé par sa destruction par érosion et délamination (fiche 225).

Partie

2

# Hydrosphère et atmosphère terrestres

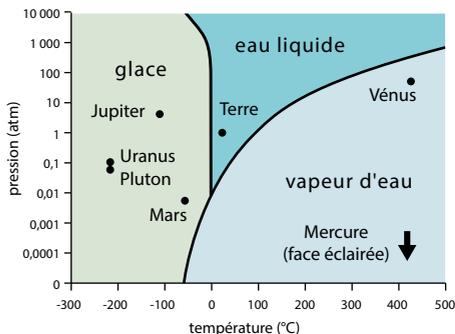


L'étude de l'hydrosphère et des fonds marins suppose le développement de nombreux outils adaptés. Le sous-marin Nautilus emmène un scientifique et deux pilotes jusqu'à 6 000 m de fond. Il est capable de prélever des échantillons et d'effectuer de nombreux travaux autour de sites particuliers comme les sites hydrothermaux. Aujourd'hui, il tend à être supplanté par les ROV dont les temps de plongée sont nettement supérieurs (voir fiche 156)

*(photo Yves Lagabrielle).*

# L'hydrosphère et les propriétés de l'eau

## ► La présence d'eau liquide est caractéristique de la planète Terre

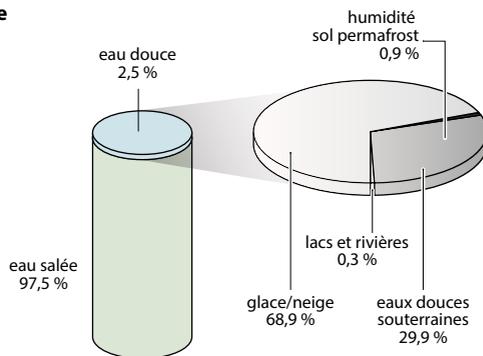


**Diagramme de phase de l'eau et position des principales planètes du système solaire**

L'océan occupe 72 % de la surface terrestre avec une répartition hétérogène entre l'hémisphère nord (qualifié d'hémisphère continental : 2/3 des continents) et sud (hémisphère océanique). L'eau terrestre résulte principalement d'apports externes à la planète en formation, par des astéroïdes et des comètes venant des zones externes du disque protosolaire, car les premiers éléments accrétés sont anhydres. Postérieurement à la formation de la Terre, il y a un apport tardif d'eau par des comètes issues de la ceinture de Kuiper (voir Fiche 7).

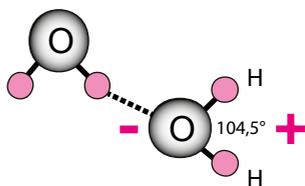
Si la répartition de l'hydrosphère était homogène, chaque  $\text{cm}^3$  de surface terrestre disposerait de 273 l d'eau dont :

- 266,2 l d'eau de mer
  - 4,69 l de glace
  - 2,03 l d'eau douce (aquifères)
  - 0,02 l d'eau douce (lacs et rivières)
  - 0,06 l dans les sols et sous forme de vapeur.
- L'eau douce disponible pour l'humanité et la biosphère est donc une ressource rare.



## ► Les propriétés de l'eau : une molécule électriquement dipolaire

L'eau présente une tendance à la polymérisation par l'intermédiaire de liaisons électrostatiques dites liaisons hydrogènes : le pôle oxygène d'une molécule attire le pôle hydrogène d'une autre. Ceci implique des propriétés particulières, ainsi l'eau devrait geler à  $-100\text{ }^\circ\text{C}$  et bouillir à  $-80\text{ }^\circ\text{C}$  (au lieu de  $0\text{ }^\circ\text{C}$  et  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ), l'énergie complémentaire, correspondant à ces écarts, sert à rompre les liaisons hydrogènes.



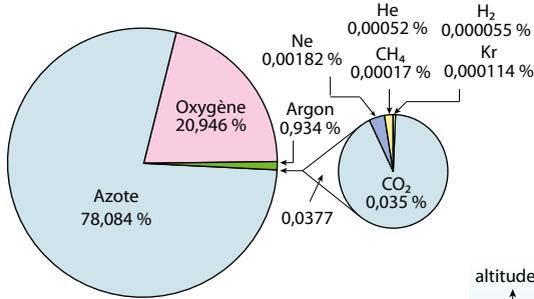
— liaison covalente  
 ..... liaison hydrogène

La **chaleur spécifique** et la **chaleur latente de fusion** sont parmi les plus fortes de tous les liquides classiques ;  
 → importance dans les transferts de chaleur et dans la régulation thermique.  
 La **chaleur de vaporisation** est la plus forte ;  
 → importance dans les transferts d'eau et de chaleur dans l'atmosphère.

Le **pouvoir dissolvant** est le plus élevé tant pour le nombre de substances dissoutes que pour les quantités dissoutes ;  
 → importance dans les altérations chimiques (fiche 44).

# L'enveloppe gazeuse : l'atmosphère terrestre

L'atmosphère est une enveloppe gazeuse que la Terre retient par gravité. Ces gaz persistent, extrêmement raréfiés, jusqu'à l'**exosphère** (entre 500 et 1 000 km) au-delà de laquelle ils s'échappent vers l'espace.



## La composition de l'atmosphère

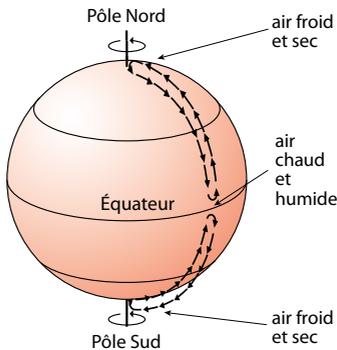
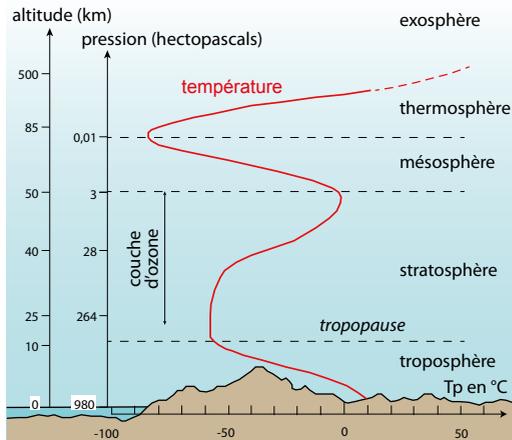
La teneur en O<sub>2</sub> est constante, celle en CO<sub>2</sub> dépend de la vitesse des réactions d'équilibre avec l'océan et les roches et de l'activité humaine. La vapeur d'eau est un constituant important des couches basses mais la température étant proche de celle de condensation, elle disparaît très vite en altitude (50 % à 2 km).

## La structure de l'atmosphère

Elle est définie par l'évolution de la température et la source d'énergie : le Soleil pour les couches hautes et le sol, qui réémet des infrarouges, pour les couches basses (fiche 14).

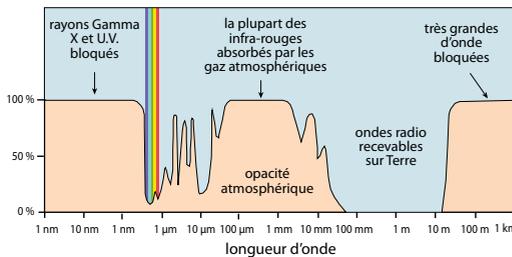
La **troposphère** contient 85 % de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau. C'est le domaine de la météorologie.

La **tropopause** peut se définir comme une surface isobare, celle des 300 hectopascals.



## La convection atmosphérique

Un système de convection existe autour de la Terre avec des vents soufflant des pôles vers l'équateur où l'air réchauffé s'élève au sommet de la troposphère pour retourner aux pôles compléter la cellule de convection. Dans la réalité, les forces de Coriolis fragmentent la cellule en sous-cellules de convection en leur donnant une composante latérale horaire ou anti-horaire suivant l'hémisphère (fiche 16).



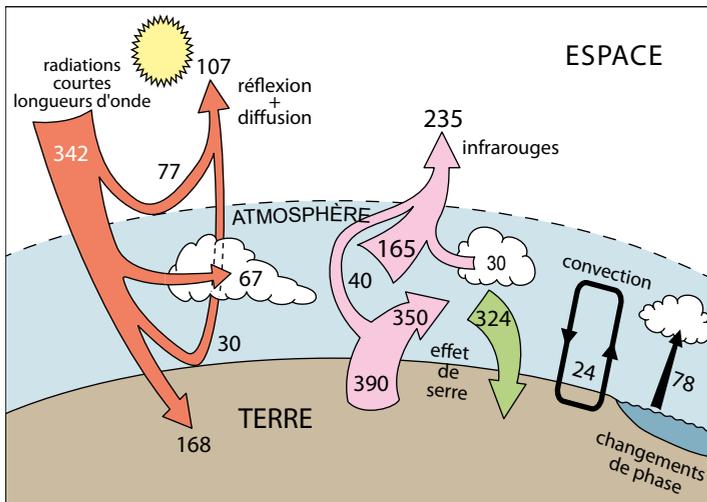
## L'opacité de l'atmosphère

La lumière visible peut atteindre le sol terrestre avec cependant une légère distorsion dans l'atmosphère.

## Le bilan thermique de la Terre

La chaleur sur la planète Terre a une double origine :

- une **source interne** ( $4,2 \cdot 10^{13} \text{ W}$  : chaleur initiale liée à la phase d'accrétion planétaire, radioactivité, différenciation des assises), responsable du déplacement des plaques ;
- une **source externe** (l'énergie solaire :  $7,1 \cdot 10^{17} \text{ W}$ ), responsable des variations de la température de surface aux différentes échelles temporelles climatiques (jour, saisons, cycles géologiques).

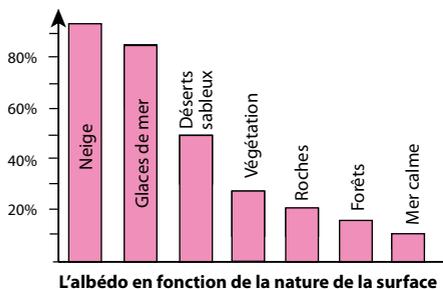


La totalité du flux solaire n'est pas absorbée :

- 107  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  sont réfléchis vers l'espace ;
- seulement 235  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  sont absorbés (67  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  par les nuages et 168  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  par la Terre).

Le système Terre-atmosphère émet, à son tour vers l'espace, une énergie de 235  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Le bilan radiatif est donc nul et le système terrestre global est, en moyenne, à l'équilibre.

Le système surface terrestre/atmosphère possède un **albédo** global (pourcentage de réflexion) de l'ordre de 30 %. L'albédo est très variable en fonction des surfaces, ce qui provoque des variations régionales importantes (fiche 15).

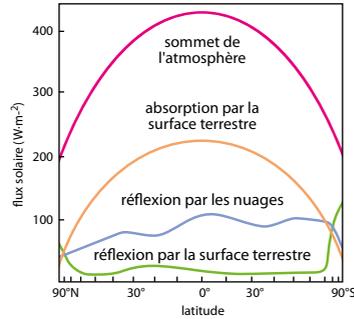
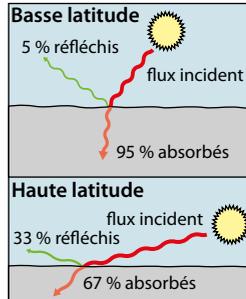
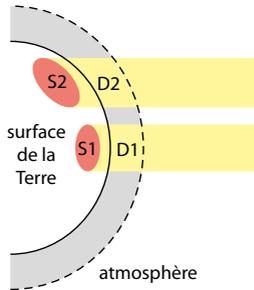


### L'effet de serre

Le rayonnement infrarouge thermique ( $\lambda > 4 \mu\text{m}$ ) absorbé dans l'atmosphère par la vapeur d'eau, le  $\text{CO}_2$  et l'ozone est réémis soit vers l'espace (195  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) soit vers la surface terrestre (324  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). La surface terrestre reçoit donc en plus du rayonnement solaire direct (168  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , domaine visible et proche infrarouge) qui a franchi l'atmosphère un flux infrarouge réémis par les basses couches de l'atmosphère (324  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Ce phénomène, l'**effet de serre**, explique la différence observée entre la **température effective** ( $-18^\circ\text{C}$ , température théorique de la planète donnée par la loi de Planck) et la **température moyenne réelle** ( $+15^\circ\text{C}$ ) observée à la surface terrestre.

# Les déséquilibres thermiques régionaux

## ► L'insolation en fonction de la latitude

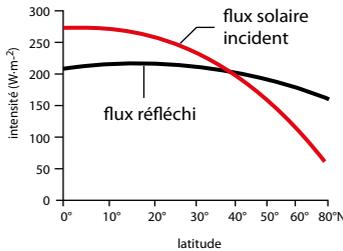


Une même quantité de rayonnement se répartit sur une plus grande surface (S2) aux hautes latitudes qu'à l'équateur (S1). La distance parcourue dans l'atmosphère (D2), et donc l'absorption, est aussi supérieure.

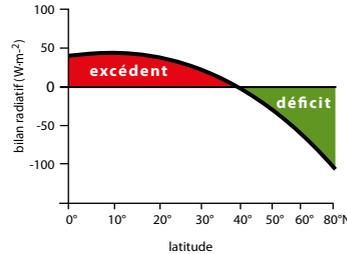
L'angle d'incidence (donc la latitude) influence sur l'absorption et la réflexion du rayonnement solaire.

Le flux solaire et son absorption par la surface terrestre varient en fonction de la latitude. L'augmentation de la réflexion dans les régions polaires est liée à l'albédo de la glace (voir fiche 14).

## ► Dissymétrie thermique du système climatique

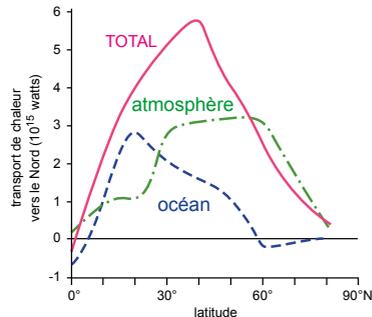


**Variation latitudinale du flux solaire incident et du flux réfléchi**

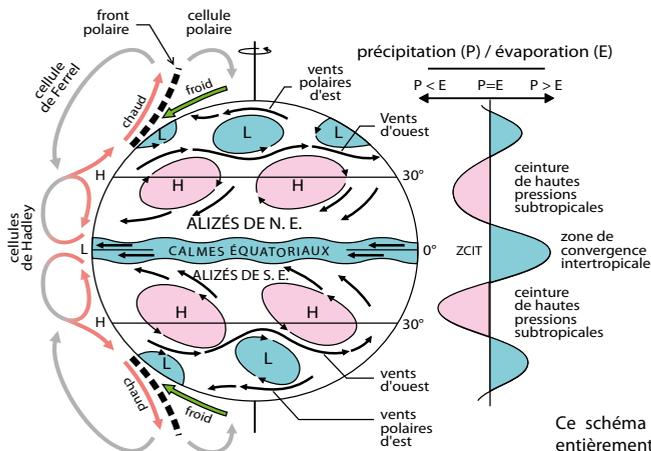


### Redistribution de l'énergie

Les circulations océaniques et atmosphériques (voir fiches 16 et 21) permettent une redistribution de l'énergie en transférant l'excédent des régions tropicales vers les hautes latitudes. Les circulations océaniques sont plus efficaces aux basses latitudes, les circulations atmosphériques aux hautes latitudes.



# Circulations atmosphériques et zonation climatique terrestre

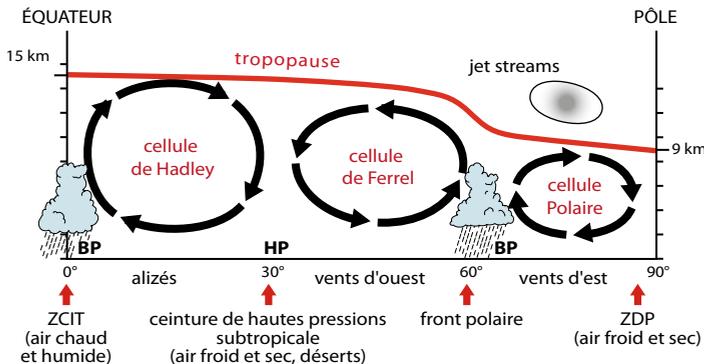


**Système des vents et zonation climatique**

La rotation de la Terre fragmente la cellule de convection (fiche 13) évacuant la chaleur des zones équatoriales vers les zones polaires en sous-cellules (Hadley, Ferrel, Polaire). Il en résulte une zonation latitudinale de hautes et basses pressions responsable des caractéristiques des zones climatiques et du régime des vents.

Ce schéma correspond à une Terre théorique entièrement recouverte d'eau. Dans la réalité la répartition hétérogène des continents et des océans complique le système.

Au niveau de la cellule de Ferrel, le régime devient plus chaotique, il se crée des cellules cycloniques et anticycloniques (anticyclone des Açores) dont les déplacements régissent le climat des régions tempérées. Les événements climatiques extrêmes (sécheresses, tornades, ouragans) sont traités avec les aléas (fiche 233).



## Circulation générale atmosphérique

ZCIT = zone de convergence inter tropicale  
ZDP = zone de divergence polaire  
HP = hautes pressions  
BP = basses pressions

La zone équatoriale est une zone de basses pressions qui attire les masses d'air, plus froides, issues de 30° N et S. Ces vents, les **alizés**, sont déviés par la force de Coriolis vers l'ouest. Le déplacement de la ZCIT, vers le nord ou le sud, au cours de l'année détermine l'alternance de saisons sèche et humide en zone tropicale (fiche 17). La zone de hautes pressions (air plus sec) qui règne vers 30° de latitude, induit une ceinture désertique sur les continents et une augmentation de salinité dans les océans (fiche 24). Au niveau du front polaire l'affrontement des masses d'air chaud (méditerranéennes) et froid (polaires) engendre des vents violents en altitude (500 km/h) : les jet streams.