

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	1
Christophe THOMAZO et Karim BENZERARA	
<b>Chapitre 1. L'altération des roches par le vivant</b> . . . . .	7
Bastien WILD et Damien DAVAL	
1.1. L'altération des roches : dissolution et zone critique. . . . .	7
1.2. Paramétrisation des lois de vitesse de dissolution des minéraux. . . . .	8
1.2.1. Équation générale. . . . .	10
1.2.2. Constante de vitesse de dissolution ( $k_{min}$ ). . . . .	11
1.2.3. Surface « effective » de contact entre le fluide et le minéral ( $S$ ). . . . .	12
1.2.4. Effet spécifique d'espèces dissoutes en solution ( $\prod_i [a_i]^{j_i}$ ) . . . . .	12
1.2.5. Effet de l'écart à l'équilibre thermodynamique ( $\Delta_r G$ ) . . . . .	13
1.2.6. Effet de la température ( $T$ ). . . . .	14
1.2.7. Facteurs non renseignés dans l'équation générale. . . . .	15
1.3. Modélisation de l'altération chimique des roches en zone critique . . . . .	16
1.3.1. Une approche classique essentiellement abiotique . . . . .	16
1.3.2. Contribution du vivant à l'altération : pourquoi s'intéresser aux microorganismes ? . . . . .	18
1.3.3. Intégration des processus d'altération d'origine microbienne dans différents types d'écosystèmes . . . . .	20
1.4. Mécanismes associés à la dissolution microbienne . . . . .	23
1.4.1. Biofilms et microenvironnements . . . . .	23
1.4.2. Réactions d'oxydoréduction. . . . .	23
1.4.3. Acidolyse. . . . .	24
1.4.4. Ligands . . . . .	24
1.4.5. Effets mécaniques. . . . .	25

1.5. Acteurs microbiens de l'altération biotique . . . . .	25
1.5.1. La minéralosphère . . . . .	26
1.5.2. Les bactéries . . . . .	28
1.5.3. Les champignons . . . . .	30
1.6. Quel impact quantitatif du vivant sur la dissolution des minéraux ? . .	30
1.6.1. Un positionnement non consensuel de la communauté . . . . .	30
1.6.2. Les obstacles à surmonter pour évaluer la contribution microbienne. . . . .	31
1.6.3. Vers de nouveaux protocoles de mesure de la contribution microbienne ? . . . . .	33
1.7. Conclusion . . . . .	35
1.8. Bibliographie . . . . .	36

**Chapitre 2. Biominéralisation : la formation de minéraux  
par le vivant . . . . .**

51

Karim BENZERARA

2.1. Introduction. . . . .	51
2.2. Diversité des biominéraux et des organismes biominéralisateurs . . . .	54
2.2.1. Diversité des organismes biominéralisateurs . . . . .	57
2.2.2. Différences entre les biominéraux et leurs équivalents abiotiques . . . . .	60
2.3. Mécanismes de formation des biominéraux . . . . .	62
2.3.1. Mécanismes de formation des minéraux . . . . .	62
2.3.2. Principes d'action du vivant sur la formation des minéraux . . . .	67
2.3.3. Méthodes d'étude de la biominéralisation . . . . .	73
2.4. Impact de la biominéralisation sur le fonctionnement de la Terre . . . .	80
2.5. Impact de la biominéralisation sur le fonctionnement du vivant. . . . .	82
2.6. Histoire évolutive des processus de biominéralisation . . . . .	83
2.7. Applications de la biominéralogie . . . . .	85
2.8. Conclusion . . . . .	87
2.9. Bibliographie . . . . .	88

**Chapitre 3. Les microbialites dans le registre fossile et actuel . . .**

93

Emmanuelle VENNIN, Anthony BOUTON, Pierre BOUSSAGOL  
et Pieter VISSCHER

3.1. Introduction. . . . .	93
3.2. Les microbialites : une archive continue de l'histoire de la Terre . . . .	94
3.2.1. Acception historique des termes . . . . .	94
3.2.2. Critères de classification des microbialites . . . . .	95
3.2.3. Outils et méthodes de caractérisation des microbialites . . . . .	99

3.2.4. Distribution temporelle et environnementale des microbialites . . .	101
3.2.5. Implications fondamentales, appliquées et sociétales de l'étude des microbialites . . . . .	105
3.3. Les modalités de formation des microbialites. . . . .	105
3.3.1. Du tapis microbien aux microbialites . . . . .	105
3.3.2. Les conditions chimiques favorables à la minéralisation . . . . .	108
3.3.3. Facteurs de contrôle de la formation des microbialites . . . . .	109
3.3.4. Les conditions environnementales favorables aux développements des microbialites . . . . .	113
3.4. La préservation des microbialites dans le registre fossile . . . . .	117
3.4.1. Potentiel de préservation. . . . .	117
3.4.2. Diagenèse précoce, diagenèse tardive . . . . .	119
3.5. Exemples illustrant la diversité des microbialites dans les environnements actuels et fossiles . . . . .	120
3.5.1. Exemples de microbialites actuels . . . . .	120
3.5.2. Les microbialites anciens : quelques périodes-clés de l'histoire de la Terre enregistrées par les dépôts microbiens . . . . .	122
3.6. Conclusion . . . . .	124
3.7. Bibliographie. . . . .	125

## **Chapitre 4. Approches moléculaires pour l'étude de la diversité phylogénétique et fonctionnelle du vivant . . . . .**

137

Miguel INIESTO, Ana GUTIÉRREZ-PRECIADO, Thomas BACCHETTA,  
David MOREIRA et Purificación LÓPEZ-GARCÍA

4.1. Classer et comprendre le vivant . . . . .	137
4.1.1. La taxonomie et les systèmes de classification des organismes . .	138
4.1.2. La phylogénie moléculaire et l'arbre du vivant . . . . .	139
4.1.3. Analyse de la diversité sur la base de gènes marqueurs d'identité phylogénétique . . . . .	140
4.1.4. Métagénomique et autres approches « omiques » . . . . .	144
4.2. La diversité microbienne associée aux microbialites . . . . .	147
4.2.1. Contexte environnemental et échantillonnage . . . . .	148
4.2.2. Composition des communautés microbiennes associées aux microbialites au travers des outils moléculaires. . . . .	150
4.3. Les fonctions des communautés microbiennes associées aux microbialites . . . . .	153
4.3.1. Métagénomique . . . . .	154
4.3.2. Métatranscriptomique et d'autres méthodes « omiques » . . . . .	156

4.4. Reconstruction de l'histoire évolutive et inférence des traits anciens . . .	156
4.4.1. Échantillonnage taxonomique, nouvelles lignées, arbre du vivant . . .	157
4.4.2. Reconstruire les fonctions ancestrales . . . . .	158
4.5. Conclusions et perspectives . . . . .	160
4.6. Bibliographie . . . . .	161

## **Chapitre 5. L'oxygène : un acteur géobiologique majeur . . . . . 169**

Christophe THOMAZO

5.1. Introduction . . . . .	169
5.2. L'oxygène : origine et propriétés . . . . .	170
5.2.1. L'origine cosmochimique de l'oxygène . . . . .	170
5.2.2. Les propriétés remarquables de l'oxygène . . . . .	172
5.3. L'histoire géobiologique du dioxygène sur Terre . . . . .	178
5.3.1. L'environnement de la Terre primitive . . . . .	178
5.3.2. Les événements d'oxygénation : tempo et conséquences . . . . .	188
5.4. Conclusion . . . . .	197
5.5. Bibliographie . . . . .	197

## **Chapitre 6. L'importance du vivant dans les cycles du carbone et de l'azote . . . . . 205**

Alice PELLERIN et Magali ADER

6.1. Le concept de cycles biogéochimiques . . . . .	205
6.2. Le cycle biogéochimique du carbone . . . . .	206
6.2.1. Pourquoi s'intéresser au cycle biogéochimique du carbone ? . . .	206
6.2.2. Les principaux réservoirs et flux de carbone . . . . .	206
6.2.3. La systématique isotopique du cycle du carbone . . . . .	208
6.2.4. Le $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ des roches sédimentaires carbonatées : archive du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ de l'océan . . . . .	210
6.2.5. Signification de la relative stabilité du $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ depuis 3,5 Ga . . .	210
6.2.6. Origine de la variabilité du $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ entre 2,3 et 2,0 Ga et entre 750 et 540 Ma . . . . .	213
6.2.7. Le $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ des roches sédimentaires : archive des métabolismes autotrophes . . . . .	214
6.2.8. Conclusions à propos du cycle biogéochimique du carbone . . .	216
6.3. Le cycle biogéochimique de l'azote . . . . .	216
6.3.1. Pourquoi s'intéresser au cycle biogéochimique de l'azote ? . . .	216
6.3.2. Les principaux réservoirs et flux d'azote actuels . . . . .	217
6.3.3. La systématique isotopique du cycle de l'azote . . . . .	219
6.3.4. Les archives de l'azote dans les temps géologiques anciens : préservation, réservoirs et flux . . . . .	220

6.3.5. Le $\delta^{15}\text{N}$ des roches sédimentaires précambriennes : une archive de l'oxygénation des océans . . . . .	222
6.3.6. Démêler les effets locaux des changements globaux . . . . .	223
6.4. Conclusions générales. D'un cycle géochimique à un cycle biogéochimique : comment détecter l'apparition des premiers flux biologiques d'azote et de carbone ? . . . . .	224
6.5. Bibliographie . . . . .	225

## **Chapitre 7. Modéliser la biosphère et ses interactions avec la géosphère . . . . . 227**

Guillaume LE HIR

7.1. Introduction . . . . .	227
7.2. Réponse du vivant aux changements globaux actuels . . . . .	231
7.2.1. La perturbation anthropique : la fragilité de l'atmosphère et de l'océan . . . . .	231
7.2.2. La divergence de réponse entre la biosphère continentale et la biosphère océanique . . . . .	232
7.2.3. Les échanges océan-atmosphère . . . . .	233
7.2.4. L'utilisation du carbone par la biosphère marine . . . . .	234
7.2.5. La pompe biologique et la perturbation anthropique . . . . .	239
7.2.6. Le problème de la régulation de l'oxygène océanique . . . . .	239
7.2.7. Limites et avantages des modèles . . . . .	241
7.3. L'interaction géosphère-biosphère lors de la colonisation des continents par les plantes . . . . .	242
7.3.1. Comment les plantes refroidissent-elles le climat ? . . . . .	242
7.3.2. Modélisation plus complexe des effets de la colonisation des plantes sur le climat . . . . .	248
7.4. Comment modéliser le vivant lors des extinctions de masse ? . . . . .	250
7.4.1. Les extinctions de masse, des crises de la biomasse vues par les modèles en boîtes . . . . .	251
7.4.2. La prise en compte des niches écologiques dans la modélisation de l'impact d'une perturbation environnementale sur la biosphère : exemple de l'extinction fini-ordovicienne . . . . .	255
7.4.3. La modélisation des zones d'habitat théoriques pour une comparaison de l'effet du volcanisme et d'un impact d'astéroïde sur la biosphère : exemple de l'extinction du K-Pg . . . . .	255
7.4.4. Développements en cours pour une modélisation plus sophistiquée des interactions entre la biosphère et les perturbations environnementales . . . . .	257
7.5. Conclusion . . . . .	258
7.6. Bibliographie . . . . .	258

<b>Chapitre 8. La biodiversité au cours des temps géologiques : une illustration du couple Terre/vie</b> . . . . .	263
Arnaud BRAYARD	
8.1. Introduction. . . . .	263
8.2. Histoire de la vie : comment la mesurer dans le temps et l'espace ? . .	264
8.2.1. Les pionniers. . . . .	265
8.2.2. L'avènement de l'informatique et des grands jeux de données . .	265
8.2.3. Les biais de l'enregistrement fossile . . . . .	268
8.2.4. Comment en tenir compte ? . . . . .	268
8.2.5. Le « big data » . . . . .	270
8.3. Extinctions et extinctions de masse. . . . .	271
8.3.1. Liste des principales extinctions du Phanérozoïque . . . . .	271
8.3.2. Les causes des extinctions. . . . .	273
8.4. (Re)diversifications : quelques exemples d'interactions de la biosphère avec la géosphère . . . . .	276
8.4.1. Dans ou sur le fond marin . . . . .	276
8.4.2. Dans la colonne d'eau . . . . .	279
8.4.3. Et sur les continents ? . . . . .	282
8.5. Conclusion . . . . .	282
8.6. Bibliographie. . . . .	283
<b>Conclusion</b> . . . . .	291
Christophe THOMAZO et Karim BENZERARA	
<b>Liste des auteurs</b> . . . . .	297
<b>Index</b> . . . . .	299