



HAL
open science

La modélisation en écologie microbienne. Chapitre 19

Jean-Christophe Poggiale, Philippe Dantigny, Rutger de Wit, Christian Steinberg

► **To cite this version:**

Jean-Christophe Poggiale, Philippe Dantigny, Rutger de Wit, Christian Steinberg. La modélisation en écologie microbienne. Chapitre 19. *Ecologie Microbienne: Microbiologie des milieux naturels et anthropisés*, Presses Universitaires de Pau et des Pays de l'Adour, 1004 p., 2011, 2-35311-022-3 9782353110223. hal-02806889

HAL Id: hal-02806889

<https://hal.inrae.fr/hal-02806889v1>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PARTIE 1

CHAPITRES GÉNÉRAUX

CHAPITRE 1

LES CHAMPS THÉMATIQUES DE L'ÉCOLOGIE MICROBIENNE

Jean-Claude Bertrand, Pierre Caumette, Philippe Lebaron & Philippe Normand

CHAPITRE 2

QUELQUES ÉLÉMENTS HISTORIQUES DE L'ÉCOLOGIE MICROBIENNE

Pierre Caumette, Jean-Claude Bertrand & Philippe Normand*

2.1. Introduction	9
2.2. À la découverte des micro-organismes	10
2.3. Les débuts de la microbiologie	12
2.4. Les débuts de l'écologie microbienne	14
2.5. L'écologie microbienne au cours du xx^e siècle	18
2.5.1. Dans le monde	18
2.5.2. ... et en France	23
2.6. L'écologie microbienne aujourd'hui	23
2.6.1. Dans le monde	23
2.6.2. ... et en France	24

CHAPITRE 3

STRUCTURE ET FONCTION DES MICRO-ORGANISMES ; PRODUCTION ET UTILISATION DE LA MATIÈRE ET DE L'ÉNERGIE

Robert Matheron & Pierre Caumette*

3.1. Structure et fonction des procaryotes et eucaryotes : caractéristiques et grandes différences	27
3.1.1. Les micro-organismes procaryotes	27
• <i>Les enveloppes cellulaires des procaryotes</i>	30
- La membrane cytoplasmique	30
- La paroi	31
• <i>Le cytoplasme et le nucléoïde</i>	32
• <i>Les spores et les appendices cellulaires</i>	34
3.1.2. Les micro-organismes eucaryotes	34
3.2. Notion de métabolisme	35

3.3. Métabolisme énergétique	39
3.3.1. Principes généraux.....	39
3.3.2. Les respirations chez les micro-organismes	40
• <i>La respiration aérobie chez les micro-organismes chimio-organotrophes</i>	40
- Oxydation des glucides	42
- Oxydation des lipides	43
- Oxydation des protéines.....	43
- Synthèse de l'énergie	43
• <i>La respiration aérobie chez les micro-organismes chimiolithotrophes</i>	45
- Les principaux donneurs d'électrons des micro-organismes chimiolithotrophes.....	45
- La production d'énergie chez les micro-organismes chimiolithotrophes	47
• <i>Les respirations anaérobies</i>	49
- La réduction dissimilatrice du nitrate	50
- Cas particulier, l'anammox	52
- La réduction dissimilatrice du sulfate.....	52
- La respiration du fer ferrique ou ferri-réduction	54
- La respiration du fumarate.....	54
- La respiration du CO ₂ (acétogénèse et méthanogénèse)	54
3.3.3. Les fermentations	55
• <i>Production d'hydrogène par les fermentations</i>	57
• <i>Mécanisme de conservation de l'énergie</i>	57
• <i>Diversité des fermentations et leurs voies métaboliques</i>	57
• <i>Syntrophie. Transfert interspécifique d'hydrogène</i>	58
3.3.4. Les photosynthèses	60
• <i>Les pigments photosynthétiques des micro-organismes phototrophes chlorophylliens</i>	61
• <i>Photosynthèse oxygénique</i>	62
• <i>Photosynthèse anoxygénique</i>	63
• <i>Utilisation de l'énergie lumineuse par les archées</i>	66
3.4. Production de matière et biosynthèses	66
3.4.1. Les micro-organismes autotrophes : l'assimilation du CO ₂	67
• <i>La voie du ribulose 1,5-diphosphate</i>	67
• <i>Le cycle inverse des acides tricarboxyliques</i>	69
• <i>La voie réductrice de l'acétyl-CoA</i>	69
• <i>Le cycle du 3-hydroxypropionate</i>	69
• <i>La voie en C₄</i>	69
3.4.2. Assimilation des composés en C ₁ et composés assimilés	70
• <i>Micro-organismes méthylotrophes aérobies</i>	70
• <i>Micro-organismes méthylotrophes anaérobies</i>	70
3.4.3. Les micro-organismes hétérotrophes	70
• <i>Assimilation des composés en C₂</i>	72
• <i>Voies métaboliques centrales et formation du squelette carboné des principaux monomères</i>	72
3.4.4. Assimilation de l'azote, du soufre, des éléments essentiels.....	73

• Assimilation des composés azotés.....	73
- Réduction assimilatrice des nitrates	73
- Fixation du diazote	73
- Incorporation de l'ammonium	75
• Assimilation des composés soufrés.....	75
• Assimilation des autres composés minéraux, oligo-éléments et facteurs essentiels	76
3.5. Conclusion.....	77

PARTIE 2

TAXONOMIE ET ÉVOLUTION

CHAPITRE 4

PENDANT TROIS MILLIARDS D'ANNÉES LES MICRO-ORGANISMES ONT ÉTÉ LES SEULS HABITANTS DE LA TERRE

Jean-Claude Bertrand, Céline Brochier-Armanet, Manolo Gouy & Frances Westall*

4. 1. Du « monde à ARN » au dernier ancêtre commun à tous les êtres vivants : LUCA.....	81
4.1.1. Définition(s) de LUCA.....	83
4.1.2. Où et quand vivait LUCA.....	83
4.1.3. Comment décrire LUCA ?	86
4.1.4. Les principales caractéristiques de LUCA.....	87
4.1.5. Le génome de LUCA.....	88
• <i>Le plus petit génome cellulaire connu</i>	88
• <i>Approches expérimentales</i>	89
• <i>Génomique comparée</i>	89
4.1.6. LUCA : hyperthermophile, thermophile ou mésophile ?.....	90
4.1.7. Structure moléculaire des lipides membranaires de LUCA.....	91
4.1.8. Le métabolisme de LUCA	91
4.1.9. LUCA procaryote, eucaryote ou autre ?	91
4.1.10. L'émergence des trois domaines.....	91
• <i>La racine de l'arbre universel du vivant</i>	91
• <i>Les trois scénarios possibles</i>	94
4.2. Les indices géologiques des plus anciennes formes de vie microbienne.....	94
4.2.1. Les micro-organismes réalisent une discrimination isotopique	94
4.2.2. Les fossiles de procaryotes, isolés ou regroupés en colonies	94
• <i>Les critères pour l'identification des microfossiles</i>	94
• <i>Les stromatolithes : une définition</i>	95
• <i>Du tapis microbien à la formation d'un stromatolithe</i>	96
• <i>Les stromatolithes de l'Archéen inférieur</i>	96

• <i>Évolution de l'importance des stromatolithes au cours des ères géologiques</i>	96
• <i>Les controverses sur la date d'apparition des stromatolithes</i>	96
• <i>D'autres traces fossiles de cellules procaryotes</i>	98
4.2.3. Les fossiles de cellules eucaryotes	98
4.2.4. Les fossiles des premiers organismes pluricellulaires	101
4.2.5. L'analyse des molécules fossiles : paléontologie moléculaire	102
• <i>Les premières traces de la photosynthèse oxygénique</i>	102
• <i>Les biomarqueurs des eucaryotes</i>	102
4.3. Le passage d'une organisation cellulaire de type procaryote	
à une organisation cellulaire de type eucaryote	104
4.3.1. Les eucaryotes sont les descendants d'un procaryote hétérotrophe anaérobie	104
• <i>Phase anaérobie</i>	104
• <i>Phase aérobie</i>	104
• <i>De nombreuses preuves soutiennent la théorie endosymbiotique</i>	106
4.3.2. Les eucaryotes résultent d'une association entre une bactérie et une archée	107
4.3.3. Les eucaryotes et les archées ont évolué à partir d'actinobactéries	107
4.3.4. Évolution par simplification chez les micro-organismes	109
4.4. Approche synthétique de l'évolution des métabolismes	110
• <i>Quels sont les mécanismes d'acquisition de l'énergie et de fixation du carbone utilisés</i> <i>par les micro-organismes au cours de l'évolution ?</i>	110
4.4.1. Le métabolisme primordial : hétérotrophe ou autotrophe ?	110
4.4.2. Apparition de la photosynthèse oxygénique et ses conséquences	112
• <i>Modification de la composition de l'atmosphère</i>	112
• <i>Apparition d'une couche d'ozone protectrice</i>	113
• <i>Apparition de nouvelles voies dans les cycles biogéochimiques</i>	113
• <i>L'oxygène est utilisé comme accepteur terminal d'électrons : apparition de la respiration aérobie</i>	113
4.5. Conclusion	113

CHAPITRE 5

SYSTÉMATIQUE ET ÉVOLUTION DES MICRO-ORGANISMES : CONCEPTS GÉNÉRAUX

Charles-François Boudouresque, Jean-Claude Bertrand, Pierre Caumette & Philippe Normand*

5.1. Historique et évolution de la systématique	119
5.1.1. Intérêt de la systématique en écologie microbienne	119
5.1.2. De la découverte du monde microbien à l'organisation taxonomique de sa diversité	120
5.1.3. De l'organisation hiérarchique à la recherche d'une phylogénie	121
• <i>La nécessité d'une organisation hiérarchique</i>	121
• <i>Les différentes écoles de classification des procaryotes</i>	125
• <i>La classification des eucaryotes et le problème des codes de la nomenclature</i>	125
5.1.4. L'organisation du monde vivant et l'évolution des concepts de la taxonomie à la phylogénie	126

5.2. Les micro-organismes : unicellularité ou pluricellularité ?	128
5.3. Le rôle des transferts de gènes dans l'évolution du vivant	132
5.4. L'origine des eucaryotes	133
5.4.1. De quand datent les premiers eucaryotes ?.....	133
5.4.2. La découverte de l'endosymbiose	134
5.4.3. La théorie actuelle de l'endosymbiose	137
• <i>Les endosymbioses primaires</i>	137
• <i>Les endosymbioses secondaires et tertiaires</i>	139
5.4.4. Les mécanismes et processus de l'endosymbiose	141
5.4.5. Les « voyages » du chloroplaste.....	145
5.5. L'arbre du vivant actuel : de la phylogénie à l'étude du génome	146
5.5.1. L'arbre du vivant actuel	146
5.5.2. Mais où sont passés les végétaux ?	146
5.5.3. Mais où sont passés les champignons, les algues et les protozoaires ?	150
5.6. Conclusion	153

CHAPITRE 6

TAXONOMIE ET PHYLOGÉNIE DES PROCARYOTES

Pierre Caumette, Céline Brochier-Armanet & Philippe Normand*

6.1. Le concept d'espèce chez les procaryotes et son évolution	159
6.2. Obtention d'une souche procaryote, collections de souches	165
6.3. Caractérisation d'une souche procaryote (minimum standard)	165
6.3.1. Critères phénotypiques	165
6.3.2. Critères génétiques	166
• <i>Le pourcentage en bases G et C des génomes</i>	168
• <i>L'hybridation ADN/ADN des génomes</i>	168
• <i>Le gène de l'ARNr 16S</i>	168
6.4. Dendrogrammes et arbres phylogénétiques	172
6.4.1. Dendrogrammes phénotypiques, taxonomie numérique.....	172
6.4.2. Arbres phylogénétiques.....	172
6.5. Classification des micro-organismes procaryotes : phylogénie versus phénotypie	175
6.6. Systématique des micro-organismes procaryotes : organisation hiérarchique et phylogénétique	177
6.6.1. Domaine <i>Archaea</i>	178
• <i>Découverte des Archaea</i>	178
• <i>Diversité des Archaea</i>	178
• <i>Classification des Archaea</i>	180
- <i>Les Crenarchaeota</i>	180
- <i>Les Euryarchaeota</i>	181
- <i>Les Korarchaeota</i>	184

- Les <i>Nanoarchaeota</i>	185
6.6.2. Domaine <i>Bacteria</i>	185
• Les phylums B1 à B9	185
- Le phylum <i>Aquificae</i>	185
- Le phylum <i>Thermotogae</i>	186
- Les phylums <i>Thermodesulfobacteria</i> , <i>Thermomicrobia</i> et <i>Deferribacteres</i>	187
- Le phylum <i>Chrysiogenetes</i>	187
- Le phylum <i>Deinococcus/Thermus</i>	187
- Le phylum <i>Chloroflexi</i>	187
- Le phylum <i>Nitrospirae</i>	187
• Le phylum B10 <i>Cyanobacteria</i>	188
• Les autres bactéries à Gram négatif	190
- Le phylum <i>Proteobacteria</i>	190
- Le phylum <i>Bacteroidetes</i>	195
- Le phylum <i>Chlorobi</i>	195
- Le phylum <i>Acidobacteria</i>	195
- Le phylum <i>Chlamydiae</i>	195
- Le phylum <i>Planctomycetes</i>	195
- Le phylum <i>Verrucomicrobia</i>	195
- Le phylum <i>Spirochaetes</i>	195
- Le phylum <i>Fibrobacteres</i>	196
- Le phylum <i>Fusobacteria</i>	196
- Le phylum <i>Dictyoglomi</i>	196
- Le phylum <i>Synergistetes</i>	196
• Les grands phylums de bactéries à Gram positif	196
- Le phylum <i>Firmicutes</i>	196
- Le phylum <i>Tenericutes</i>	198
- Le phylum <i>Actinobacteria</i>	199
6.7. Conclusion	200

CHAPITRE 7

TAXONOMIE ET PHYLOGÉNIE DES EUCARYOTES UNICELLULAIRES

Charles-François Boudouresque

7.1. Introduction	203
7.2. Les caractères généraux des eucaryotes	204
7.3. Les cycles biologiques	209
7.3.1. Pourquoi utiliser une terminologie simple et uniforme ?	209
7.3.2. Définition des spores, gamètes, conidies, boutures, carpoconidies et zygotes	209
7.3.3. Définition des cystes	211
7.3.4. Différents types de gamies	211

7.3.5. Définition des générations, des phases et du biocycle	213
7.4. Unichontes et Bichontes	215
7.5. Le règne des Plantae	215
7.5.1. Généralités	215
7.5.2. Centrohelida	216
7.5.3. Glaucocystobiontes	216
7.5.4. Rhodobiontes	217
7.5.5. Viridiplantae.....	219
7.6. Le règne des Rhizaria	222
7.6.1. Généralités	222
7.6.2. Radiolaires	222
7.6.3. Chlorarachniobiontes	223
7.6.4. Phytomyxea.....	224
7.6.5. Foraminifères	225
7.7. Les Chromalvéolés	226
7.8. Le règne des Alvéolés	227
7.8.1. Généralités	227
7.8.2. Ciliés.....	227
7.8.3. Dinobiontes	229
7.8.4. Apicomplexes	231
7.9. Le règne des Straménopiles	232
7.9.1. Généralités	232
7.9.2. Oobiontes	233
7.9.3. Chromobiontes	234
7.10. Les Haptobiontes	237
7.11. Les Cryptobiontes	239
7.12. Le règne des Discicristates.....	240
7.12.1. Généralités	240
7.12.2. Les Euglénéoïdes.....	240
7.12.3. Les Kinétoplastides	241
7.13. Le règne des Excavates	242
7.13.1. Généralités	242
7.13.2. Les Parabasalia.....	242
7.13.3. Les Diplomonadines	242
7.14. Le règne des Opisthochontes.....	243
7.14.1. Généralités	243
7.14.2. Les Microsporidies	243
7.14.3. Les Fungi.....	244
7.15. Le règne des Amœbobiontes	247
7.15.1. Généralités	247
7.15.2. Les Archamoebae	248
7.15.3. Les Mycétobiontes	248
7.16. Conclusion.....	249

PARTIE 3
LES HABITATS MICROBIENS :
DIVERSITÉ, ADAPTATION ET INTERACTIONS

CHAPITRE 8

BIODIVERSITÉ ET FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES MICROBIENS

Philippe Normand, Robert Duran, Xavier Le Roux, Cindy Morris & Jean-Christophe Poggiale*

8.1. Introduction	263
8.2. L'écologie microbienne face aux paradigmes de l'écologie relatifs à la biodiversité et au fonctionnement des écosystèmes	264
8.3. Démarches et outils mathématiques pour étudier la biodiversité microbienne	266
8.3.1. Approches basées sur les indices de diversités	268
8.3.2. Approches multivariées	268
8.4. Variables et méthodes d'études de la diversité microbienne	271
8.4.1. Approches ciblant le phénotype	271
• <i>Approches culturales</i>	271
• <i>Approches ciblant les métabolites</i>	272
- Lipides	272
- Pigments	272
• <i>Analyses des capacités métaboliques de communautés</i>	272
8.4.2. Approches ciblant le génotype	273
• <i>Approches ciblant les acides nucléiques (ADN)</i>	273
- Réassociation d'ADN	273
- Analyse de déséquilibre de liaison par association de polymorphismes (sur isolats)	273
- Électrophorèse sur gel en gradient, dénaturant (<i>DGGE</i>), Électrophorèse sur gel en gradient de température (<i>TGGE</i>)	273
- Polymorphisme conformationnel simple brin (<i>SSCP</i>)	274
- Analyse de l'espace intergénique ribosomal (<i>RISA</i>)	274
- Polymorphisme de longueur des fragments de restriction terminaux (<i>T-RFLP</i>)	274
- Analyses de banques de gènes ribosomiques ou de leur ADN complémentaire	274
- Analyse des différences de compositions entre communautés (<i>Libshuff</i>)	275
- Analyse de saturation, courbes de raréfaction	275
- Analyse de chimères	275
- Puces à ADN	275
• <i>Approches ciblant les acides nucléiques (ARN)</i>	276
- Gènes de fonction	276
- Cycle de l'azote	276
- Phototrophie (<i>rbc</i>)	276
- Oxydation du méthane (<i>pmo</i>)	277

- Cycle du soufre (<i>dsr</i> et <i>aprA</i>).....	277
- Autres gènes liés à une fonction	278
8.4.3. Comment quantifier cette biodiversité ?	278
• Indice de Diversité spécifique (<i>S</i> , richesse spécifique ou « <i>Species Richness</i> »).....	278
• Indice de Shannon (<i>H'</i>) de diversité alpha.....	278
• Indice de Simpson (<i>D</i>)	279
• Indice de Nei.....	279
8.5. Démarches d'étude des relations biodiversité microbienne-fonctionnement des écosystèmes	281
8.5.1. Fonctionnement des écosystèmes microbiens	283
• Tapis microbiens	284
• Biodiversité aquatique, fleurs d'eau.....	285
• Mer.....	286
• Tube digestif et communautés microbiennes	286
• Peau et autres parties du corps humain	288
• Dépollution.....	288
• Terre profonde	289
• Environnements anthropisés	290
8.6. Conclusion.....	290

CHAPITRE 9

ADAPTATIONS DES PROCARYOTES À LEURS BIOTOPES ET AUX CONDITIONS PHYSICO-CHIMIQUES DANS LES MILIEUX NATURELS OU ANTHROPISÉS

Philippe Normand, Pierre Caumette*, Philippe Goulas, Petar Pujic & Florence Wisniewski*

9.1. Introduction	297
9.2. Principaux systèmes de régulation.....	298
9.2.1. Régulation de la transcription	298
9.2.2. Les systèmes de transduction de signal	303
• Les systèmes à Histidine Protéine Kinase.....	304
- Les systèmes à deux composants (<i>Two-Component Systems</i> , TCS).....	304
- Le système de signalisation du chimiotactisme.....	309
- Les systèmes à Ser/Thr/Tyr kinases (<i>STYKs</i>).....	313
• Les systèmes à messenger secondaire	314
- Les systèmes à di-GMPc.....	314
- Les systèmes à AMPc	317
• Un système à uridylation	317
9.2.3. Régulation de la traduction.....	317
9.2.4. Glycosylation des protéines	317
9.3. Le système de perception de la densité cellulaire ou <i>quorum sensing</i>	319
9.3.1. Découverte du <i>quorum-sensing</i>	319

9.3.2. Gènes impliqués dans la communication par les acyl homosérines lactones (AHLs) et cascade de régulation	320
9.3.3. Interférences avec la communication bactérienne par AHLs	321
9.3.4. Les acyl homosérines lactones (AHLs), des signaux uniquement destinés aux bactéries ?	322
9.3.5. Les autres molécules signal bactériennes	323
9.4. Variation de phase	323
9.4.1. Variation de phase et variation antigénique	323
9.4.2. Variation de phase par modification du génome	324
• <i>Conversion génique</i>	324
• <i>Inversion site-spécifique</i>	324
• <i>Insertion-excision</i>	325
• <i>Duplication</i>	325
• <i>Délétion</i>	326
• <i>Mésappariement par glissement de brins</i>	326
• <i>Évènements multiples affectant un gène unique</i>	326
9.4.3. Variation de phase par régulation épigénétique	327
9.5. Antibiose et résistance aux antibiotiques	327
9.5.1. Biosynthèse des antibiotiques	327
9.5.2. Types de résistance aux antibiotiques	332
9.6. Réponses physiologiques aux stress abiotiques	332
9.6.1. Stress thermique	332
• <i>Les hautes températures</i>	333
• <i>Les basses températures</i>	335
9.6.2. Stress oxydatif	336
• <i>Les protéines induites par le stress oxydatif</i>	337
• <i>Les réponses au stress oxydatif</i>	337
9.6.3. Stress chimique	338
• <i>Réponses à la salinité</i>	338
- Influence des ions inorganiques sur la croissance	338
- Métabolisme sodium dépendant	338
- Résistance au sel et osmorégulation	339
- Bactéries et archées halophiles et leurs habitats	340
• <i>Réponses au pH</i>	342
- Écologie et diversité des procaryotes vivant à pH extrême	342
- Les bactéries et archées acidophiles	343
- Les bactéries et archées alcalophiles	343
- Maintenance de l'homéostasie	343
9.6.4. Adaptation à la pression	344
• <i>Les procaryotes piézophiles et piézotolérants</i>	344
• <i>Adaptation des micro-organismes à la pression</i>	345
9.6.5. Adaptation à la dessiccation	345
9.7. Adaptation aux biotopes	345
9.7.1. Sol	345

9.7.2. Eau et sédiments.....	346
• <i>Adaptation au milieu aquatique</i>	346
- La forme procaryotique.....	346
- Le mouvement.....	346
• <i>Adaptation aux supports</i>	347
9.7.3. Adhésion aux surfaces, biofilms et tapis microbiens.....	348
• <i>Mécanismes de l'adhésion</i>	348
- Interactions ioniques.....	349
- Interactions hydrophobiques.....	349
- Présence de lectines.....	349
- Autres mécanismes d'adhésion.....	349
• <i>Formation des biofilms</i>	349
• <i>Les tapis microbiens</i>	350
9.7.4. Air.....	352
9.8. Adaptation aux milieux anthropisés.....	352
9.9. Conclusion.....	353

CHAPITRE 10

LES CONDITIONS DE VIE EXTRÊMES SUR LA PLANÈTE ET EXOBIOLOGIE

Jean-Luc Cayol, Bernard Ollivier*, Didier Alazard, Ricardo Amils, Anne Godfroy,*

Florence Piette & Daniel Prieur

10.1. Introduction.....	363
10.2. Les bactéries psychrophiles.....	364
10.2.1. Présentation.....	364
10.2.2. Terminologie.....	364
10.2.3. Environnements et biodiversité.....	365
• <i>Les Océans Arctiques et Antarctiques</i>	365
• <i>Les eaux profondes</i>	366
• <i>Glace de mer</i>	366
• <i>Neiges et glaciers</i>	366
• <i>Permafrost</i>	367
• <i>Lacs sous-glaciaires antarctiques</i>	368
10.2.4. Adaptations moléculaires.....	368
• <i>Les membranes</i>	368
• <i>Les enzymes</i>	369
• <i>Facteurs divers</i>	370
- Séquences génomiques.....	370
- Exopolysaccharides.....	370
- Protéines de nucléation et protéines « antigels ».....	370

- Protéines du choc froid (« <i>cold-shock proteins</i> »)	371
10.2.5. Applications biotechnologiques	371
10.3. Les micro-organismes procaryotes thermophiles et hyperthermophiles	371
10.3.1. Habitats des micro-organismes thermophiles	372
• <i>Les écosystèmes géothermiques terrestres</i>	372
• <i>Les écosystèmes hydrothermaux océaniques profonds</i>	372
• <i>Les écosystèmes hydrothermaux sous-marins littoraux</i>	374
• <i>Autres habitats : les puits de pétrole et les habitats liés à l'activité humaine</i>	374
10.3.2. Panorama phylogénétique et métabolique des procaryotes thermophiles et hyperthermophiles	374
• <i>Le domaine des bactéries</i>	374
• <i>Le domaine des archées</i>	376
• <i>Euryarchaeota hyperthermophiles</i>	376
• <i>Crenarchaeota hyperthermophiles</i>	378
10.3.3. La vie à haute température	379
• <i>Stabilité des protéines</i>	379
• <i>Stabilité de l'ADN</i>	379
• <i>Lipides membranaires</i>	379
10.3.4. Contraintes techniques liées à la culture des procaryotes thermophiles	379
10.3.5. Applications biotechnologiques	380
10.3.6. Les hyperthermophiles et l'évolution	380
10.4. Les micro-organismes halophiles et hyperhalophiles	380
10.4.1. Habitats des micro-organismes halophiles.....	381
• <i>Les écosystèmes</i>	381
• <i>La physico-chimie des lacs</i>	382
10.4.2. Origine de la matière organique	386
• <i>Dégradation de la matière organique dans les milieux hypersalés</i>	386
• <i>Les solutés compatibles</i>	387
10.4.3. Les bactéries halophiles extrêmes	387
10.4.4. Les archées halophiles extrêmes.....	388
10.4.5. Les micro-organismes eucaryotes halophiles	388
10.4.6. Applications biotechnologiques	388
10.5. Les micro-organismes piézophiles	389
10.5.1. Les piézopsychrophiles des abysses : un peu d'histoire.....	390
• <i>Présentation de quelques bactéries piézopsychrophiles</i>	390
10.5.2. Taxonomie et phylogénie des micro-organismes piézopsychrophiles.....	391
10.5.3. Adaptations aux hautes pressions chez les micro-organismes piézopsychrophiles	391
10.5.4. Cas particulier des sources hydrothermales océaniques	392
• <i>Réponses à la pression hydrostatique</i>	392
10.5.5. D'autres piézophiles à découvrir	393
10.6. Les micro-organismes acidophiles	394
10.6.1. Présentation	394
10.6.2. Diversité des environnements acides extrêmes.....	395

• <i>Domaine des bactéries</i>	396
• <i>Domaine des archées</i>	398
• <i>Domaine des eucaryotes</i>	398
10.6.3. Écologie microbienne d'un environnement acide extrême : le Rio Tinto	399
10.7. Les micro-organismes alcalophiles	401
10.7.1. Présentation	401
10.7.2. Les écosystèmes alcalins	401
10.7.3. Diversité microbienne des lacs sodiques	403
• <i>Producteurs phototrophes primaires</i>	405
• <i>Micro-organismes alcalophiles aérobies</i>	405
• <i>Micro-organismes alcalophiles anaérobies</i>	406
10.7.4. Homéostasie du pH	407
10.7.5. Applications biotechnologiques des micro-organismes alcalophiles	407
10.8. Conclusion	408
• <i>Extrêmophiles et exobiologie</i>	408

CHAPITRE 11

MICRO-ORGANISMES ET INTERACTIONS BIOTIQUES

Yvan Moënne-Loccoz, Patrick Mavingui*, Claude Combes, Philippe Normand & Christian Steinberg*

11.1. Les grands types d'interactions	413
11.1.1. L'interaction, caractère fondamental du vivant	413
11.1.2. Les interactions conflictuelles	414
11.1.3. Les interactions bénéfiques	415
11.1.4. Le caractère dynamique des interactions	418
11.1.5. Les armes propres aux micro-organismes	418
11.2. Interactions entre micro-organismes	419
11.2.1. Les interactions conflictuelles	419
• <i>Parasitisme</i>	419
• <i>Prédation</i>	420
• <i>L'antibiose</i>	420
• <i>Compétition</i>	422
11.2.2. Les interactions bénéfiques	422
• <i>Cométabolisme</i>	422
• <i>Coopération, mutualisme, syntrophie</i>	422
• <i>Commensalisme</i>	424
• <i>Transfert de gène</i>	424
11.3. Interactions entre micro-organismes et plantes	425
11.3.1. Introduction	425
11.3.2. Localisation et effectifs des micro-organismes associés aux plantes	425

11.3.3. Provenance des micro-organismes associés aux plantes	428
11.3.4. Diversité et activité des micro-organismes associés aux plantes	429
• <i>Facteurs écologiques</i>	429
• <i>Diversité microbienne</i>	430
• <i>Activités microbiennes</i>	431
11.3.5. Les interactions biotiques des micro-organismes associés aux plantes	432
• <i>Vue d'ensemble</i>	432
• <i>Parasitisme</i>	432
• <i>Symbiose</i>	434
• <i>Coopération</i>	437
11.3.6. Signification pour la plante	439
11.3.7. Utilisations biotechnologiques	440
11.3.8. Épilogue	441
11.4. Interactions entre micro-organismes et animaux	441
11.4.1. Introduction	441
11.4.2. Diversité, distribution et effectif des micro-organismes associés aux animaux	442
• <i>Diversité microbienne</i>	442
• <i>Abondance et localisation des microbes</i>	444
11.4.3. Les différents types d'interactions entre micro-organismes, animaux et l'homme	445
• <i>Les interactions pathogènes</i>	445
• <i>Microbes et maladies infectieuses</i>	445
• <i>Les notions d'émergence et de ré-émergence des maladies</i>	448
• <i>Le caractère conflictuel des interactions microbes-animaux</i>	448
• <i>Les facteurs de virulence des pathogènes</i>	450
- Les adhésines	450
- Les systèmes de sécrétion	450
- Ilots de pathogénie et molécules effectrices	451
• <i>Les interactions mutualistes</i>	452
- Le mutualisme microbes-invertébrés	452
- Le mutualisme microbes-vertébrés	454
• <i>Commensalisme, parasitisme et autres interactions aux phénotypes intermédiaires</i>	455
- <i>Vue d'ensemble</i>	455
- <i>Wolbachia</i> et pléiotropie phénotypique	455
11.4.4. Réaction de défense et de contre-offensive dans les interactions microbes-animaux	456
• <i>MCP comme moyen de défense des animaux</i>	456
- Modulation de l'apoptose par les micro-organismes	457
11.4.5. Applications dans les interactions entre micro-organismes et animaux	459
• <i>Microbes et nutrition</i>	459
• <i>Microbes et santé</i>	459
11.4.6. Épilogue	460
11.5. Conclusion	460

CHAPITRE 12

TRANSFERTS HORIZONTAUX DE GÈNES DANS LES ÉCOSYSTÈMES MICROBIENS

Céline Brochier-Armanet* & David Moreira

12.1. Introduction	471
12.2. Mécanismes de transferts horizontaux chez les micro-organismes	471
12.2.1. Modes de transferts	471
• <i>La transformation</i>	471
• <i>La conjugaison</i>	473
• <i>La transduction</i>	476
12.2.2. Devenir de l'ADN transféré	477
12.3. Détection	480
12.3.1. Méthodes basées sur la similarité de séquences	480
• <i>Principe</i>	480
• <i>Biais</i>	480
12.3.2. Méthodes basées sur la répartition taxonomique des séquences	482
• <i>Principe</i>	482
• <i>Biais</i>	482
12.3.3. Méthodes phylogénétiques	484
• <i>Principe</i>	484
• <i>Limites</i>	485
12.3.4. Méthodes basées sur les biais de composition	486
• <i>Principe</i>	486
• <i>Limites</i>	490
12.3.5. Quantification	490
12.4. Un mécanisme évolutif majeur ?	493
12.4.1. THGs chez les procaryotes	494
• <i>THGs et adaptation</i>	494
• <i>THGs évolution et le concept d'espèce</i>	501
12.4.2. THGs chez les eucaryotes	504
• <i>Les symbioses et l'acquisition de gènes bactériens</i>	505
• <i>THGs inter-eucaryotes</i>	507
12.5. Conclusion	508

PARTIE 4

RÔLE ET FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES MICROBIENS

CHAPITRE 13

LES RÉSEAUX TROPHIQUES MICROBIENS DES MILIEUX AQUATIQUES ET TERRESTRES

Behzad Mostajir, Christian Amblard*, Evelyne Buffan-Dubau, Rutger de Wit,
Robert Lensi & Télésphore Sime-Ngando*

13.1. Introduction	515
13.1.1. Les écosystèmes pélagiques marins et lacustres	515
13.1.2. Les écosystèmes benthiques	516
13.1.3. Les écosystèmes terrestres	517
13.2. Les acteurs des réseaux trophiques microbiens	518
13.2.1. Les micro-organismes des milieux pélagiques marins et lacustres	518
• <i>Le femtoplanton</i>	518
• <i>Le picoplanton</i>	518
• <i>Le nanoplanton</i>	519
• <i>Le micro- et le mésoplanton</i>	519
• <i>Les champignons microscopiques (oobiontes et Fungi)</i>	520
13.2.2. Les micro-organismes des milieux benthiques marins et lacustres	521
• <i>Les micro-algues et les cyanobactéries</i>	521
• <i>Les bactéries phototrophes anoxygéniques</i>	522
• <i>Les bactéries chimolithotrophes</i>	522
• <i>Les bactéries hétérotrophes et les archées</i>	522
13.2.3. Les micro-organismes des milieux terrestres	523
• <i>Les consommateurs primaires</i>	524
• <i>Les consommateurs secondaires</i>	524
13.3. Le fonctionnement des réseaux trophiques microbiens	525
13.3.1. Le fonctionnement des réseaux trophiques microbiens en milieux pélagiques marins	525
• <i>Le réseau trophique herbivore</i>	525
• <i>Le réseau trophique microbien</i>	525
• <i>La boucle microbienne</i>	526
• <i>Le réseau trophique multivore</i>	527
• <i>Les voies trophiques et le transfert de matière du système microbien vers les macro-organismes</i>	527
13.3.2. Le fonctionnement des réseaux trophiques microbiens en milieux pélagiques lacustres	527
• <i>Le transfert de matière et d'énergie vers les niveaux trophiques supérieurs</i>	527
• <i>Le recyclage des éléments nutritifs</i>	529
13.3.3. Le fonctionnement des réseaux trophiques microbiens en milieux benthiques marins et lacustres	529
13.3.4. Le fonctionnement des réseaux trophiques microbiens en milieux terrestres	532

• <i>La décomposition de la MO dans les sols</i>	532
• <i>Le rôle de la prédation sélective</i>	532
• <i>Le rôle des autres interactions biotiques et abiotiques</i>	533
13.4. Les facteurs de contrôle des réseaux microbiens	534
13.4.1. Les facteurs de contrôle des réseaux microbiens pélagiques marins et lacustres	534
• <i>Les rôles des virus dans les réseaux trophiques microbiens aquatiques</i>	534
- <i>L'abondance et la diversité des virus</i>	534
• <i>Les principaux rôles des virus en milieu aquatique pélagique</i>	536
13.4.2. Les principaux facteurs de contrôle des réseaux microbiens benthiques marins et lacustres	537
13.4.3. Les facteurs de contrôle des réseaux microbiens terrestres	538
• <i>La régulation par les facteurs environnementaux et les perturbations</i>	538
• <i>La régulation par les facteurs biotiques</i>	539
13.5. Conclusion	539

CHAPITRE 14

LES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES

*Jean-Claude Bertrand**, *Patricia Bonin*, *Pierre Caumette*, *Jean-Pierre Gattuso*,
Gérald Grégori, *Rémy Guyoneaud*, *Xavier Le Roux*, *Robert Matheron* & *Franck Poly*

14.1. Introduction	545
14.1.1. Un cycle biogéochimique comporte trois étapes essentielles	545
14.1.2. Évolution qualitative et quantitative des éléments biologiques : échelles d'observation spatiales et temporelles	548
14.1.3. Rôle des micro-organismes dans les cycles biogéochimiques	549
14.2. Le cycle du carbone	549
14.2.1. Introduction	549
14.2.2. Le cycle global du carbone	550
• <i>Principaux réservoirs</i>	550
• <i>Cycle du carbone à long terme</i>	551
• <i>Cycle du carbone à court terme</i>	552
- <i>Flux continent-atmosphère</i>	552
- <i>Flux océan-atmosphère</i>	553
- <i>Flux continent-océan</i>	553
• <i>Modifications anthropiques du cycle du carbone et mécanismes de rétroaction sur le climat</i>	553
- <i>Émissions résultant de la combustion de carbone fossile</i>	553
- <i>Augmentation du CO₂ atmosphérique</i>	554
- <i>Échanges végétation-atmosphère</i>	554
- <i>Absorption du CO₂ par les océans</i>	555
14.2.3. Cycle du carbone dans la colonne d'eau océanique	556
• <i>Importance des micro-organismes planctoniques</i>	557
• <i>Production primaire et exportation de carbone : rôle du phytoplancton</i>	560

- Les principaux producteurs primaires.....	560
- Production primaire nette	561
- Devenir de la production primaire nette.....	563
- Production globale.....	564
- Respiration	568
- Échelle de l'écosystème	568
- Bilan production primaire-respiration.....	569
• <i>Cycle du carbonate de calcium</i>	570
14.2.4. le cycle du carbone dans les sédiments marins.....	571
• <i>Le carbone organique qui atteint l'interface eau-sédiment</i>	571
• <i>L'écosystème sédimentaire</i>	571
• <i>Dégradation de la matière organique dans le sédiment</i>	572
- La répartition des métabolismes.....	572
- La dégradation de la matière organique en présence de dioxygène.....	572
- La dégradation anaérobie de la matière organique.....	572
- Le rôle des micro-organismes fermentatifs	574
- En milieu marin, la sulfato-réduction est le métabolisme majoritaire.....	574
- Production et consommation d'hydrogène	574
- La bioturbation et ses conséquences.....	575
- Séquestration de la matière organique dans les sédiments.....	575
14.2.5. Le cycle du carbone dans les sols	578
• <i>La matière organique du sol</i>	578
• <i>La biocénose du sol</i>	579
• <i>Dégradation de la matière organique dans le sol (système plante - micro-organismes - sol)</i>	580
- Les métabolismes prédominants du cycle du carbone dans les sols.....	580
- Dégradation de la matière organique dans le sol	583
- Assimilation des composés organiques dans la biomasse microbienne	585
- Formation de l'humus	585
14.2.6. Le cycle du carbone dans les écosystèmes lacustres	590
14.2.7. Production et consommation de méthane.....	590
• <i>Qu'est-ce le méthane ?</i>	590
• <i>Les sources</i>	590
• <i>Conséquences des émissions de méthane : effet de serre</i>	590
• <i>La méthanogénèse</i>	591
- Les micro-organismes : les archées méthanogènes	591
- Les habitats des méthanogènes.....	592
- Rôle de la méthanogénèse lors de la biodégradation anaérobie de la matière organique	592
- Les différentes voies de production du méthane.....	592
- Production biologique du méthane en fonction du biotope.....	593
- Le méthane source d'énergie	596
• <i>Destruction photochimique du méthane</i>	596
• <i>Élimination du méthane en présence de dioxygène par les bactéries méthanotrophes</i>	596

• <i>Dégradation anaérobie du méthane</i>	598
14.3. Le cycle de l'azote	601
14.3.1. Introduction	601
14.3.2. L'Azote organique : assimilation des composés azotés	602
• <i>Assimilation de l'ammonium</i>	603
• <i>Assimilation du nitrate</i>	603
• <i>Fixation du diazote</i>	603
14.3.3. Processus conduisant à la production d'ammonium	606
• <i>Minéralisation-Ammonification</i>	606
• <i>Réduction dissimilatrice du nitrate en ammonium (RDNA) ou ammonification du nitrate</i>	609
14.3.4. Processus conduisant à la production de nitrate : nitrification	610
14.3.5. Production de diazote	612
• <i>Dénitrification</i>	612
• <i>Anammox</i>	614
14.3.6. Production d'oxyde nitreux	615
14.3.7. Le cycle de l'azote dans les écosystèmes naturels	616
• <i>Cycle de l'azote et agriculture</i>	616
• <i>Le cycle de l'azote dans les écosystèmes forestiers</i>	617
• <i>Le cycle de l'azote dans les zones humides</i>	617
• <i>Le cycle de l'azote dans les écosystèmes marins</i>	618
14.4. Le cycle du soufre	619
14.4.1. Introduction	619
14.4.2. La production de sulfures	621
• <i>Le soufre organique : biosynthèse et dégradation</i>	621
• <i>Sulfato-réduction dissimilatrice</i>	622
• <i>Autres métabolismes produisant du sulfure</i>	627
14.4.3. La production de sulfate	627
• <i>Production de sulfate par chimiotrophie : micro-organismes sulfo-oxydants incolores</i>	628
• <i>Production de sulfate par phototrophie : micro-organismes sulfo-oxydants photosynthétiques</i>	629
- Les bactéries phototrophes pourpres	631
- Les bactéries phototrophes vertes	632
14.4.4. Le fonctionnement du cycle du soufre dans les écosystèmes naturels	633
• <i>Les lacs stratifiés</i>	633
• <i>Les lagunes et autres milieux côtiers</i>	634
• <i>Les tapis microbiens photosynthétiques</i>	637
• <i>Les sources hydrothermales océaniques profondes</i>	639
14.5. Les cycles des métaux et métalloïdes	641
14.5.1. Introduction	641
14.5.2. Le cycle du fer	641
• <i>Le fer dans l'environnement</i>	641
• <i>Assimilation du fer par les micro-organismes</i>	642
• <i>L'oxydation du fer</i>	643

• <i>La réduction du fer</i>	644
14.5.3. Le cycle du manganèse	645
• <i>Le manganèse dans l'environnement</i>	645
• <i>Les fonctions biologiques</i>	645
• <i>L'oxydation par les micro-organismes</i>	645
• <i>La réduction par les micro-organismes</i>	648
14.6. Conclusion	652
• <i>Le rôle primordial des micro-organismes</i>	652
• <i>Plasticité des micro-organismes</i>	652
• <i>Évolution des cycles</i>	653

CHAPITRE 15

ENVIRONNEMENT ET MICRO-ORGANISMES PATHOGÈNES DE L'HOMME

Philippe Lebaron, Benoît Cournoyer, Karine Lemarchand, Sylvie Nazaret & Pierre Servais*

15.1. Introduction	659
15.2. Les différents types d'agents pathogènes	660
15.2.1. Les virus	660
• <i>Les entérovirus</i>	662
• <i>Les virus de l'hépatite A (HAV) et de l'hépatite E (HEV)</i>	662
• <i>Le rotavirus</i>	663
• <i>Le virus de Norwalk</i>	663
15.2.2. Les bactéries	663
15.2.3. Cas particulier des cyanobactéries toxiques	669
15.2.4. Les Fungi.....	669
15.2.5. Les eucaryotes unicellulaires	670
15.3. Qu'est-ce qu'un agent pathogène ?	671
15.3.1. Pouvoir de colonisation et de multiplication	672
• <i>Le pouvoir d'adhérence</i>	672
• <i>La capacité de multiplication à l'intérieur des tissus de l'hôte</i>	672
• <i>La capacité d'entrer et de survivre à l'intérieur des cellules eucaryotes</i>	674
• <i>La capacité de contourner les défenses immunitaires de l'hôte</i>	674
15.3.2. Pouvoir toxigène.....	674
• <i>Les exotoxines</i>	674
• <i>Les endotoxines</i>	674
15.3.3. Les voies d'entrée	674
• <i>Les voies cutanées et conjonctivales</i>	674
• <i>La voie respiratoire</i>	675
• <i>La voie orale</i>	675
15.3.4. Communication intercellulaire et virulence.....	675

15.3.5. Les îlots de pathogénie (IP) et autres îlots génomiques (IG) mobiles.....	675
• <i>Évidence de transferts des IP chez les bactéries</i>	676
15.3.6. Les antibiotiques et la lutte contre les maladies infectieuses bactériennes	677
• <i>Émergence et dissémination de la résistance bactérienne chez les bactéries pathogènes</i>	677
- Les mécanismes cellulaires d'adaptation et de dissémination	677
- Les antibiotiques, pression de sélection favorable en milieu hospitalier	677
- Utilisation des antibiotiques hors du milieu hospitalier	678
- Pression non antibiotique favorable au maintien de la résistance.....	678
• <i>Le résistome à l'origine de la résistance aux antibiotiques et de son évolution</i>	679
15.4. Les micro-organismes indicateurs de contamination fécale.....	680
15.4.1. Les coliformes totaux, coliformes thermotolérants (CTT) et <i>Escherichia coli</i>	681
15.4.2. Les entérocoques intestinaux.....	681
15.5. Sols et diffusion des agents pathogènes	682
15.6. Sources de pathogènes présents dans l'environnement aquatique	685
15.6.1. Les sources ponctuelles.....	685
• <i>Les rejets de station d'épuration</i>	686
• <i>Désinfection des eaux usées</i>	686
• <i>Les rejets urbains de temps de pluie (RUTP)</i>	687
15.6.2. Les sources diffuses.....	687
15.7. Devenir et transport dans l'environnement.....	688
15.7.1. Les facteurs abiotiques	688
• <i>La température</i>	688
• <i>La lumière</i>	689
• <i>Les éléments nutritifs</i>	689
• <i>La salinité</i>	689
• <i>La sédimentation</i>	690
• <i>Le pH</i>	690
15.7.2. Les facteurs biotiques	690
• <i>La prédation</i>	690
• <i>La lyse virale</i>	690
• <i>La compétition</i>	690
15.7.3. Effets des changements globaux	690
• <i>Cas particulier des changements climatiques globaux</i>	691
15.8. Les bactéries viables mais non cultivables (VNC).....	692
15.9. Les méthodes de détection.....	694
15.9.1 Les méthodes non destructives.....	695
• <i>L'hybridation in situ (HIS)</i>	696
• <i>Les méthodes immunologiques</i>	696
• <i>Les méthodes enzymatiques</i>	697
15.9.2. Les méthodes destructives	697
• <i>Application de la réaction de polymérisation en chaîne (PCR)</i>	697
15.10. Les réseaux de surveillance	699
15.11. Conclusion.....	701

CHAPITRE 16

ÉCOLOGIE MICROBIENNE APPLIQUÉE ET DÉPOLLUTION LES MICRO-ORGANISMES ACTEURS MAJEURS DE L'ÉLIMINATION DES POLLUTIONS QUI AFFECTENT L'ENVIRONNEMENT

Jean-Claude Bertrand, Pierre Doumenq, Rémy Guyoneaud, Benoît Marrot,
Fabrice Martin-Laurent, Robert Matheron, Philippe Moulin & Guy Soulas*

16.1. Introduction	705
16.2. Les traitements préventifs et de bioremédiation	706
16.2.1. Les micro-organismes agents de dépollution	707
• <i>La biostimulation</i>	707
• <i>La bio-augmentation</i>	707
• <i>La rhizostimulation</i>	707
• <i>La biolixiviation</i>	707
• <i>La bio-immobilisation</i>	707
16.2.2. Les principaux procédés de traitement des pollutions par voie microbiologique	707
• <i>Les bioréacteurs</i>	707
• <i>Le traitement dans des bassins et stations d'épuration</i>	708
• <i>Les biotertres, andains et « landfarming »</i>	708
• <i>La bioventilation et le biobarbotage</i>	709
16.3. Les principaux types de pollution	709
16.4. Les eaux résiduelles urbaines	710
16.4.1. Introduction	710
16.4.2. Origine et contenu des eaux usées	710
16.4.3. Traitement des eaux usées	713
• <i>Les prétraitements</i>	713
- Du dégrillage grossier au dégrillage fin	714
- Dessablage-déshuilage	714
• <i>Les traitements primaires ou traitements physico-chimiques</i>	716
- Coagulation - Flocculation	716
- Décantation	716
• <i>Les traitements secondaires</i>	716
- Traitements biologiques aérobies	716
- Élimination de l'azote et du phosphore par voie biologique	719
- La décantation secondaire dans les traitements aérobies à boues activées	720
- Traitements biologiques anaérobies	721
• <i>Traitements tertiaires : élimination de l'azote, du phosphore par d'autres procédés ; traitements complémentaires d'affinage</i>	721
• <i>Un procédé innovant : les Bioréacteurs à Membranes (BàM)</i>	721
16.5. Les déchets solides	722
16.5.1. Définition d'un déchet	722

16.5.2. La classification des déchets.....	723
16.5.3. Traitement aérobie ou compostage.....	723
• <i>Définition</i>	723
• <i>Les différentes étapes</i>	723
• <i>Les micro-organismes</i>	724
• <i>Les différents procédés de compostage</i>	725
16.5.4. Traitements anaérobies et méthanisation.....	725
• <i>Définition</i>	725
• <i>Le principe de la fermentation méthanique et les micro-organismes impliqués dans le processus</i>	725
16.5.5. Les décharges.....	726
16.6. Les effluents gazeux.....	728
16.6.1. Les sources.....	728
16.6.2. Les traitements.....	728
• <i>Les traitements récupératifs</i>	728
• <i>Les traitements destructifs</i>	729
- <i>L'incinération</i>	729
- <i>Les traitements biologiques</i>	729
16.7. Les xénobiotiques.....	730
16.7.1. Présentation.....	730
16.7.2. L'adaptation des micro-organismes aux xénobiotiques.....	730
16.7.3. Les pesticides.....	731
• <i>Présence dans l'environnement</i>	731
• <i>Biodégradation par les micro-organismes</i>	732
- <i>Le début des études de biodégradation : les herbicides à activité hormonale</i>	732
- <i>Principales voies biochimiques de la dégradation des pesticides</i>	734
- <i>Les principaux micro-organismes impliqués</i>	736
- <i>Bases physiologiques de la dégradation des pesticides</i>	736
- <i>Bases génétiques de la biodégradation des pesticides</i>	738
• <i>Les pesticides : bioremédiation</i>	739
- <i>Les méthodes de bioremédiation des sols</i>	739
- <i>Une étude de cas : l'atrazine</i>	743
16.7.3. Les polychlorobiphényles (PCB).....	751
• <i>Synthèse, structure chimique et utilisation</i>	751
• <i>Présence dans l'environnement</i>	751
• <i>Biodégradation par les micro-organismes</i>	752
- <i>Biodégradation anaérobie</i>	753
- <i>Biodégradation aérobie</i>	754
- <i>Le couplage de traitements anaérobies et aérobies est nécessaire pour la minéralisation des composés polychlorés</i>	757
• <i>Bioréhabilitation de sites contaminés par les PCB</i>	758
16.8. Les hydrocarbures et les produits pétroliers.....	759
16.8.1. Les hydrocarbures.....	759
• <i>Les différentes familles d'hydrocarbures</i>	759

- Les hydrocarbures saturés	759
- Les hydrocarbures insaturés	759
- Les hydrocarbures aromatiques	759
• <i>Origine des hydrocarbures</i>	760
- Les hydrocarbures d'origine naturelle	760
- Les hydrocarbures d'origine anthropique	761
• <i>Biodégradation par les micro-organismes</i>	762
- Transfert des hydrocarbures à la surface cellulaire	762
- La biodégradation aérobie	766
- La biodégradation anaérobie	767
16.8.2. Les produits pétroliers	771
• <i>Les 2 cycles biogéochimiques des pétroles</i>	772
• <i>Composition chimique des pétroles</i>	772
• <i>L'origine des produits pétroliers dans l'environnement marin</i>	772
• <i>Élimination naturelle des hydrocarbures pétroliers dans l'environnement marin</i>	772
- Les processus physico-chimiques	774
- Les processus de biodégradation	776
16.8.3. Bioremédiation des sites pollués	777
• <i>Bioremédiation des écosystèmes marins</i>	777
- Rappel des différents traitements : physiques, chimiques et biologiques	777
- La bio-augmentation	777
- La biostimulation	778
• <i>Bioremédiation des sols et des aquifères</i>	779
16.9. Les métaux et métalloïdes	783
16.9.1. Introduction	783
16.9.2. Utilisation des micro-organismes dans l'exploitation minière : biolixiviation et bio-oxydation	784
16.9.3 Bio-réduction microbienne des métaux	785
• <i>Les mécanismes mis en jeu</i>	785
• <i>Applications environnementales</i>	786
16.9.4. Bio-accumulation et production d'agents chélatants des métaux	787
• <i>Les mécanismes mis en jeu</i>	787
• <i>Applications environnementales</i>	788
16.9.5. Bio-minéralisation microbienne des métaux	788
• <i>Les mécanismes mis en jeu</i>	788
• <i>Applications environnementales</i>	788
16.9.6. Autres activités microbiennes liées aux contaminants métalliques	789
16.10. Conclusion	789

PARTIE 5

LES OUTILS DE L'ÉCOLOGIE MICROBIENNE

CHAPITRE 17

MÉTHODES D'ÉTUDES DES MICRO-ORGANISMES DANS L'ENVIRONNEMENT

Fabien Joux, Jean-Claude Bertrand, Rutger De Wit, Vincent Grossi, Laurent Intertaglia,
Philippe Lebaron, Valérie Michotey, Philippe Normand, Pierre Peyret, Patrick Raimbault,
Christian Tamburini & Laurent Urios*

17.1. Introduction	799
17.2. Les techniques de prélèvement en écologie microbienne	799
17.2.1. Les techniques de prélèvement dans les sols.....	799
17.2.2. Les techniques de prélèvement dans les milieux aquatiques	800
• <i>Systèmes de prélèvement d'eau</i>	800
- Prélèvement de surface à la main	800
- Prélèvement à la bouteille hydrologique.....	803
- Prélèvement à la pompe.....	806
• <i>Systèmes de collecte de particules</i>	807
• <i>Le prélèvement d'organismes vivants dans la colonne d'eau</i>	807
• <i>La collecte des particules</i>	808
• <i>Les prélèvements au niveau du sédiment</i>	809
17.2.3. L'échantillonnage du milieu marin profond	809
• <i>De la découverte de micro-organismes adaptés à de fortes pressions hydrostatiques aux effets physiologiques et moléculaires</i>	810
• <i>Mesures d'activités microbiennes en milieu profond</i>	810
• <i>Systèmes hyperbares utilisés pour évaluer l'effet de la pression hydrostatique sur les micro-organismes marins</i>	811
- Systèmes hyperbares pour les cultures sous haute pression.....	811
- Systèmes de prélèvement hyperbare pour la mesure d'activités microbiennes <i>in situ</i>	811
- Système hyperbare pour simuler la chute de particules le long de la colonne d'eau.....	812
17.3. Les méthodes de cytométrie	814
17.3.1. Historique	814
17.3.2. Les différentes techniques de cytométrie	814
• <i>Les techniques de microscopie</i>	815
- Les techniques de microscopie optique	815
- Les techniques de microscopie électronique.....	816
• <i>La cytométrie en flux</i>	817
• <i>La cytométrie en phase solide</i>	818
17.3.3. Les applications liées au dénombrement	818
17.3.4. La mesure de l'activité à l'échelle cellulaire	820

• <i>Utilisation de sondes fluorescentes</i>	820
• <i>Micro-autoradiographie</i>	820
17.3.5. La détermination taxonomique à l'échelle cellulaire	820
• <i>Immunofluorescence</i>	820
• <i>Hybridation in situ avec des sondes fluorescentes (FISH)</i>	821
17.4. Les mesures de la biomasse et de l'activité des micro-organismes	822
17.4.1. La quantification de la biomasse	822
• <i>Les méthodes biochimiques</i>	822
- Les approches lipidiques	822
- Les autres méthodes biochimiques	823
• <i>Biovolume et facteurs de conversion</i>	823
• <i>Mesure de la biomasse phytoplanctonique</i>	823
17.4.2. Les mesures de production primaire	825
17.4.3. Les mesures de la production bactérienne hétérotrophe et chimio-autotrophe	826
17.4.4. La mesure de la respiration bactérienne	827
• <i>Mesures dans les milieux aquatiques</i>	827
• <i>Mesures dans les sols et les sédiments</i>	828
17.4.5. La mesure des activités enzymatiques bactériennes	828
• <i>Profil d'activités enzymatiques</i>	828
• <i>Mesure de l'activité exoenzymatique bactérienne</i>	829
17.4.6. Les mesures du taux de mortalité des bactéries induit par les protozoaires hétérotrophes et les virus	830
• <i>Taux de prédation par les protozoaires hétérotrophes</i>	830
- Méthodes utilisant des traceurs	830
- Méthodes utilisant une manipulation de l'échantillon	830
• <i>Production virale et taux de mortalité induit par les virus</i>	830
17.5. Les micro-sondes chimiques et optiques	831
17.5.1. Principes des mesures par micro-sondes chimiques	831
• <i>Principes de fonctionnement</i>	832
- Micro-électrodes potentiométriques	832
- Micro-électrodes ampérométriques	832
- Micro-électrodes voltamétriques	834
- Bio-sondes miniaturisées	835
17.5.2. Applications des micro-sondes chimiques	835
• <i>Application dans les liquides homogènes</i>	835
• <i>Mesures aux interfaces et à l'intérieur des sédiments et biofilms</i>	836
17.5.3. Micro-sondes optiques	838
17.6. Isotopes stables et biomarqueurs lipidiques	839
17.6.1. Concepts et définitions	839
17.6.2. Utilisation de l'abondance naturelle en isotopes stables des biomarqueurs lipidiques	839
• <i>Origine du carbone assimilé par les micro-organismes</i>	839
• <i>Identification des micro-organismes impliqués dans les processus biogéochimiques</i>	839
• <i>Mécanisme d'assimilation du carbone chez les organismes (photo)autotrophes</i>	840
17.6.3. Marquage isotopique	840

• Mise en évidence des populations actives dans les processus biogéochimiques.....	842
• Production primaire et fonctionnement des chaînes trophiques.....	842
• Étude des voies métaboliques.....	842
• Avantages et inconvénients.....	843
17.7. Les méthodes d'étude de la diversité des micro-organismes.....	843
17.7.1. L'extraction des acides nucléiques d'échantillons de l'environnement.....	843
17.7.2. Les différentes techniques de PCR.....	844
• La PCR quantitative.....	845
• La PCR compétitive.....	846
• PCR en temps réel.....	846
17.7.3. Les empreintes moléculaires.....	846
17.7.4. Le clonage-séquençage.....	848
17.7.5. L'analyse bio-informatique des séquences.....	851
17.7.6. Les puces à acides nucléiques.....	853
• Principe des biopuces ADN.....	853
- Formats des biopuces ADN.....	853
- Détermination des sondes et préparation des cibles.....	854
- Hybridation, lecture et analyse des biopuces ADN.....	855
• Applications des biopuces ADN.....	855
- Les biopuces génomiques.....	856
- Les biopuces transcriptomiques.....	856
- Les biopuces fonctionnelles.....	856
- Les biopuces phylogénétiques.....	857
17.7.7. L'analyses des pigments.....	857
17.7.8. L'analyse des acides gras phospholipidiques.....	859
17.8. Les méthodes d'isolement, de culture et de conservation.....	861
17.8.1. Les cultures en conditions d'aérobiose.....	861
17.8.2. Les besoins en dioxygène et les cultures en conditions d'anaérobiose.....	863
17.8.3. Les cultures en continu.....	864
17.8.4. Dénombrement des bactéries hétérotrophes cultivables.....	865
17.8.5. Les techniques alternatives d'isolement.....	866
• La micro-manipulation.....	866
• La micro-encapsulation couplée au tri cellulaire (GMDs).....	866
• La culture en dilution.....	867
• Les colonisateurs in situ.....	867
• Modifications des milieux de culture.....	867
17.8.6. La gestion des collections de cultures de micro-organismes.....	867
• La lyophilisation.....	868
• La cryoconservation.....	868
17.9. Conclusion.....	869

CHAPITRE 18

APPORTS DE LA GÉNOMIQUE DESCRIPTIVE ET FONCTIONNELLE EN ÉCOLOGIE MICROBIENNE

Philippe Bertin, Valérie Michotey & Philippe Normand*

18.1. La génomique descriptive	877
18.1.1. La structure de l'ADN et son séquençage	877
18.1.2. Le séquençage de génomes	879
18.1.3. L'annotation et les bases de données internationales.....	881
18.1.4. La comparaison de génomes	881
18.1.5. Les résultats	883
18.2. La Génomique fonctionnelle	883
18.2.1. La transcriptomique	883
18.2.2. La protéomique	884
18.2.3. La métabolomique.....	886
18.3. L'apport des Sciences en « -omique » en écologie microbienne	887
18.3.1. Mieux connaître les souches cultivées.....	887
18.3.2. Mieux connaître les souches non cultivées.....	888
18.3.3. Analyser les communautés et identifier des souches ou des métabolismes originaux.....	889
18.3.4. Cultiver de nouveaux organismes présentant des caractéristiques physiologiques originales.....	890
18.3.5. De l'écologie à la biotechnologie.....	891
18.4. Conclusion	891

CHAPITRE 19

LA MODÉLISATION EN ÉCOLOGIE MICROBIENNE

Jean-Christophe Poggiale, Philippe Dantigny, Rutger de Wit & Christian Steinberg*

19.1. Introduction	897
19.2. Principes de la construction d'un modèle en écologie	900
19.2.1. Modèles à temps discret	901
19.2.2. Modèles à temps continu	901
19.3. Cinétique microbienne en milieu de culture	902
19.3.1. Le procédé	902
19.3.2. Différents modes de fermentation	903
19.3.3. Modélisation du procédé	904
• <i>Variables d'état</i>	904
- Équation de bilan	904
• <i>Bilan biomasse (g.h⁻¹)</i>	905
• <i>Bilan substrat (g.h⁻¹)</i>	906
• <i>Bilan produit (g.h⁻¹)</i>	906

• <i>Bilan volumique (L.h⁻¹)</i>	906
19.3.4. Modèles primaires	906
• <i>Batch</i>	906
• <i>Fed-batch</i>	907
• <i>Chémostat</i>	907
• <i>Chémostat avec recyclage</i>	908
19.3.5. Métabolisme	909
• <i>Rendement cellulaire et coefficient de maintenance</i>	910
• <i>Notions de vitesses spécifiques</i>	910
19.3.6. Modèles secondaires	911
• <i>Substrat limitant</i>	911
• <i>Substrat inhibiteur</i>	912
• <i>Inhibition par le produit</i>	912
• <i>Les modèles à quota</i>	912
• <i>Facteurs environnementaux</i>	913
• <i>Notion d'étape limitante</i>	914
19.4. Les différents types d'interaction et leur représentation	915
19.4.1. La compétition	915
• <i>Le modèle de Lotka-Volterra</i>	915
• <i>Le principe d'exclusion compétitive</i>	917
19.4.2. Interactions trophiques	918
19.4.3. Les virus	923
19.5. Le problème de la formulation des processus : mécanismes et changements d'échelle	923
19.6. La représentation de l'espace	926
19.6.1. Structuration spatiale discrète	926
19.6.2. Structuration spatiale continue	926
19.7. Les biofilms	927
19.8. Les modèles biogéochimiques	933
19.9. Conclusion	933

GLOSSAIRE INDEX

Glossaire	939
Index	959
Index des taxons	981

