2007

ACADÉMIE DES SCIENCES

CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

Sous la direction de
GEORGES PÉDRO

INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

EDP SCIENCES

جامعة أمحمد بوقرة - بومرداس
المكتبة الجامعية
Université M'hamed Bougara-BOUMERDES

Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux

RAPPORT SUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE N° 27

Animateur : Georges Pédro

جامعة أمحمد بوقرة - بومرداس
Université M'hamed Bougara - Boumerdes
المكتبة الجامعية
574.3/PED
رقم

جامعة أمحمد بوقرة - بومرداس
Université M'hamed Bougara - Boumerdes
المكتبة الجامعية
0102988
رقم الجرد:

ACADÉMIE DES SCIENCES

EDP SCIENCES

17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

TABLE DES MATIÈRES

Rapport Science et Technologie iii

Composition du Comité RST v

Avant-propos ix

Composition du groupe de travail xv

Résumé xxxi

Summary xxxv

Présentation du rapport xxxix

Conclusions générales et recommandations xlvii

Introduction générale 1

1. Objectif du rapport 1
2. Géochimie et biogéochimie 2
   2.1. Cadre historique 2
   2.2. Domaines spécifiques de la géochimie et de la biogéochimie . . 4
   2.3. Les cycles biogéochimiques – Nature et constitution 6
3. Cycles biogéochimiques et anthropisation 7
   3.1. Fertilisation azotée des terres cultivées 9
   3.2. Dépérissement des forêts tempérées 11
4. Cadre du rapport 12
   4.1. Situation et caractéristiques de la biosphère terrestre 12
   4.2. Rôle du « système écologique » 15

4.3. Importance du facteur sol et ses conséquences dans le domaine biogéochimique 16

PARTIE I Approche par élément **21**

CHAPITRE 1 Cycle du carbone **25**

1. Réservoirs, flux et processus – Présentation générale 28
2. Échelles de temps concernées 32
3. Rôle de l'évolution biologique 36
4. Histoire géologique du CO_2 37

CHAPITRE 2 Cycle des principaux nutriments (azote, phosphore et soufre) à l'échelle planétaire **49**

1. Processus généraux communs aux divers cycles biogéochimiques des nutriments 51
   - 1.1. La stœchiométrie écosystémique, un problème d'équilibre entre les nutriments 51
   - 1.2. Le rôle de la matière organique 55
   - 1.3. Systèmes biologiques de régulation et zones tampons à diverses échelles 55
   - 1.4. Entrées et sorties des cycles 60
2. Intérêt actuel de la connaissance des cycles globaux particuliers . . . 62
   - 2.1. Cycle global de l'azote 62
   - 2.2. Cycle global du phosphore 64
   - 2.3. Cycle global du soufre 66

CHAPITRE 3 Cycles du silicium, de l'aluminium et du fer **75**

1. Le silicium 78
   - 1.1. Recyclage biologique du silicium en milieu continental et son impact sur la pédogenèse 79
   - 1.2. Biogéochimie du silicium, bilans globaux et grands cycles 81
   - 1.3. Le silicium et la production végétale 82
   - 1.4. Le développement de nouveaux outils 83
2. L'aluminium 84
   - 2.1. Spéciation et mobilité de l'aluminium 85
   - 2.2. La toxicité aluminique 87
3. Le fer 89
   - 3.1. Spéciation et mobilité du fer 90
   - 3.2. Interactions entre les formes du fer et l'activité biologique 91

3.3. Interactions entre les formes du fer et les éléments traces métalliques ou les métalloïdes 93
4. Impact de l'activité biologique sur les interactions silicium, aluminium, fer en milieu continental 93

CHAPITRE 4 Radionucléides naturels et artificiels 101
1. Cinétiques d'injections dans l'environnement 106
1.1. Effluents 106
1.2. Accidents (*cf.* note complémentaire Tchernobyl) 106
1.3. Tests nucléaires 107
1.4. Autres sources 108
2. Sources potentielles 108
3. Commentaires 108
Annexe A : La spéciation dans les cycles biogéochimiques des radionucléides 113
Annexe B : Le comportement des radionucléides dans les cycles biogéochimiques 117

PARTIE II Approche par milieu 127

CHAPITRE 5 Écosystèmes peu anthropisés 131

SOUS-CHAPITRE 5.1 Écosystèmes forestiers 135
1. Cycles biogéochimiques dans les écosystèmes forestiers 135
1.1. Aspects généraux et définitions 135
1.2. Importance des cycles dans les différentes fonctions de l'écosystème 139
1.3. La régulation et/ou le contrôle des cycles 141
1.4. Conclusions sur l'état de l'art 142
2. Les axes de recherche en vue d'améliorer la connaissance et la prévision 143
2.1. Considérations d'ensemble 143
2.2. Les axes de recherche à développer 144

SOUS-CHAPITRE 5.2 Écosystèmes océaniques 159
1. Disciplines concernées et leur évolution 161
1.1. Chimie, géochimie et marqueurs organiques 161
1.2. Biologie et écologie fonctionnelle : développement des approches moléculaire et génomique 162

2. Cas du domaine profond 166
3. Les apports continentaux et l'interface côte-large 167
4. Changement climatique et flux biogéochimiques 172
5. Rôle de l'évolution des outils d'observation ou de modélisation 174

CHAPITRE 6 Milieux à pression anthropique accentuée 177

SOUS-CHAPITRE 6.1 Agrosystèmes particuliers en relation avec l'épandage de matières organiques exogènes 183

1. Matières organiques exogènes (MOE) et effluents d'élevage 185
   1.1. Cadre général de l'élevage intensifié 185
   1.2. Intérêt des matières organiques exogènes 188
2. Influence des MOE sur les cycles biogéochimiques 190
   2.1. Aspect général du problème 190
   2.2. Enjeux environnementaux de l'épandage des matières organiques exogènes 195
   2.3. Régulations et contrôle des cycles par l'homme 206
3. Perspectives et recommandations 212
   3.1. Amélioration des modes de régulation 212
   3.2. Amélioration des outils d'évaluation 216
   3.3. Développement de réseaux d'observation et de sites expérimentaux 218

SOUS-CHAPITRE 6.2 Biogéochimie et réhabilitation des sites miniers et industriels 223

1. L'exploitation minière d'uranium en France et ses impacts 226
   1.1. Introduction 226
   1.2. Exploitation minière : production de stériles et de résidus de traitement de minerai 227
   1.3. Réaménagement des sites miniers 228
   1.4. Gestion des résidus de traitement des minerais et aménagement des stockages 229
   1.5. Surveillance des sites 230
   1.6. Conséquences de l'exploitation de l'uranium la gestion des impacts 230
2. Dégradation des sols et des écosystèmes en milieu tropical humide : les sites nickélifères de la Nouvelle-Calédonie 238
   2.1. Sols et biodiversité spécifique de la Nouvelle-Calédonie 238
   2.2. Résultats des essais de revégétalisation 239

2.3. Enjeux de la mis en place d'une zone atelier/conservatoire en Nouvelle-Calédonie 240

SOUS-CHAPITRE 6.3 Comportement des contaminants chimiques dans les estuaires 245

1. Processus géochimiques généraux 247
2. La matière organique naturelle et ses interactions avec les contaminants 248
3. Les éléments en traces métalliques et métalloïdes 249
4. Les xénobiotiques organiques et hydrocarbures aromatiques 251
5. Les biogaz 253
6. Production primaire, réseaux trophiques et contamination chimique . . 253
7. Modélisation biogéochimique estuarienne, un enjeu national : cas des éléments en traces 254
8. Risques chimiques 256

PARTIE III Secteurs de recherche à développer 261

CHAPITRE 7 Les micro-organismes, clé des recyclages biogéochimiques 265

1. Production et acquisition de nutriments 271
2. Rôle majeur des micro-organismes dans les étapes fondamentales du cycle de divers éléments 272
   - 2.1. Cycle du carbone 272
   - 2.2. Cycle de l'azote 273
   - 2.3. Cycle du soufre 274
   - 2.4. Cycle du phosphore 276
   - 2.5. Cycle du fer 277
   - 2.6. Éléments en traces 278
3. Rôle des micro-organismes dans l'immobilisation et la solubilisation des métaux et non-métaux ; application aux radionucléides (*cf.* aussi chapitre 4) 278
   - 3.1. Immobilisation des éléments minéraux (dont les radionucléides) 279
   - 3.2. Solubilisation d'éléments minéraux dont les radionucléides par les micro- organismes 280
   - 3.3. Rôle spécifique des champignons mycorhiziens 281
   - 3.4. Tableau d'ensemble 281
4. Les couplages de cycles 281
   - 4.1. Couplages entre processus biotiques 281
   - 4.2. Couplages entre processus biotiques et abiotiques 283

5. Rôle de la rhizosphère 284
6. Les associations faune – micro-organismes 285
7. Applications aux biotechnologies de l'environnement et aux traitements de matériaux, minerais et déchets 285
8. Des outils prometteurs pour le développement de l'écologie microbienne des milieux naturels 286

Note sur la biosphère souterraine profonde 290

CHAPITRE 8 Nature, rôle et fonctions des matières organiques dans les sols 297

1. Les matières organiques du sol et leurs grandes fonctions 299
2. Nature des matières organiques 300
3. Réactivité chimique et physicochimique 302
4. Biodégradation et stabilisation des matières organiques 304
5. Interactions organominérales et structure des sols 308
6. Interactions matières organiques – micro-organismes – minéraux dans les sols : quelques exemples et questions 309
   6.1. Exemples d'interactions « argiles – matières organiques – micro-organismes » 309
   6.2. Interactions entre « constituants organiques naturels – contaminants organiques – micro-organismes » ; stabilisation à la biodégradation (« récalcitrante ») 310
   6.3. Impact des interactions micro-organismes – minéraux-matières organiques sur la mobilité des éléments en traces métalliques . . 311

PARTIE IV Nécessité de recourir à des modélisations et à des observations 319

CHAPITRE 9 Développements de la modélisation – Nécessité de mise en place d'indicateurs 325

1. Grandeurs caractéristiques, échelles d'observation, maillage et approximation 334
   1.1. Grandeurs caractéristiques 335
   1.2. Échelles d'observation et de représentation 336
   1.3. Maillage et instrumentation 338
2. Changements d'échelles, couplages et données 339
   2.1. Hiérarchie 339
   2.2. Agrégation, modèles *bottom up* 340
   2.3. Désagrégation, modèles *top down* 344

2.4. Couplage et interfaçage 345
2.5. Données 346

CHAPITRE 10 Mise en place et gestion de réseaux d'observation de longue durée 361

SOUS-CHAPITRE 10.1 Observatoires océaniques et réseaux forestiers 365

SOUS-CHAPITRE 10.2 Observatoire permanent de la radioactivité 373

1. Étude de l'atmosphère 375
2. Étude du milieu terrestre 378
3. Étude du milieu fluvial 380
4. Étude du milieu marin 380

APPENDICE 1 Quelques notions de base en biogéochimie 387

APPENDICE 2 Liste des éléments chimiques 391

APPENDICE 3 Tableau périodique des éléments chimiques 395

APPENDICE 4 Tableau des unités de mesures 399

Groupe de lecture critique 403

Composition du Groupe de lecture critique **405**

Commentaire du Centre de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement (Cemagref) **409**

Commentaire du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) **411**

Commentaires de l'Institut français du pétrole (IFP) **413**

Commentaire de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) **417**

Commentaire de Scope France (Scientific Committee on Problems of the Environment) **419**

Présentation à l'Académie des sciences, par Bernard Tissot 421

CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

Sous la direction de
GEORGES PÉDRO

Depuis deux siècles, la poussée démographique et les développements industriels et agricoles provoquent un profond déséquilibre des cycles biogéochimiques de la planète.

La vie est dépendante d'un grand nombre des éléments de la classification périodique. Certaines parties du cycle biogéochimique de ces éléments ont été explorées et une connaissance approfondie des mécanismes qui les font intervenir dans certains processus biologiques a été acquise : comprendre comment les éléments chimiques voyagent d'un règne à un autre permettra de déterminer une nouvelle approche de la nutrition, de la santé, de l'environnement et du climat.

L'Académie des sciences a mené une réflexion multidisciplinaire pour établir l'état de l'art en ce domaine, tant du point de vue des connaissances fondamentales que de celui de la recherche et de ses structures.

Ce rapport décrit plusieurs problèmes biogéochimiques en fonction de leurs impacts actuels sur la société : production de CO_2 en relation avec l'évolution du climat, pollution d'origine industrielle et agricole en relation avec la dégradation des sols et des eaux, en incluant les conséquences d'ordre toxicologique, les phénomènes de phytoremédiation, etc.

L'étude est concentrée sur la biosphère fonctionnelle, celle où se développent des êtres vivants au sein d'écosystèmes bien déterminés mais variés. La biosphère considérée ici est avant tout superficielle, continentale et, à moindre titre, océanique. Cela implique de prendre en compte tout ce qui a trait à la matière organique, présente dans les sols et les sédiments, qui constituent l'interface géochimique entre l'inerte et le vivant et où les micro-organismes jouent un rôle prépondérant.

Le rapport s'articule en une première approche par éléments, puis une approche des milieux, qu'ils soient peu ou fortement anthropisés. La troisième partie traite des secteurs de recherche à développer ; elle est complétée par une argumentation en faveur de la modélisation et du développement de réseaux d'observation de longue durée.

Cette étude est justifiée par la nature d'un sujet très vaste, bien qu'ici volontairement délimité. Elle apporte un éclairage scientifique argumenté sur un sous-ensemble de la question générale de la connaissance de l'environnement et du cadre de toute vie sur la Planète.

ISBN : 978-2-86883-938-1
69,00 euros TTC
Création graphique : Thierry Gourdin

EDP SCIENCES

9 782868 839381

www.edpsciences.org