

TABLE DES MATIÈRES

Rapport Science et Technologie	iii
Composition du Comité RST	v
Avant-propos	ix
Composition du groupe de travail	xv
Résumé	xxxix
Summary	xxxv
Présentation du rapport	xxxix
Conclusions générales et recommandations	xlvi
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 CO₂ 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 mise 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 <i>bottom up</i>	340
2.3. Désagrégation, modèles <i>top down</i>	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