

SOMMAIRE

Avant-propos	XIII
Remerciements	XV
Abréviations et sigles	XVII
Introduction	1
1. Les radionucléides	1
2. La persistance dans l'environnement	2

PARTIE 1

Structure de l'environnement et facteurs impactant le devenir des radionucléides

CHAPITRE 1

L'atmosphère	7
1. Introduction	7
2. La structure et la composition de l'atmosphère	7
3. Fonctionnement de l'atmosphère	8
3.1. La circulation générale de l'atmosphère	9
3.2. Les circulations locales de l'atmosphère	10
4. Origines des radionucléides dans l'atmosphère	11
4.1. Les radionucléides dus aux rayonnements d'origine cosmique	11
4.2. Les radionucléides naturels issus de la lithosphère	12
4.3. Les radionucléides anthropiques dus aux rejets chroniques des installations nucléaires	12
4.4. Les radionucléides anthropiques dus aux essais de bombes atomiques	13
4.5. Les radionucléides anthropiques dus aux accidents nucléaires	14
5. La dispersion des radionucléides dans l'atmosphère	16
5.1. La circulation atmosphérique globale des radionucléides	17
5.2. Dispersion à l'échelle locale	18
6. Facteurs conditionnant le devenir des radionucléides dans l'atmosphère	19

CHAPITRE 2

L'hydrosphère	22
1. Introduction	22
2. La structure et la composition de l'hydrosphère	22
2.1. Inventaire de l'eau à la surface terrestre	22
2.2. La composition de l'hydrosphère	24
2.3. La structure de l'hydrosphère	25
2.4. La composante sédimentaire de l'hydrosphère	25
3. Fonctionnement de l'hydrosphère	26
3.1. Voies d'entrée dans l'hydrosphère	26
3.2. Les échanges à l'interface continent-océan	26
3.3. La circulation océanique des eaux	27
4. Origines des radionucléides dans l'hydrosphère	29
4.1. Les radionucléides dus aux rayonnements d'origine cosmique	29
4.2. Les radionucléides naturels issus de la lithosphère	30

VI Le devenir des radionucléides dans l'environnement

4.3. Les radionucléides anthropiques dus aux rejets chroniques des installations nucléaires	30
4.4. Les radionucléides anthropiques dus aux essais de bombes atomiques	31
4.5. Les radionucléides anthropiques dus aux accidents nucléaires	31
5. La dispersion des radionucléides dans l'hydrosphère	31
6. Facteurs écologiques conditionnant le devenir des radionucléides dans l'hydrosphère	32
7. Conclusion partielle	33

CHAPITRE 3

La lithosphère	35
1. Introduction	35
2. La structure et la composition de la lithosphère	35
3. Fonctionnement de la lithosphère	36
3.1. Les sols et les sédiments sont-ils un puits ou une source pour les radionucléides ?	37
3.2. Les conséquences de la contamination des sols : contamination des plantes et des nappes phréatiques	37
4. Origines des radionucléides dans la lithosphère	38
4.1. Les radionucléides dus aux rayonnements d'origine cosmique	38
4.2. Les radionucléides naturels issus de la lithosphère	38
4.3. Les radionucléides anthropiques dus aux rejets chroniques des installations nucléaires	39
4.4. Les radionucléides anthropiques dus aux essais de bombes atomiques	39
4.5. Les radionucléides anthropiques dus aux accidents nucléaires	39
5. La dispersion des radionucléides dans la lithosphère	40
6. Facteurs lithosphériques conditionnant le devenir des radionucléides	41

CHAPITRE 4

La biosphère	44
1. Introduction	44
2. La structure et la composition de la biosphère	44
2.1. Les zonations de la biosphère	44
2.2. Les niches écologiques	46
2.3. Quelques grands concepts écologiques	46
2.4. Le cas particulier de la composante biologique de l'hydrosphère	47
3. Fonctionnement de la biosphère	48
3.1. Les flux d'énergie et de matière dans la biosphère	49
3.2. La bioaccumulation des radionucléides	50
3.3. Les transferts des radionucléides dans les chaînes trophiques	51
4. Origines des radionucléides dans la biosphère	52
4.1. Les radionucléides dus aux rayonnements d'origine cosmique	52
4.2. Les radionucléides naturels issus de la lithosphère	53
4.3. Les radionucléides anthropiques dus aux rejets chroniques des installations nucléaires	53
4.4. Les radionucléides anthropiques dus aux essais des bombes atomiques	54
4.5. Les radionucléides anthropiques dus aux accidents nucléaires	54
5. La dispersion des radionucléides dans la biosphère	54
6. Facteurs biologiques conditionnant le devenir des radionucléides dans la biosphère	55

CHAPITRE 5

Les cycles biogéochimiques	58
1. Introduction	58
2. Les échanges intercompartimentaux	59
2.1. Les interfaces physiques entre les compartiments	59
2.2. Les échanges des radionucléides entre les milieux physiques et la biosphère	61
2.3. L'influence des organismes vivants sur le cycle des radionucléides dans l'environnement	62
3. Fonctionnement des cycles biogéochimiques	64
3.1. Les principaux paramètres des cycles biogéochimiques	64
3.2. Quelques exemples de cycles biogéochimiques	65
4. Les facteurs contrôlant les cycles biogéochimiques	66

PARTIE 2

Le devenir des radionucléides naturels dans l'environnement

CHAPITRE 6

Les radionucléides naturels de l'atmosphère	71
1. Le béryllium	72
1.1. Généralités sur l'élément	72
1.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	72
1.3. Origines	73
1.4. Devenir dans les écosystèmes terrestres	73
1.5. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles	74
1.6. Devenir dans les écosystèmes marins	75
2. Le sodium-22	75
2.1. Généralités sur l'élément	75
2.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	75
2.3. Origines	76
2.4. Devenir dans l'environnement	76
3. Le silicium-32	76
3.1. Généralités sur l'élément	76
3.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	77
3.3. Devenir dans les écosystèmes terrestres	77
3.4. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles	77
3.5. Devenir dans les écosystèmes marins	78
4. Le phosphore-32	79
4.1. Généralités sur l'élément	79
4.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	79
4.3. Devenir dans l'environnement	80
4.4. Devenir dans les écosystèmes	80
5. Le chlore-36	81
5.1. Généralités sur l'élément	81
5.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	82
5.3. Origines	82
5.4. Devenir dans les écosystèmes terrestres	83
5.5. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles	83
5.6. Devenir dans les écosystèmes marins	84

6. Le radon-222	84
6.1. Généralités sur l'élément	84
6.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	85
6.3. Origines	85
6.4. Devenir dans l'environnement	86

CHAPITRE 7

Les radionucléides naturels de la lithosphère	91
1. Les uraniums-235 et 238	92
1.1. Généralités sur l'élément	92
1.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	93
1.3. Origines	94
1.4. Devenir en milieu terrestre	95
1.5. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles	96
1.6. Devenir dans les écosystèmes marins	98
1.7. Conclusions partielles	100
2. Le thorium-232	100
2.1. Généralités sur l'élément	100
2.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	101
2.3. Origines	101
2.4. Devenir dans les écosystèmes terrestres	102
2.5. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles	102
2.6. Devenir dans les écosystèmes marins	103
2.7. Conclusion partielle	103
3. Le potassium-40	104
3.1. Généralités sur l'élément	104
3.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	104
3.3. Devenir dans l'environnement	105

CHAPITRE 8

Les radionucléides naturels dans l'hydrosphère	110
1. Le plomb-210	110
1.1. Généralités sur l'élément	110
1.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	111
1.3. Origines	111
1.4. Devenir dans les écosystèmes terrestres	111
1.5. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles	113
1.6. Devenir dans les écosystèmes marins	113
2. Le polonium-210	114
2.1. Généralités sur l'élément	114
2.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	114
2.3. Origines	114
2.4. Devenir en milieu terrestre	115
2.5. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles	116
2.6. Devenir dans les écosystèmes marins	116
3. Les radiums-226 et 228	119
3.1. Généralités sur l'élément	119
3.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	119
3.3. Origines	120
3.4. Devenir dans les écosystèmes terrestres	120
3.5. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles	120
3.6. Devenir dans les écosystèmes marins	122

PARTIE 3

Le devenir des radionucléides naturels et anthropiques dans l'environnement

CHAPITRE 9

Le tritium	129
1. Généralités sur l'élément.....	129
2. Caractéristiques chimiques et nucléaires.....	129
2.1. Les données physiques du tritium.....	129
2.2. Le parcours du tritium.....	130
2.3. La transmutation du tritium.....	130
2.4. L'effet isotopique du tritium.....	130
2.5. Les différentes formes physico-chimiques du tritium.....	131
3. Origines.....	132
4. Le devenir du tritium dans le vivant.....	134
4.1. Le transfert du tritium vers le vivant.....	134
4.2. La bioamplification potentielle.....	136
5. Le devenir dans les écosystèmes terrestres.....	137
6. Le devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles.....	140
7. Le devenir dans les écosystèmes marins.....	141
8. Conclusions.....	143

CHAPITRE 10

Le carbone-14, les iodes radioactifs et le krypton-85	151
1. Le carbone-14.....	151
1.1. Généralités sur l'élément.....	151
1.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires.....	152
1.3. Origines.....	153
1.4. Devenir dans les écosystèmes terrestres.....	156
1.5. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles.....	157
1.6. Devenir dans les écosystèmes marins.....	157
2. Les iodes radioactifs.....	158
2.1. Généralités sur l'élément.....	158
2.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires.....	159
2.3. Origines.....	160
2.4. Devenir dans les écosystèmes terrestres.....	161
2.5. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles.....	164
2.6. Devenir dans les écosystèmes marins.....	164
3. Le krypton-85.....	166
3.1. Généralités sur l'élément et caractéristiques chimiques et nucléaires.....	166
3.2. Origines.....	167
3.3. Devenir dans l'atmosphère.....	168

PARTIE 4

Le devenir des radionucléides anthropiques dans l'environnement

CHAPITRE 11

Le césium-137	177
1. Généralités sur l'élément.....	177
2. Caractéristiques chimiques et nucléaires.....	178
3. Origines.....	179

3.1. Les retombées des essais des bombes atomiques	179
3.2. Les accidents nucléaires majeurs	179
3.3. Les installations nucléaires militaires et civiles	180
4. Devenir dans les écosystèmes terrestres	181
4.1. Le césium-137 dans l'atmosphère	181
4.2. Le césium-137 dans les sols	182
4.3. Le césium-137 dans les plantes	184
4.4. Le césium-137 dans les forêts et les produits forestiers	185
4.5. Le césium-137 dans les tourbières et marais	186
4.6. Le césium-137 dans le gibier	187
4.7. Le césium-137 dans les écosystèmes anthropiques	188
4.8. Le transfert du césium-137 dans les chaînes alimentaires	189
4.9. L'élimination biologique du césium	189
5. Devenir dans les écosystèmes aquatiques	189
6. Devenir dans les écosystèmes marins	191
6.1. Le césium-137 dans les milieux physiques marins	191
6.2. La bioaccumulation du césium-137 en milieu marin	194

CHAPITRE 12

Le strontium-90	201
1. Généralités sur l'élément	201
2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	202
3. Origines	202
4. Devenir dans les écosystèmes terrestres	203
4.1. Le strontium-90 dans les sols	203
4.2. Le strontium-90 dans les plantes	204
4.3. Le strontium-90 dans les environnements soumis aux accidents nucléaires	205
5. Devenir dans les écosystèmes dulçaquicoles	207
5.1. Le strontium-90 dans les eaux et les sédiments	207
5.2. Le strontium-90 dans les végétaux et les animaux	208
5.3. Le strontium-90 dans les milieux aquatiques pollués	208
6. Devenir dans les écosystèmes marins	209
7. Conclusions	210

CHAPITRE 13

Les autres produits de fission	214
1. Le technétium-99	214
1.1. Généralités sur l'élément	214
1.2. Caractéristiques chimiques et nucléaires	215
1.3. Origines	215
1.4. Devenir dans les écosystèmes terrestres	215
1.5. Devenir dans les écosystèmes aquatiques	216
1.6. Devenir dans les écosystèmes marins	217
1.7. Conclusions partielles	220
2. Le ruthénium-106	220
3. L'antimoine-125	222
4. Le cérium-144	224

CHAPITRE 14

Les radionucléides produits d'activation	231
1. Généralités sur les produits d'activation	231
2. Caractéristiques nucléaires des produits d'activation	232
3. Origines des produits d'activation	232

4. Le devenir dans l'environnement du cobalt-60	232
5. Le devenir dans l'environnement de l'argent-110m	235
6. Manganèse-54	239
7. Le fer-59	240
8. Le baryum-133	242
9. Le nickel-63	243
10. Le mercure-203	245
11. Le niobium-94	245
CHAPITRE 15	
Les plutoniums et les autres transuraniens	252
1. Les actinides et les transuraniens	252
1.1. Les rejets d'actinides dans l'environnement	253
1.2. La contamination des organismes par les actinides	254
2. Le plutonium-239	255
2.1. Les origines du plutonium	255
2.2. Le devenir du plutonium dans les environnements physiques	257
2.3. La bioaccumulation du plutonium	259
3. L'américium-241	263
4. Le neptunium-237	265
PARTIE 5	
Les applications des radionucléides dans les sciences environnementales	
CHAPITRE 16	
Les traceurs radioactifs dans les divers compartiments environnementaux	275
1. Introduction	275
2. L'utilisation des traceurs radioactifs dans l'atmosphère pour étudier la circulation atmosphérique	276
3. L'utilisation des traceurs radioactifs dans l'hydrosphère	276
3.1. L'utilisation des traceurs radioactifs en océanologie physique	277
3.2. L'utilisation des traceurs radioactifs en milieu dulçaquicole	281
3.3. L'utilisation des traceurs radioactifs dans les eaux souterraines	282
4. L'utilisation des traceurs radioactifs dans la lithosphère	283
5. L'utilisation des traceurs radioactifs dans la biosphère	284
5.1. L'utilisation des traceurs radioactifs en océanologie biologique	284
5.2. L'utilisation des traceurs radioactifs dans les écosystèmes forestiers	285
6. Conclusion	286
CHAPITRE 17	
Les modélisations mathématiques et les simulations numériques	290
1. Introduction	290
2. Les divers modèles	291
3. Les modélisations dans l'atmosphère	292
4. Les modélisations dans l'hydrosphère	293
5. Les modélisations dans la lithosphère	296
6. Les modélisations dans la biosphère	297
7. Les modélisations dans la simulation des accidents	300

CHAPITRE 18

Les conséquences du changement climatique sur le devenir des radionucléides	306
1. Généralités sur le changement climatique	306
2. Conséquences du changement climatique sur la dispersion des radionucléides . .	307
2.1. Changement climatique et modifications des courants atmosphériques	307
2.2. Changement climatique et modifications des courants océaniques	308
3. Conséquences du changement climatique sur la bioaccumulation et le transfert trophique des radionucléides	309
3.1. Influence de la température sur la bioaccumulation	309
3.2. Influence du changement climatique sur le fonctionnement des chaînes trophiques	311
4. Conséquences du changement climatique sur les installations nucléaires	311
4.1. Les variations des précipitations	312
4.2. Les variations du débit des cours d'eau	312
4.3. L'élévation de la température des cours d'eau	312
4.4. Les conséquences du changement climatique sur le fonctionnement des réacteurs nucléaires	313
4.5. Les conséquences du changement climatique sur la sûreté des réacteurs nucléaires	316
5. Conclusions	317
Conclusions	319
1. La diversité des radionucléides	319
1.1. Les origines variées	319
1.2. La chimie des radionucléides	320
1.3. La mobilité des radionucléides	321
2. Le comportement des radionucléides	321
2.1. Le comportement des radionucléides dans l'atmosphère	321
2.2. Le comportement des radionucléides dans l'hydrosphère	321
2.3. Le comportement des radionucléides dans la lithosphère	322
2.4. Le comportement des radionucléides dans la biosphère	324
3. La dispersion	325
3.1. La dispersion atmosphérique	325
3.2. La dispersion océanique	325
3.3. Les échanges dans la biosphère	326
4. Les échanges intercompartimentaux	327
4.1. Les échanges aux interfaces entre les compartiments	327
4.2. Les échanges entre les compartiments physiques	327
4.3. Les échanges entre les compartiments physiques et la biosphère	327
Index	329