

Table des matières

Avant-propos	1
Remerciements	5
Chapitre 1. Généralités sur la radioécologie marine et sur l'évaluation du risque	7
1.1. Généralités sur la radioécologie	7
1.1.1. Historique de la radioécologie	8
1.1.2. Les principaux laboratoires de radioécologie marine	9
1.1.3. La triade de la radioécologie : exposition, bioaccumulation et effet néfaste.	10
1.1.3.1. Les transferts des milieux physiques aux organismes	10
1.1.3.2. Contamination et irradiation, spécificités des radionucléides	12
1.2. Le principe de l'évaluation du risque.	13
1.3. Le cas particulier du risque lié aux rayonnements ionisants	17
Chapitre 2. Les origines des radionucléides dans les milieux marins	19
2.1. Les origines naturelles ou anthropiques des radionucléides dans l'environnement marin.	19
2.2. Les origines naturelles des radionucléides.	21
2.3. Les origines militaires des radionucléides anthropiques	23
2.3.1. Les radionucléides dus aux retombées atmosphériques des explosions d'engins atomiques	23

2.3.1.1. Les bombes atomiques A	24
2.3.1.2. Les bombes atomiques H	25
2.3.1.3. Le cas de l'explosion de Nagasaki.	25
2.3.1.4. La distribution des retombées entre les hémisphères nord et sud	26
2.3.2. Les rejets directs de radionucléides dus à la dissuasion nucléaire.	30
2.3.3. Les rejets indirects de radionucléides dus à la dissuasion nucléaire.	32
2.4. Les origines civiles des radionucléides anthropiques liées au cycle du combustible nucléaire	33
2.4.1. Les mines d'uranium et les usines de fabrication du combustible nucléaire	34
2.4.2. L'utilisation du combustible nucléaire.	34
2.4.2.1. Les réacteurs nucléaires électrogènes.	35
2.4.2.2. Les réacteurs nucléaires producteurs de matériaux	37
2.4.3. Les usines de retraitement des combustibles usés	37
2.5. Les origines des radionucléides anthropiques liées aux accidents	41
2.5.1. L'accident de Thulé.	43
2.5.2. Les rejets dus aux accidents de sous-marins	43
2.5.3. L'accident de Tchernobyl	43
2.5.4. L'accident de Fukushima	44
2.6. Les origines anthropiques indirectes dues aux fleuves et aux eaux souterraines	46
2.7. Les origines anthropiques liées aux déchets radioactifs	46
2.8. Conclusion	49

Chapitre 3. Le devenir des radionucléides dans l'environnement marin 53

3.1. L'introduction du radionucléide dans l'environnement marin	53
3.1.1. L'introduction diffuse ou ponctuelle, chronique ou intermittente du radionucléide dans le milieu marin.	53
3.1.2. La spéciation chimique du radionucléide lors de son introduction dans l'environnement	53
3.2. Le comportement des radionucléides dans le milieu marin.	54
3.2.1. Radionucléide conservateur ou non conservateur	55
3.2.2. Le coefficient de distribution K_d	55
3.2.3. Les facteurs influençant le K_d	57
3.2.3.1. Les mécanismes de sorption	57
3.2.3.2. Les migrations horizontales.	61

3.2.3.3. Les migrations verticales et les phénomènes de désorption . . .	62
3.2.3.4. L'influence du vivant sur les migrations verticales des radionucléides en milieu marin	65
3.2.3.5. Conclusions partielles	65
3.2.4. La spéciation chimique des radionucléides	68
3.2.4.1. La spéciation des radionucléides dans les estuaires.	68
3.2.4.2. L'évolution de la forme physico-chimique des radionucléides du fleuve à la mer	68
3.2.4.3. Les radionucléides présents sous forme cationique dans l'effluent.	69
3.2.4.4. Les radionucléides présents sous forme anionique dans l'effluent.	70
3.2.4.5. Les radionucléides présents sous forme particulière et colloïdale dans l'effluent.	70
3.2.5. Le comportement physico-chimique des radionucléides dans les eaux marines	70
3.2.5.1. La spéciation chimique dans l'eau de mer	72
3.2.5.2. La spéciation chimique dans la matrice sédimentaire	73
3.3. La dispersion des radionucléides dans les eaux marines	74
3.3.1. Le passage des radionucléides à travers les estuaires	74
3.3.2. La dispersion dans les eaux marines	78
3.3.2.1. La dispersion mondiale des radionucléides	82
3.3.2.2. La dispersion dans l'océan Atlantique	83
3.3.2.3. La dispersion des rejets des usines de retraitement de Sellafield et de La Hague	84
3.3.2.4. La dispersion des radionucléides dans les mers nordiques	86
3.3.2.5. La dispersion en mer Méditerranée	87
3.3.2.6. La dispersion en mer Noire	88
3.3.2.7. La dispersion des radionucléides après l'accident de Fukushima	88
3.4. La dispersion des radionucléides avec les particules sédimentaires marines	88
3.5. Conclusion	89

Chapitre 4. Le devenir des radionucléides dans la biosphère marine 91

4.1. Introduction.	91
4.2. Les voies de pénétration des radionucléides dans les êtres vivants	92
4.2.1. Les voies d'exposition de la flore et de la faune	92
4.2.2. Les passages transmembranaires	92

4.2.3. La distribution corporelle	94
4.2.3.1. Le transport sanguin et de son équivalent	94
4.2.3.2. La répartition cellulaire et tissulaire.	94
4.3. Les mécanismes de la bioaccumulation des radionucléides	94
4.3.1. Les mécanismes d'accumulation chez les végétaux	95
4.3.1.1. La contamination par adsorption.	95
4.3.1.2. La contamination par absorption.	96
4.3.2. Les mécanismes d'accumulation chez les animaux	97
4.3.2.1. Les cinétiques d'accumulation	97
4.3.2.2. Quelques exemples de bioaccumulation	98
4.3.2.3. Les phénomènes de régulation	98
4.3.2.4. Le phénomène de tolérance et de résistance	100
4.4. L'influence des facteurs écologiques sur la contamination radioactive . .	101
4.4.1. L'influence des facteurs abiotiques sur la contamination radioactive des organismes aquatiques	102
4.4.1.1. Les formes physico-chimiques des radionucléides et de leurs isotopes stables	102
4.4.1.2. La discrimination isotopique	103
4.4.1.3. Les compétitions isotopique et chimique, salinité.	104
4.4.1.4. La température	105
4.4.1.5. Les vecteurs de la contamination	106
4.4.2. Les facteurs biologiques de la contamination des organismes. . .	107
4.4.2.1. Âge et taille des animaux	107
4.4.2.2. Sexe et maturité sexuelle	108
4.4.2.3. Mue et cycle d'intermue.	108
4.4.3. L'influence des organismes vivants sur le cycle des radionucléides dans l'environnement aquatique	110
4.4.3.1. L'influence des organismes sur la répartition des radionucléides au sein du sédiment.	110
4.4.3.2. L'influence des organismes sur la répartition des radionucléides au sein des masses d'eau.	113
4.4.3.3. L'influence de l'activité biologique sur la forme physico-chimique des radionucléides	114
4.5. L'organotropisme des radionucléides	114
4.6. Les mécanismes de détoxication chimique des radionucléides.	117
4.6.1. La détoxication chimique chez les animaux : biominéralisation et induction de la métallothionéine	117
4.6.2. Formes de stockage et spéciation chimique des radionucléides dans les organismes	118
4.6.3. L'influence de la spéciation chimique dans le biota sur les transferts trophiques.	119
4.7. L'élimination des radionucléides	120

4.8. La quantification des transferts des radionucléides aux organismes. . .	124
4.8.1. Les diverses méthodologies d'estimation des transferts des radionucléides	124
4.8.2. Le transfert des radionucléides de l'eau aux organismes ou bioconcentration	125
4.8.2.1. Le concept de facteur de concentration.	126
4.8.2.2. Le rapport de concentration (CR)	128
4.8.2.3. Le facteur de concentration des divers radionucléides chez les organismes	129
4.8.3. Le transfert des radionucléides du sédiment aux organismes benthiques	129
4.8.4. Les transferts trophiques des radionucléides	131
4.8.4.1. Le concept de bioamplification	135
4.8.4.2. Exemples de bioamplification de radionucléides	136
4.8.4.3. L'efficacité de l'assimilation	138
4.9. Conclusion	141

Chapitre 5. La contamination radioactive de l'environnement marin et les programmes de surveillance 145

5.1. Introduction.	145
5.2. La contamination radioactive des milieux marins	146
5.2.1. La contamination radioactive par les radionucléides naturels . . .	146
5.2.1.1. L'uranium dans l'environnement marin	146
5.2.1.2. Le polonium-210	148
5.2.2. L'état actuel de la contamination radioactive des milieux marins. .	150
5.2.3. Les sites marins des essais atomiques atmosphériques	151
5.2.3.1. Les sites américains des îles Marshall	151
5.2.3.2. Les sites soviétiques de Nouvelle-Zemble	157
5.2.3.3. Les sites britanniques des îles de Montebello	158
5.2.3.4. Les sites communs britanniques et américains Malden et Christmas	159
5.2.3.5. Les sites français, atolls de Mururoa et de Fangataufa	159
5.2.4. Les sites touchés par les retombées atmosphériques	160
5.2.4.1. La mer Méditerranée et les mers adjacentes	160
5.2.4.2. L'océan Arctique et les mers adjacentes	161
5.2.4.3. La mer Baltique.	163
5.2.4.4. L'océan Pacifique du Nord	164
5.2.5. Les sites contaminés par les usines de retraitement du combustible usé	164
5.2.5.1. La surveillance de l'usine de Hanford	164
5.2.5.2. La surveillance de l'usine de Sellafield.	165

5.2.5.3. La surveillance de l'usine de La Hague	166
5.2.5.4. Les impacts des deux usines de retraitement européennes sur les mers nordiques	168
5.2.5.5. L'usine japonaise de Rokkasho	169
5.2.6. Les sites touchés par les accidents nucléaires	170
5.2.6.1. Les accidents de Palomarès et de Thulé	170
5.2.6.2. L'accident de Tchernobyl	170
5.2.6.3. L'accident de Fukushima	171
5.2.7. Les sites touchés par les déchets radioactifs immergés	174
5.2.8. Les sites peu impactés par la pollution radioactive	175
5.3. Les réseaux de surveillance radiologique de l'environnement	177
5.3.1. Généralités	177
5.3.2. La surveillance de l'environnement à l'aide des bioaccumulateurs	178
5.3.2.1. L'amélioration des contrôles avec des transplantations de populations contrôlées	180
5.3.2.2. La gestion des données	181
5.4. Les réseaux de surveillance de l'environnement marin internationaux et régionaux	181
5.4.1. Les travaux de l'AIEA dans le domaine de l'environnement marin	181
5.4.2. La surveillance radiologique de l'Ospar	182
5.4.3. Les réseaux des mers nordiques	184
5.5. La surveillance radiologique en France	184
5.5.1. Les principes du contrôle	185
5.5.2. Le réseau de surveillance de l'IRSN	186
5.5.3. Le réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement	187
5.6. Conclusion	188

Chapitre 6. Doses d'irradiation subies par les organismes marins. 189

6.1. Introduction	189
6.2. Méthodologies de l'estimation de la dose reçue par les organismes marins	189
6.2.1. Les unités des doses d'irradiation	191
6.2.2. Les difficultés de l'estimation de la dose d'irradiation	192
6.3. Exemples de doses d'irradiation naturelles subies par les organismes marins	192
6.3.1. Les organismes marins pélagiques	194
6.3.2. Les organismes marins benthiques	195

6.3.3. Les organismes marins des profondeurs et des sources hydrothermales	195
6.4. Exemples de doses d'irradiation anthropiques subies par les organismes	196
6.4.1. Les doses d'irradiation dues aux essais des bombes atomiques . .	197
6.4.2. Les doses d'irradiation dues aux accidents nucléaires	198
6.4.3. Les doses d'irradiation dues aux usines de retraitement du combustible nucléaire utilisé	200
6.4.4. Les doses d'irradiation dues aux exploitations gazières et pétrolières	202
6.4.5. Les doses d'irradiation dues aux contaminations expérimentales	203
6.5. L'approche de la CIPR	204
6.5.1. Les organismes de référence (RAP, <i>Reference Animal or Plant</i>) . .	204
6.5.2. Les limites de la méthodologie	205
6.5.3. Vers des améliorations indispensables.	206
6.6. La sous-estimation systématique de la dose reçue par les organismes . .	208
6.7. Conclusion	209

Chapitre 7. Effets de l'irradiation chez les organismes marins 211

7.1. Généralités sur les effets de l'irradiation.	211
7.1.1. Les modes d'action des rayonnements ionisants.	211
7.1.2. Les effets déterministes et stochastiques	212
7.2. Les effets des radiations ionisantes au niveau moléculaire	213
7.2.1. Les effets sur l'ADN	213
7.2.2. L'induction d'effets cytogénétiques et génétiques.	216
7.2.3. Les effets sur les autres biomolécules	217
7.3. Les effets de l'irradiation au niveau subcellulaire et cellulaire.	219
7.3.1. Les altérations physiques de la structure des chromosomes	219
7.3.2. Les changements histopathologiques	219
7.3.3. L'induction de biomarqueurs de défense et de dommage	220
7.4. Les effets de l'irradiation au niveau des individus	221
7.4.1. La mortalité	222
7.4.1.1. La mortalité des organismes invertébrés	222
7.4.1.2. La mortalité des organismes vertébrés	224
7.4.2. L'altération de la reproduction	225
7.4.2.1. Stérilité et diminution de la fertilité	225
7.4.2.2. Le succès reproducteur	227
7.4.3. L'influence du stade vital	231
7.4.4. Radiosensibilité et radiorésistance des organismes	234
7.4.5. Conclusion sur les effets de l'irradiation au niveau individuel . .	236

7.5. Les effets biocénétiques de l'irradiation	236
7.5.1. Les suivis des zones fortement contaminées	236
7.5.2. Conclusions partielles	237
7.6. Les facteurs de confusion sur les effets de l'irradiation	238
7.7. La sous-évaluation systématique des effets biologiques des rayonnements ionisants	241
7.7.1. La nocivité selon le stade vital	241
7.7.2. La nocivité selon le tissu ou l'organe	241
7.7.3. La nocivité selon les émetteurs	241
7.7.4. La non-prise en compte de l'effet de voisinage (<i>bystander effect</i>)	241
7.7.5. La non-prise en compte des interactions entre effets des radionucléides	242
7.7.6. La non-prise en compte de la biodiversité dans l'environnement marin	242
7.8. Conclusion	242

Chapitre 8. La caractérisation du risque radioactif chez les organismes marins 245

8.1. Le principe de la caractérisation du risque radioactif	245
8.1.1. Les organismes internationaux impliqués dans l'évaluation du risque radioactif	246
8.1.2. Les recherches européennes	247
8.2. Les méthodes pour choisir les valeurs de référence	248
8.2.1. L'approche de la CIPR	248
8.2.2. L'approche Erica	248
8.3. Les outils de l'évaluation du risque radioactif pour les organismes non humains	249
8.3.1. L'outil Erica	250
8.3.2. La base de données Fasset	251
8.4. Les recommandations des doses d'irradiation pour les organismes marins	252
8.5. Applications et retour d'expériences	253
8.6. Les lacunes de la caractérisation du risque radioactif	255
8.6.1. La position des organismes internationaux vis-à-vis de l'approche CIPR	255
8.6.2. Les effets transgénérationnels	256
8.6.3. L'ignorance de la biodiversité	256
8.6.4. Le choix de l'effet néfaste liminaire	257
8.7. Conclusion	257

Conclusion	259
Liste des acronymes	269
Bibliographie	273
Index	323