



Jean-Claude Amiard

Le risque radioactif

Devenir des radionucléides dans l'environnement
et impacts sur la santé



062655

TEC
& DOC

Lavoisier

ECL 190

Remerciements



062655
⑤

Le risque radioactif

Devenir des radionucléides dans l'environnement et impacts sur la santé

Jean-Claude Amiard



062655

TEC
& DOC

www.editions.lavoisier.fr

Table des matières

Remerciements	V
Abréviations et sigles	VII
Avant-propos	XIII
1. Mes convictions	XIII
1.1. Indépendance	XIII
1.2. Liberté d'esprit	XIV
1.3. Compétence	XIV
1.4. Transparence	XIV
1.5. Rigueur scientifique	XIV
1.6. Conflit d'intérêt	XV
1.7. Droit à l'erreur en toute sincérité	XV
2. L'opinion publique	XV
2.1. La perception du risque radioactif par la population	XV
2.2. Les Français se fient à la science, pas aux chercheurs	XVI
2.3. La création d'organismes officiels indépendants	XVI
3. Le secret défense	XVI
4. La vérité scientifique	XVI
5. Le rôle de l'expert	XVII
6. Les objectifs de l'ouvrage	XVIII
Pour en savoir plus	XVIII

Première partie

Les connaissances de base

Chapitre 1

Historique : découverte de la radioactivité naturelle et artificielle

1. Les découvertes de la radioactivité naturelle et artificielle	3
2. La découverte de la fission et le premier réacteur nucléaire	5
3. La découverte du phénomène d'Oklo, un réacteur naturel	5

4. Les prix Nobel	6
5. La bombe atomique A, première application effroyable de la fission à Hiroshima et Nagasaki	7
6. Les travaux français pendant et après la Seconde Guerre mondiale	7
7. La course aux armes atomiques	8
8. Les principaux traités de non-prolifération	10
9. Entités impliquées dans la recherche, la technologie, l'information et la réglementation de l'énergie nucléaire	10
9.1. Les acteurs internationaux et européens	10
9.1.1. Les gestionnaires	11
9.1.2. Les organismes de recherche	12
9.2. Les acteurs français	15
9.2.1. Les gestionnaires	15
9.2.2. Les organismes de recherche	15
9.2.3. Les associations d'information du public	17
9.2.4. Les sites industriels	20
10. Les grands groupes industriels du nucléaire	20
11. Les premières applications médicales	22
11.1. La radiothérapie	22
11.2. L'imagerie médicale nucléaire ou radiologie	23
11.3. Les traceurs radioactifs	24
12. La production électronucléaire et la propulsion nucléaire	24
13. Les accidents nucléaires	25
Pour en savoir plus	26

Chapitre 2

Notions de physique

1. Éléments de physique nucléaire	29
1.1. Structure nucléaire	30
1.2. Les électrons	31
1.3. Stabilité du noyau atomique et réactions nucléaires	32
1.4. Les rayonnements ionisants	34
1.5. Les propriétés des radiations	35
1.6. Nature et origine des radiations	36
1.7. La période radioactive	36
2. Radionucléides et radioéléments	37
3. Les divers radionucléides naturels	38
3.1. Les radionucléides dus aux rayonnements d'origine cosmique	38
3.2. Les familles radioactives naturellement présentes dans la lithosphère	39
3.3. Les autres radionucléides naturels	41
3.3.1. Radium 226	41
3.3.2. Radon	41
3.3.3. Polonium 210	42
4. Radionucléides artificiels	43
4.1. Les produits de fission	43

4.2. Les produits d'activation	45
4.3. Les gaz nobles	45
4.4. Les transuraniens	46
4.5. Autres radionucléides	46
5. Polluant ou contaminant ?	46
6. Les unités dans le domaine de la radioactivité	47
7. Éléments de chimie nucléaire	48
7.1. La radiochimie	48
7.2. La chimie des réactions nucléaires	48
7.2.1. Les fissions spontanée et induite	48
7.2.2. La fusion nucléaire	51
7.3. La chimie isotopique	51
7.4. Le combustible nucléaire	52
7.5. La spéciation chimique nucléaire	52
8. La détection de la radioactivité	56
Pour en savoir plus	58

Chapitre 3

Les applications de l'énergie nucléaire

1. Les applications militaires	61
1.1. Les piles atomiques plutonigènes	61
1.2. La dissuasion	61
1.3. Les centres de recherche militaire	62
2. La propulsion nucléaire	63
2.1. Les navires	63
2.2. Les satellites	64
3. La production d'électricité	65
3.1. L'amont du cycle du combustible (extraction minière, concentration, raffinage, conversion, enrichissement, fabrication du combustible)	65
3.2. L'irradiation du combustible dans les réacteurs	67
3.2.1. Les diverses filières électriques	68
3.2.2. La première génération UNGG	68
3.2.3. La seconde génération	69
3.2.4. Le nucléaire dans le monde	70
3.2.5. La troisième génération de réacteurs	70
3.2.6. Une quatrième génération de réacteurs attendue après l'EPR	71
3.3. L'aval du cycle du combustible nucléaire	72
3.3.1. L'entreposage intermédiaire et les transports radioactifs	73
3.3.2. Le retraitement du combustible irradié	73
3.3.3. La gestion des déchets nucléaires et entreposages de déchets radioactifs	74
4. Le génie civil	74
5. Les marqueurs et les traceurs radioactifs	75
6. Les applications médicales	76

6.1. Médecine nucléaire	77
6.1.1. Les traceurs radioactifs	77
6.1.2. Les examens scintigraphiques	78
6.1.3. Les examens par tomographie à émission de positons	78
6.2. Thérapies par rayons	78
6.2.1. Radiothérapies	78
6.2.2. Les radiothérapies métaboliques	79
6.2.3. Les curiethérapies	79
6.2.4. Les thérapies avancées	79
7. La recherche fondamentale	80
7.1. Physique et chimie nucléaires	80
7.2. Datations	80
7.2.1. La datation au carbone 14	80
7.2.2. La thermoluminescence	81
7.2.3. Datation en géologie	81
7.2.4. Datation du vin	82
8. Les applications industrielles et agroalimentaires	83
8.1. Contrôles non destructifs	83
8.2. Réactions de synthèse industrielles et transformations mécaniques et chimiques	84
8.3. Traitement des déchets par irradiation	84
8.4. Applications agroalimentaires	85
9. Les applications au patrimoine	85
9.1. Analyse des objets	86
9.1.1. Objectifs	86
9.1.2. Appareillages et méthodes	86
9.2. Préservation	87
9.2.1. Durcissement par irradiation	87
9.2.2. Désinfection et stérilisation	87
Pour en savoir plus	88
Principaux sites internet	89

Chapitre 4

Notions d'écologie et de génétique

1. Organisation du monde vivant : une grande unicité	91
1.1. De la molécule à l'individu	91
1.2. De la population à l'écosphère	93
2. La structure de l'écosphère	93
3. Les relations milieu – organisme : notions de base en écologie	94
3.1. La niche écologique	95
3.2. La biocénose	95
3.3. L'écosystème	95
3.4. Le biome	96
4. Qu'est-ce que l'écologie ?	96
5. L'autoécologie ou les relations entre les milieux inertes et les êtres vivants	97
5.1. Notions générales	97

5.2. Les facteurs abiotiques	98
5.2.1. Facteurs climatiques	98
5.2.2. Facteurs chimiques	101
5.2.3. Facteurs édaphiques	102
5.3. Les facteurs biotiques	103
5.3.1. Réactions homotypiques	103
5.3.2. Réactions hétérotypiques	103
5.4. Conclusions	104
6. La démoécologie ou dynamique des populations	105
6.1. Les populations et leurs caractéristiques	105
6.1.1. Notion de population	105
6.1.2. Les caractéristiques des populations	105
6.2. Les fluctuations des populations animales en conditions naturelles	106
6.3. Les stratégies démographiques	107
7. La synécologie. Structure et fonctionnement des écosystèmes	107
7.1. Les zonations	108
7.1.1. Les écosystèmes terrestres ou biomes continentaux	108
7.1.2. Les macrosystèmes aquatiques	109
7.1.3. La zonation en altitude	109
7.2. Caractéristiques des biocénoses	110
8. Les transferts de matière et d'énergie dans les écosystèmes	110
8.1. Les réseaux trophiques ou alimentaires	110
8.2. Les pyramides écologiques	112
9. Écologie végétale	112
9.1. Dynamisme de la végétation	112
9.2. Analyse des populations végétales	114
10. Connaissances de base en génétique	114
10.1. L'ADN, molécule essentielle du vivant	115
10.1.1. Les deux allèles	115
10.1.2. Le code génétique	116
10.1.3. La réplication de l'ADN	117
10.1.4. La transcription	117
10.1.5. L'organisation de l'ADN en nucléotides ou chromosomes	117
10.1.6. Les dommages et les réparations de l'ADN	118
10.2. La division des cellules	119
10.2.1. La division des cellules somatiques ou mitose	119
10.2.2. La division des cellules germinales ou méiose	119
10.3. La génétique	120
10.4. L'épigénétique	122
10.5. Les mutations	123
10.5.1. L'apparition des mutations	123
10.5.2. La fréquence des mutations	124
10.5.3. Les types de mutation	124
10.5.4. Les mutations ponctuelles	124
10.5.5. Les mutations chromosomiques	126
10.5.6. Les mutations ploïdiques	126
Pour en savoir plus	127

Chapitre 5

Origines anthropiques des radionucléides
dans l'environnement

1. Origine naturelle ou anthropique des radionucléides dans l'environnement ?	129
2. Origine artificielle des radionucléides : retombées atmosphériques des explosions d'engins atomiques	131
2.1. Les bombes atomiques A	131
2.2. Les bombes atomiques H	132
2.3. Distribution des retombées entre les hémisphères Nord et Sud	132
3. Origine artificielle des radionucléides liée au cycle du combustible nucléaire	135
3.1. Les mines d'uranium	136
3.2. Fabrication du combustible nucléaire	136
3.3. Utilisation du combustible nucléaire	137
3.3.1. Réacteurs nucléaires électrogènes	138
3.3.2. Réacteurs nucléaires producteurs de matériaux	140
3.3.3. Réacteurs nucléaires destinés à la propulsion navale	141
3.4. Retraitement du combustible nucléaire irradié	142
3.5. Transport, stockage des déchets et démantèlement des installations nucléaires	146
3.5.1. Transport	146
3.5.2. Stockage des déchets	146
3.6. Démantèlement des installations nucléaires	149
3.7. Recyclage du combustible uranium et les autres cycles de combustible	149
3.8. Autres utilisations des radionucléides	150
4. Origines accidentelles des radionucléides	150
5. La surveillance radioactive de l'environnement	154
5.1. Le contrôle du nucléaire en France	154
5.1.1. Les principes du contrôle	154
5.1.2. Le réseau de surveillance de l'IRSN	155
5.1.3. Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement	156
5.2. La surveillance radiologique de l'OSPAR	157
6. Conclusions	158
Pour en savoir plus	160

Deuxième partie

La radioécologie

1. Généralités sur la radioécologie	165
2. Historique de la radioécologie	166
3. L'évolution des concepts en radioécologie	167
4. La triade de la radioécologie : exposition, bioaccumulation et effet néfaste	168

4.1. Les transferts des milieux physiques aux organismes	168
4.2. Contamination et irradiation, spécificités des radionucléides	170
Pour en savoir plus	170

Chapitre 6

Devenir des radionucléides dans l'environnement

1. Introduction	173
2. Dispersion des radionucléides dans l'atmosphère	174
2.1. Structure de l'atmosphère	174
2.2. Les mouvements horizontaux	176
2.3. Les mouvements verticaux	177
2.4. Facteurs influençant la dispersion atmosphérique et déposition des radionucléides	178
3. Dispersion des radionucléides dans l'hydrosphère	179
3.1. Dispersion dans les eaux douces	179
3.1.1. Rejets dans les lacs et réservoirs	179
3.1.2. Rejets dans les rivières et les fleuves	180
3.2. Dispersion dans les eaux marines	183
3.2.1. Rejets dans les estuaires	183
3.2.2. Rejets en milieu marin	186
4. Dispersion des radionucléides dans la lithosphère	193
4.1. Comportement des radionucléides dans les sédiments	194
4.1.1. Le coefficient de distribution K_d	194
4.1.2. Mécanismes de sorption	196
4.1.3. Migrations horizontales	199
4.1.4. Migrations verticales et phénomènes de désorption	203
4.1.5. Conclusions partielles	205
4.2. Comportement des radionucléides dans les sols	207
5. La spéciation chimique des radionucléides dans les milieux physiques	209
5.1. La spéciation dans l'atmosphère	209
5.2. La spéciation dans les sols et les sédiments	210
5.3. La spéciation dans les eaux douces	211
5.3.1. Distinction entre phase soluble et phase particulaire	211
5.3.2. Évolution des formes physico-chimiques des radionucléides dans les eaux naturelles	211
5.3.3. Caractéristiques physico-chimiques des radionucléides lors de leur introduction dans les milieux aquatiques	212
5.3.4. Caractéristiques du milieu récepteur	213
5.3.5. La spéciation dans les eaux souterraines	213
5.4. La spéciation des radionucléides dans les estuaires	214
5.4.1. Évolution de la forme physico-chimique des radionucléides du fleuve à la mer	215
5.4.2. Radionucléides présents sous forme cationique dans l'effluent	215
5.4.3. Radionucléides présents sous forme anionique dans l'effluent	216

5.4.4. Radionucléides présents sous forme particulaire et colloïdale dans l'effluent	217
5.5. Comportement physico-chimique des radionucléides dans les eaux marines	217
6. Les transferts intercompartimentaux	219
7. Les cycles biogéochimiques	221
7.1. Les principaux paramètres des cycles biogéochimiques	221
7.2. Les principaux facteurs influençant les cycles biogéochimiques des radionucléides	221
8. Conclusions	222
Pour en savoir plus	224

Chapitre 7

Contamination radioactive des organismes

1. Les voies de pénétration des radionucléides dans les êtres vivants	232
1.1. Les voies d'exposition de la flore et de la faune	232
1.2. Les passages transmembranaires	233
1.3. La distribution corporelle	235
1.3.1. Transport sanguin	236
1.3.2. Transports dans les plantes	236
1.3.3. Répartition cellulaire et tissulaire	236
2. Les mécanismes de la bioaccumulation des radionucléides	237
2.1. Mécanismes d'accumulation chez les végétaux	237
2.1.1. Contamination par adsorption	237
2.1.2. Contamination par absorption	239
2.2. Mécanismes d'accumulation chez les animaux	241
2.2.1. Les cinétiques d'accumulation	241
2.2.2. Quelques exemples de bioaccumulation	242
2.2.3. Phénomènes de régulation	243
2.2.4. Phénomène de tolérance et de résistance	245
3. Influence des facteurs écologiques sur la contamination radioactive	246
3.1. Influence des facteurs abiotiques sur la contamination radioactive des organismes aquatiques	247
3.1.1. Formes physico-chimiques des radionucléides et de leurs isotopes stables	247
3.1.2. Discrimination isotopique	250
3.1.3. Compétitions isotopique et chimique, salinité	250
3.1.4. Température	251
3.1.5. Vecteurs de la contamination	253
3.2. Facteurs biologiques de la contamination des organismes	254
3.2.1. Âge et taille des animaux	254
3.2.2. Sexe et maturité sexuelle	254
3.2.3. Mue et cycle d'intermue	255
3.3. Influence des organismes vivants sur le cycle des radionucléides dans l'environnement aquatique	256

3.3.1. Influence des organismes sur la répartition des radionucléides au sein du sédiment	256
3.3.2. Influence des organismes sur la répartition des radionucléides au sein des masses d'eau	258
3.3.3. Influence de l'activité biologique sur la forme physico-chimique des radionucléides	260
3.3.4. Influence de l'activité microbienne sur la forme physico-chimique des radionucléides	260
3.4. Conclusions partielles	261
4. L'organotropisme des radionucléides	262
4.1. Organotropisme chez les organismes aquatiques	262
4.2. Organotropisme chez les organismes terrestres	264
5. Les mécanismes de détoxification chimique des radionucléides	265
5.1. Détoxification chimique chez les animaux : biominéralisation et induction de la métallothionéine	265
5.2. Détoxification chimique chez les végétaux : phytochélatines et vacuoles cytoplasmiques	266
5.3. Formes de stockage et spéciation chimique des radionucléides dans les organismes	266
5.4. Influence de la spéciation chimique dans le biota sur les transferts trophiques	267
6. L'élimination des radionucléides	268
7. La quantification des transferts des radionucléides	272
7.1. Les diverses méthodologies d'estimation des transferts des radionucléides	272
7.2. La bioconcentration des radionucléides. Concept de facteur de concentration	275
7.2.1. Le concept de facteur de concentration	276
7.2.2. Le rapport de concentration (CR)	278
7.2.3. Facteur de concentration des divers radionucléides chez les organismes	278
7.2.4. Facteur de concentration des divers radionucléides chez les animaux domestiques	280
7.3. Transfert des radionucléides de l'atmosphère aux organismes aériens	281
7.3.1. Les transferts foliaires	281
7.3.2. Les transferts aux fruits	282
7.4. Transfert des radionucléides du sédiment aux organismes benthiques	282
7.5. Transferts des sols aux organismes terrestres	284
7.6. Transferts dans les écosystèmes complexes. Les facteurs de transfert agrégé	287
7.7. Les transferts trophiques des radionucléides	289
7.7.1. Le concept de bioamplification	289
7.7.2. Généralité sur le transfert trophique des radionucléides	290
7.7.3. Exemples de bioamplification de radionucléides	292
7.7.4. L'efficacité de l'assimilation	294
8. Conclusions	296
Pour en savoir plus	298

Chapitre 8

Les conséquences de l'irradiation
sur les êtres vivants non humains

1. Doses d'irradiation subies par les organismes	310
2. Généralités sur les effets de l'irradiation	316
3. Effets des radiations ionisantes au niveau moléculaire	318
3.1. Effets sur l'ADN	318
3.2. Effets sur les autres biomolécules	322
3.3. Effets déterministes et stochastiques	323
4. Effets de l'irradiation au niveau subcellulaire et cellulaire	324
4.1. Induction d'effets cytogénétiques et génétiques	324
4.2. Relation linéaire entre réponse génétique et dose d'irradiation	324
4.3. Altérations physiques de la structure des chromosomes	326
4.4. Altérations moléculaires de la structure des chromosomes	326
4.5. Induction de biomarqueurs de défense et de dommage	326
5. Effets de l'irradiation au niveau des individus	327
5.1. Mortalité	328
5.1.1. Mortalité des organismes invertébrés	328
5.1.2. Mortalité des organismes vertébrés	330
5.2. Changements histopathologiques	331
5.3. Diminution de la fertilité	331
5.4. Succès reproducteur	333
5.4.1. Radiosensibilité inhérente et fertilité	333
5.4.2. Facteurs affectant la radiosensibilité inhérente	335
5.4.3. Stratégie de la gamétogénèse	336
5.4.4. Stratégie de la reproduction	336
5.4.5. Exposition historique	337
5.5. Influence du stade vital	337
5.6. Radiosensibilité des organismes	339
5.7. Effets génétiques de l'irradiation	341
5.8. Conclusion sur les effets de l'irradiation au niveau individuel	342
6. Effets biocénétiques de l'irradiation	343
6.1. Études expérimentales en laboratoire	344
6.2. Études expérimentales <i>in situ</i>	344
6.3. Suivis des zones fortement contaminées	347
6.4. Conclusions partielles	352
7. Facteurs de confusion sur les effets de l'irradiation	353
8. Évaluation du risque radioactif pour les organismes non humains	355
8.1. Outil ERICA	355
8.2. Base de données FASSET	356
8.3. Estimation de la valeur seuil de non-effet aux radiations	357
8.4. Part de la chimiotoxicité et de la radiotoxicité dans les effets nocifs	359
9. Conclusions	360
Pour en savoir plus	362

Troisième partie

Le risque radioactif pour l'homme
L'anthroposphère

Chapitre 9

La contamination de l'anthroposphère

Exposition et imprégnation par l'homme des radionucléides

1. La contamination de l'anthroposphère	373
1.1. Contaminations naturelles	373
1.1.1. La contamination naturelle des milieux physiques	373
1.1.2. La contamination naturelle des aliments	375
1.1.3. La contamination naturelle des bâtiments	376
1.2. Contaminations anthropiques	377
2. Les voies d'exposition de l'homme	379
2.1. Les voies d'exposition externes	379
2.1.1. Les expositions externes naturelles	380
2.1.2. Les expositions externes artificielles	382
2.2. Les voies d'exposition internes	383
2.2.1. Les expositions internes naturelles	383
2.2.2. Les expositions internes artificielles	383
3. Les transferts des radionucléides de la diète à l'homme	384
3.1. Transferts de l'environnement aux produits animaux consommés par l'homme	384
3.1.1. Les coefficients de transfert alimentaire	384
3.1.2. Influence de la transformation des produits	386
3.2. Transferts de l'environnement aux produits végétaux consommés par l'homme	388
3.3. Surveillance environnementale des produits consommés par l'homme	389
3.4. Transferts de l'eau de boisson à l'homme	390
4. L'imprégnation de l'homme par les radionucléides	391
4.1. Les transferts transmembranaires	391
4.2. Les barrières épithéliales et cérébrales	392
4.3. Les mécanismes moléculaires	393
4.4. Imprégnation par les radionucléides naturels	393
4.5. Imprégnation par les radionucléides artificiels	395
4.5.1. Les iodes radioactifs	395
4.5.2. Le césium 137	395
4.5.3. Le strontium 90	396
4.5.4. Les plutoniums	396
4.5.5. Le ruthénium 106	397
4.5.6. Le phosphore 32	397
5. La décorporation des radionucléides chez l'homme	397
6. Biocinétique, organotropisme et périodes biologiques des radionucléides	399

7. Les valeurs réglementaires	401
8. Conclusions	402
Pour en savoir plus	404

Chapitre 10

Les doses d'irradiation et les effets chez l'homme

1. De l'exposition à la dose	410
1.1. L'expression de l'exposition	410
1.2. La dose absorbée	410
1.3. La dose équivalente	410
1.4. La dose efficace	411
1.5. La dose engagée due à une contamination interne	413
1.5.1. Les modèles biocinétiques	413
1.5.2. Les modèles biophysiques	415
1.5.3. De la dose engagée à la dose efficace	415
1.6. Les limites de l'estimation des doses efficaces	416
1.6.1. La modélisation	416
1.6.2. La microdistribution	417
1.6.3. La transmutation	417
1.6.4. Les interactions de la radiotoxicité et de la toxicité chimique	417
1.6.5. Les variabilités individuelles	418
1.7. Les doses collectives	418
2. De la dose à l'effet néfaste	419
2.1. Les radiopathologies	419
2.1.1. Les effets déterministes et stochastiques	419
2.1.2. Les effets au niveau moléculaire et tissulaire	420
2.1.3. Les effets sur la fertilité et la stérilité humaine	421
2.1.4. Les effets au niveau de l'individu	422
2.2. Les principaux facteurs influençant l'effet de l'irradiation	423
2.3. Les mortalités à fortes doses d'irradiation	424
2.3.1. Exposition du corps entier	424
2.3.2. Exposition au niveau d'organes particuliers	425
2.4. Cancers radio-induits	426
2.4.1. Les relations dose – réponse pour les doses fortes. Cas d'Hiroshima et Nagasaki	428
2.4.2. Induction de cancers aux faibles expositions	429
2.4.3. Les mécanismes de déclenchement des cancers	430
2.4.4. Les divers types de cancers attribuables aux radiations	430
2.5. Les effets héréditaires de la radio-exposition	430
2.6. Maladies non cancéreuses liées aux rayonnements	431
2.7. Les relations dose-réponse pour les doses moyennes : les études épidémiologiques	434
2.7.1. Le principe général des études épidémiologiques	434
2.7.2. Les études épidémiologiques évaluant les faibles doses d'irradiation	437

2.7.3. Les excès de cancer du poumon dans certaines habitations	437
2.7.4. Les excès de leucémies infantiles autour des installations nucléaires de base (INB)	438
2.7.5. Tentatives d'explication d'apparition des agrégats	441
2.8. Les réponses aux faibles doses	442
2.8.1. Seuil ou sans seuil liminaire, la controverse	443
2.8.2. Réponses linéaires ou non linéaire ? Les réponses non uniformes	444
2.8.3. L'hormèse ou le pouvoir réparateur	445
2.8.4. Les effets de proximité (« bystander effect ») et instabilité génomique	445
2.9. Conclusions partielles	446
3. L'estimation des doses d'irradiation	447
3.1. Coefficients de dose pour une exposition externe	447
3.2. Coefficients de dose pour une exposition interne	447
3.3. Exposition interne : les facteurs de dose par unité d'incorporation (DPUI)	449
4. Estimations des doses d'irradiation naturelles reçues par l'homme	452
4.1. Les doses d'irradiation externes naturelles	453
4.1.1. L'exposition cosmique	453
4.1.2. L'exposition tellurique	454
4.2. Les doses d'irradiation internes naturelles	454
5. Estimation des doses d'irradiation artificielles reçues par l'homme	455
5.1. Les expositions médicales externes	455
5.2. Les expositions dues aux retombées des essais atomiques	456
5.3. Les expositions internes artificielles dues à la boisson	457
5.4. Les exposition due aux produits de la mer	457
6. Quelques cas d'irradiation de populations humaines	458
6.1. Les cobayes	458
6.2. Estimation des irradiations autour des installations nucléaires	458
6.3. Estimation des irradiations suite à l'accident de Tchernobyl	461
6.4. Estimation des irradiations pour les travailleurs du nucléaire	462
7. La radioprotection et recommandations pour l'irradiation humaine	463
7.1. Textes réglementaires généraux	464
7.2. La limite annuelle d'incorporation	465
8. Conclusions	466
Pour en savoir plus	467

Quatrième partie

Les déchets et les accidents nucléaires

Chapitre 11

Les déchets radioactifs – Démantèlements, stockages et transmutations

1. Qu'est-ce qu'un déchet nucléaire ?	480
1.1. La classification des déchets radioactifs.	480
1.2. La classification française des déchets radioactifs.	481
2. Les sources de déchets nucléaires	482
2.1. Les déchets nucléaires liés à la production d'électricité.	482
2.2. Les déchets nucléaires liés aux activités militaires.	483
2.3. Les déchets nucléaires liés aux activités civiles	484
2.4. Les déchets nucléaires liés aux démantèlements des installations nucléaires.	484
3. Comment se débarrasser des déchets nucléaires ? Quelles solutions dans l'avenir pour les déchets nucléaires ?	487
3.1. La réduction du volume des déchets nucléaires	487
3.2. Les dilutions.	488
3.3. La séparation des radionucléides.	488
3.4. Les confinements.	489
3.5. Les stockages	489
3.5.1. Les entreposages (ou stockages temporaires)	489
3.5.2. Les entreposages de longue durée	490
3.5.3. Les stockages définitifs.	491
3.5.4. Les immersions	494
3.6. Destruction naturelle des radionucléides par le temps	494
3.7. Les transmutations	494
4. La gestion des déchets nucléaires en France.	496
4.1. Le contexte réglementaire	498
4.2. Le Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR)	499
4.3. L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).	500
4.4. Les centres de stockage des déchets nucléaires à faible et moyenne activité à vie courte en France.	500
4.5. La gestion des déchets nucléaires de faible activité à vie longue (FAVL) en France	501
4.6. La gestion des déchets à forte activité et vie longue (HAVL) en France	502
4.6.1. Le laboratoire souterrain de Bure	502
4.6.2. Le projet Cigéo	503
4.6.3. Réversibilité du stockage profond.	505
4.6.4. Préservation de la mémoire et sa transmission intergénérationnelle	505
4.6.5. Conclusions	506

4.7. Les stockages des déchets tritiés	507
4.8. Les solutions adoptées par d'autres pays pour les déchets à fortes activités	508
4.9. Les déchets militaires	509
4.10. Les sites d'entreposage de déchets radioactifs des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).	510
5. Conclusions	510
Pour en savoir plus	512

Chapitre 12

Les principaux accidents

1. Incident ou accident ?	515
2. Les accidents dans le domaine militaire	517
2.1. Les essais atomiques	517
2.1.1. Les accidents soviétiques	517
2.1.2. Les accidents américains.	518
2.1.3. Les accidents français	519
2.2. Les bombardements d'Hiroshima et Nagasaki	522
2.3. Les accidents sur les armes en service	523
2.4. Accidents sur les unités de production de plutonium.	525
2.4.1. Windscale	525
2.4.2. Kyshtym.	525
2.4.3. Tomsk	527
3. Les accidents liés à la production d'électricité	528
3.1. Three Mile Island.	529
3.2. Tchernobyl	530
3.2.1. Les faits	530
3.2.2. La gestion de l'accident	531
3.2.3. Conséquences pour les écosystèmes terrestres.	533
3.2.4. Conséquences pour les écosystèmes aquatiques	538
3.2.5. Les contre-mesures réalisées à Tchernobyl	540
3.2.6. Impact sanitaire	541
3.2.7. Les pathologies.	542
3.2.8. Le rapport de l'ONU sur Tchernobyl	545
3.2.9. L'impact de Tchernobyl en Europe	546
3.2.10. L'impact de Tchernobyl en France	548
3.3. Fukushima Dai-Ichi	552
3.3.1. Les faits	552
3.3.2. Les actions engagées par les autorités japonaises	555
3.3.3. Conséquences pour l'environnement terrestre	557
3.3.4. Conséquences pour l'environnement marin.	559
3.3.5. Conséquences pour la population humaine locale	561
3.3.6. Conséquences pour les travailleurs du nucléaire	563
3.3.7. Les conséquences pour l'Europe	564
3.3.8. Les essais de décontamination.	564
3.4. Comparaison des accidents de Tchernobyl et Fukushima.	565

4. Les accidents liés à l'utilisation de sources radioactives en médecine et dans l'industrie	565
5. Les accidents terroristes	568
6. Autres accidents	570
7. Que faire en cas d'accident ?	571
7.1. Les recherches et développement relatives aux accidents graves	571
7.2. L'évacuation et le confinement des populations.	572
7.3. La prise d'iode non radioactif.	573
7.4. L'interdiction de consommation et de commercialisation de produits.	573
7.5. La décontamination de l'environnement	575
7.6. La réparation des dommages par des contre-mesures	575
7.6.1. Les méthodes physiques.	576
7.6.2. Les méthodes chimiques	576
7.6.3. Les méthodes agricoles de décontamination	578
7.7. La cellule post-accidentelle de l'ASN	579
8. Conclusions	580
Pour en savoir plus	584
Conclusion	597
Glossaire	599
Index	621

L'utilisation et la gestion de l'énergie nucléaire sont des sujets sensibles. Chaque accident nucléaire majeur qui se produit soulève de nombreuses et nouvelles interrogations sur les risques radioactifs pour l'environnement et la biodiversité, et l'impact des radionucléides sur les êtres vivants et la santé.

S'inscrivant au cœur du débat public, **Le risque radioactif** propose une synthèse complète des connaissances actuelles sur les principaux polluants radioactifs de l'environnement (uranium, transuraniens, isotopes radioactifs du césium, du strontium, de l'iode, du tritium, du carbone et de divers métaux de transition...), leur comportement et leur devenir dans les divers compartiments physiques des milieux et au sein des organismes vivants, dont l'homme. Il présente de façon claire et raisonnée :

- ▶ les fondements de la physique et de la chimie nucléaires ainsi que leurs applications dans différents domaines (militaire, énergie, médecine, industrie...). Il aborde également les notions à connaître d'écologie et de génétique, et rappelle les origines anthropiques des radionucléides dans l'environnement ;
- ▶ les grands principes de la radioécologie, discipline consacrée à l'étude des radionucléides, le comportement de ces derniers dans l'environnement (atmosphère, hydrosphère et lithosphère), leur mode de contamination et leur effet néfaste sur les organismes non humains ;
- ▶ les principaux risques radioactifs pour l'homme (exposition, imprégnation), les mécanismes de contamination et leurs conséquences sur la santé (effets des irradiations) ;
- ▶ les principaux inconvénients de l'utilisation de l'énergie nucléaire que sont les déchets radioactifs et leur gestion, et les accidents nucléaires et leur impact.

Véritable ouvrage de référence multidisciplinaire, **Le risque radioactif** s'adresse aux ingénieurs, techniciens et industriels concernés par l'évaluation, la prévention et la gestion des risques radioactifs, aux responsables « environnement » des entreprises et collectivités ainsi qu'aux autorités de sûreté nucléaire. Il sera également utile aux enseignants et étudiants de troisième cycle ainsi qu'à toute personne souhaitant mieux comprendre le risque radioactif.

Jean-Claude Amiard est docteur d'État en radioécologie, directeur de recherche émérite au CNRS et ancien professeur associé au Québec. Reconnu par la communauté scientifique nationale et internationale, ses recherches sont centrées sur l'estimation de la biodisponibilité et le transfert des métaux, radionucléides et nanoparticules métalliques dans les chaînes trophiques. Il est l'auteur de nombreuses publications (150 publications internationales, 44 ouvrages ou chapitres, 150 communications à des congrès) et de plusieurs ouvrages de synthèse. Il enseigne également dans diverses universités et organismes de formation, publics et privés, et il met à profit ses qualités d'expertise auprès de diverses instances.

www.editions.lavoisier.fr



978-2-7430-1495-7