

Table des matières

Présentation et résumé des conclusions	1
Presentation and summary of conclusions	19
Chapitre I – Les matériaux du nucléaire et l'irradiation	37
I – A Préambule : la réflexion sur les matériaux du nucléaire est liée au concept de temps	38
I – B L'irradiation des matériaux : mécanismes, phénomènes et propriétés	41
1. Problématiques fondamentales de la science des matériaux pour le nucléaire	41
2. Interaction particule-matière	44
2.1 Excitation électronique	45
2.2 Chocs nucléaires	49
2.3 Réactions nucléaires	54
3. Conséquences des interactions particule-matière sur les phénomènes qui contrôlent le comportement macroscopique	55
3.1 Altération de la cohésion	55
3.2 Modification de la structure atomique	56
3.3 Modification de la microstructure	59
3.4 Modification de la diffusion	67
3.5 Modification de la plasticité, de la ductilité	70
3.6 Interfaces	72
4. Effets de dose, de débit de dose et de dose intégrée	73

5. Utilisation et représentativité des irradiations par des particules chargées	74
6. Problèmes posés par la modélisation numérique	76
6.1 Les outils de modélisation	76
6.2 Modélisations multi-échelle	85
6.3 Programmes, codes et machines	85
7. Thèmes à développer et lacunes à combler	86
7.1 Interaction particule-matière	87
7.2 Problèmes de cinétique	87
8. Conclusion	89
Bibliographie	90
I – C Fiabilité des matériaux polymères en ambiance nucléaire	93
1. Problématiques fondamentales	93
2. Interaction particule-matière	95
3. Étude des conséquences sur les phénomènes macroscopiques	97
4. Représentativité des expériences de laboratoire : problèmes posés par la modélisation	100
5. Cas particulier des bitumes	101
6. Conclusion	102
Bibliographie	103
Chapitre II – Les matériaux des réacteurs nucléaires	105
1. Introduction	106
1.1 Contenu	106
1.2 Présentation	106
2. État des lieux : les réacteurs existants	108
2.1 Les cuves	108
2.2 Les internes	116
2.3 Les gaines	122
2.4 Les enceintes en béton armé précontraint	125
2.5 Autres composants	128
3. Problématiques scientifiques	140
3.1 Méthodologie	140
3.2 Comportement et endommagement mécaniques	145

3.3	Vieillessement	148
3.4	Corrosion et mécanique	152
3.5	Couplage avec l'irradiation	160
3.6	Structuration de l'acquis et développement de nouveaux matériaux	161
4.	Les matériaux des réacteurs du futur	162
4.1	Introduction	162
4.2	Les réacteurs de demain	164
4.3	Les réacteurs d'après-demain	165
4.4	Les réacteurs à fusion contrôlée	166
4.5	Les réacteurs incinérateurs	166
5.	Conclusion	167
	Bibliographie	167
 Chapitre III – Les matériaux dans l'aval du cycle nucléaire		169
III – A Matériaux inorganiques non métalliques		171
1.	Les matériaux inorganiques non métalliques	171
2.	Matériaux silicatés ; matériaux non silicatés	172
2.1	Matériaux silicatés	172
2.2	Matériaux non silicatés	173
3.	Matériaux inorganiques non métalliques : l'absence de ductilité	173
4.	Céramiques, verres, ciments : des matériaux granulaires cohésifs	174
5.	Structures et microstructures	175
III – B L'aval du cycle : comportement à long terme des déchets nucléaires en entreposage et stockage		176
1.	L'aval du cycle	176
2.	La spécificité des études sur les matériaux dans l'aval du cycle du combustible	178
3.	Le combustible nucléaire irradié provenant des réacteurs ..	180
3.1	Besoins de l'aval du cycle	180
3.2	État des lieux scientifique	186
3.3	Place de la France dans la communauté internationale ..	189
3.4	Commentaires	190
4.	Comportement à long terme des bétons pour l'entreposage et le stockage des déchets nucléaires	191

2.	Les verres de confinement	220
2.1	Étude du comportement à long terme	222
2.2	Amélioration de la composition du verre et du procédé de vitrification	225
2.3	Recherche de nouvelles compositions et de nouveaux procédés	226
3.	Place de la communauté française dans le contexte international	228
4.	Conclusion	229
	Bibliographie	229
III – E	Les matériaux cimentaires	231
1.	Les matériaux cimentaires	231
1.1	Clinker Portland	232
1.2	Ciment Portland et autres ciments	232
1.3	Le ciment hydraté	233
1.4	Mortiers et bétons	235
2.	Rôle de l'eau ; porosité	236
3.	Les bétons comme matériaux du nucléaire : bâtiments et structures	236
4.	Les bétons comme matériaux du nucléaire : aval du cycle	237
5.	Confinement : le béton comme barrière physique	237
6.	Confinement : le béton comme barrière chimique	239
6.1	Précipitation	240
6.2	Adsorption	240
6.3	Substitution	241
6.4	Bétons à charge active	241
6.5	Ciments activés par les alcalins	242
7.	Effets de la température, effets des rayonnements et effets biologiques	243
8.	Emplois des bétons : le moyen terme	244
9.	Performances des bétons : le très long terme	245
10.	Place de la communauté française dans le contexte international	247
11.	Conclusion	247
	Bibliographie	248

2.	Les verres de confinement	220
2.1	Étude du comportement à long terme	222
2.2	Amélioration de la composition du verre et du procédé de vitrification	225
2.3	Recherche de nouvelles compositions et de nouveaux procédés	226
3.	Place de la communauté française dans le contexte international	228
4.	Conclusion	229
	Bibliographie	229
III – E	Les matériaux cimentaires	231
1.	Les matériaux cimentaires	231
1.1	Clinker Portland	232
1.2	Ciment Portland et autres ciments	232
1.3	Le ciment hydraté	233
1.4	Mortiers et bétons	235
2.	Rôle de l'eau ; porosité	236
3.	Les bétons comme matériaux du nucléaire : bâtiments et structures	236
4.	Les bétons comme matériaux du nucléaire : aval du cycle	237
5.	Confinement : le béton comme barrière physique	237
6.	Confinement : le béton comme barrière chimique	239
6.1	Précipitation	240
6.2	Adsorption	240
6.3	Substitution	241
6.4	Bétons à charge active	241
6.5	Ciments activés par les alcalins	242
7.	Effets de la température, effets des rayonnements et effets biologiques	243
8.	Emplois des bétons : le moyen terme	244
9.	Performances des bétons : le très long terme	245
10.	Place de la communauté française dans le contexte international	247
11.	Conclusion	247
	Bibliographie	248

III – F Les argiles	249
1. Matériaux, géomatériaux et formations géologiques : argiles, granite, sel...	249
2. Les argiles : une brève (et incomplète) typologie	250
3. Quelles argiles pour le stockage ?	254
4. Les problèmes posés	256
4.1 La stabilité	257
4.2 Le comportement thermo-hydro-mécanique	257
4.3 Le comportement hydrodynamique	259
4.4 L'échange et la rétention des ions	259
4.5 Le couplage chimio-mécanique	260
5. Perspectives scientifiques : une physico-chimio-mécanique des argiles	263
6. Place de la communauté française dans le contexte international	264
Bibliographie	264
III – G Démantèlement des installations nucléaires	265
1. Devenir des installations nucléaires après leur exploitation.	265
2. Les scénarios de démantèlement	265
3. Technologies de démantèlement	266
4. Les déchets de démantèlement	266
5. Volume et activité des déchets de démantèlement	267
6. La politique de démantèlement en France	268
7. Le devenir des déchets de démantèlement	269
8. Les déchets nucléaires inorganiques non métalliques	270
8.1 Les déchets bétons et leur devenir	270
8.2 Les déchets de graphite et leur devenir	271
9. Conclusion	276
Bibliographie	277
Glossaire	279
Groupe de lecture critique	
Composition du groupe de lecture critique	289

Commentaire de Creusot-Loire Industrie	291
Commentaire de l'Andra	293
Commentaire de la Conférence des Présidents d'université.	313

Présentation à l'Académie des sciences

Intervention de Jacques Friedel	319
Intervention de Bernard Tissot	325