

COLLECTION
**GÉNIE
ATOMIQUE**

Le cycle du combustible nucléaire



COORDINATEUR
LOUIS PATARIN

Avec la collaboration de Pascal Baron,
Philippe Fournier, Dominique Ochem

instn

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES
ET TECHNIQUES NUCLÉAIRES


EDP
SCIENCES

Table des matières

Partie I Introduction et chimie de l'uranium

Chapitre 1 : Cycle ouvert ou fermé ? Les outils industriels

1. Les données fondamentales	13
2. Les trois logiques du cycle	15
2.1. La logique physique	15
2.2. La logique économique	15
2.3. La logique écologique	15
3. Une question polémique : le destin des déchets nucléaires	15
4. Les outils industriels	17
4.1. L'amont du cycle	18
4.2. L'aval du cycle	18
4.3. Les moyens de transport	19
5. La réussite éminente de l'industrie française	19
6. Les aspects économiques du cycle	20

Chapitre 2 : Éléments de chimie de l'uranium et des actinides

1. Rappels sur la liaison chimique	23
1.1. Configuration électronique des atomes et tableau périodique des éléments	23
1.2. Réactions et liaison chimique	24
1.3. L'oxydo-réduction	24
2. La série des actinides	25
2.1. La découverte de l'uranium et sa place dans le tableau périodique	25
2.2. La radioactivité	26
3. L'uranium	27
3.1. Les propriétés nucléaires	27
3.2. Les propriétés chimiques	28
4. Les transuraniens (neptunium, plutonium, américium, curium)	29
4.1. Le plutonium	29
4.2. Les actinides mineurs	30

Partie II Préparation de la matière première

Chapitre 3 : Géologie de l'uranium et extraction minière

1. La géologie de l'uranium	33
1.1. Abondance	33
1.2. Les minéraux uranifères	33
1.3. Les gisements	34
2. La recherche des gisements	35
3. L'exploitation minière	35
3.1. Les exploitations à ciel ouvert	35
3.2. Les exploitations souterraines	36
4. Le traitement des minerais d'uranium	37
5. Les ressources en uranium	39
5.1. Les réserves	39
5.2. La production minière	40
5.3. La position française	41
6. Le réaménagement des sites miniers après exploitation	41
6.1. La mine	41
6.2. L'usine	42
6.3. Les résidus miniers	42

Chapitre 4 : Conversion de l'uranium : des concentrés à l'hexafluorure

1. Les concentrés uranifères : uranates et oxydes	43
2. Les produits finis recherchés pour le combustible	43
2.1. U métal	43
2.2. U oxyde	44
3. Les procédés de la conversion de l'uranium	44
3.1. U métal	44
3.2. UF ₆	44
4. Les usines françaises de conversion : COMURHEX / groupe COGEMA	45

Chapitre 5 : Enrichissement en uranium fissile

1. Les besoins en uranium enrichi des réacteurs à eau	47
2. Les différentes possibilités de séparation isotopique de l'uranium	48
3. La diffusion gazeuse	49
3.1. Principe	49
3.2. Le facteur de séparation	50
3.3. Schéma d'usine	50
3.4. Le travail de séparation isotopique	51
4. L'usine EURODIF	53
5. L'ultracentrifugation	54
5.1. Principe	54
5.2. Développement	56

5.3. Résultats	
6. Les procédés par l	
6.1. Principe	
6.2. Développement	

Partie III Combustibles refroidis

Chapitre 6 : Fabrication

1. Les fonctions et le	
1.1. Les fonctions	
1.2. Les compos	
2. Rappel des condi	
2.1. Les conditio	
2.2. Le comporte	
3. Les exigences à s	
4. La fabrication de	
5. La fabrication de	
6. La fabrication des	
6.1. Les crayons	
6.2. L'assemblag	
7. Les caractéristiqu	
7.1. Les contrain	
7.2. Les fabricati	
7.3. Les usines fr	

Chapitre 7 : Effet

1. Les conditions gé	
2. La composition a	
2.1. Les transfor	
2.2. Le bilan des	
3. La puissance rési	
4. La radioactivité e	
5. La radioprotectio	

Chapitre 8 : Refroidissement

1. L'entreposage en	
2. La conception de	
3. Les conditions d'	
4. Un exemple de p	



5.3. Résultats	56
6. Les procédés par laser	57
6.1. Principe	57
6.2. Développement	58

Partie III Combustible neuf et usé : fabrication, irradiation, refroidissement

Chapitre 6 : Fabrication de la céramique nucléaire et de l'assemblage

1. Les fonctions et les composantes du combustible nucléaire	63
1.1. Les fonctions	63
1.2. Les composantes	63
2. Rappel des conditions d'usage et du comportement du combustible	65
2.1. Les conditions d'usage	65
2.2. Le comportement en cours d'irradiation	65
3. Les exigences à satisfaire et les spécifications de fabrication	66
4. La fabrication de la céramique nucléaire (pastilles)	66
5. La fabrication de la gaine	67
6. La fabrication des crayons et de l'assemblage	68
6.1. Les crayons	68
6.2. L'assemblage	69
7. Les caractéristiques des usines de fabrication	69
7.1. Les contraintes imposées par la matière nucléaire	69
7.2. Les fabrications annexes	70
7.3. Les usines françaises	70

Chapitre 7 : Effets de l'irradiation sur le combustible en réacteur

1. Les conditions générales d'usage en réacteur	71
2. La composition après irradiation et le bilan matière	72
2.1. Les transformations induites par les neutrons	72
2.2. Le bilan des noyaux lourds	74
3. La puissance résiduelle lors du refroidissement	75
4. La radioactivité et l'émission neutronique	76
5. La radioprotection vis-à-vis de l'activité du combustible usé	77

Chapitre 8 : Refroidissement et entreposage en piscine

1. L'entreposage en piscine - Pourquoi ?	81
2. La conception des piscines d'entreposage	82
3. Les conditions d'entreposage des combustibles irradiés en piscine	83
4. Un exemple de piscine d'entreposage : La Hague	84

Partie IV Gestion du combustible utilisé par le retraitement

Chapitre 9 : Éléments de chimie du retraitement

1. Le milieu nitrique	89
1.1. Les propriétés acide et complexante	89
1.2. Les réactions redox entre états oxydés de l'azote	89
1.3. Les composés antinitrites	90
2. La chimie redox des éléments U-Np-Pu-Am en milieu nitrique	90
2.1. Les formes ioniques	90
2.2. La stabilité en milieu acide nitrique	91
2.3. Les réactions d'oxydation	91
2.4. La réduction du plutonium tétravalent	92
2.5. La réduction du plutonium hexavalent	92
3. Le TBP et l'extraction liquide-liquide	93
3.1. Le tributylphosphate (TBP, masse molaire 323)	93
3.2. Le rôle du diluant	94
3.3. L'extraction liquide-liquide	95
4. La séparation de U-Np-Pu-Am par extraction	96
5. Le comportement des principaux produits de fission	98
5.1. Les produits de fission gazeux	98
5.2. Les produits de fission alcalins et alcalino-terreux	98
5.3. L'yttrium et les lanthanides	98
5.4. Les platinoïdes	99
5.5. Les métaux de transition : molybdène, zirconium et technétium	99

Chapitre 10 : Opérations de tête du retraitement

1. Le cisailage des assemblages combustibles	101
2. La dissolution nitrique	102
2.1. Les mécanismes de dissolution	102
2.2. Le bilan de la dissolution	104
2.3. Contraintes et aspects technologiques	104
3. La clarification de la solution de dissolution	106
4. Le traitement des gaz de dissolution	106
5. Le résultat des opérations de tête	107

Chapitre 11 : Opérations d'extraction

1. Introduction : le procédé PUREX	109
1.1. Les objectifs	109
1.2. Les performances de PUREX	109
1.3. Chimie et hydrodynamique	110
1.4. La solution d'entrée	110
2. La conception générale des cycles d'extraction	111
3. La co-extraction uranium et plutonium au premier cycle	112

4. La désactivation	
5. Le traitement des	
6. Les opérations	
6.1. Le lavage	
6.2. Le traitement	
6.3. Les cycles	
7. Les appareils	
7.1. Les mélange	
7.2. Les extra	
7.3. Les colim	
8. La modélisati	

Chapitre 12 : La

1. L'objectif	
2. Le procédé	
2.1. La précipi	
2.2. La filtra	
2.3. La calori	
2.4. La comm	
3. Les caractéris	
4. Le colis de plut	
5. La reprise du Pu	

Chapitre 13 : La

1. Introduction	
2. L'utilisation	
2.1. Les mesur	
2.2. Les mesur	
2.3. Exemple	
3. Les différen	
4. Les méthodi	

Partie V Trans

Chapitre 14 : La

1. Les transmiss	
2. Les matéri	
3. La sûreté de	
4. Les colis	
4.1. La classifi	
4.2. Le colim	

4. La dés extraction sélective du plutonium (partition)	113
5. Le traitement du solvant	114
6. Les opérations annexes	115
6.1. Le lavage des phases aqueuses par du diluant	115
6.2. Le traitement complémentaire du solvant	115
6.3. Les cycles de purification uranium et plutonium	115
7. Les appareils d'extraction	116
7.1. Les mélangeurs-décanteurs (M-D)	116
7.2. Les extracteurs centrifuges (EC)	117
7.3. Les colonnes pulsées (CP)	118
8. La modélisation	119

Chapitre 12 : Conditionnement final du plutonium

1. L'objectif	121
2. Le procédé	121
2.1. La précipitation oxalique	121
2.2. La filtration	122
2.3. La calcination	122
2.4. La concentration des eaux mères oxaliques	123
3. Les caractéristiques du produit fini	123
4. Le colis de plutonium	123
5. La reprise du PuO ₂ hors norme	124

Chapitre 13 : Contrôles analytiques et mesures nucléaires au retraitement

1. Introduction	127
2. L'utilisation de mesures non destructives	127
2.1. Les mesures directes sur le procédé	128
2.2. Les mesures indirectes sur prélèvements	128
2.3. Exemples de mesures nucléaires utilisées dans le procédé de retraitement ..	128
3. Les différents contrôles	130
4. Les méthodes analytiques	130

Partie V Transports nucléaires, déchets et effluents du cycle, recyclage

Chapitre 14 : Transports nucléaires

1. Les transports du cycle du combustible	135
2. Les matières radioactives transportées	136
3. La sûreté des transports	137
4. Les colis	139
4.1. La classification des colis	140
4.2. Le colis et les épreuves réglementaires	142

5. Les modes de transport	142
6. La réglementation applicable aux transports	142

Chapitre 15 : Aspects d'ensemble des déchets et effluents du cycle

1. Généralités	145
2. La classification des déchets solides nucléaires en France	146
3. Les types de déchets produits à chaque étape du cycle	147
3.1. Les déchets miniers et les déchets de l'amont du cycle	148
3.2. Les déchets générés par les réacteurs nucléaires	149
3.3. Les déchets de l'aval du cycle	150
4. Quantité de déchets solides produits par l'industrie nucléaire	150
5. Les déchets de démantèlement des INB	151
6. L'ANDRA	152
7. Les effluents liquides et gazeux issus de l'industrie nucléaire en France	153
7.1. Les rejets des centrales nucléaires	154
7.2. Les effluents générés par les étapes du cycle	155
7.3. L'impact dosimétrique des rejets de l'industrie nucléaire	156

Chapitre 16 : Conditionnement des déchets de retraitement

1. Les déchets de procédé (issus du combustible usé)	159
2. Les déchets technologiques (maintenance et interventions)	163
2.1. Les déchets dus aux interventions et à la maintenance	164
2.2. Les résines échangeuses d'ions	164
2.3. Les résidus de solvant	164
2.4. Les déchets solides issus du traitement chimique des effluents	164
3. Quelles matrices de conditionnement ?	165
4. Comment réduire les volumes de déchets du retraitement ?	167

Chapitre 17 : Recyclage de l'uranium et du plutonium

1. Les données du recyclage	169
1.1. La composition isotopique des matières recyclables	169
1.2. Comment recycler ?	170
2. Les conditions du recyclage dans les réacteurs à eau	171
2.1. La neutronique du recyclage du plutonium	171
2.2. La stratégie du recyclage du plutonium	171
2.3. Le problème de l'uranium	172
3. Le recyclage du plutonium avec le combustible MOX	172
3.1. Les caractéristiques et le comportement du MOX	172
3.2. La fabrication du MOX	174
3.3. Le bilan du recyclage MOX	174
4. Le recyclage en France	175
4.1. L'aspect politique	175
4.2. Les aspects industriels	176

Partie VI Devenir des déchets ultimes

Chapitre 18 : Stockage définitif et entreposage

1. Le stockage des déchets de faible activité	181
2. L'entreposage des déchets de haute activité	185
2.1. Les besoins français d'entreposage	185
2.2. Les critères de conception des entreposages de déchets B et C	185
2.3. Exemples d'entreposage de déchets B et C	186

Chapitre 19 : Risque à très long terme des déchets de haute activité

1. Les spécificités du risque des déchets nucléaires	189
2. Le plan scientifique	190
2.1. La loi de décroissance radioactive	190
2.2. Activité et nocivité des radioéléments de longue vie	193
2.3. Les facteurs fondamentaux du risque	195
2.4. Les solutions techniques	195
2.5. La radioprotection à très long terme	198
3. Le plan économique	199
4. Le plan « sociétal »	199

Chapitre 20 : Le stockage géologique multibarrière, solution de référence

1. Pourquoi le stockage géologique des déchets nucléaires de longue vie ?	201
2. Le concept du stockage géologique à barrières multiples	201
3. L'avancement des projets de stockage géologique dans le monde et en Europe ..	203
4. Étude phénoménologique, recherches, analogues naturels	204
5. Les modélisations de performance des stockages géologiques	206

Chapitre 21 : Voies de recherche en France (loi de 1991)

1. Introduction : pourquoi une loi de recherche ?	209
2. Les axes de recherche fixés par la loi	210
3. Les programmes de recherche de l'axe 1 : Séparation-Transmutation	212
3.1. Les objectifs	212
3.2. Les études de séparation	213
3.3. Les études de transmutation	214
4. Les programmes de recherche de l'axe 2 : Stockage en formation géologique profonde	215
5. Les programmes de recherche de l'axe 3 : Conditionnement et entreposage de longue durée	217
5.1. La structure des programmes	217
5.2. Le traitement et le conditionnement des déchets	218
5.3. Le comportement à long terme des colis	218
5.4. La caractérisation des colis	219
5.5. L'entreposage de longue durée en surface ou en subsurface	220
6. Le rendez-vous de 2006	220

Le cycle du combustible nucléaire

COORDINATEUR : **LOUIS PATARIN**

Avec la collaboration de Pascal Baron,
Philippe Fournier, Dominique Ochem

L'industrie de l'énergie nucléaire comporte deux branches, celle des réacteurs (construction et exploitation) et celle du combustible nucléaire. Cet ouvrage, destiné aux futurs ingénieurs nucléaires, traite les différents aspects des opérations industrielles liées au combustible, avant et après son passage en réacteur. Cet enchaînement d'opérations est appelé « **cycle** », qu'il comporte ou non le recyclage de la matière nucléaire.

La science de base du **cycle du combustible** nucléaire est la chimie. On trouvera ici un rappel des notions élémentaires indispensables à la compréhension des phénomènes, pour le traitement du minerai, l'enrichissement isotopique, la fabrication des pastilles et des crayons (partie amont du cycle), l'extraction des matières recyclables que sont l'uranium résiduel et le plutonium, et le conditionnement des déchets (partie aval du cycle après le passage en réacteur).

Les centrales nucléaires produisent près de 80 % de l'électricité française et le groupe industriel du cycle COGEMA réalise 40 % de son chiffre d'affaires à l'exportation. C'est pourquoi ce livre contient également des repères économiques et géopolitiques afin de positionner clairement les enjeux. La dernière partie, consacrée à la gestion des déchets, couvre les solutions actuellement opérationnelles ainsi que les axes de recherche développés, dont le stockage géologique.



Ce livre fait partie de la collection d'ouvrages supports au **Cours de Génie Atomique** enseigné à L'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (**INSTN**).

Cette spécialisation en « **Nuclear Engineering** » constitue un enseignement pluridisciplinaire qui permet aux étudiants d'acquérir une vision globale et approfondie des sciences et techniques mises en œuvre dans chaque phase de vie des installations électronucléaires et du cycle du combustible, depuis leur conception et leur construction jusqu'à leur exploitation puis leur démantèlement. Ces ouvrages constitueront également des outils indispensables aux ingénieurs et techniciens de ce secteur industriel.



www.edpsciences.org ISBN : 2-86883-620-8



EDP
SCIENCES

The logo for EDP Sciences, featuring a stylized 'S' symbol above the text 'EDP SCIENCES'.