

# 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 <sub>6</sub> .....	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 .....	56
6. Les procédés par laser .....	57
6.1. Principe .....	57
6.2. Développement .....	58

## **Partie III Combustible neuf et utilisé : 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 utilisé .....	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 usé 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 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 <sub>2</sub> 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