

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

Extrait de la publication


EDP
SCIENCES

Le cycle du combustible nucléaire

Louis Patarin

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



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Illustration de couverture : Minéral d'autunite, phosphate d'uranium et calcium, forme fréquente dans les gisements français – document COGEMA –

ISBN : 2-86883-620-8

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2002

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	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 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

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

Partie I

Introduction et chimie de l'uranium

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

1

Cycle ouvert ou fermé ? Les outils industriels

1. Les données fondamentales

Un combustible est par définition un corps se combinant avec l'oxygène, en dégageant de la chaleur grâce à une réaction chimique qui mobilise seulement les électrons périphériques des éléments se combinant. Par extension, on a appelé combustible nucléaire une matière qui produit aussi de la chaleur par transformation des *noyaux des atomes*, en pratique par fission d'atomes lourds, ceux de l'uranium, du plutonium, éventuellement ceux du thorium.

Les processus physiques sont donc très différents pour les deux types de combustible. Les conditions de production continue de chaleur pour une application industrielle sont beaucoup plus difficiles à réaliser avec le combustible nucléaire. Les impératifs de contrôle des neutrons dans la réaction en chaîne entretenue font du *combustible nucléaire un produit hautement technique*. Sa matière première doit suivre une série d'opérations qui s'achèvent par les procédés de haute technologie de la séparation isotopique ou du recyclage, et sa fabrication demande une haute précision pour obtenir les caractéristiques spécifiées de composition, structure et confinement.

On appelle « **cycle** » l'ensemble des étapes industrielles qu'il faut suivre pour assurer les services du combustible nucléaire. Celles-ci constituent une chaîne qui ne s'arrête pas à la fourniture du combustible neuf. En effet ce cycle est marqué par quatre données fondamentales du combustible nucléaire :

La *densité d'énergie* est extraordinaire, des millions de fois supérieure à celle d'un combustible chimique.

L'énergie de fission immédiate s'accompagne d'une intense *énergie résiduelle*, qui ensuite va se manifester longtemps sous forme radioactive et secondairement thermique (la chaleur n'est qu'une manifestation de la radioactivité).

La fission nucléaire produit toujours une certaine *régénération* de la matière « fissile », à partir de la matière « fertile » associée dans le combustible (voir le rappel des propriétés nucléaires de l'uranium au chapitre 2).

La fin de combustion ne correspond pas à l'épuisement du potentiel énergétique de la matière nucléaire chargée ; elle est imposée par les impératifs de la neutronique et ceux du confinement. L'évolution des atomes lourds et l'accumulation progressive des produits de fission neutrophages, plus l'endommagement conjoint par irradiation du confinement proche (le « gainage ») fixent les *limites d'usage* du combustible (Figure 1.1).

① CHIMIE - Combustion			
$H_2 + O$	\rightarrow	H_2O	1,4 eV/atome H
$C + O_2$	\rightarrow	CO_2	4 eV/atome C
② NUCLEAIRE			
<u>Rayonnement</u>	α	4 à 8	MeV/atome
	β	jusqu'à 3	MeV/atome
	γ	jusqu'à 2	MeV/atome
<u>Radioactivité U et descendants</u>			
U^{238}	\rightarrow	P^{206}	8 α, 6 β \equiv 50 MeV/atome U
<u>Fission U</u>			\equiv 200 MeV/atome U
<u>Fusion isotopes H</u>	D + T		8,5 MeV/atome

Figure 1.1. Énergie des liaisons chimiques et des phénomènes nucléaires.

Ainsi à toutes les étapes de son cycle industriel, le combustible nucléaire se caractérise par une *masse manipulée extrêmement petite*, c'est une caractéristique clé.

Pour alimenter en combustible une centrale électrique de 1 000 MWe pendant un an, pour une production d'environ 8 TWh, il faut :

- avec le pétrole 2 millions de tonnes ;
- avec le charbon 3 millions de tonnes ;
- avec le nucléaire 200 tonnes d'uranium naturel, devenant 25 tonnes d'uranium enrichi, dont seulement 1 tonne est effectivement fissionnée.

Pour mémoire une centrale électrique de 1 000 MWe fournit l'électricité nécessaire à une ville d'environ 1 million d'habitants.

Quand la limite d'usage est atteinte, il demeure une matière durablement chaude et très radioactive, qui nécessite un refroidissement et un confinement rigoureux, pendant très longtemps. Mais comme seulement quelques % de la masse des noyaux lourds ont été « brûlés », la fin de cycle est confrontée à un problème particulier au nucléaire. *Que peut-on faire du combustible utilisé ?*

- déclarer que le combustible utilisé est un déchet global, et choisir la voie du cycle « ouvert » ou direct ;
- ou bien le traiter pour récupérer et recycler les noyaux lourds restants, et choisir ainsi le cycle « fermé ».

2. Les trois logiques du cycle

Le choix peut être fait suivant trois logiques.

2.1. La logique physique

Quand on retire le combustible des réacteurs, il contient encore des « allumettes » (atomes fissiles naturels de l'uranium 235, et artificiels des isotopes 239 et 241 du plutonium généré), ainsi que beaucoup de « gros bois » peu entamé (atomes fertiles de l'uranium 238).

Le recyclage de ces restes énergétiques est donc physiquement logique (voir Figure 7.3).

2.2. La logique économique

Le coût du recyclage est à comparer au coût de la matière vierge, extraite des mines d'uranium.

À l'origine historique du nucléaire civil, les ressources en uranium étaient très limitées et le recyclage s'imposait. On pensait même que le développement à grande échelle ne pouvait se faire que par conversion maximale de l'uranium 238 en plutonium. C'est ainsi que le premier réacteur électrogène dans le monde (1951) fut un « surgénérateur » à neutrons rapides (EBR1 aux États-Unis).

Aujourd'hui l'uranium naturel est abondant et surtout peu cher, si bien que le non-recyclage est devenu la logique dominante. Mais jusqu'à quand ?

2.3. La logique écologique

Cette troisième logique s'appuie sur le principe général d'économie de la matière première et de l'énergie, en recyclant même à coût supplémentaire et en séparant puis conditionnant les déchets ultimes, ceux qui ne peuvent aucunement être valorisés.

Curieusement la logique écologique n'a pas beaucoup de soutien pour le combustible nucléaire.

3. Une question polémique : le destin des déchets nucléaires

La **radioactivité artificielle** engendrée par les réacteurs nucléaires provient de l'interaction des neutrons, qui y sont multipliés à haut niveau, avec la matière. Cette interaction joue à fond dans le combustible, ce qui est recherché pour y entretenir la réaction en chaîne, et secondairement touche la matière au-delà. Les défauts d'étanchéité du gainage du combustible et la circulation de l'eau primaire de refroidissement entraînent une certaine dispersion des éléments rendus radioactifs. Mais au total, environ 99 % de la radioactivité artificielle de l'industrie nucléaire proviennent du **combustible usé**, et y restent confinés, sauf accident grave, jusqu'à éventuellement son traitement ultérieur ou sa dégradation par vieillissement.

Dans l'option du *cycle ouvert*, le combustible usé constitue la structure globale des déchets. C'est une politique de « tout à la décharge », qui conduit à envisager des stockages à radioactivité maximale.

Les déchets nucléaires véritables, ceux qui n'ont pas de valorisation possible par recyclage, sont tout d'abord les produits de fission et ensuite les noyaux lourds « dégradés », créés par capture « stérile » de neutrons (uranium 236 et transuraniens mineurs). Il s'y ajoute quelques produits d'activation dans les structures métalliques, le caloporteur et les impuretés.

Dans l'option du *cycle fermé*, on vise la séparation des matières recyclables (uranium et plutonium), et en complément le conditionnement spécifique des déchets séparés (par exemple par vitrification des résidus de retraitement ou par compactage des structures métalliques cisailées). C'est une politique de « déchets ultimes ».

Le cycle ouvert tend à rester dans une pure logique économique, et le cycle fermé profite de sa logique physique pour être écologiquement « correct ». Mais aujourd'hui une polémique s'est installée, au-delà des orientations industrielles, car aucune des options de fin de cycle n'a encore mis en application la « solution finale » pour les déchets nucléaires du combustible.

Les autres déchets du nucléaire, bien moins actifs, ont une solution finale par dépôts en surface. Ceci se réalise sur les sites miniers avec les résidus de traitement du minerai, et dans des centres de stockage définitif avec les déchets de faible activité, industriels ou autres.

Quelle pourrait être la « solution finale » des déchets issus du combustible usé ?

Le problème posé est celui du risque lié à la radioactivité à long terme des **radioéléments de longue vie**, ceux qui restent hautement toxiques après des temps longs à l'échelle humaine, plusieurs siècles ou un millénaire. Ce risque d'impact par retour vers la vie, après la ruine des dispositions humaines prises à l'origine, dépend :

- de l'activité des radioéléments restants à long terme, facteur « source » ;
- des voies de leur retour physique et biologique, facteur « transfert ».

Pour protéger durablement la biosphère, on peut agir sur ces deux facteurs séparément ou ensemble. L'idéal c'est de détruire la source, par réirradiation neutronique des déchets de longue vie, solution *transmutation*. Une solution simple, qui paraît satisfaisante, est le confinement robuste dans une roche profonde, stable et isolée des eaux de surface, solution *stockage profond*.

- Le **stockage profond** vise à disposer de stockages définitifs installés en couches géologiques solides et étanches. Présentement la *référence mondiale*, cette solution est l'objet d'importants programmes de recherche. Elle est reconnue comme sûre à très long terme, ne devant avoir qu'un impact nul ou très faible même à des horizons de temps très lointains, et aussi comme faisable à coût réduit, à cause des petits volumes à enfouir. Elle est envisagée pour les deux fins de cycle en compétition (cycle ouvert et cycle fermé).
- La **transmutation**, idée également ancienne, est un concept scientifique dont le développement industriel apparaît incertain. Sa technologie, qui reste à définir dans un contexte de grande complication, et ses coûts ne peuvent être étudiés avant de très importants efforts de recherche. Il est déjà estimé que ses performances pratiques ne seront pas suffisantes pour éliminer tout recours à un dépôt profond. On peut aussi craindre que son aspect de sûreté « active », nécessaire avec la manipulation de très

hautes activités dues aux cycles spéciaux de réirradiation, annule les avantages recherchés en mettant en balance des risques réels à court terme avec des gains limités et hypothétiques à très long terme. On reverra cette question plus en détail avec le chapitre 21, à propos des recherches entreprises en France.

Le destin final des déchets de longue vie du combustible utilisé est aujourd'hui au cœur de la *polémique* sur le nucléaire. L'enfouissement, assiégé par les antinucléaires, est en situation de blocage ou au mieux de progrès à pas comptés et la transmutation, qui fait l'objet d'une relance de la recherche, est loin de convaincre le monde scientifique et industriel de son intérêt.

Heureusement le stockage provisoire, qu'on dénomme **entreposage**, peut être pratiqué sur une durée indéfinie avec le combustible utilisé des réacteurs à eau, puisque sa dégradation par vieillissement est extrêmement lente, dans de bonnes conditions de refroidissement.

4. Les outils industriels

L'irradiation du combustible nucléaire dans les réacteurs change considérablement sa composition et le niveau de sa radioactivité. Ceci fait que l'industrie du cycle est structurée par la transmutation des atomes irradiés : elle est divisée naturellement en deux parties, l'amont du cycle qui prend en charge la matière non irradiée exclusivement faite d'uranium (naturel et enrichi), et l'aval du cycle qui prend le relais en recueillant la matière irradiée, le passage en réacteurs étant à leur frontière (Figure 1.2).

Entre les différents maillons des opérations du cycle, il est nécessaire de disposer de moyens de **transport**, qui sont spéciaux pour ceux qui véhiculent une matière à risque, et qui sont sous contrôle international strict.

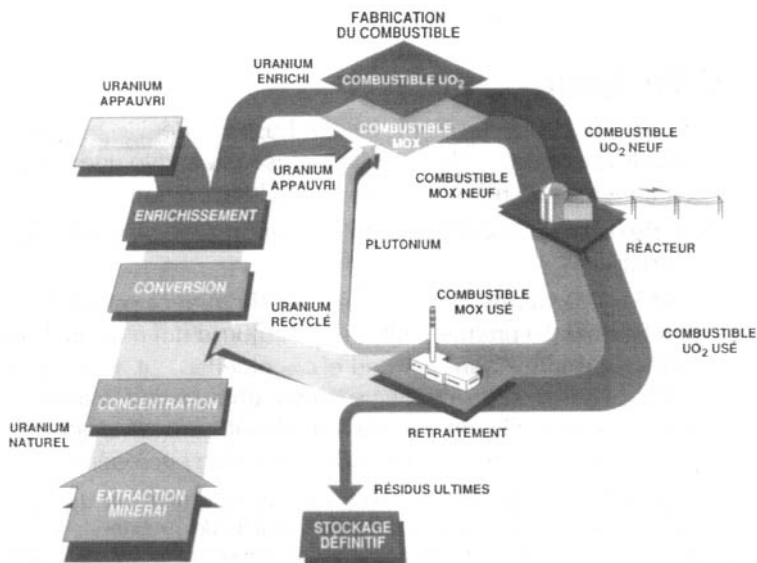


Figure 1.2. Le cycle du combustible nucléaire.

La sortie du cycle que constitue la gestion finale des déchets nucléaires quels qu'ils soient est le fait, dans la majorité des pays nucléaires, d'organismes étatiques n'appartenant pas à l'industrie.

4.1. L'amont du cycle

La matière mise en œuvre pour le combustible neuf, produit final de l'amont, subit plusieurs transformations mais reste à *base exclusive d'uranium 238 et 235, très peu actif*. Il y a deux activités industrielles différentes dans l'amont : la préparation de la matière première, et ensuite la fabrication de l'objet combustible.

La *préparation de la matière première* commence par l'extraction de l'uranium dans les mines, à partir d'un minerai qui peut être valorisable, à cause des faibles quantités requises, jusqu'à de faibles teneurs (quelques pour mille). Après traitement du minerai, près des mines, il est procédé à une concentration par voie chimique qui aboutit à un produit marchand, dit « yellow cake », à 60-70 % d'uranium.

Une seconde étape de préparation est engagée dans de grandes usines traitant des tonnages importants d'uranium (plusieurs milliers de tonnes par an), pour faire d'une part une *conversion chimique des concentrés (uranates et oxydes) vers l'hexafluorure d'uranium*, avec une haute performance de purification, et d'autre part un *enrichissement* en uranium fissile 235, à la teneur requise par les réacteurs à eau, qui orientent largement la demande en uranium (la teneur doit passer de 0,7 à 3,5 ou 4 %, voire plus dans l'avenir jusqu'à 5 %). L'uranium appauvri est sorti du cycle et entreposé.

La *fabrication* termine l'amont industriel. Elle se fait dans des usines façonnant moins de 1 000 tonnes d'uranium enrichi par an. C'est alors une industrie manufacturière de précision, qui produit la céramique oxyde UO_2 et assemble les différents composants dans une structure que l'on appelle « **assemblage combustible** ». Il s'y ajoute la fabrication des « grappes » servant au contrôle neutronique.

4.2. L'aval du cycle

L'industrie de cette partie du cycle reçoit le combustible déchargé des réacteurs. La matière nucléaire est devenue des millions de fois plus radioactive que l'uranium naturel, même après un certain temps de refroidissement dans les piscines.

L'objectif de l'industrie de l'aval, c'est la *gestion du combustible usé*, selon l'une ou l'autre des deux options disponibles.

Dans le *cycle ouvert* les opérations industrielles sont simplifiées puisque le combustible usé est déclaré déchet global. La première phase, qui aujourd'hui n'a pas de durée définie, est l'entreposage, avec refroidissement par eau et éventuellement avec refroidissement à sec en relais après décroissance suffisante. La seconde phase serait la mise en conteneurs robustes des assemblages refroidis, en vue de leur dépôt dans un stockage géologique. Mais il n'y a pas présentement de réalisation industrielle de cette opération.

L'Allemagne a construit à Gorleben (Basse Saxe), à grands frais, un pilote de mise en conteneurs d'assemblages irradiés entiers ou sectionnés, dit PKA (capacité de 30 tonnes par an). Les difficultés actuelles du nucléaire dans ce pays n'ont pas permis de lui donner l'autorisation d'exploitation.

La Suède et les États-Unis ont étudié des projets d'atelier et ont mené des essais de fabrication de conteneurs de haute intégrité.

Dans l'option du *cycle fermé* toutes les opérations industrielles ont été déployées, dans deux pays qui ont une grande expérience du retraitement, la France et le Royaume-Uni.

nationaux). Elle a en outre établi un rendez-vous pour le Parlement, 15 ans après sa publication donc en 2006, en vue de prendre de nouvelles décisions politiques en fonction des résultats des recherches.

Il y a donc une obligation pour les chercheurs à remettre à temps leurs résultats, avec des éléments aussi clairs que possible.

Il est déjà prévisible que les trois axes ne donneront pas un choix de solutions alternatives, mais ouvriront une flexibilité grâce à des solutions complémentaires.

Cette flexibilité sera utile à la fois pour la gestion des déchets du passé, celle des déchets du parc actuel de centrales et des usines du cycle, et enfin pour la stratégie du futur de l'énergie nucléaire.

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.