

La gestion des déchets de l'énergie nucléaire

par P.J. West

Le premier objectif de la gestion des déchets est la protection de l'homme et de l'environnement. Lorsqu'on parle de gestion des déchets dans le domaine de l'énergie nucléaire, il faut tenir compte des déchets produits au cours de toutes les phases du cycle du combustible nucléaire.

Le cycle du combustible nucléaire comprend les activités physiques et chimiques nécessaires pour fabriquer le combustible utilisé dans le réacteur, l'exploitation du réacteur pour produire de l'électricité et le traitement chimique du combustible irradié pour récupérer les matières réutilisables. Les stades principaux en sont les suivants:

- 1) Prospection, extraction et purification des matières fissiles et fertiles;
- 2) Transformation chimique de ces matières pour l'enrichissement;
- 3) Préparation des mélanges nécessaires de matières fissiles et fertiles par ajustement isotopique ou mélange physique;
- 4) Elaboration physique du mélange pour obtenir la forme et le confinement nécessaires au fonctionnement d'un réacteur;
- 5) Exploitation du réacteur pour la production d'électricité;
- 6) Séparation et purification en vue de leur réutilisation des matières fertiles et fissiles produits ou restant dans le combustible irradié.

Le cycle du combustible n'est pas le même pour toutes les filières de réacteurs. Ainsi, certains réacteurs modérés à l'eau lourde fonctionnent à l'uranium naturel, sans enrichissement isotopique, récupération ou recyclage du combustible sortant du réacteur. Certains réacteurs refroidis à l'eau peuvent utiliser tant du plutonium que de l'uranium 235 comme matière fissile pour les rechargements. Les réacteurs à neutrons rapides utilisent comme matière fissile du plutonium 239 ainsi que de l'uranium 235 ou de l'uranium 233. Les déchets de la réaction de fission étant cependant les mêmes quelle que soit la matière fissile, au stade du retraitement du combustible, les problèmes de gestion des déchets sont semblables. La filière la plus utilisée actuellement dans le monde est le réacteur à uranium légèrement enrichi refroidi à l'eau.

La figure 1 illustre le cycle du combustible nucléaire. La première opération consiste à extraire les minerais d'uranium des gisements souterrains ou à ciel ouvert par des méthodes semblables à celles qui sont utilisées pour de nombreux autres minerais métallifères. Les minerais d'uranium sont généralement à faible concentration; aux Etats-Unis, la teneur moyenne en uranium des minerais est d'environ 0,25%. Pour réduire les coûts de transport, les usines de concentration de l'uranium sont généralement construites à proximité des mines. Dans ces usines, les minerais sont concassés et broyés, l'uranium est extrait par lixiviation acide et ensuite généralement converti en oxyde (U_3O_8); le reste du minerai forme des déchets, ordinairement appelés résidus stériles.

RESIDUS STERILES

Le poids de l'uranium extrait du minerai étant relativement faible, la radioactivité des résidus est presque la même que celle du minerai. La production de l'uranium nécessaire pour alimenter une centrale nucléoélectrique (réacteur à eau légère) de 1000 MW(e)

laisse annuellement 91 000 tonnes de résidus. La teneur en radium 226, descendant le plus important du fait de sa longue période et de sa haute radiotoxicité spécifique, s'élève aux Etats-Unis en moyenne à 800 picocuries par gramme de minerai d'uranium. En poids, cette activité représente moins d'une partie par milliard. Les minerais ayant été réduits à l'état de sable assez fin au cours des opérations d'extraction, les monticules de résidus se prêtent à l'érosion éolienne. La concentration de la radioactivité étant toutefois très faible, la nuisance d'une telle érosion consiste essentiellement en production de poussière. L'objectif principal de la gestion des déchets est dans ce cas de minimiser cette nuisance. Les usines d'uranium sont fréquemment implantées dans des régions à très faible pluviosité et il est nécessaire d'arroser leurs terrils pour contenir les poussières. On aménage des talus pour empêcher les ruissellements d'atteindre les cours d'eaux avoisinants et protéger les terrils des inondations éventuelles. Aux alentours de certaines usines désaffectées, il a été possible de consolider les terrils, de les couvrir de terreau et d'y faire pousser une végétation dont on n'a plus besoin de s'occuper. En conditions stabilisées, les matières radioactives des résidus, à part peut-être le radon, se trouvent par rapport à l'environnement dans la même situation que les minerais au voisinage de la surface, non extraits.

Le radon est le premier descendant du radium 226 qui, nous l'avons vu, est le radionucléide qui doit le plus retenir l'attention. Etant un gaz, le radon peut se dégager des matières contenant du radium. Le radon de certains terrils caractéristiques, nus ou couverts de terre, est indetectable dans le radon ambiant naturel au-delà d'une centaine de mètres. On admet cependant que, en raison d'émanations de radon, les résidus de l'extraction d'uranium ne devraient pas être utilisés comme matériaux de construction ou de remplissage pour les bâtiments à l'usage de l'homme, pas plus que de tels bâtiments devraient être construits sur des sols contenant de tels résidus. La conséquence en est que la surveillance de ces résidus devra s'exercer pendant des milliers d'années.

Au stade suivant du cycle du combustible, les concentrés sont expédiés à une raffinerie, où l'uranium est extrait avec un solvant organique et transformé par chauffage en trioxyde d'uranium (UO_3) pratiquement pur. La teneur isotopique de cet oxyde est de 0,7% en uranium 235 et de 99,3% en uranium 238. De nombreux réacteurs ne pouvant fonctionner qu'avec un combustible à plus haute teneur en uranium 235, l'enrichissement isotopique constitue le stade suivant du cycle du combustible.

ENRICHISSEMENT

Le procédé d'enrichissement généralement employé est la diffusion gazeuse, qui utilise de l'hexafluorure d'uranium (UF_6) obtenu par attaque fluoro-fluorhydrique du trioxyde d'uranium. L'hexafluorure d'uranium, solide à la température ambiante, est transformé en gaz par chauffage et envoyé sur des barrières poreuses où la diffusion légèrement plus rapide de l'uranium 235 (grâce à son moindre poids atomique) permet d'obtenir une fraction enrichie en cet isotope. L'uranium résiduel, symétriquement appauvri en uranium 235, n'est pas considéré actuellement comme un déchet et est stocké à l'usine de diffusion en vue de son utilisation éventuelle. Les usines d'enrichissement ont à résoudre presque uniquement des problèmes de gestion de déchets chimiques non radioactifs. Les grandes précautions prises pour réduire les pertes d'uranium au cours de l'enrichissement par diffusion gazeuse permettent aussi de maintenir au minimum les déchets non radioactifs de l'opération. Les principaux contaminants gazeux (ou aérosols) proviennent des chaudières à combustible fossile utilisées pour fournir les thermies nécessaires au processus. Les effluents liquides contiennent de l'ammoniaque, des chlorures, des fluorures et des nitrates produits par les opérations d'épuration et autres.

La concentration des impuretés dans l'effluent liquide est très faible. Les déchets non radioactifs produits par une usine typique de conversion de UF_6 , par voie sèche ou par voie humide, et par un complexe d'enrichissement de l'uranium sont indiqués respectivement aux tableaux 1 et 2. Il est difficile de prévoir quelle sera la production de déchets radioactifs dans les installations d'enrichissement de l'uranium et de fabrication de combustible. Les quantités de combustible fabriquées seront certes fonction de la capacité de production nucléaire, mais plusieurs autres facteurs influenceront aussi sur le taux de production de déchets radioactifs, dans une mesure telle qu'il n'est pas possible d'établir une relation entre les quantités de déchets et de combustibles.

Ces facteurs comprennent l'amélioration de la technologie de fabrication du combustible et des opérations d'enrichissement de l'uranium. Avec le recyclage probable du plutonium dans le combustible pour réacteurs à eau légère, c'est le plutonium 239 qui deviendra le principal contaminant à surveiller, vu sa haute toxicité et sa période exceptionnellement longue (24 000 ans), dans les déchets des usines de fabrication de combustible.

TABLEAU 1. Usines de conversion de UF_6 – Effluents non radioactifs (tonnes par an) pour 5000 tonnes d'uranium par an.

Constituant	Voie sèche Fluorure	Processus	Voie humide	Processus
Gaz et aérosol	Processus	Combustion de Combustible ¹	Processus	Combustion ou Combustible ¹
SO_x		0,1	18	0,4
NO_x		25,0	60	75,0
Hydrocarbures		5,0		15,1
Fluore et fluorure	1,2		1,2	
<u>Liquide</u>				
Sulfate	225		22,5	
Nitrate			6	
Fluorure	481		5	
Cl^-	9		3,3	
Na^+	52		6,7	
NH_3	86		-	
Fe	2		0,5	
K	127		-	
<u>Solides</u>				
Fluorure (en CaF_2)	250 ²⁾		400	

¹⁾ Combustion de gaz naturel pour produire la chaleur nécessaire au processus.

²⁾ CaF_2 , couche inférieure.

TABLEAU 2. Complexe d'enrichissement isotopique – Effluents non radioactifs (en tonnes par an) pour 10 500 tonnes UTS par an.

Constituant	Quantité tonnes par an	Concentration mg/l
<u>Gaz et aérosol</u>		
SO _x	740	
NO _x	1390	
Fluorures	45	
<u>Liquide</u>		
Ammoniaque	16	1,0
Chlorures	150	9,0
Fluorures	16	1,0
Fer	36	2,0
Nitrates	240	15,0

La radioactivité induite par capture neutronique dans les réacteurs de puissance constitue la source principale de déchets radioactifs qu'il faut éliminer sur place. Quant aux quantités beaucoup plus grandes de déchets radioactifs produites dans les éléments combustibles du réacteur, le problème est du ressort de l'usine de retraitement du combustible.

Les matériaux structurels utilisés dans le réacteur et les composants qui en extraient la chaleur subissent à la longue une corrosion et une érosion très légère, mais suffisantes pour engendrer des particules appelées globalement produits de corrosion. Les produits de corrosion circulent, avec d'autres impuretés du caloporteur, dans le cœur du réacteur où ils sont radioactivés par capture de neutrons. Les quantités de matières radioactives ainsi formées sont faibles, comparées aux produits de fission, et consistent généralement en radioisotopes d'éléments tels que le fer, le cobalt et le manganèse. La commande du processus de fission utilise du bore dans le cœur et dans le caloporteur primaire de certains réacteurs. Or, le bore absorbe des neutrons pour donner du tritium, radioisotope de l'hydrogène. Il y a aussi formation de tritium lorsqu'on utilise de l'eau comme caloporteur, par transmutation du deutérium, isotope naturel de l'hydrogène – présent dans l'eau. Dans les réacteurs refroidis au gaz carbonique, les produits d'activation comprennent du carbone 14 et de l'argon 41.

EFFLUENTS

Les déchets radioactifs, sous-produits du processus de fission, sont fondamentalement du même type pour tous les réacteurs à l'uranium; en revanche, les caractéristiques des effluents des centrales nucléoélectriques peuvent varier considérablement selon le caloporteur du réacteur ou les cycles de vapeur utilisés. Les radioisotopes présents dans les effluents influent sur le choix des systèmes de traitement des déchets. L'objectif que l'on se fixe

lors de l'étude d'une installation est de traiter et de recycler les flux de déchets de façon à réduire autant que possible le volume et la radioactivité des effluents. Les rejets dans l'environnement sont contrôlés au moyen d'un traitement global des effluents et de la mesure de leur radioactivité avant évacuation, garantissant ainsi qu'aucun rejet n'excède les limites maximales admissibles.

Pour réduire les niveaux de radioactivité, on applique dans les systèmes de gestion des déchets liquides quatre méthodes fondamentales de traitement: retard et décroissance; filtration; évaporation; échange d'ions.

La méthode «retard — décroissance» consiste à stocker les déchets suffisamment longtemps pour obtenir une certaine décroissance radioactive. Elle est surtout intéressante en ce qui concerne les radioisotopes de courte période. Les méthodes de gestion utilisées pour les déchets gazeux sont le retard et la décroissance, la filtration et l'adsorption à basse température sur charbon actif. L'efficacité du retard — décroissance dans la réduction des niveaux d'activité des déchets gazeux dépend des isotopes en présence. Pour finir, les gaz sont filtrés et rejetés dans l'atmosphère, par des cheminées. Les filtres retiennent les particules radioactives qui se forment lorsqu'un corps radioactif gazeux se fixe sur des poussières ou bien donne par décroissance un descendant radioactif solide, ou encore lorsque des poussières sont entraînées par le courant d'air à travers le cœur du réacteur. Pour retenir l'iode, on peut utiliser des filtres au charbon actif spécialement traité. Parmi les déchets solides, on peut compter les composants de réacteur nucléaire radioactivés par capture neutronique, les filtres à poussière à haut rendement des circuits de ventilation, les précipités, les boues, les résines échangeuses d'ions contenant des matières radioactives extraites des effluents liquides, ainsi que les vêtements de protection et autres articles utilisés aux fins de la radioprotection (sécurité et contrôle). En règle générale, les problèmes de gestion des déchets que pose l'exploitation d'un réacteur sont relativement peu graves comparés à ceux des usines de retraitement du combustible nucléaire. Il faut néanmoins tenir compte d'un autre type de déchet qui peut en raison de ses incidences possibles sur l'environnement susciter l'inquiétude: la chaleur résiduelle.

CHALEUR RESIDUELLE

Aucun procédé de transformation de la chaleur en électricité n'utilise toute la chaleur disponible. Les turbines à vapeur modernes, utilisant du combustible fossile et de la vapeur à hautes pressions et températures, atteignent des rendements thermiques égaux ou supérieurs à 40%; une partie de l'excédent de chaleur est rejetée dans l'atmosphère avec les effluents gazeux. Dans les centrales nucléaires pratiquement la totalité de la chaleur en excès est transférée à l'eau de refroidissement. Il s'ensuit qu'une centrale nucléoélectrique où le circuit d'eau de refroidissement est à passe unique évacuera dans les eaux réceptrices une chaleur résiduelle d'environ 50% supérieure à celle d'une centrale à combustible fossile produisant la même quantité d'électricité. On prévoit toutefois que les futurs réacteurs du type avancé, refroidis au gaz ou avec un métal liquide, auront de meilleurs rendements thermiques.

Il est certain que l'évacuation de la chaleur résiduelle dans les eaux de surface peut modifier l'environnement aquatique. En plus des effets thermiques proprement dits sur les eaux réceptrices, il peut y avoir danger pour la chaîne alimentaire en raison du choc mécanique et thermique subi par la flore et la faune aquatiques du fait du passage de l'eau de refroidissement dans le circuit de condensation, entraînant un déséquilibre de l'écologie aquatique. La connaissance de la biologie des eaux réceptrices et l'emploi d'une technologie qui réduise les effets de la chaleur évacuée peuvent mettre les centrales nucléoélectriques en mesure de respecter les normes souhaitées pour la qualité de l'eau. Si l'eau n'est pas assez



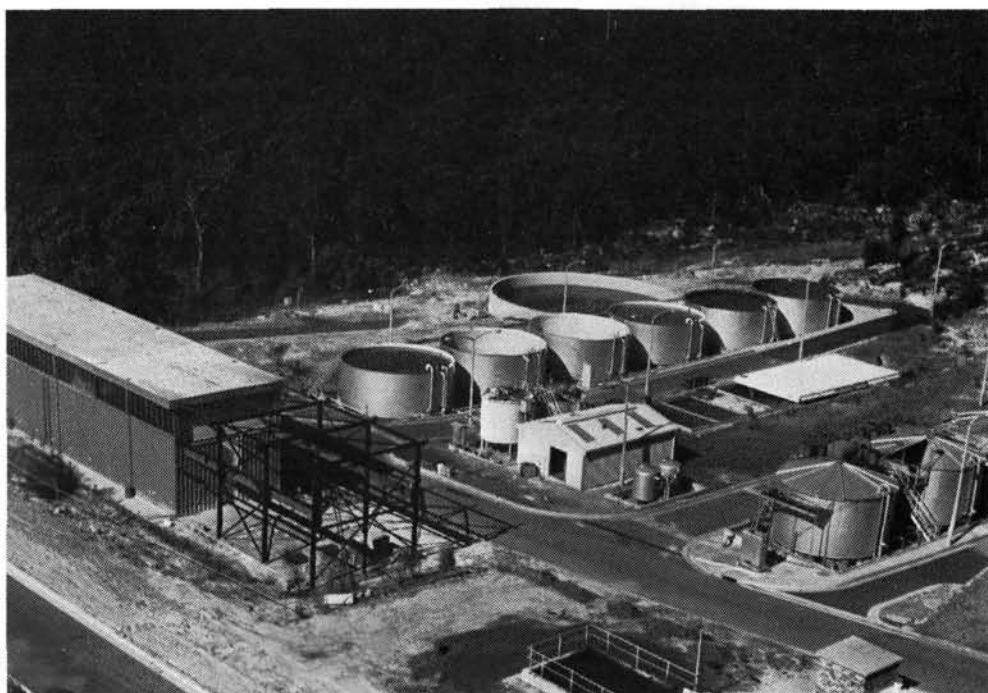
Sortie de camions de la mine de sel désaffectée Asse 11, en Allemagne du Nord, que la République fédérale utilise pour le stockage souterrain des déchets de faible ou moyenne radioactivité.

abondante pour permettre l'application de ces normes dans le cas d'un système de refroidissement à passe unique, il faut alors prévoir d'autres dispositifs, tels que des tours et des bassins de refroidissement pour recycler l'eau de refroidissement et ramener ainsi la pollution thermique à des niveaux admissibles. Malheureusement, les grandes tours de refroidissement — outre leur aspect inesthétique — modifient aussi l'environnement en occasionnant la formation de brouillards au niveau du sol, des nuages et des précipitations, des ombres et des effets synergiques par le mélange de leur panache avec les effluents de cheminées industrielles contenant des oxydes, du soufre et de l'azote.

RETRAITEMENT DU COMBUSTIBLE

La dernière phase du cycle du combustible nucléaire, le retraitement du combustible irradié, pose le problème de la gestion de plus de 99% de tous les déchets radioactifs de la production d'énergie nucléoélectrique.

Les produits de fission obtenus dans les éléments combustibles du réacteur finissent par absorber une telle quantité de neutrons que le processus de fission est perturbé. Les éléments combustibles sont donc extraits du réacteur bien avant que tout le combustible utilisable n'ait été brûlé et sont envoyés dans des usines de retraitement. Le principal objectif du retraitement est de récupérer, dans les meilleures conditions d'efficacité et de sécurité, le plutonium (produit dans le réacteur) et de purifier suffisamment l'uranium résiduel pour qu'il puisse être réutilisé dans le cycle du combustible.



Usine de traitement des déchets de faible activité construite près du centre de recherches nucléaires de Lucas Heights de la Commission australienne de l'énergie atomique. Photo: AAEC.

Dans l'étude des problèmes de gestion de déchets liés au retraitement du combustible, il sera bon de récapituler les types principaux d'opérations afin de bien voir l'origine des diverses catégories de déchets:

- 1) Opérations de démontage, parfois nécessaires pour extraire par télémanipulation les parties externes des assemblages combustibles irradiés, avant d'entreprendre le retraitement lui-même. Ces opérations entraînent une accumulation de déchets métalliques, généralement rendus radioactifs par activation neutronique dans le réacteur.
- 2) Le dégainage de certains combustibles, notamment des combustibles à l'uranium, effectué par dissolution chimique des gaines ou par des procédés mécaniques. La dissolution produit un effluent liquide alors que le procédé mécanique donne des déchets solides métalliques. Dans l'un et l'autre des cas, l'activité des gaines, principalement due à la diffusion des produits de fission du combustible et à l'activation neutronique, donne des déchets radioactifs.
- 3) D'autres combustibles, notamment les combustibles à l'oxyde d'uranium, sont cisailés en courts tronçons qui tombent dans la cuve à dissolution. Cette opération peut dégager de faibles quantités d'effluents gazeux, dont des gaz nobles radioactifs produits de fission.
- 4) Les combustibles métalliques, après dégainage, et les combustibles d'oxydes, après cisaillement, sont généralement dissous dans un acide aqueux en ébullition. Il y a dans ce cas production d'effluents gazeux contenant des produits de fission radioactifs tels que les gaz nobles krypton et xénon ainsi que de l'iode. Parfois combustible et gaine sont

totalelement dissous, mais le plus souvent l'oxyde d'uranium irradié est seul dissous, laissant un résidu de coquilles métalliques vides, évacuées comme déchets radioactifs solides.

5) Le traitement chimique fait appel à une série d'extractions par solvant et parfois de traitements aux échangeurs d'ions, entrecoupés de phases de conditionnement chimique. A la sortie, la masse des produits de fission est séparée de l'uranium et du plutonium dans une solution fortement radioactive, qu'il faut stocker sous une forme ou sous une autre après traitement et concentration. Les divers stades du processus de récupération des deux produits principaux — l'uranium et le plutonium — donnent des effluents liquides contenant des traces non extraites de produits de fission et d'uranium et de plutonium. Ces opérations laissent aussi certains déchets liquides modérément radioactifs, tels que les résines échangeuses d'ions, les filtres usés, etc.

Après avoir indiqué sommairement l'origine et le type des déchets radioactifs produits par le retraitement du combustible, il convient de dire quelques mots de l'influence sur l'environnement des déchets non radioactifs. Le tableau 3 montre des déchets non radioactifs typiques produits par une installation de retraitement, sur la base d'un débit de 900 tonnes par an d'uranium.

TABLEAU 3. Usine de retraitement du combustible — Effluents non radioactifs (tonnes par an).	
Constituant	Tonnes par an
<u>Gazeux ou aérosol</u>	
SO _x	160
NO _x	185
Hydrocarbures	0,5
Fluorures	28
<u>Liquide</u>	
Na ⁺	137
Cl ⁻	6,3
SO ₄ ⁼	11,3
NO ₃	21,6

SOLIDES, LIQUIDES ET GAZ

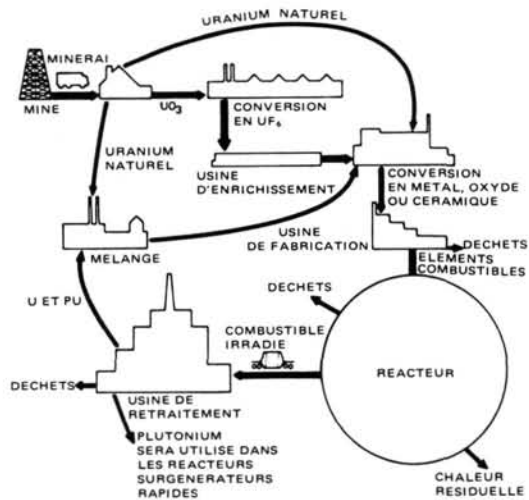
La gestion et le contrôle des déchets radioactifs sont examinés sous trois rubriques: solides, liquides et gaz.

Les déchets solides sont principalement constitués par les chutes métalliques, les débris de gaines et les tronçons de gaines de combustible lixivié. Ces déchets sont généralement trop radioactifs pour une simple élimination par enfouissement, bien que cette méthode ait été adoptée pour certains sites où l'on a pu établir l'existence de strates géologiques suffisamment imperméables. Le plus souvent ces déchets solides sont stockés sur place, dans des silos en béton, conçus et utilisés d'une façon telle que soit ménagée la possibilité d'une évacuation définitive, après une très longue décroissance. D'autres déchets solides sont contrôlés et ensuite séparés en catégories appropriées, comme combustible et

non combustible, activité faible et activité moyenne. Les techniques d'évacuation de ces déchets peuvent varier d'un pays à l'autre. Pour les déchets de faible activité, on a utilisé l'enfouissement sur le site, dans des tranchées larges; on limite dans ces cas l'activité de longue période afin de se réserver la possibilité d'une évacuation définitive. On veille à la constante sécurité de cette méthode en contrôlant régulièrement la radioactivité de l'eau drainée des sites. Une autre méthode d'évacuation des déchets solides de faible activité, utilisée dans certains pays, est le rejet en mer dans des conditions soigneusement contrôlées; les déchets sont placés dans des fûts, qui sont noyés dans du béton et immergés dans des endroits choisis des océans, à des profondeurs supérieures à 2700 mètres. De telles immersions ont souvent été effectuées dans le cadre d'opérations internationales coordonnées. Dans d'autres sites, on a préféré incinérer les déchets combustibles, en veillant particulièrement à purifier des produits de combustion gazeux par des techniques spéciales d'épuration et de filtrage. Les cendres résiduelles peuvent soit être soumises à un traitement de récupération chimique ou stockées à bon compte, étant donné leur faible volume. Les déchets solides d'activité moyenne sont généralement stockés à longue échéance, afin de permettre la décroissance de leur activité.

Les déchets gazeux du retraitement proviennent généralement du cisaillement du combustible d'oxyde, de la dissolution du combustible et de l'air de ventilation d'installations telles que les cuves de stockage de liquides très radioactifs. Ces déchets peuvent comprendre des poussières et des aérosols ainsi que l'iode 131, l'iode 129 et des gaz nobles radioactifs comme le krypton 85. Le combustible est toujours stocké suffisamment longtemps avant le retraitement pour que le plus gros de l'iode 131 (période 8 jours) puisse décroître, aussi ce radionucléide ne pose-t-il que rarement de vrais problèmes; on utilise des filtres absorbants de construction spéciale pour retenir le reste de radioiode. La radioactivité entraînée ou sous forme de poussière est maintenue à un faible niveau au moyen de matériels spéciaux d'épuration des gaz, comprenant des épurateurs et des filtres. Le rejet dans l'environnement se fait finalement au moyen de hautes cheminées munies de matériels de contrôle radiologique qui mesurent les niveaux d'activité et les débits de façon que l'on puisse connaître et enregistrer la radioactivité des gaz rejetés. Pour

FIG. 1
LE CYCLE
DU
COMBUSTIBLE
NUCLEAIRE



parachever la surveillance, la plupart des sites de retraitement font l'objet d'un contrôle radiologique du milieu, autour de l'usine et souvent jusqu'à plusieurs kilomètres de celle-ci. Les échantillons prélevés et examinés comprennent ceux qui sont indicatifs d'une radioexposition potentielle du public, comme le radioiode et le radiostrontium dans le lait.

Le retraitement produit trois catégories principales de déchets liquides: des déchets de faible activité, tels que l'eau de la piscine de stockage du combustible, les condensats des évaporateurs et de nombreux effluents de l'usine; les déchets d'activité moyenne comme ceux qui proviennent des opérations de dégainage chimique et certains effluents de l'usine; les déchets de haute activité contenant le plus gros des produits de fission (généralement plus de 99,9%).

Les grandes installations de retraitement produisent quotidiennement plusieurs mètres cubes de déchets aqueux de faible activité. Après traitement, qui peut aller d'un simple stockage pour décroissance radioactive jusqu'à des processus chimiques compliqués, ces déchets sont généralement rejetés dans les cours d'eau ou en mer, dans des conditions rigoureusement contrôlées et conformément aux règlements en vigueur. Les déchets d'activité moyenne, de composition très variable, contiennent généralement des quantités notables de sels dissous. Ils sont traités par diverses méthodes, souvent combinées, telles que l'évaporation (avec transfert du résidu concentré au stockage haute activité), stockage pour décroissance et précipitation (les précipités étant gardés comme déchets solides). Le plus grande partie de ces déchets est donc ainsi transformée en déchets liquides de faible activité.

Les déchets de haute activité contiennent le gros des produits de fission obtenus dans les réacteurs de puissance, sous forme d'une solution aqueuse de nitrates de divers métaux résultant du retraitement. La composition des déchets varie en fonction des réactifs utilisés dans le processus et selon que le combustible a été lixivié de la gaine ou que combustible et gaine ont été complètement dissous. Le premier stade du traitement est invariablement la concentration par évaporation, concentration dont le degré varie considérablement selon le processus utilisé. Si seules de faibles quantités de sels ont été ajoutées et si les gaines n'ont pas été dissoutes, on obtient un volume réduit à environ 50 litres par tonne de combustible d'uranium; dans certaines usines ce volume s'élève cependant à 450-900 litres par tonne de combustible. Le liquide extrêmement radioactif est stocké dans des cuves en acier à fortes parois, contenues dans des cellules de béton d'une épaisseur pouvant atteindre 1,5 m, elles-mêmes doublées d'acier. Afin d'évacuer la chaleur créée par la décroissance des produits de fission, on incorpore aux cuves des boucles de refroidissement et on envoie, parfois, des jets d'air pour maintenir en suspension les solides précipités. Afin d'éviter toute fuite éventuelle, on prévoit des cuves de secours d'un volume suffisant. Bien que l'on estima que le stockage des solutions concentrées dans de telles cuves, pendant plusieurs années, soit sans danger, on est généralement d'avis que le stockage sous forme solide est préférable. Comme nous l'avons vu, les déchets liquides de haute activité varient avec les procédés utilisés, et les méthodes de solidification mises au point peuvent convenir mieux à certains déchets qu'à d'autres.

En général, les procédés de solidification comprennent le chauffage des déchets entre 400°C et 1200°C, ce qui élimine les composants volatils, principalement l'eau et les nitrates, et laisse un résidu calciné solide ou une masse fondue qui se solidifie par refroidissement. Dans la plupart des cas on ajoute aux déchets des fondants qui aboutissent à la formation de produits vitrifiés. Les déchets solides devraient idéalement posséder une bonne conductivité thermique, une faible solubilité, une haute stabilité chimique et résistance aux rayonnements, et une bonne résistance mécanique. Après solidification, les déchets doivent être placés dans des conteneurs adéquats. Un stockage provisoire sur le site du retraitement du combustible et l'usine de solidification des déchets sera probablement

TABLEAU 4. Quantité de déchets solides contenant des produits de fission
Chiffres annuels estimatifs

Déchets solides	1000 MW(e) Réacteur à eau légère	1000 MW(e) Réacteur surgénérateur rapide à métal liquide
<u>Produits sur le site du réacteur</u>		
<u>Faible activité</u>		
Mètres cubes par an	56 - 110	28 - 56
Kilogrammes par an	60 000 - 100 000	30 000 - 50 000
Nombre de fûts de 240 litres par an	270 - 540	135 - 270
Surface de site de stockage utilisée — mètres carrés par an	165 - 330	83 - 165
<u>Produits dans l'usine de retraitement</u>		
<u>Haute activité, vitrifiés</u>		
Mètres cubes par an	2,5	2,0
Kilogrammes par an	5000	4000
Conteneurs par an	60	40
Espace de stockage nécessaire — mètres carrés par an	1100	750
<u>Tronçons de gaines</u>		
Mètres cubes par an	1,7	5,5
Kilogrammes par an	7600	30 000
Nombre de fûts de 150 litres par an	15	50
Surface de stockage par an	a	a
<u>Solides de faible activité</u>		
Mètres cubes par an	17 - 115	56 - 340
Kilogrammes par an	30 000 - 65 000	100 000 - 200 000
Nombre de fûts de 250 litres par an	80 - 540	270 - 1600
Surface de stockage utilisée — mètres carrés par an	93 - 460	185 - 930
<u>Produits à l'usine de fabrication de combustible</u>		
<u>Déchets contaminés par Pu</u>		
Mètres cubes par an	340 ^b	230
Nombre de fûts de 250 litres par an	1500 ^b	1000
Volume de stockage — mètres cubes par an	600 ^b	400

^a Selon que le stockage est effectué sur un site privé ou dans un dépôt fédéral.

^b Suppose le recyclage de Pu.

nécessaire pour permettre la décroissance radioactive de la plupart des radionucléides de période courte et moyenne. Pour évacuer la chaleur créée par la décroissance radioactive, les installations de stockage doivent comporter un système de refroidissement, à l'air ou à l'eau. Dans certains pays, on examine actuellement la possibilité d'une évacuation définitive des déchets solidifiés dans des formations géologiques profondes, telles que des dômes de sel gemme. La technologie utilisée aujourd'hui pour le retraitement du combustible irradié ne permet pas de séparer quantitativement les actinides des produits de fission, de sorte que ces déchets contiennent certains radionucléides de longue période, comme le plutonium 239 (période 24 000 ans). La conséquence en est que les déchets solidifiés actuellement obtenus à partir des concentrés de déchets de haute activité devront être isolés de l'environnement humain pendant plusieurs milliers d'années.

Le tableau 4 montre les quantités de déchets radioactifs par 1000 MW(e) de puissance installée par an, pour les réacteurs à eau légère, qui seront la filière prédominante au moins jusqu'en 1990. Etant donné que le réacteur surgénérateur rapide à métal liquide viendra probablement au premier rang après 1990, le tableau présente aussi des chiffres pour les déchets produits annuellement par 1000 MW(e) de réacteur surgénérateur rapide à métal liquide.

Les autorités sont conscientes des problèmes que pose la gestion des déchets de haute activité et tout nouveau fait est attentivement examiné. Les techniques à utiliser en dernier lieu ne seront choisis qu'une fois acquise l'assurance qu'un compromis satisfaisant a été réalisé entre une probabilité assez forte de succès et les risques que l'on peut déterminer.

Le risque total lié à la gestion des déchets radioactifs est constitué par l'ensemble des risques propres à chaque phase. Le but principal est de réduire le risque cumulatif au niveau le plus bas possible. Il s'ensuit que les stades des programmes de gestion des déchets peuvent varier d'un pays à l'autre, en fonction de l'importance des risques liés à chaque procédé utilisé.

La centrale nucléaire de Wylfa, Anglesey, Galles du Nord, que le Financial Times a signalée en 1973 comme une réalisation exceptionnelle d'architecture industrielle. La centrale était une des six installations retenues comme candidates à cette distinction. Dans son rapport sur la centrale nucléaire de Wylfa, le jury note: «Cette réalisation est due à un sens esthétique peu commun qui a permis d'insérer l'ouvrage dans un paysage côtier d'une grande beauté. Le goût et l'ingéniosité des architectes et des paysagistes ont fait de cette centrale nucléaire massive, qui pouvait être un désastre pour l'œil, une œuvre qui n'enlaidit pas le cadre qui l'entoure. Ces énormes bâtiments ont une unité et une simplicité qui en quelque sorte les intègrent au paysage, grâce à l'emploi discret de la couleur et à l'imagination des formes.»

