

Gestion des déchets radioactifs

par William L. Lennemann

Les éléments radioactifs (radionucléides) ne peuvent être détruits par aucun procédé chimique ou mécanique connu. Leur destruction définitive est le fait, soit d'une transformation en isotopes stables par décroissance radioactive, soit d'une transmutation nucléaire sous l'effet du bombardement par des particules atomiques. Par conséquent, la gestion des déchets radioactifs consiste à maîtriser les rejets radioactifs et à les maintenir à un niveau tolérable en retirant des effluents et des déchets les radionucléides dangereux. Ceux-ci sont concentrés sous une forme qui permette de les stocker ou les éliminer sans qu'ils ne puissent réapparaître ultérieurement dans la biosphère en concentration dangereuse.

Il faudrait écrire des volumes pour examiner tous les aspects de la gestion des déchets radioactifs et les techniques qu'elle implique; d'ailleurs, de nombreux ouvrages ont déjà été consacrés à ce sujet. On ne peut donc s'attendre à trouver dans cet article plus qu'un bref aperçu de l'état actuel de la question dont certains aspects seront inévitablement omis. Peut-être pourra-t-il montrer néanmoins que les spécialistes scientifiques, les ingénieurs et les agents d'exploitation, qui interviennent dans le cycle du combustible nucléaire, se conforment et continueront de se conformer aux exigences techniques de sûreté que pose la gestion des déchets contaminés par des radionucléides.

GENERALITES

La gestion des déchets radioactifs repose sur une option fondamentale: les matières radioactives peuvent-elles être rejetées dans l'environnement, ou doivent-elles être confinées et isolées de la biosphère jusqu'au moment où l'activité des radionucléides nocifs aura décliné jusqu'à devenir inoffensive.

En général, la radioactivité rejetée dans l'environnement provient des effluents liquides ou gazeux des installations nucléaires. La quantité de radioactivité dont on peut tolérer le rejet dépend de la dose admissible à des groupes de population, celle-ci est fixée par des directives et règlements nationaux, fondés généralement sur les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique.

Il est très rare que les effluents radioactifs d'une installation nucléaire puissent être rejetés sans qu'existe, sous une forme ou une autre, une régulation ou un traitement destiné à en retirer l'excès de radioactivité. C'est ainsi que la plus grande partie des déchets radioactifs dus à l'exploitation d'une installation du cycle du combustible nucléaire doit subir un traitement, de manière que les éléments radioactifs soient concentrés sous un volume réduit, plus facile à manipuler, et que le gros des matières traitées puisse être rejeté ou évacué sans danger.

La gestion des déchets radioactifs fait appel à des opérations et des techniques industrielles normales adaptées cependant pour s'accommoder des barrières qu'impose la protection des ouvriers et des agents d'exploitation contre l'irradiation excessive et le contact avec les radionucléides. Aussi, le matériel et les modalités de son utilisation et de son entretien derrière ces barrières protectrices sont-ils très souvent assez complexes. En fait, la plupart

M. Lennemann dirige la Section de la gestion des déchets, au sein de la Division de la sûreté nucléaire et de la protection de l'environnement.

des recherches et réalisations relatives aux techniques de gestion des déchets radioactifs tendent à adapter des opérations industrielles et des techniques de laboratoire normales à la manipulation des matières radioactives.

De l'avis général des responsables et des experts, les techniques et les modes opératoires sont maintenant suffisamment au point pour être exploités. On dispose des connaissances fondamentales nécessaires pour rassembler, traiter, emballer et entreposer sans risque tous les déchets du cycle du combustible nucléaire. On peut même souvent choisir, entre plusieurs techniques, la mieux adaptée à une situation donnée ou la plus économique.

Du point de vue technique, il semble donc que le manque de méthodes et de techniques appropriées pour la manipulation des déchets radioactifs ne doit pas constituer un goulot d'étranglement pour la mise en œuvre des programmes nucléo-énergétiques. Il est vrai, toutefois, que certaines des techniques nécessaires en sont encore au stade de l'élaboration. Il reste beaucoup à faire, mettre au point les détails de construction et de conception, se plier aux exigences de la réglementation et adapter la technique aux conditions réelles d'exploitation et de surveillance. Ces dernières remarques s'appliquent principalement aux déchets radioactifs qui proviennent du retraitement du combustible irradié et qui contiennent tous les produits radioactifs de la fission nucléaire.

RESIDUS DU TRAITEMENT DU MINERAL

Les résidus du traitement du minerai d'uranium ne présentent pas des risques d'irradiation grave dans des zones ouvertes et bien aérées. Le souci principal tient aux concentrations dangereuses de radon auxquelles peut donner lieu la décroissance radioactive du radium 226 contenu, en quantité relativement faible il est vrai, dans ces résidus.

Il est possible d'évacuer les résidus dans des zones délimitées, gérées et isolées de manière appropriée. On sait les stabiliser en les recouvrant d'une couche de terre et de végétation, et, si nécessaire, les protéger par d'autres moyens, afin d'empêcher qu'ils ne soient dispersés par le vent, l'eau ou l'homme. En outre, ces zones peuvent (et devraient) être enregistrées auprès des services cadastraux local et central, de façon que des restrictions puissent être imposées à perpétuité sur leur utilisation.

EFFLUENTS DU RAFFINAGE ET DE L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM

Au cours des opérations de raffinage et d'enrichissement de l'uranium, les produits chimiques toxiques, mais non radioactifs, contenus dans les effluents gazeux et liquides, posent un problème plus sérieux que les contaminants radioactifs. Il existe des techniques et des méthodes industrielles éprouvées pour prévenir la pollution de l'environnement par les solvants organiques, les nitrates, les sulfates, l'ammoniaque, les chlorures, les fluorures, le fluor et d'autres produits chimiques utilisés pour le raffinage et l'enrichissement. Quant à l'uranium appauvri provenant des usines d'enrichissement, on ne le considère pas actuellement comme un déchet: on le récupère et on le stocke.

Cependant, le matériel de début de chaîne des usines de raffinage d'uranium et de conversion de l'uranium raffiné en hexafluorure d'uranium finit par devenir radioactif en raison de l'accumulation de traces d'éléments radioactifs encore présents dans les concentrés et l'uranium raffiné. Ces radionucléides sont adsorbés par les surfaces du matériel, se déposent sur elles et se concentrent particulièrement dans les "cendres" résiduelles du processus de fluoration de l'uranium. Ces matières et ce matériel radioactifs sont généralement éliminés par enfouissement convenablement réglé, bien que l'on ait eu aussi recours à l'immersion dans les océans.

FABRICATION DU COMBUSTIBLE A L'URANIUM

En matière de gestion des déchets, le principal problème posé par la fabrication de combustible à l'uranium tient aux éléments et produits chimiques non radioactifs utilisés.

L'uranium contenu dans les déchets est récupéré et sa concentration dans les effluents est minime. Généralement, il suffit d'appliquer les techniques et pratiques de sûreté que l'on utilise pour la gestion des déchets industriels non radioactifs. Quant au matériel contaminé par l'uranium, il peut être facilement décontaminé avant d'être évacué sans danger ou éventuellement réutilisé.

DECHETS DU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE

La radioactivité induite par capture de neutrons est la principale source de radioactivité des déchets qui imposent l'adoption de mesures spéciales sur le site d'un réacteur de puissance. Cette capture de neutrons se produit dans les produits de corrosion et dans d'autres impuretés du fluide caloporteur qui traverse le cœur du réacteur, ainsi que dans les composants de la structure du réacteur, qui sont exposés à des rayonnements de haute activité. En outre, à la suite d'une rupture de gaine, on peut rencontrer de faibles quantités de produits de fission radioactifs dans le fluide caloporteur et l'eau du bassin de désactivation du combustible.

Les contaminants radioactifs les plus inquiétants sont les produits de la fission nucléaire qui s'effectue dans les éléments combustibles. Ces produits de fission se dégagent à l'usine de retraitement du combustible, où l'on procède à la fragmentation soit chimique, soit mécanique des gaines avant de dissoudre le combustible. Les produits de fission solubles passent alors dans une solution aqueuse avec le plutonium et l'uranium non irradié, et les produits de fission gazeux passent dans le circuit d'évacuation des gaz de l'usine.

Les radionucléides qui restent en solution après récupération de l'uranium et du plutonium sont les produits de fission et les actinides, appelés aussi transuraniens, au nombre desquels figure le plutonium non récupéré et les éléments plus lourds (Np, Am, Cm, etc) de la série des actinides, formés par capture de neutrons. Etant donné que la décroissance radioactive de ces transuraniens s'opère par émission alpha, on les appelle couramment émetteurs alpha et les déchets contaminés par eux, déchets émetteurs alpha.

Les produits de fission et les émetteurs alpha contaminent tout matériau au contact duquel ils se trouvent et cette contamination continue de se transmettre par contact: d'où l'apparition de déchets radioactifs dans ce qui serait sans cela constitué de déchets industriels normaux. Lorsqu'il est possible de décontaminer convenablement ces matériaux, on crée des déchets radioactifs supplémentaires par le processus même de la décontamination. Les opérations de manutention et de fabrication qui mettent en jeu des produits de fission et des transuraniens sous forme liquide ou solide, se traduisent par une contamination du matériel et des circuits d'aération, qui doivent ensuite être traités. C'est le cas notamment lorsqu'on utilise le plutonium dans la fabrication de combustible à l'oxyde de plutonium ou à l'oxyde mixte d'uranium et de plutonium.

DECHETS GAZEUX

Les effluents gazeux libérés lors du fonctionnement d'un réacteur peuvent contenir des radioisotopes de gaz nobles (principalement de l'argon 41, du krypton 85 et du xénon 133), de l'iode radioactif 129 et 131, du tritium et des oxydes de carbone 14. Cependant, on a vu que l'essentiel du dégagement de radionucléides gazeux se produit lorsque le combustible nucléaire irradié est fragmenté et dissous à l'usine de retraitement. Là, les principaux radionucléides libérés sont le krypton 85, le xénon 133, l'iode 129 et 131 le tritium. Le xénon 133, dont la période radioactive est relativement courte (5,3 jours), ne devrait pas poser de problème étant donné qu'on dispose de moyens pour retarder si nécessaire son émission et permettre ainsi à son activité de décroître. L'iode radioactif peut être éliminé des effluents gazeux par épuration à contre-courant à l'aide d'une solution aqueuse d'un produit caustique, de nitrate mercurique, d'acide nitrique, ou par adsorption

chimique sur des zéolithes traitées à l'argent ou sur d'autres métaux présentant une affinité pour l'iode. On peut aussi recourir à l'adsorption sur le charbon qui peut être imprégné de produits chimiques retenant les complexes iodés.

Si l'on n'a pas encore déterminé exactement dans quelle mesure le tritium, le krypton 85 et le carbone 14 pouvaient être rejetés dans l'atmosphère sans poser de problème à l'échelle planétaire, il ressort des analyses effectuées que l'incidence de ces rejets ne devrait pas devenir critique avant la fin du siècle. D'ailleurs, il existe déjà des méthodes de séparation cryogénique (à basse température) du krypton 85 et du xénon 133. D'autres techniques, telles que l'absorption par des fluorocarbones liquides, l'adsorption sur le charbon ou d'autres solides, et la diffusion à travers des membranes sont en cours d'élaboration.

On n'a pas encore trouvé le moyen de réaliser dans la pratique l'extraction du tritium contenu dans les effluents, car pour l'essentiel il s'y trouve sous la forme extrêmement diluée d'eau tritiée. Une solution d'avenir, semble-t-il, au niveau des usines de retraitement consiste à confiner, oxyder et capter les effluents gazeux provenant des opérations de début de chaîne, telles que le cisailage, de convertir le tritium (T_2) en T_2O et de récupérer le T_2O (probablement le THO) à une concentration de 1 à 5% en tritium. D'autres solutions actuellement étudiées consistent à adsorber le tritium sur de l'oxyde de vanadium ou à recourir à des procédés de séparation isotopique tels que la diffusion sous haute pression et haute température au travers de films de palladium et à utiliser des tamis moléculaires. L'application des techniques d'extraction par solvant sélectif est également envisagée.

Le carbone 14 peut être extrait des effluents gazeux sous forme d'oxyde par épuration au moyen de produits caustiques ou adsorption sur un milieu alcalin solide. Les matières particulaires et aérosols radioactifs contenus dans les effluents gazeux peuvent être extraits par des techniques de filtration à haut rendement.

DECHETS LIQUIDES

Les déchets radioactifs liquides sont classés sans grande rigueur d'après leur niveau d'activité: haute activité, activité moyenne et basse activité. On considère généralement comme déchet de haute activité le raffinat (effluent liquide) du premier cycle des opérations de retraitement du combustible. Ce raffinat contient plus de 99,9% des produits de fission non gazeux, le plutonium non récupéré et les actinides supérieurs (transuraniens). La distinction entre déchets d'activité moyenne et déchets de basse activité est assez arbitraire; elle est fonction de la teneur en radionucléides et généralement aussi de la mesure dans laquelle les déchets doivent être isolés ou traités au lieu d'être rejetés directement dans l'environnement. Si ces deux catégories de déchets ont une teneur extrêmement variable en éléments transuraniens et en produits de fission, ils se distinguent très nettement des déchets de haute activité par les procédés de traitement qui leur sont appliqués. Cette distinction peut donc servir de critère de classement.

Les déchets liquides de haute activité, on l'a vu, sont constitués essentiellement par les raffinats du premier cycle de retraitement du combustible. Mais ils peuvent aussi inclure des concentrés de produits de fission et d'éléments transuraniens résultant du traitement de déchets liquides de moyenne ou de basse activité.

On les stocke dans des cuves spéciales en acier inoxydable, refroidies et placées généralement dans des casemates souterraines tapissées d'acier. On considère que c'est là une méthode sûre de stockage à long terme, qui requiert, il est vrai, une stricte surveillance. Néanmoins, de l'avis général, il faudrait solidifier ces déchets pour les isoler à long terme de la biosphère terrestre.

Plusieurs méthodes ont été mises au point pour la solidification des déchets de haute activité, faisant appel notamment à des lits fluidisés, des lits à agitation, des fours rotatifs,

des atomiseurs et des creusets. Dans tous les cas, on porte les déchets à une température comprise entre 400 et 1200°C, et l'on chasse les constituants volatiles de manière à laisser un solide calciné. Cependant, la plupart des déchets calcinés sont relativement solubles et généralement considérés comme impropres à l'évacuation. Aussi, le plus souvent, introduit-on des éléments vitrifiants borosilicatés ou phosphatés soit au stade de la calcination, soit lors d'une deuxième phase du processus de solidification. Les déchets calcinés se trouvent ainsi incorporés à une masse vitreuse qui, en refroidissant, se transforme en un produit vitrifié ayant un taux de lixiviation semblable à celui du Pyrex. On peut obtenir un produit vitrifié essentiellement identique par 15 méthodes différents ou moins. Cependant, à l'exception du procédé utilisé à l'atelier de vitrification de Marcoule (France), dont l'exploitation industrielle doit commencer en 1977, les autres n'ont pas encore dépassé le stade expérimental. Une nouvelle méthode étudiée par Eurochemic consiste à enrober le calcinat ou le verre radioactif à une matrice métallique.

Les déchets liquides d'activité moyenne présentent généralement un volume plus réduit et une concentration plus élevée en radionucléides que les déchets liquides de basse activité. Cependant, comme on l'a vu, il n'existe pas de distinction universellement acceptée entre ces deux types de déchets. Les premiers comprennent notamment les projections, les solutions de lavage des effluents gazeux, les produits de régénération des échangeurs d'ions, les solutions de décontamination des fûts et des installations, les solvants de lavage des installations, les solutions chimiques de destruction de gaines, les raffinats des cycles de purification de l'uranium et du plutonium et certains déchets de laboratoire. Parmi les seconds on peut citer les condensats des évaporateurs et des concentrateurs, les déchets de blanchisserie, les condensats des systèmes de ventilation des cuves de traitement et, éventuellement, l'eau de refroidissement ou la vapeur industrielle contaminés par des fuites de radionucléides.

Tous les corps radioactifs solubles dans d'eau, qui sont libérés lors du fonctionnement d'un réacteur, passent d'abord soit dans le réfrigérant primaire, soit dans l'eau du bassin de désactivation, principalement ceux qui s'échappent par de ruptures de gaine. On trouve aussi des produits de corrosion radioactifs sous forme granulaire. Cette radioactivité se répand ensuite dans l'ensemble de l'installation du fait des fuites ou du traitement des fluides contaminés; elle peut ainsi atteindre les produits de régénération des échangeurs d'ions et les boues des évaporateurs. Les courants de déchets liquides d'activité moyenne et basse, créés par le traitement du combustible, ont été énumérés au paragraphe précédent. Outre les déchets de la décontamination, de l'épuration et du lavage, une usine de fabrication de combustible à l'oxyde mixte ($\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$) engendre généralement aussi des courants de déchets liquides lors des opérations de récupération du plutonium dans les rebuts solides. Ces courants peuvent être considérés comme des déchets d'activité moyenne ou basse suivant leur teneur en actinides.

Les principales techniques de traitement qui permettent de réduire le niveau de radioactivité dans les courants de déchets liquides sont la filtration et la centrifugation (qui éliminent les particules radioactives), l'évaporation, l'échange d'ions, la flocculation et la précipitation. On peut aussi utiliser des bassins d'infiltration pour les déchets liquides contenant de produits de fission de courte période à très faible concentration. Les techniques de concentration par membranes sont à l'étude, mais leur emploi ne s'est pas encore généralisé. Toutes ces techniques donnent des concentrés liquides ou des boues qui sont ensuite conditionnées de manière à se présenter sous une forme solide pour le stockage ou l'évacuation. Il existe des techniques d'incinération et de distillation à la vapeur pour le traitement des huiles et des solvants organiques radioactifs. On peut aussi incorporer à ceux-ci certaines matières solides ayant la propriété d'absorber l'huile.

DECHETS SOLIDES

Outre l'appareillage et les matériaux solides, contaminés par induction de radioactivité ou par contact, les déchets solides incluent également les liquides de haute activité solidifiés, les concentrés enrobés de déchets liquides d'activité intermédiaire ou faible, les résines échangeuses d'ions chargées ou usées, et les radionucléides gazeux incorporés dans un milieu solide pour stockage ou élimination. On classe les déchets solides en deux catégories, selon qu'ils sont combustibles ou non. Dans certaines installations, les deux types de déchets sont mélangés et un tri peut s'imposer avant leur traitement ou emballage aux fins de stockage ou d'élimination.

Les déchets solides combustibles se composent d'une grande variété de matériaux, tels que papiers, chiffons, coton absorbant, feuilles de plastic, gants de protection, chaussures en caoutchouc, bois, carton, résines organiques échangeuses d'ions, adjuvants de filtrage, milieux filtrants combustibles à haut rendement, etc. Etant donné que la plupart de ces matériaux sont évacués comme déchets ordinaires, ils font généralement l'objet d'un tri avant incinération. Les opérations effectuées en boîte à gants lors de la purification et de la transformation du plutonium laissent des déchets en caoutchouc ou en plastique.

Les techniques classiques d'incinération à sec sont utilisées avec succès mais posent encore des problèmes de combustion totale et d'épuration des effluents gazeux. D'autres techniques d'incinération en cours de mise au point utilisent des soles d'agitation, des fours à cyclone et des lits fluidisés. Les techniques d'oxydation par voie humide impliquant un processus de digestion acide, actuellement à l'étude, ainsi que les procédés pyrolytiques semblent ouvrir des perspectives intéressantes. On envisage également d'incorporer les déchets combustibles, avant incinération, à un mélange de sel fondu.

Le matériel rebuté peut poser des problèmes plus délicats à cause de son encombrement et de sa haute radioactivité, mais chaque type d'installation du cycle du combustible nucléaire apporte aussi en continu divers déchets radioactifs non combustibles. Ceux-ci se composent principalement de pièces métalliques, et notamment de gaines à combustible, mais il se trouve aussi parmi eux une quantité appréciable d'autres matériaux, tels que le verre et le béton, et souvent même des matériaux combustibles, notamment des résines organiques échangeuses d'ions, des matières plastiques, des graisses et des balayures.

On peut donner comme exemples types de gros matériel provenant d'une usine de retraitement du combustible: les dissolvants, les colonnes ou unités d'extraction par solvant et les concentrateurs qui peuvent atteindre jusqu'à 3 mètres de diamètre et 10 mètres de hauteur. Parmi les déchets non combustibles de grandes dimensions provenant de centrales, on peut trouver des composants du cœur des réacteurs. La plupart des éléments encombrants doivent être démontés, parfois même au cours de leur dépose. Normalement, ce matériel est rincé et décontaminé dans toute la mesure du possible. Qu'il provienne des usines de retraitement du combustible ou des réacteurs, il peut présenter une très haute activité; il faut alors le manipuler à distance et prévoir des écrans de protection du personnel, équivalant à plus d'un mètre de béton. On peut le stocker en attendant que sa radioactivité décroisse.

La radioactivité des matériels rebutés, tels que les boîtes à gants, ayant servi au traitement du plutonium et à la fabrication de combustible à l'oxyde mixte, peut être suffisamment faible pour dispenser les travailleurs d'un écran de protection ou ne leur imposer qu'une faible protection. Toutefois, il faut prendre des mesures de précaution complexes si l'on veut éviter que le plutonium contenu dans ces déchets ne soit disséminé dans l'environnement.

Généralement, les déchets non combustibles sont conditionnés sous un blindage approprié. Dans la mesure du possible, on les broie ou on les fond pour en réduire le volume. Lorsqu'ils se présentent sous un petit volume, comme dans le cas des cendres d'incinération,

des résines échangeuses d'ions, des boues et des résidus du traitement de déchets liquides d'activité moyenne ou faible, on les incorpore à du béton et du bitume. On utilise également les résines urée-formaldéhyde et les matrices de sel ainsi que d'autres absorbants et matériaux d'emballage.

STOCKAGE

Le stockage implique la faculté de récupérer les déchets aisément. Les installations de stockage des déchets radioactifs doivent être conçues de manière à éviter l'exposition de l'homme aux rayonnements et à garantir le confinement physique. Il est nécessaire de procéder à une surveillance continue pour s'assurer que ces deux conditions sont satisfaites.

Ainsi qu'on l'a vu, il n'a pas encore été nécessaire de stocker des matières gazeuses radioactives et il ne semble pas que cela le devienne dans l'avenir immédiat. Il est toutefois possible de les comprimer et de les stocker ensuite dans des fûts métalliques. On élabore des techniques qui permettront de les incorporer à des matrices solides et à des absorbants pour éviter qu'elles ne se dégagent brusquement en cas de rupture d'un récipient. Quant aux déchets radioactifs liquides, ils peuvent être facilement stockés dans des cuves ou dans d'autres récipients. Dans le cas des déchets radioactifs solides, enfin, les méthodes de stockage vont de l'utilisation de casemates en béton ou en terre, pour les matériaux de haute activité, à celle de simples structures ignifugées pour les déchets de faible activité. On recourt également à des mines et à des tunnels creusés dans des formations géologiques sèches. Pour le stockage des déchets solides de haute activité dans des bassins remplis d'eau ou dans des souterrains refroidis par circulation d'air, on peut bénéficier de l'expérience tirée du stockage d'éléments combustibles irradiés.

ELIMINATION

L'élimination suppose un emplacement d'évacuation définitif, les déchets ne devant jamais être récupérés. En outre, une fois que l'on s'est assuré de la sûreté de la méthode d'élimination et du confinement qu'elle assure, on peut réduire à un minimum ou même cesser toute surveillance du site. Il est généralement admis qu'aux fins de l'élimination définitive, il vaut mieux que les déchets radioactifs se présentent sous une forme solide relativement insoluble; ainsi on risque moins une dispersion des radionucléides dans l'environnement qu'avec des déchets liquides et gazeux. On peut, il est vrai, prévoir un emballage qui sépare son contenu du milieu environnant. Par ailleurs, l'URSS a démontré que l'injection de déchets liquides de faible ou moyenne activité dans des formations poreuses de structures géologiques profondes constituait une méthode d'élimination sûre. Aux Etats-Unis, le Laboratoire national d'Oak Ridge étudie l'injection d'un mélange de déchets liquides et d'agents de solidification dans des formations schisteuses par hydrofracturation.

Quel que soit l'attrait que puisse présenter l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, l'élimination des déchets radioactifs solides devra se faire pendant quelque temps encore sur terre. On a recours à l'enfouissement et à l'immersion pour les déchets solides d'activité moyenne et faible. Les techniques d'enfouissement vont de l'utilisation de tranchées et de casemates bétonnées, qui peuvent être ensuite remplies de béton, à l'enfouissement direct de déchets conditionnés dans des tranchées et des puits ou sous un remblai. La protection contre la migration des radionucléides dans les eaux souterraines est d'une importance capitale. Quant à l'immersion sous-marine, elle suppose un emballage et une préparation, tels que les récipients puissent résister à la pression de l'eau, et un poids suffisant pour qu'ils puissent couler au fond de l'océan et y rester. La quantité de radionucléides évacués en un site (terrestre ou marin) donné est réglée minutieusement de manière à ne pas dépasser la capacité d'absorption de l'environnement. L'élimination par enfouissement ou immersion des déchets solides contaminés par des émetteurs alpha de longue période (déchets émet-

teurs alpha) fait encore l'objet d'études qui portent sur la concentration de ces émetteurs dans les déchets et les quantités totales admissibles.

L'élimination de déchets solides de moyenne et faible activité, convenablement conditionnés, dans des formations salines souterraines fait l'objet d'expériences en République fédérale d'Allemagne. Beaucoup de pays envisagent maintenant de recourir à cette méthode.

Le produit d'activation qui, dans les déchets solides, pose le plus de problèmes est le cobalt 60 dont la période est de 5,3 ans. Par conséquent les composants de réacteurs fortement irradiés verront leur activité tomber à un niveau inoffensif après 150 à 200 ans. Il semble que pour cette période relativement courte l'enfouissement ou l'immersion des déchets, bien conditionnés, constitue une solution appropriée.

En revanche, les déchets contaminés par des produits de fission de période plus longue devront être stockés pendant 600 à 1000 ans pour ne plus être dangereux. Pour les déchets contaminés par du plutonium 239 (dont la période est de 24 300 ans) la durée d'isolement pourra même atteindre 500 000 ans. Quant aux autres actinides transuraniens, des durées «géologiques» du même ordre peuvent être nécessaires pour que leur concentration devienne tolérable.

Aucune méthode n'a jusqu'ici fait ses preuves pour l'élimination des déchets solidifiés, de haute activité ou non, contaminés de façon significative par des émetteurs alpha, peut-être parce que le besoin d'installations correspondantes ne s'est pas fait sentir. Toutefois, on ne peut feindre d'ignorer plus avant les préoccupations des populations et des responsables politiques à ce sujet. De nombreux pays étudient actuellement la possibilité d'évacuer les déchets solidifiés de haute activité et émetteurs alpha dans des structures géologiques souterraines convenables (élimination géologique), ce qui constitue la seule solution possible en l'état actuel de la technique. On a retenu à cet effet des formations salines, argileuses et cristallines. On peut penser que d'ici cinq à sept ans, plusieurs projets expérimentaux auront fait leur preuves. Il a été proposé d'enfouir les déchets dans des sédiments sous-marins profonds ou dans des zones géologiquement stables du fond des mers par des techniques mises au point récemment pour la prospection et l'exploitation des gisements pétrolifères sous-marins. Il ne faut toutefois pas escompter dépasser le stade exploratoire avant plusieurs années (une dizaine au moins), sous réserve par ailleurs que les exigences techniques puissent être satisfaites de façon rentable.

Une idée attrayante serait de séparer de la masse des déchets, des déchets de haute activité notamment, les actinides émetteurs alpha ayant une période très longue. Il suffirait alors d'isoler le reste des matériaux contaminés par des produits de fission pendant 1000 ans au plus, période déjà beaucoup moins chimérique. En l'absence de produits de fission fortement générateurs de chaleur, les autres actinides pourraient être éliminés de façon plus appropriée ou recyclés et renvoyés vers les réacteurs nucléaires pour combustion (transmutation) et obtention d'éléments stables ou de période plus courte. Si, en principe, il est techniquement possible d'abaisser la concentration en actinides à une valeur négligeable, il n'est pas certain que cela soit pratiquement réalisable. Par ailleurs, il faudrait plusieurs décennies pour démontrer la possibilité du recyclage des actinides.

OPERATIONS DE GESTION DES DECHETS RADIOACTIFS

Finalement, il ne faut pas négliger le fait que la plupart des procédés de traitement des déchets radioactifs engendrent eux-mêmes des déchets liquides de faible ou de moyenne activité. Ceux-ci proviennent principalement du traitement des effluents gazeux produits, des condensats obtenus et des solutions de décontamination ainsi que du volume considérable de matériel et de détritiques contaminés. Ils sont soit recyclés, pour donner finalement des effluents pouvant être rejetés dans l'environnement, soit ajoutés aux déchets radioactifs destinés au stockage ou à l'élimination. Ainsi, du point de vue de la gestion des déchets, il est souhaitable d'avoir le moins possible de déchets radioactifs à traiter.