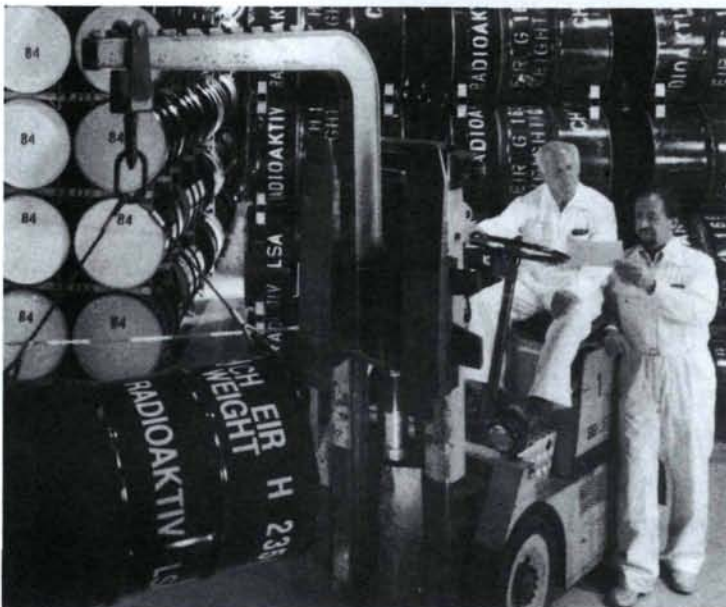


Le stockage définitif des déchets de haute activité dans les couches géologiques profondes est fondé sur le principe des barrières multiples qui permettent d'isoler les déchets de l'environnement, dans des conditions de sûreté. Plusieurs pays disposent de laboratoires souterrains pour l'étude de ce mode de stockage. (Photos SKB, ANDRA)



Hangar de stockage de déchets de faible activité aux Etats-Unis. (Photo: USDOE)



A l'Institut fédéral de recherche sur les réacteurs (Suisse), certains déchets de faible activité sont stockés sur place. (UNIPEDA)

La gestion des déchets radioactifs dans le monde

Réalisations et perspectives actuelles

par J.L. Zhu et C.Y. Chan

Depuis plus de 40 ans que l'atome est à notre service, on peut dire que la technologie nucléaire est déjà bien avancée, mais ses avantages ne sont pas sans inconvénients. Au cours des 30 dernières années, peu de sujets ont autant retenu l'attention des scientifiques, des autorités et du public que le problème des "déchets nucléaires" (radioactifs) et de ce que l'on peut en faire. Nombreux sont les pays où l'avenir de l'énergie nucléaire sera compromis si l'on ne trouve pas de solutions acceptables pour la gestion et le stockage définitif des déchets.

Parmi les 113 Etats Membres de l'AIEA, rares sont ceux qui ne produisent pas de déchets nucléaires. Ces déchets se présentent sous différentes formes et ont des caractéristiques différentes selon qu'ils proviennent des centrales nucléaires, des installations du cycle du combustible, des centres de recherche, des hôpitaux ou des applications industrielles des radio-isotopes. S'il est vrai que la production d'énergie et les autres applications de l'énergie nucléaire produisent effectivement moins de déchets que d'autres opérations industrielles (cf. les centrales thermiques au charbon), le principal sujet de préoccupation est que les déchets demeurent radioactifs pendant de longues périodes pendant lesquelles ils peuvent représenter un danger pour l'homme et l'environnement.

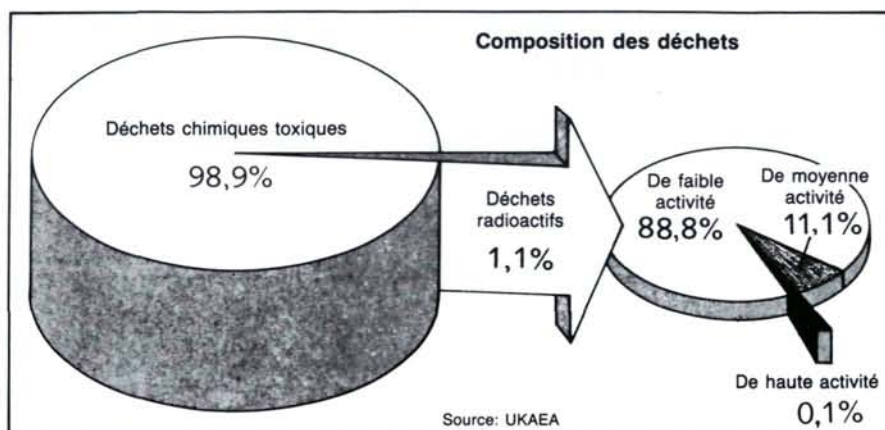
M. Zhu est directeur de la Division du cycle du combustible nucléaire et de la gestion des déchets de l'AIEA; M. Chan est membre de cette division qui s'appelait auparavant "Division du cycle du combustible nucléaire". Cette ancienne dénomination est employée dans le corps de certains articles du présent bulletin.

Nous nous proposons dans cet article de donner un aperçu des tendances et des stratégies de la gestion et de l'évacuation des déchets radioactifs, et de l'action internationale entreprise dans ce domaine. Nous nous occuperons essentiellement des programmes nucléaires civils.

Tendances et stratégies

La planification, la mise en œuvre et le développement des divers programmes nationaux de gestion des déchets radioactifs de toutes sortes font apparaître un certain nombre de problèmes communs et diverses tendances au niveau des méthodes et des stratégies utilisées, que l'on pourrait résumer ainsi:

● *Il importe de démontrer que tous les déchets nucléaires, même les plus fortement radioactifs, peuvent être isolés de l'homme et de l'environnement en toute sécurité aussi longtemps qu'il le faut.* La plupart des pays qui possèdent des centrales nucléaires ont entrepris des programmes d'étude, de développement et de démonstration des solutions techniques permettant de gérer les déchets radioactifs dans des conditions de sûreté. La plupart des projets dans le cadre de ces programmes ont pour objet de montrer qu'il existe des méthodes acceptables et sûres d'évacuation des déchets. Cet effort soutenu est important à plusieurs égards: il permet de faire l'essai des nouvelles solutions proposées pour la gestion et le stockage définitif des déchets; les résultats des essais contribueront à



Au Royaume-Uni, plus de quatre millions de mètres cubes de déchets sont produits chaque année. Les déchets radioactifs ne représentent que 1,1% de ce volume et la plupart sont des déchets de faible activité.

Définitions

Pour des raisons techniques et aux fins de la sûreté, les déchets nucléaires, sous leurs diverses formes, sont généralement classés d'après leur radioactivité, leur puissance thermique et les risques qu'ils comportent. L'AIEA a adopté des définitions spécifiant les caractéristiques techniques des déchets radioactifs, que de nombreux pays appliquent à la gestion de leurs déchets. En voici quelques-unes, sous une forme simplifiée pour faciliter la compréhension du sujet:

● **Période.** Ce terme désigne le temps nécessaire pour qu'un radionucléide perde la moitié de sa radioactivité. La plupart des produits de fission, très radioactifs, ont des périodes d'une trentaine d'années, ou moins; c'est le cas du césium 137, par exemple. Quelques-uns, tel l'iode 129, ont des périodes de plusieurs milliers d'années. Pour fixer les idées, rappelons que l'uranium naturel a une période d'environ 4,5 milliards d'années, soit à peu de chose près l'âge de la planète.

● **Déchets de courte période et de longue période.** La limite entre ces deux catégories se situe généralement vers 30 ans.

● **Déchets de faible activité.** Ce sont les déchets qui contiennent des quantités négligeables de radionucléides de longue période. Ils proviennent des applications pacifiques de l'énergie nucléaire dans l'industrie, en médecine, dans la recherche, et de la production nucléo-électrique; ce sont les gants, chiffons, verrerie, petit outillage, papiers et filtres contaminés par des matières radioactives; ils sont généralement empaquetés.

● **Déchets de moyenne activité.** Ces déchets sont moins radioactifs et émettent moins de chaleur que les déchets de haute activité, mais il faut néanmoins prévoir des protections pour leur manutention et leur transport. Il peut s'agir de résines provenant des réacteurs, ou de boues chimiques solidifiées, ainsi que de fragments de matériel ou de métaux. Divers procédés permettent de traiter et stabiliser ces déchets, généralement en vue de leur stockage définitif en surface ou à faible profondeur. Plusieurs pays étudient ou pratiquent déjà l'enfouissement dans des formations rocheuses terrestres ou dans les sédiments des fonds marins.

● **Déchets de haute activité.** Ils proviennent du retraitement du combustible épuisé des centrales nucléaires, opération qui permet de récupérer l'uranium et le plutonium en vue de leur réutilisation. Ces déchets contiennent des éléments transuraniens et des produits de fission fortement radioactifs, thermogènes et de longue période. Par suite, les déchets liquides de cette catégorie sont provisoirement stockés dans des réservoirs prévus à cet effet. Avant d'être stockés définitivement et isolés de la biosphère, ils subissent obligatoirement un traitement approprié et sont solidifiés. Le combustible épuisé non retraité peut être considéré comme un déchet de haute activité.

● **Déchets émetteurs alpha** (matières contaminées par les transuraniens). Ce sont des déchets dont la teneur en émetteurs alpha de longue période interdit leur enfouissement définitif à faible profondeur. Ils résultent principalement du retraitement des combustibles épuisés et de la fabrication des combustibles à mélange d'oxydes. On peut les éliminer de la même façon que les déchets de haute activité.

Etude des effets sur l'environnement

En réponse aux recommandations émises lors de la réunion d'analyse de l'accident de Tchernobyl, tenue en 1986, l'AIEA a entrepris une étude internationale sur les données relatives aux effets environnementaux des retombées de l'accident. Cette étude, dont le but est de valider les modèles de transfert dans l'environnement, aura à sa disposition ce qu'on peut appeler un "laboratoire naturel". Les modèles dont il s'agit peuvent être appliqués dans l'évaluation de l'impact radiologique de toutes les activités du cycle du combustible nucléaire. L'étude est menée par quatre groupes de travail composés d'experts venant d'établissements de recherche de plus de 20 Etats Membres et elle bénéficie également de la participation de la Commission des communautés européennes (CCE). Cette étude doit se poursuivre jusqu'en 1992.

L'AIEA participe également à l'exercice de validation du modèle de biosphère, étude analogue de caractère international entreprise en 1986 par l'Institut suédois de radioprotection. Cette étude, commencée avant l'accident de Tchernobyl, a pour objet de vérifier les modèles de transfert écologique et de bioaccumulation des radionucléides et autres indicateurs. Le programme de travail initial a été modifié pour tenir compte des données nouvelles fournies par l'accident de Tchernobyl et continuera jusqu'en 1991. — S. Hossain, *Division du cycle du combustible nucléaire et de la gestion des déchets.*

améliorer les modèles mathématiques informatisés utilisés pour les évaluations de la sûreté et des conditions favorables au stockage dans les formations géologiques; il permettra de déterminer par la modélisation analytique, la validation des résultats et la recherche en laboratoire l'aptitude d'un dépôt de déchets à protéger la santé publique à longue échéance. Le comportement présumé des déchets, à long terme, est confirmé par l'étude de zones radioactives naturelles, notamment du comportement des radionucléides provenant de gisements d'uranium non perturbés présents dans la croûte terrestre depuis des millions d'années.

● **Plusieurs pays étudient ou construisent des installations de retraitement et de vitrification de taille industrielle.** Près de la moitié des pays qui exploitent des centrales nucléaires procèdent au retraitement du combustible épuisé ou envisagent de le faire. La France et le Royaume-Uni possèdent des installations industrielles de retraitement depuis près de dix ans. Dès le début de la prochaine décennie, la plupart des autres pays mettront aussi des installations de retraitement en service.

Pour améliorer la technologie de la vitrification (stabilisation du déchet dans du verre ou dans une substance analogue), certains pays ont, ou vont construire, de petites installations pilotes pour faire la démonstration de la technologie actuelle. Quelques grandes installations sont actuellement en exploitation et d'autres sont en projet ou en construction. L'Organisation

australienne de science et de technologie nucléaires (ANSTO) a récemment entrepris d'intégrer sa petite usine pilote de fabrication de roche synthétique (Synroc) dans une unité plus vaste où seront aussi étudiées diverses méthodes de calcination.

● *La plupart des pays dotés d'un parc nucléo-énergétique étudient des techniques de stockage définitif des déchets de haute activité dans les formations géologiques profondes.* Les facteurs qui déterminent le mode de gestion des déchets nucléaires sont liés à la politique du pays et à sa participation aux divers stades du cycle du combustible nucléaire. L'opinion des spécialistes internationaux, fondée sur des considérations techniques, est que le stockage définitif des déchets de haute activité ou du combustible nucléaire épuisé dans des formations géologiques profondes est actuellement la meilleure solution. Dans certains pays, on continue néanmoins d'étudier d'autres options, tel l'enfouissement dans les sédiments des fonds marins (voir les tableaux).

● *Perfectionnement continu des techniques de traitement, de conditionnement et de stockage définitif des déchets de faible et moyenne activité.* On étudie notamment des techniques nouvelles de réduction volumique des déchets, immédiate ou différée (par exemple, l'incinération et le compactage). On travaille aussi activement sur plusieurs méthodes de stabilisation. Dans le passé, certains déchets de faible activité ont été éliminés sans traitement ni conditionnement préalables. Les programmes nationaux sont revus et des pratiques sont mises au point pour prévenir les effets nuisibles du stockage des déchets de faible activité sur l'environnement.

● *Plusieurs pays ont institué un mode spécial de financement des programmes de gestion et de stockage définitif des déchets nucléaires, et des opérations de déclassement des centrales nucléaires.* L'une des méthodes consiste à exiger des exploitants des centrales nucléaires (ou des établissements producteurs de déchets) le versement d'une petite redevance, par kilowatt produit, visant à couvrir les dépenses en cours et prévues afférentes à l'aménagement, à l'exploitation et à la clôture des installations de stockage. Vu l'énorme quantité d'électricité produite, il semble que cette modeste imposition devrait suffire à financer les programmes nationaux de gestion et d'évacuation des déchets nucléaires. En valeur absolue, les prévisions globales de dépenses varient considérablement selon l'importance et les besoins du parc nucléaire du pays considéré. Dans la réalité, les coûts sont très modérés par rapport à la valeur totale de la production électrique. En pourcentage, ils se situent généralement entre 2 et 6% du prix de revient de l'électricité nucléaire, si l'on en juge par les études communiquées à l'AIEA et à l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (AEN/OCDE).

● *Le volume de déchets radioactifs ne fera que croître dans les prochaines années, tant dans les pays en développement que dans les pays industriels, à cause du développement continu de l'énergie nucléaire et du déclassement et démontage des réacteurs mis hors service.* Selon l'information communiquée à l'AIEA, il y avait, en octobre 1989, 531 réacteurs en exploitation

Roche synthétique

Dans une installation de démonstration de Lucas Heights, en Australie, une équipe de scientifiques procède à des essais avec une roche synthétique, le synroc, devant servir à la stabilisation des déchets de haute activité. Elle se compose de trois titanates et d'une faible proportion d'alliage métallique. Ces travaux permettront d'acquérir une expérience pratique de la fabrication de synroc non radioactif en assez grande quantité; il n'est pas prévu de construire en Australie une usine pour la fabrication de synroc radioactif. Cette installation permettra aussi d'obtenir l'information nécessaire à l'étude d'une usine de traitement des déchets radioactifs et de faire une étude des coûts de la fabrication de synroc radioactif.

Cette initiative a pour origine le fait avéré que certains minéraux naturels ont résisté pendant des millions d'années à des conditions géologiques extrêmes. Toutes les roches contiennent de petites quantités d'éléments radioactifs, tels l'uranium, le thorium et le potassium, qui se sont répartis parmi les minéraux coexistants sous forme de solutions solides très diluées. Plusieurs de ces minéraux, dont le zircon et le feldspath, ont la propriété de fixer de petites quantités de radioéléments pendant des millénaires. Les radioéléments contenus dans les déchets sont fixés de la même façon par le synroc, sous forme de solutions solides diluées dans les structures cristallines des minéraux présents*.

L'Australie mène cette étude en collaboration avec le Royaume-Uni, le Japon et l'Italie. Au Royaume-Uni, de petits spécimens de synroc contenant des déchets de haute activité ont été préparés et le Japon, qui dispose déjà d'échantillons de synroc, envisage de faire la même expérience. Les propriétés et le comportement de cette roche synthétique ont également été étudiés par des laboratoires du Canada, des Etats-Unis et de République fédérale d'Allemagne. En Australie, les travaux sont essentiellement menés par l'Organisation australienne de science et de technologie nucléaires (ANSTO) et par l'Université nationale australienne (ANU), où le synroc a d'ailleurs été inventé par le professeur A.E. Ringwood et son équipe dans les années 70.

Dans le cadre de ce projet national, les chercheurs de l'Université ont préparé du synroc contenant les radioéléments uranium et technétium et en ont étudié les propriétés. Ils ont également étudié la géologie, la cristallographie et la composition isotopique de minéraux naturels qui ont reçu de fortes irradiations cumulatives pendant de longues périodes géologiques et ont retenu des quantités mesurables d'éléments radioactifs. De son côté, ANSTO a préparé du synroc radioactif contenant, d'une part, des actinides et, d'autre part, des produits de fission résultant de la préparation d'isotopes à usage médical au centre d'études nucléaires de Lucas Heights; ils ont soumis ces spécimens à des épreuves de lixiviation, avec d'excellents résultats. Du synroc a également été irradié dans un flux de neutrons rapides du réacteur de recherche de ce centre. Selon le rapport des chercheurs d'ANSTO, les six mois d'épreuves ont représenté, en simulation, l'équivalent de 100 000 années de confinement de déchets de haute activité sans que le synroc subisse aucun dommage physique significatif ni perde sa résistance à la lixiviation.

* "Synroc", par A.E. Ringwood et S.E. Kesson, *Radioactive Waste Forms for the Future*, Elsevier Science Publishers B.V. (1988).

Perspectives

Déchets de faible et moyenne activité: procédés de traitement et systèmes de stockage définitif

	Procédés de traitement	Systèmes de stockage (pratiqués ou envisagés)
Argentine	incinération partielle	faible profondeur
Belgique	traitement, compactage et stockage	dépôt
Bésil	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	faible profondeur ou installation côtière
Bulgarie	traitement ou non, compactage et stockage	en surface/sous couverture
Canada	traitement ou non, compactage et stockage	faible profondeur; dépôt
Chine	traitement ou non, compactage et stockage; incinération partielle	faible profondeur
Cuba	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	en surface/sous couverture
Tchécoslovaquie	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	faible profondeur, dépôt
Finlande	traitement, compactage et stockage	dépôt
France	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	faible profondeur; en surface/sous couverture
République démocratique allemande	sans traitement, compactage et stockage; emballage et enfouissement	dépôt
République fédérale d'Allemagne	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	dépôt
Hongrie	traitement, compactage et stockage;	à faible profondeur
Inde	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	en surface/sous couverture
Italie	sans traitement, compactage et stockage	à faible profondeur
Japon	traitement, compactage et stockage	faible profondeur; études fond marin
République de Corée	traitement, compactage et stockage	faible profondeur; dépôt
Pays-Bas	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	dépôt
Roumanie	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	
Espagne	traitement, compactage et stockage	à faible profondeur
Suède	traitement, compactage et stockage; emballage et enfouissement	installation côtière
Suisse	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	dépôt
Royaume-Uni	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	faible profondeur; dépôt; études fond marin
Etats-Unis	traitement ou non, compactage et stockage; incinération partielle	faible profondeur; en surface/sous couverture
URSS	traitement, compactage et stockage; incinération partielle	en surface/ sous couverture
Yugoslavie		dépôt; en surface/sous couverture

ou en construction dans 31 pays. On comptait par ailleurs 356 réacteurs de recherche en service, en construction ou en projet, dans 67 pays; 239 autres unités étaient à l'arrêt à la fin de 1988. Ajoutons à cela une centaine d'installations nucléaires à divers stades de déclassement dans 17 pays.

A partir des données les plus récentes publiées par l'AEN/OCDE et par l'AIEA sur la puissance nucléaire installée, on a calculé les quantités de déchets à prévoir pour les années 1988, 1990, 1995 et 2005 (voir les figures page 10). Ces prévisions, fondées sur une durée utile moyenne des centrales fixée à 30 ans, ne sont qu'une approximation.

● *Les pays en développement se heurtent à d'autres problèmes — et ont par conséquent d'autres besoins immédiats — que les pays industriels en ce qui concerne les opérations courantes de manutention et de gestion des déchets radioactifs.* La raison en est que leurs programmes nucléo-énergétiques ne sont pas

encore très avancés ou viennent même tout juste de commencer, de sorte que leur expérience est réduite et leurs infrastructures industrielles et réglementaires ne sont pas encore en place dans la plupart des cas. Bon nombre de pays en développement n'ont pas de centrales nucléaires mais doivent néanmoins gérer des déchets provenant des applications des radio-isotopes dans l'industrie, en médecine, dans la recherche, etc. Pour les aider à résoudre leurs problèmes particuliers dans ce domaine, l'AIEA leur propose une assistance technique personnalisée sous forme de projets, de services d'experts, de facilités de formation et de matériel. (Voir dans ce numéro l'article intitulé "La gestion des déchets radioactifs dans les pays en développement".)

● *Dans de nombreux pays, la pression de l'opinion publique a fortement stimulé les progrès de la gestion des déchets radioactifs et l'on peut s'attendre qu'il en soit de même dans l'avenir.* Les scientifiques et les ingénieurs ne doutent pas que la technologie moderne

**Stockage définitif des déchets de haute activité et du combustible épuisé:
programmes d'études et réalisations**

	Etude de site	Choix du site	<i>Laboratoire de recherche souterrain</i>		Mise en service du dépôt (prévue)
			Construction	Recherche	
Argentine	■				
Belgique	■	■	■	■	
Bésil	■				
Canada	■		■	■	> 2020
Chine	■				
Finlande	■				
France	■	■			2009
République fédérale d'Allemagne	■	■	■	■	> 2000
Inde	■		■	■	
Japon	■	■			> 2020
Pays-Bas	■				
Espagne	■				2005-10
Suède	■	■			> 2020
Suisse	■	■	■	■	> 2020
Royaume-Uni	■				
Etats-Unis	■	■	■		2003
URSS	■				

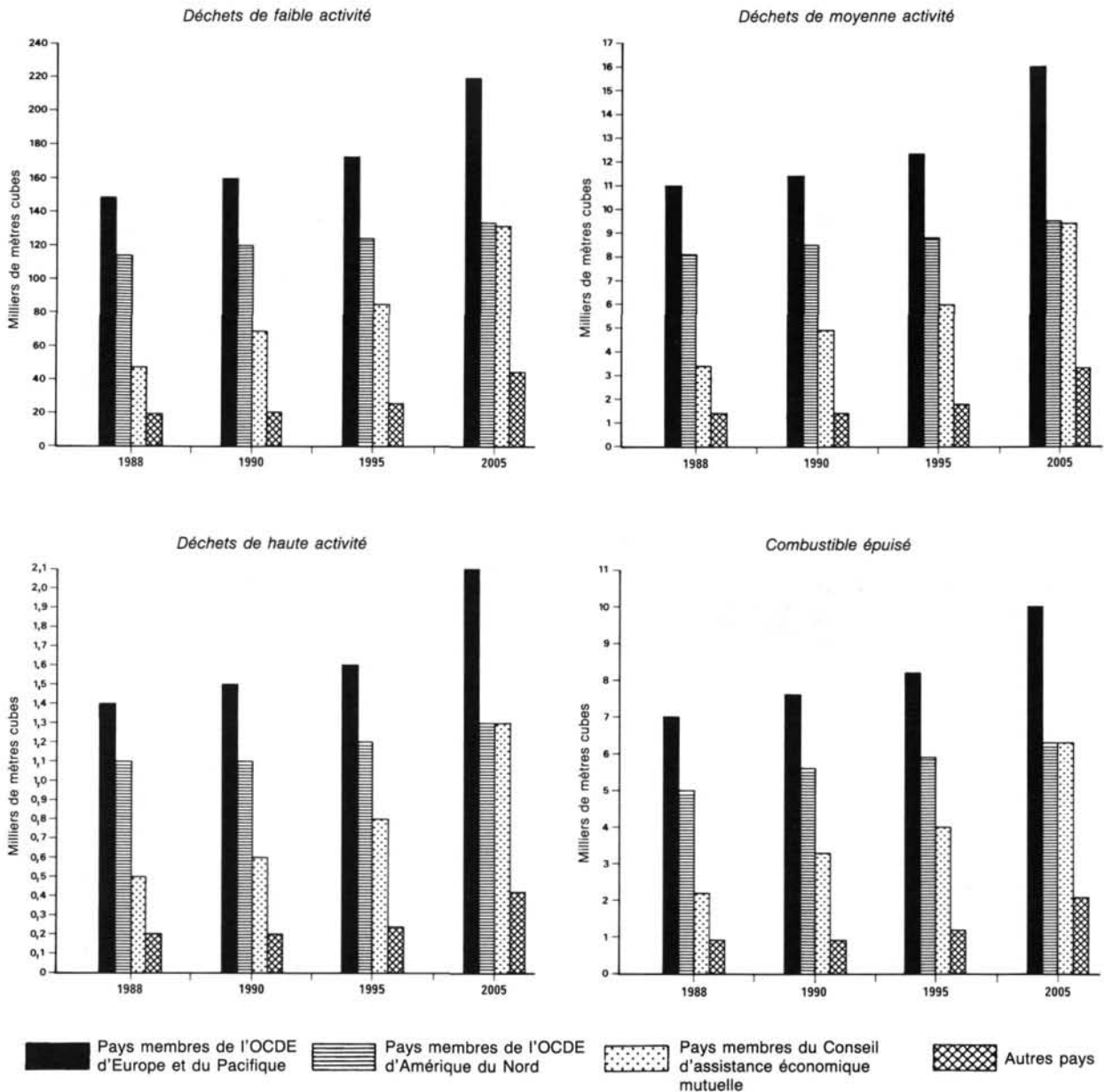
Note: La Bulgarie, Cuba, la Hongrie, la Pologne, la République démocratique allemande, la Roumanie et la Tchécoslovaquie renvoient le combustible épuisé au fournisseur étranger.

Plans de stockage définitif des déchets de haute activité et/ou du combustible épuisé

	Stockage en profondeur	Formation géologique	<i>Retraitement</i>		Forme finale des déchets
			National	Etranger	
Argentine	■	Granite	■		Blocs vitrifiés
Belgique	■	Argile		■	Blocs vitrifiés
Bulgarie				■	
Canada	■	Granite			Châteaux de combustible épuisé
Chine	■		■		Blocs vitrifiés
Cuba				■	
Tchécoslovaquie				■	
Finlande	■	Granite		■	Blocs vitrifiés
France	■	Argile, sel granite, schiste	■	■	Blocs vitrifiés
République démocratique allemande				■	
République fédérale d'Allemagne	■	Sel		■	Blocs vitrifiés
Hongrie				■	
Inde	■	Granite	■		Blocs vitrifiés
Italie	■	Argile ou roche cristalline		■	Blocs vitrifiés
Japon	■	Granite, tuf, schiste	(1992) ■	■	Blocs vitrifiés
Pays-Bas	■	Sel, argile		■	Blocs vitrifiés
Pologne				■	
Roumanie				■	
Espagne	■	Sel, argile, roche cristalline		■	Blocs vitrifiés et châteaux de combustible épuisé
Suède	■	Granite			Châteaux de combustible épuisé
Suisse	■	Granite, roche sédimentaire		■	Blocs vitrifiés et châteaux de combustible épuisé
Royaume-Uni	■		■	■	Blocs vitrifiés
Etats-Unis	■	Tuf			Châteaux de combustible épuisé
URSS	■	Sel, roche cristalline	■	■	Blocs vitrifiés

Note: Aucun Etat Membre n'a choisi un site de dépôt pour le stockage définitif des déchets de haute activité ou du combustible épuisé. Les formations géologiques indiquées sont à l'étude en elles-mêmes et/ou pour déterminer les caractéristiques des sites. La Bulgarie, Cuba, la Hongrie, la Pologne, la République démocratique allemande, la Roumanie et la Tchécoslovaquie renvoient le combustible épuisé au fournisseur étranger.

Prévision de la production de déchets des centrales nucléaires



Sources: AEN/OCDE, AIEA

soit capable d'assurer le stockage définitif des déchets nucléaires dans des conditions de sûreté, mais le public n'en est pas toujours aussi certain. Comme l'a rappelé M. Hans Blix, directeur général de l'AIEA, ce qu'il faut dans de nombreux pays, c'est faire mieux comprendre les techniques proposées et préciser leurs caractéristiques de sûreté. Il est d'ailleurs fort probable, a-t-il ajouté, qu'une campagne éducative demande plus d'efforts que les réalisations des ingénieurs. Les programmes d'information et de vulgarisation, tant nationaux qu'internationaux, se sont multipliés au cours des quelques dernières années et de nombreuses organisations étudient les moyens d'atteindre le public et de

l'éduquer. C'est ainsi que l'AIEA prépare actuellement une brochure reprenant les principaux sujets de préoccupation du public relatifs à la gestion et au stockage des déchets. Cette publication donnera un aperçu des méthodes appliquées dans certains pays pour régler la question des déchets nucléaires, pour communiquer avec le public, et pour élaborer et mettre en œuvre les directives. Son but est de présenter aux autorités nationales un choix de problèmes types, avec les préoccupations qu'ils suscitent et les solutions possibles.

● *La coopération internationale et les échanges entre les programmes nationaux et les organisations internationales continuent de jouer un rôle très utile pour*

toutes les parties intéressées. Les études en commun, les groupes de travail spéciaux et les projets coopératifs financés par des organismes nationaux et internationaux se multiplient à mesure que l'on se rend compte du grand intérêt des initiatives communes. Des organisations internationales telles que la Commission des Communautés européennes (CCE), l'AIEA et l'AEN/OCDE ont financé diverses études des aspects techniques et environnementaux de la gestion des déchets et y ont participé. Des études en commun, tel le projet Stripa, en Suède, continuent de fournir d'intéressantes données à leurs participants et enrichissent leur expérience. Plusieurs initiatives concernant l'environnement sont à l'étude ou déjà lancées sous l'égide des trois organisations.

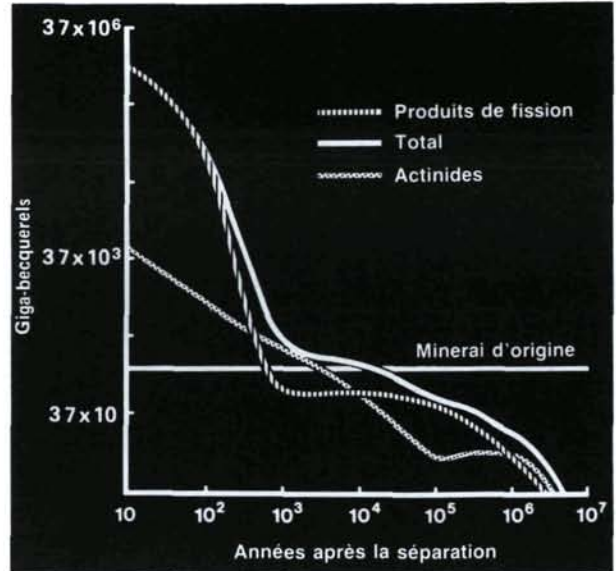
Stratégies de gestion des déchets radioactifs

Déchets de faible et moyenne activité. La plupart des stratégies nationales prévoient un traitement et un conditionnement de ces deux catégories de déchets. Au cours des dernières années, de nombreux pays ont mis en œuvre des projets et entrepris des études pour mettre au point des techniques permettant de réduire sensiblement la production de déchets et de réduire aussi le volume de ceux-ci une fois produits. Après traitement et conditionnement, les déchets sont généralement emballés et déposés dans une installation de stockage spécialement conçue (par exemple, enfouissement dans le sol à faible profondeur et dans des tranchées bétonnées).

Plusieurs pays disposent déjà de ce genre d'installation pour les déchets de faible et moyenne activité. La République démocratique allemande, par exemple, a mis en service dès 1978 un dépôt pour le stockage des déchets de son réacteur. La Suède a terminé en 1988 l'aménagement d'un dépôt sous la mer Baltique, près de Forsmark. D'autres pays ont prévu des installations de stockage en surface ou à faible profondeur.

Combustible épuisé et déchets de haute activité. Le combustible épuisé est d'abord déposé provisoirement dans des bassins de désactivation remplis d'eau spécialement aménagés sur le site même des réacteurs, où il perd une grande partie de sa radioactivité. Il arrive fréquemment que le combustible épuisé soit ensuite stocké dans des dépôts centraux provisoires ou dans les installations de retraitement. La durée de ce stockage provisoire varie d'un pays à l'autre. En général, le combustible épuisé est stocké pendant cinq à dix ans avant son retraitement. Quant au stockage définitif des déchets de haute activité ou du combustible épuisé, il intervient en moyenne dans les 20 à 50 ans. L'intérêt technique de la décroissance radioactive pendant le stockage est de faciliter la manutention et l'élimination des déchets; elle est plus rapide pendant les premières années (voir le graphique).

Dans plusieurs pays, il existe déjà, ou il existera bientôt, des installations centrales de stockage du combustible épuisé situées loin des réacteurs. Cette solution est adoptée soit pour mieux intégrer la gestion du combustible avant son retraitement ou son évacuation, soit à cause du manque de place pour son stockage provisoire sur le site du réacteur. Dans quelques pays, les centrales nucléaires ont de sérieux problèmes de stockage. Selon les études faites par l'AIEA et



La radioactivité des déchets fortement radioactifs décroît constamment dans le temps, plus spectaculairement pendant les premières centaines d'années. Leur niveau d'activité finira par être inférieur à celui du minerai d'uranium naturel qui est à l'origine du combustible épuisé. Le graphique représente les niveaux d'activité des déchets correspondant à une tonne de combustible.

Le becquerel est l'unité internationale de désintégration spontanée des radioéléments, avec émission d'énergie. Un becquerel correspond à la désintégration d'un atome par seconde. Le curie est aussi parfois utilisé comme unité de radioactivité, il équivaut à 37 giga-becquerels.

l'AEN/OCDE, environ 200 000 tonnes de combustible épuisé de réacteurs à eau légère se seront accumulées d'ici à l'an 2000 dans le monde entier*.

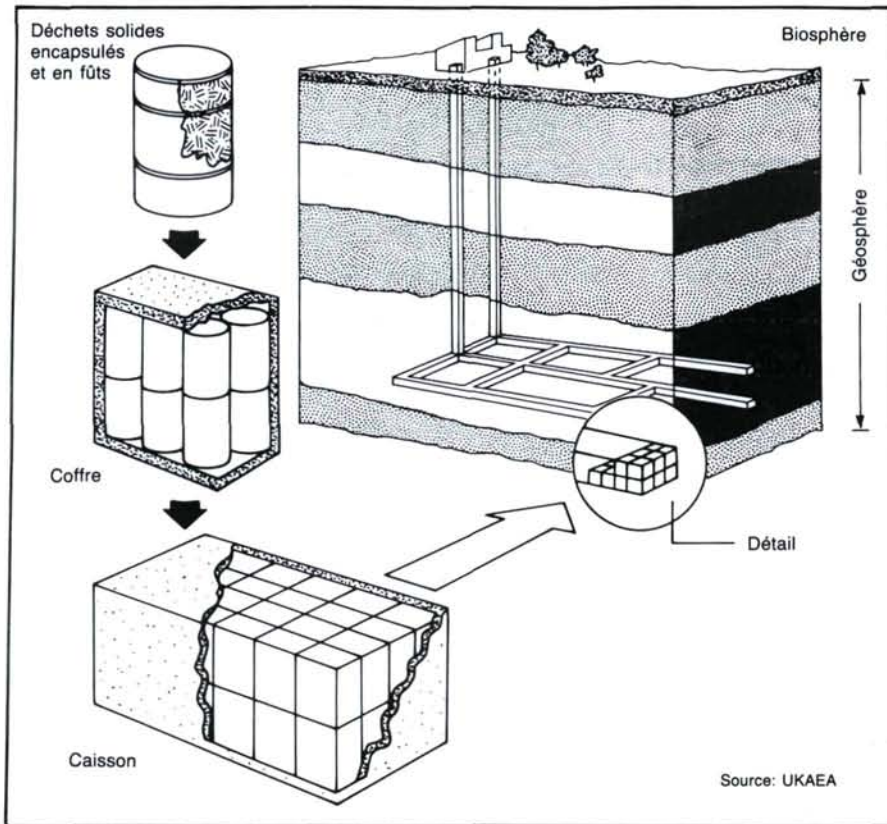
Des installations de retraitement du combustible épuisé sont actuellement en service ou en construction dans neuf pays, et 11 pays font ou feront bientôt traiter leur combustible épuisé à l'étranger. Environ la moitié des Etats Membres dotés d'un parc nucléaire envisagent de retraiter leur combustible épuisé, opération qui permet d'extraire l'uranium et le plutonium contenus dans les produits de fission, en vue d'une réutilisation.

Dépôt des déchets de haute activité dans des formations géologiques profondes — principes et justification. Pourquoi cette solution? Nombre de scientifiques considèrent que c'est actuellement la meilleure option de stockage définitif des déchets de haute activité dont on dispose, le but recherché étant d'isoler les déchets radioactifs de l'environnement humain pendant suffisamment longtemps et dans les meilleures conditions pour qu'aucun dégagement ultérieur de radionucléides à partir des déchets déposés ne puisse impliquer des risques radiologiques inacceptables, même à longue échéance**.

On peut y parvenir grâce à des systèmes à structures multiples dans lesquels l'emballage des déchets (forme des déchets, conteneur et couverture de stockage), les autres barrières artificielles ainsi que l'emplacement

* Nuclear power and fuel cycle: Status and trends, dans le IAEA Yearbook 1989, Part C, AIEA, Vienne (1989).

** Recherches et études in situ dans les pays de l'OCDE, AEN/OCDE, Paris (1988).



Système à barrières multiples pour le stockage des déchets de faible et moyenne activité dans les couches géologiques profondes.

et ses caractéristiques particulières (géologie, hydrogéologie, etc.) sont autant d'obstacles au dégagement et au transport des radionucléides. L'emballage bien étudié des déchets de longue période et leur mise en place en profondeur dans des formations géologiques stables assurent la stabilisation et l'isolement du contenu, tandis que la décroissance des nucléides ramène la radioactivité à des niveaux faibles ou même négligeables. Il est entendu que les risques radiologiques pour la génération actuelle et les générations futures doivent être maintenus à de très bas niveaux compatibles avec les règles de sûreté nationales et internationales.

On s'attend que la démonstration du stockage définitif, à l'échelle industrielle, de déchets de haute activité ou de combustible épuisé préalablement conditionnés se fera dans les 10 à 15 prochaines années. En attendant, on procèdera à des analyses et à des essais de plus en plus poussés pour mieux connaître le comportement à long terme des déchets sous différentes formes, de leur confinement et du site choisi.

Etude de sites de stockage souterrain. Dans les laboratoires de recherche souterrains de Belgique, du Canada, des Etats-Unis, d'Inde, de République fédérale d'Allemagne, de Suède et de Suisse, scientifiques et ingénieurs étudient les propriétés de sites possibles dans des formations de sel, d'argile, et de roches cristallines et autres. Quelques équipes ont déjà placé des éléments très radioactifs dans des trous de sonde pratiqués dans des excavations souterraines et les y ont laissés pendant un certain temps pour démontrer la validité des techniques actuelles. Dans plusieurs pays, des installations d'essai sont à l'étude ou en cours d'aménagement sur le site de dépôts éventuels. Quelques-uns de ces pays

participent aux travaux du premier laboratoire souterrain international installé dans la mine de Stripa, mis en service en 1978. Le projet Stripa, déjà bien avancé dans la seconde année de la troisième tranche de ses travaux, doit maintenant aborder les méthodes d'étude des sites, les techniques géophysiques, la modélisation des réseaux, les phénomènes de cheminements préférentiels et le colmatage des fractures des masses rocheuses*.

Etude d'analogues: laboratoires naturels. Une des opérations les plus spécifiques et scientifiquement complexes de l'évaluation de la sûreté des dépôts de déchets de haute activité consiste à projeter à long terme les résultats obtenus à court terme en laboratoire. L'étude des analogues naturels est peut être encore le meilleur moyen de se faire une idée de l'effet cumulatif de la migration des radionucléides pendant des dizaines de millénaires.

Plusieurs organisations nationales et internationales collaborent à diverses études d'analogues naturels: le gisement d'uranium de la région des Alligator Rivers du Territoire du Nord, en Australie; le gisement d'uranium de Cigar Lake dans le Nord du Saskatchewan, au Canada, où l'on s'intéresse tout spécialement aux facteurs qui ont influé sur la migration des radionucléides dans la roche hôte et assuré la conservation du gisement d'uranium pendant 1,3 milliard d'années dans un milieu relativement ouvert et saturé d'eaux souterraines; le gisement de thorium proche de Poços de Caldas, au Brésil, qui fait l'objet d'études approfondies;

* Voir l'article "Les politiques et programmes de gestion des déchets" dans le *Bulletin des déchets nucléaires* n° 2, AEN/OCDE, Paris (1988).

Code de bonne pratique sur les transactions internationales concernant les déchets radioactifs

Préoccupée par la nouvelle que des résidus toxiques avaient été déversés sur le territoire de pays en développement, la Conférence générale de l'AIEA a adopté, à sa trente-deuxième session ordinaire de septembre 1988, une résolution demandant que soit rédigé un code de bonne pratique sur les transactions internationales concernant les déchets radioactifs. Ce code est destiné à aider les gouvernements à prévenir les transactions illicites portant sur des déchets radioactifs et leur élimination.

En application de cette résolution, l'AIEA a réuni à Vienne, en mai 1989, un groupe d'experts représentant 20 Etats Membres et trois organisations internationales. Un certain nombre de principes fondamentaux étaient à l'ordre du jour: il fallait notamment s'assurer que toutes les transactions internationales portant sur des déchets

radioactifs s'effectuent avec le consentement exprès des pays intéressés, dans le respect de leurs lois et règlements et conformément aux normes de sûreté acceptées à l'échelon international; de plus, aucun déchet radioactif ne devrait être exporté vers un pays incapable techniquement ou administrativement d'en assurer la gestion et le stockage définitif dans des conditions de sûreté; enfin, le transport international de ces déchets devrait se faire conformément aux règles et normes généralement acceptées.

Le groupe d'experts mettra la dernière main au projet de code lors de sa prochaine réunion, en janvier 1990, en vue de le soumettre pour approbation au Conseil des gouverneurs et à la Conférence générale de l'AIEA, en septembre 1990. — P.L. De, *Division du cycle du combustible nucléaire et de la gestion des déchets.*

et le site du laboratoire naturel d'Oklo, au Gabon, où les chercheurs ont pu obtenir une information très intéressante pour le stockage à long terme des déchets radioactifs.

Immersion en mer des déchets de faible et moyenne activité. L'évacuation en mer de colis de déchets solides de faible activité peut, dans certains cas, remplacer leur stockage définitif terrestre. A l'étude depuis 1949, et régulièrement pratiquée par plusieurs pays, l'immersion dans l'océan de certains déchets radioactifs sous emballage reste à l'état de projet dans certains autres pays. Par ailleurs, en vertu de la Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets et autres matières (dite Convention de Londres), signée en 1972, les parties contractantes sont convenues de recommander la suspension des immersions de déchets radioactifs en attendant que certaines questions soient élucidées. (Voir dans le présent Bulletin l'article sur l'immersion des déchets radioactifs dans l'océan.)

Dans le cadre de cette convention, l'AIEA a établi la définition des déchets fortement radioactifs impropres à l'immersion. Elle a également formulé des recommandations à l'adresse des parties à la Convention sur les quantités et la nature des matières qu'il est permis d'évacuer en mer. La définition est périodiquement revue de façon à tenir compte de l'évolution de la radio-

protection, des progrès de la modélisation de l'océan et de nos connaissances sur l'impact de l'immersion sur les espèces marines. Ces activités réunissent des experts de divers pays et de diverses disciplines et permettent de recueillir les avis de maintes organisations.

L'avenir

En résumé, le temps qu'il a fallu, et qu'il faudra encore, pour élaborer, présenter et mettre en œuvre des options sûres et permanentes de stockage des déchets radioactifs donne la mesure des difficultés de cette tâche et de son importance du point de vue de l'environnement, notamment en ce qui concerne la santé et la protection du public. Or, les problèmes ne sauraient faire obstacle au progrès. Selon les spécialistes, les moyens techniques de gestion et de stockage définitif des déchets existent déjà et on peut en faire la démonstration. Ce qui reste à résoudre pour aller de l'avant, ce sont les problèmes d'ordre institutionnel et de caractère socio-politique. Aussi les autorités nationales et internationales qui s'occupent de la gestion des déchets doivent-elles continuer de mettre à profit le vaste acquis commun, tant technologique qu'institutionnel, pour exécuter leurs programmes. A tous égards, une coopération internationale active demeure indispensable au progrès.

