

# Stockage prolongé et définitif du combustible irradié

par Alexandre Netchaïev, Vladimir Onufriev  
et K.T. Thomas

Chacun sait que le combustible irradié et les déchets de haute activité vitrifiés sont fortement radioactifs et que leur décroissance produit beaucoup de chaleur. En conséquence, les éléments combustibles irradiés doivent être stockés sous refroidissement avant toute autre opération. La chaleur de décroissance baisse assez rapidement avec le temps; la radioactivité induite diminue plus lentement et la plupart des produits de fission du combustible irradié décroissent jusqu'à des niveaux acceptables en quelque 300 à 1000 ans.\*

Les principaux isotopes du plutonium, de l'américium, du neptunium, de l'iode, du technétium et les descendants de l'uranium restent radioactifs pendant plusieurs millions d'années. Or, la radiotoxicité est un problème surtout pendant les 10 000 premières années environ. L'effet des précautions prescrites pour les installations aménagées en surface ne dure pas aussi longtemps, à l'inverse des processus géologiques. C'est ce qui fait l'attrait du stockage du combustible irradié dans des formations géologiques.

Quelle que soit la stratégie adoptée pour la phase terminale du cycle du combustible, le stockage prolongé du combustible irradié joue un rôle très important dans

l'ensemble du système de gestion. Il faut prévoir la manutention des éléments combustibles irradiés, ainsi que leur emballage et peut-être aussi la consolidation des barreaux dans les installations de stockage prolongé. On peut aussi envisager le stockage définitif en conteneurs après stockage prolongé et sans réemballage.\*

## Les problèmes actuels du stockage

On n'envisage aujourd'hui que deux solutions définitives en ce qui concerne la phase terminale du cycle du combustible nucléaire: le retraitement (immédiat ou différé) et le stockage définitif direct du combustible irradié ou des déchets radioactifs. Dans un cas comme dans l'autre le stockage — de courte ou de longue durée — du combustible irradié est nécessaire (voir le graphique à la page 17 récapitulant les options).

Les études faites par l'AIEA et par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (AEN/OCDE) ont montré que d'ici à l'an 2000, il faut prévoir 200 000 tonnes environ de métal lourd (U) provenant des réacteurs refroidis à l'eau du monde entier. On n'en retirera pas plus du quart.\*\*

M. Netchaïev est Chef de la Section des matières nucléaires et de la technologie du cycle du combustible, dont M. Onufriev fait partie. M. Thomas appartient à la Division du cycle du combustible nucléaire.

\* Pour plus de détails techniques, voir *Guidebook on Spent Fuel Storage*, AIEA, Collection Rapports techniques n° 240, Vienne (1984); et «Characterization of Long-Lived Radioactive Wastes to be Disposed in Geological Formations», par W. Boeola, Document de travail SCK, CEN, Mol (Belgique) (1983).

\* Voir dans *Nuclear Fuel* (28 janvier 1985) l'article sur la proposition du Département de l'énergie des Etats-Unis concernant le rôle futur d'une installation de stockage surveillée récupérable dans la gestion des déchets.

\*\* Voir «Rapport final du Groupe de travail sur la gestion internationale du combustible irradié» AIEA Reg. ISFM/EG/26 (1982) et *Summary of Nuclear Power and Fuel Cycle Data*, OCDE (1985).

Au cours des années 1990, certaines centrales connaîtront une pénurie de capacité de stockage, bien que celle des installations existantes, commandées et projetées dans le monde entier (sur le site ou à l'extérieur du réacteur) dépasse les livraisons annuelles de combustible non retraité.\*

Ce problème de stockage se pose parce que les centrales nucléaires existantes ont été conçues pour stocker le combustible irradié pendant trois à cinq ans environ de la vie du réacteur, afin de permettre au combustible déchargé de refroidir avant d'être transporté à l'installation de retraitement. On recherche aujourd'hui le meilleur moyen d'augmenter les capacités de stockage en raison des retards dans la construction à l'échelle industrielle de réacteurs surgénérateurs rapides, du coût élevé du retraitement et de la surproduction d'uranium.

### Les solutions possibles du problème du stockage

Il y a plusieurs moyens de résoudre le problème ou d'en différer la solution:

- *Transporter le combustible irradié* du bassin de stockage du réacteur, lorsqu'il est plein, jusqu'à un emplacement libre du ressort de l'exploitant. Aux Etats-Unis, cette méthode pourrait réduire, de 43% environ, la capacité totale nécessaire d'ici à 1998.\*\* Elle pourrait toutefois entraîner des investissements supplémentaires dans des châteaux de transport, et créer quelques difficultés en matière de réglementation et de permis d'exploitation. Ce choix ne pourrait que retarder le moment d'une décision définitive. Les frais seraient de 10 à 40 dollars US par kilo d'uranium, selon la distance.\*\*\*
- *Augmenter la capacité des bassins existants auprès des réacteurs* en resserrant les rateliers et en consolidant les barreaux. Les rateliers resserrés et doublés ont fait leurs preuves, mais des travaux supplémentaires de recherche et développement seraient nécessaires pour obtenir l'homologation complète de la consolidation des barreaux. Les frais seraient de 10 dollars environ par kilo d'uranium.\*\*\*\* Cette méthode pourrait elle aussi retarder le moment d'une décision définitive sur le stockage prolongé.
- *Construire de nouvelles installations de stockage loin du site du réacteur* pour centraliser le combustible irradié pendant 50 ans ou davantage jusqu'à ce que l'on puisse le stocker définitivement ou le retraiter. Ce serait peut-être la seule possibilité de stocker le combustible irradié quand les bassins des centrales seront pleins,

\* Ce qu'a montré en 1982 une étude du Groupe d'experts de l'AIEA sur la gestion internationale du combustible irradié, confirmée par la suite dans «Status of spent-fuel management in Canada», par D.R. McLean, F.N. McDonnell et autres, communication à la réunion du groupe consultatif de l'AIEA sur la gestion du combustible irradié, tenue à Vienne en mars 1984.

\*\* Voir «Utilities face squeeze in spent nuclear fuel storage space» par E. Anderson, *Chemical and Engineering News*, (1er avril 1985).

\*\*\* Voir «Choosing a spent-fuel storage technology», par E.R. Johnson, *Nuclear Engineering International* (septembre 1984).

\*\*\*\* Voir *Status of Spent-Fuel Dry Storage Concepts: Concerns, Issues, and Developments*, TECDOC-359 (1985).

avant de l'envoyer au retraitement ou au stockage définitif. Mais la construction d'une telle installation prend du temps — au moins dix ans — et coûte cher.

### L'expérience du stockage prolongé

On a le choix entre deux modes de stockage prolongé du combustible irradié:

- *Le stockage humide*, qui a fait ses preuves pour le stockage du combustible à l'oxyde. On a stocké avec succès, pendant plus de 20 ans, des combustibles de réacteurs à eau, sous gaine de zircaloy ou d'acier inoxydable dans des bassins, sans corrosion ni dégagement de gaz de fission de quelque importance. On ne prévoit pas d'inconvénients graves à prolonger le stockage jusqu'à 50 ans.
- *Le stockage à sec*, qui consiste à conserver le combustible irradié dans une atmosphère d'air, de gaz inerte ou de gaz carbonique. Cette technique est en train de faire ses preuves. Certes, on n'en possède encore que peu d'exemples, mais des calculs effectués en République fédérale d'Allemagne ont montré que le combustible irradié pouvait sans danger être stocké en atmosphère de gaz inerte pendant 40 à 50 ans. On envisage aussi un stockage sous ventilation par l'air, mis au point au Canada et aux Etats-Unis, qui durerait au moins 40 à 50 ans. Avec cette méthode, la température maximale des gaines des barreaux de combustible au moment de leur mise en place dans l'entrepôt ne devrait pas excéder 175°C. La température admissible des gaines en zircaloy, au moment du stockage sous gaz inerte, est de 400°C environ.\* Cela signifie que si l'on stocke sous ventilation par l'air, il faut d'abord stocker en bassin ou sous gaz inerte, afin de laisser baisser la température des gaines de combustible jusqu'aux niveaux voulus.

La principale différence entre installations de stockage humide et à sec est que ces dernières ont une structure modulaire et peuvent donc être agrandies en cas de besoin.

De nombreux pays Membres, dont le Canada, la Finlande, l'Italie, la Suède, le Royaume-Uni, les Etats-Unis et l'URSS étudient la conception, la construction et l'homologation des installations de stockage séparées du réacteur. Des installations centralisées de stockage prolongé du combustible irradié sont en service en Suède et en République fédérale d'Allemagne. Plusieurs pays ont annoncé leur intention d'en construire (voir le tableau joint).

Il est assez difficile de comparer les coûts des divers modes de stockage prolongé par voie humide (bassins) et à sec (fûts métalliques, fûts enrobés de béton, casemates, puits secs) parce que les facteurs varient selon les pays. Pour un stockage de 40 ans, les estimations vont de 45 à 220 dollars pour les installations à bassin et de 33 à

\* Voir «Experience in the Safety Evaluation of Dry Spent-Fuel Storage Casks in the Federal Republic of Germany» par B. Droste; «Interim Dry Spent Fuel Storage — Experience from Safety Analyses in the Atomic Licensing Procedures», par A. Müller; et «Heat Removal from Dry Stored Spent-Fuel Elements», par M. Neumann, communications au Comité technique de l'AIEA sur les méthodes de conception des installations de stockage humide ou à sec du combustible irradié, réuni à Espoo (Finlande), du 30 septembre au 3 octobre 1985 (publication prévue).

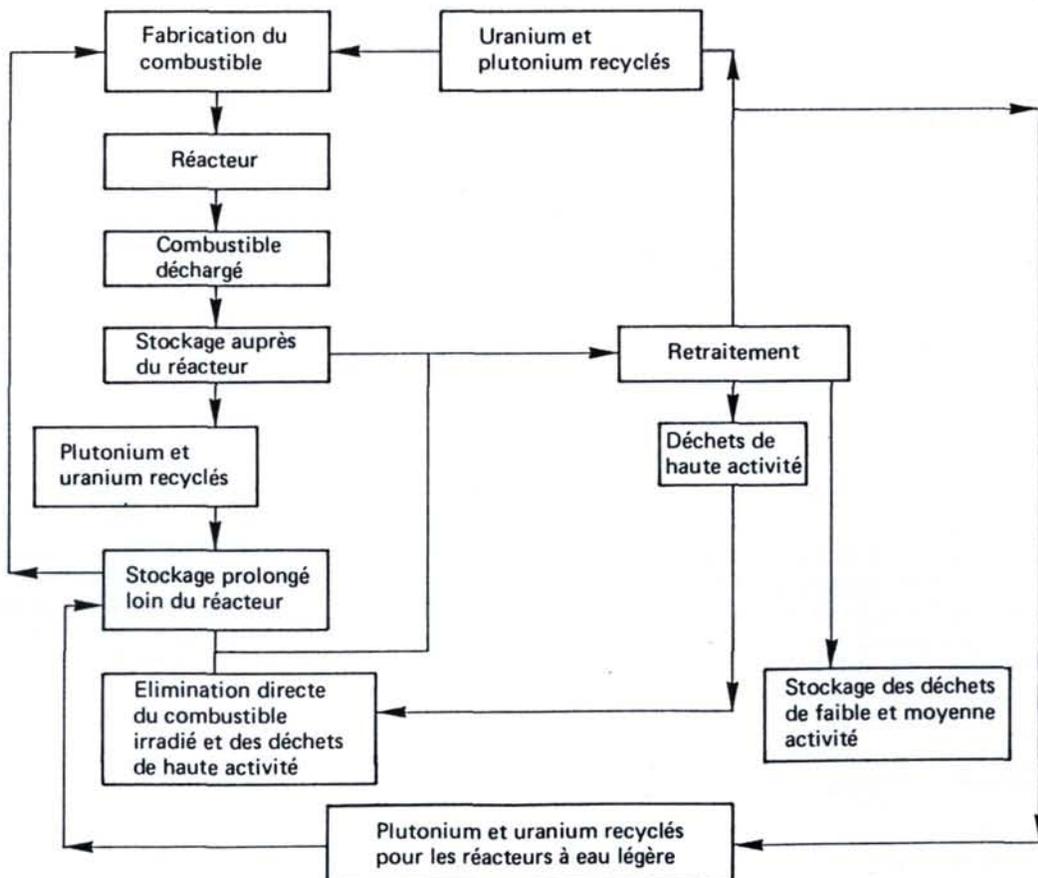
## Gestion des déchets radioactifs

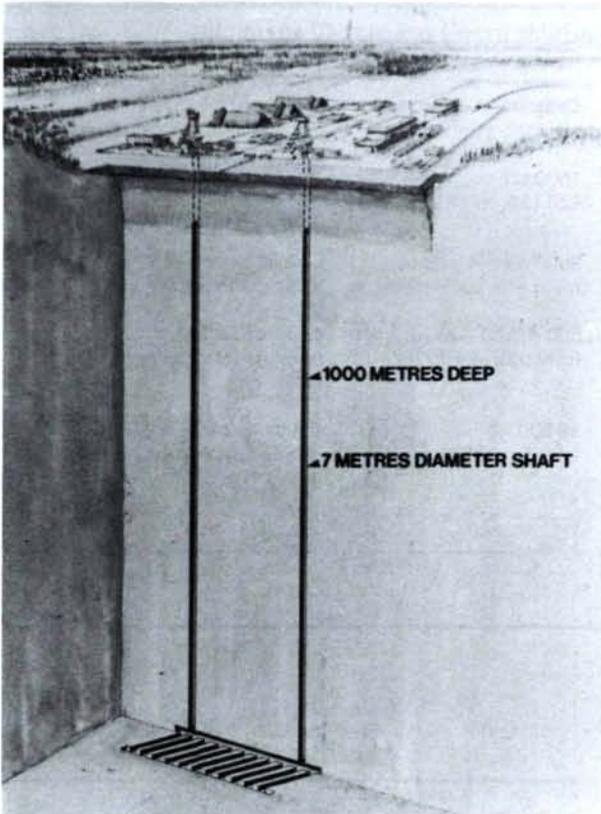
### Installations indépendantes du réacteur pour le stockage du combustible irradié pendant 40 ans et plus

Pays	Désignation	Type d'installation	Capacité*	Situation
Rép. féd. d'Allemagne	Gorleben	Stockage à sec en fûts (type castor)	1500 tU (420 fûts ou plus)	Gorleben: permis d'exploiter reçu en septembre 1983 Ahaus: en construction
	Ahaus			
Suède	CLAB	Bassins souterrains	3000 dans 4 bassins (peut être augmentée)	Opérationnelle le 11 juillet 1985 (6,5 tU admises)
Finlande	TVO-KPA-STORE	Bassins souterrains	600 dans 3 bassins (sera portée à 1270)	en construction (sera opérationnelle en 1987-88)
Etats-Unis	MRS	Stockage à sec en conteneurs scellés placés dans des conteneurs ou des puits secs	15 000	site en cours de définition (mise en service en 1996)

\* tU = tonnes d'uranium

### Solutions possibles pour la phase terminale du cycle du combustible





Un des systèmes d'élimination du combustible irradié.  
Le puits a 1000 mètres de profondeur et sept mètres de diamètre.  
(Dessin: US DOE)

83 dollars pour le stockage à sec (dollars US de 1984 par kilo d'uranium).\*

D'après l'expérience acquise dans la conception, la construction et l'homologation des premières installations indépendantes du réacteur, on a notamment tenu compte des facteurs suivants: volume accumulé du combustible irradié et sa dynamique; conditions climatiques et sismiques; existence de capacités et d'infrastructures industrielles du pays; acceptation par le public; disponibilité de données pour les rapports de sûreté.

### Stockage géologique

Pour choisir les modes appropriés de stockage géologique, on étudie les propriétés hydrogéologiques, géochimiques, minéralogiques et thermomécaniques, la résistance et la stabilité des formations. On peut envisager des matériaux très divers au sein de plusieurs sortes de milieux géologiques, à condition de concevoir et de construire les installations de façon appropriée.

Les formations géologiques qui peuvent se prêter à l'installation de dépôts sont classées en trois groupes: les évaporats (tel le sel), les roches sédimentaires et les roches ignées et cristallines métamorphiques.

\* Voir «Storage of Spent Fuel: Experience and Trends», par A. Netchaïev et V. Onufriev, communication au 6ème colloque CAEM sur les recherches concernant le retraitement du combustible irradié et la décontamination des déchets radioactifs réuni à Pestany (Tchécoslovaquie) en mars 1985.

- *Sel gemme (halite)*. C'est cet évaporat très commun qui a le plus retenu l'attention. Il possède de bonnes propriétés et est très répandu sous forme de dépôts intacts au sein de formations géologiques, ce qui atteste sa stabilité pendant des centaines de millions d'années. On le trouve sous forme de couches ou de vastes dômes soulevés par diapirisme. Sa forte plasticité le rend pratiquement imperméable aux gaz et aux liquides. Il se caractérise aussi par sa bonne résistance à la compression, sa bonne conductivité thermique et se laisse facilement creuser. Les inconvénients possibles sont: l'existence de poches captives de saumure et les inclusions de fluides susceptibles de migrer dans certaines conditions thermiques; la probabilité d'interactions nuisibles entre conteneur et roche; le faible pouvoir de sorption; l'éventualité de mouvements du sel (diapirisme); l'éventuelle recherche par l'homme de sel et de substances associées au voisinage du dépôt de déchets; la forte solubilité du sel dans l'eau.

- *Anhydrite (sulfate de calcium)*. On n'étudie à l'heure actuelle que les anhydrites en couches épaisses en massifs, à profondeur moyenne.

- *Formations argileuses*. Elles présentent généralement une très faible perméabilité, un bon pouvoir de sorption et une faible solubilité. Les inconvénients possibles sont: la déshydratation sous contrainte thermique; la faible conductivité thermique et ses effets nuisibles sur les propriétés mécaniques de la roche; la présence de matières organiques et de gaz; l'existence d'inhomogénéités; la difficulté qu'il peut y avoir à creuser et à maintenir ouvertes les excavations.

- *Roches ignées et métamorphiques*. Elles sont considérées par certains pays comme des candidates de choix à l'aménagement de dépôts de déchets radioactifs en profondeur. Elles possèdent généralement une stabilité durable, une forte résistance, une bonne stabilité chimique, une assez bonne conductivité thermique et une faible porosité. Dans certains pays, elles offrent aussi l'avantage de se présenter fréquemment en formations massives et homogènes de valeur économique faible ou nulle. Ces roches ont tendance à être cassantes ou peu plastiques aux profondeurs envisagées pour les dépôts, et peuvent par conséquent présenter des fissures ou autres ouvertures secondaires, ce qui entraîne ordinairement la présence d'eau souterraine dans les espaces secondaires ainsi créés. La présence d'inhomogénéités — dues en grande partie à la nature, à l'orientation et aux dimensions de la fracturation — rend difficile l'établissement de modèles hydrogéologiques.

D'autres roches ignées présentent un intérêt particulier: ce sont le basalte et les tufs volcaniques. Le basalte se présente surtout en vastes plateaux massifs relativement jeunes, dans des régions continentales. Il possède une conductivité thermique modérée et sa température de fusion est très élevée. Il présente aussi une très forte résistance à la compression mais on y constate d'ordinaire des joints colonnaires crevassés ou verticaux. Lorsqu'il est massif, le basalte est très imperméable; lorsqu'il présente des fissures et des joints il peut laisser passer d'assez grandes quantités d'eau. Sa capacité d'échange ionique est faible, à moins qu'elle ne soit modifiée en partie par la présence de minéraux secondaires, plus aptes à la sorption.

Des recherches sont en cours sur deux sortes de tuf, le soudé et le zéolithique. De nombreux dépôts de tuf contiennent des minéraux résultant d'altérations telles les argiles et les zéolithes très aptes à la sorption que l'on rencontre tant dans la roche mère que le long des fissures primaires et secondaires. Généralement très poreux, les tufs contiennent d'assez grandes quantités d'eau.

### Evaluation de la sûreté à long terme

Pour choisir un site de dépôt géologique, il faut tenir compte des effets thermo-mécaniques possibles; des effets sur l'émission et l'écoulement des fluides; des effets sur les matériaux-tampon et de remblayage; des effets géochimiques et de la charge thermique.

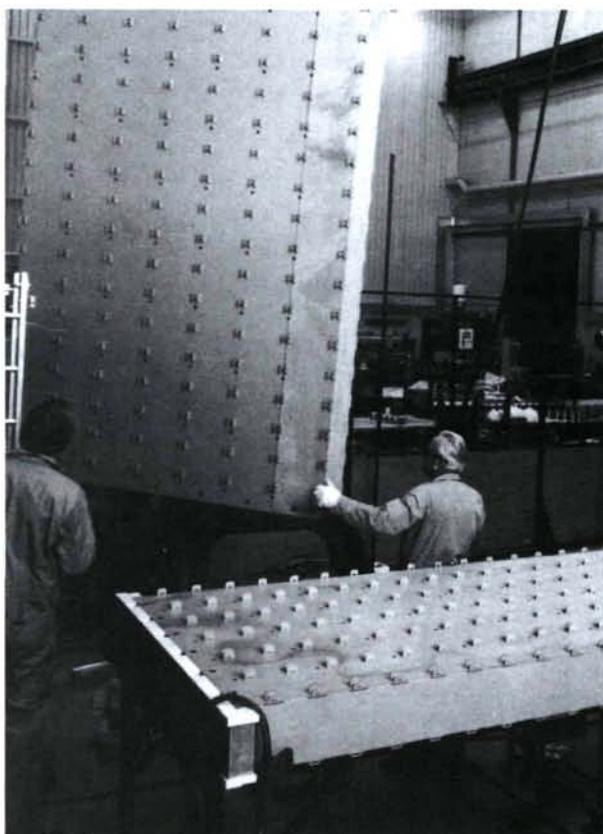
Le stockage intermédiaire prolongé du combustible irradié facilite l'abaissement de la température, ce qui est un avantage, car la chaleur nuit aux propriétés mécaniques de la roche. Aussi faut-il évaluer l'effet à long terme des contraintes thermiques, notamment pour les roches présentant une forte tension naturelle. Les effets mécaniques sont liés à des modifications de la composition minéralogique et de la teneur en eau, dont il faut tenir compte dans les formations d'argile et de schiste. Il faut comprendre leurs effets dans les différents types de formation, car les températures élevées risquent de modifier le régime de l'écoulement, au voisinage d'un dépôt, en libérant des eaux précédemment captives. Le choix des matériaux-tampon et de remblayage exige une étude détaillée de leur exposition aux températures élevées.

Les rayonnements émis par la décroissance des radionucléides peuvent avoir des effets divers, dont l'importance dépend en grande partie des détails de la conception du stockage en cause. Par exemple, des conteneurs très durables, à paroi métallique épaisse, sont pratiquement imperméables aux rayonnements. On peut faire abstraction des effets du rayonnement gamma à partir de ces conteneurs. En revanche, les champs gamma à l'extérieur des conteneurs à parois minces peuvent avoir de l'importance et il y a lieu d'en évaluer les effets. Il faut signaler qu'un stockage provisoire avant le stockage définitif réduit sensiblement les champs gamma et l'échauffement.

Le retardement du mouvement des radionucléides, qui dépend dans une certaine mesure du milieu récepteur, se produit en raison des différences de comportement physico-chimique entre radionucléides et eau souterraine. Les principaux phénomènes qui interviennent à ce niveau sont la dissolution chimique, la diffusion, l'échange d'ions, la sorption, les réactions de substitution chimique et l'ultra-filtration. Ils dépendent de la répartition et de la nature des substances chimiques en solution. Les paramètres physico-chimiques les plus importants sont le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, la température de la solution et la concentration des autres substances naturellement présentes. La teneur des eaux souterraines en sulfates, en chlorures, en substances qui corrodent le fer et en agents complexants doit être évaluée.

### Considérations relatives au site

Un dépôt définitif ne peut être construit que dans un site où existe une formation rocheuse suffisamment vaste possédant des propriétés géologiques, hydrologiques et



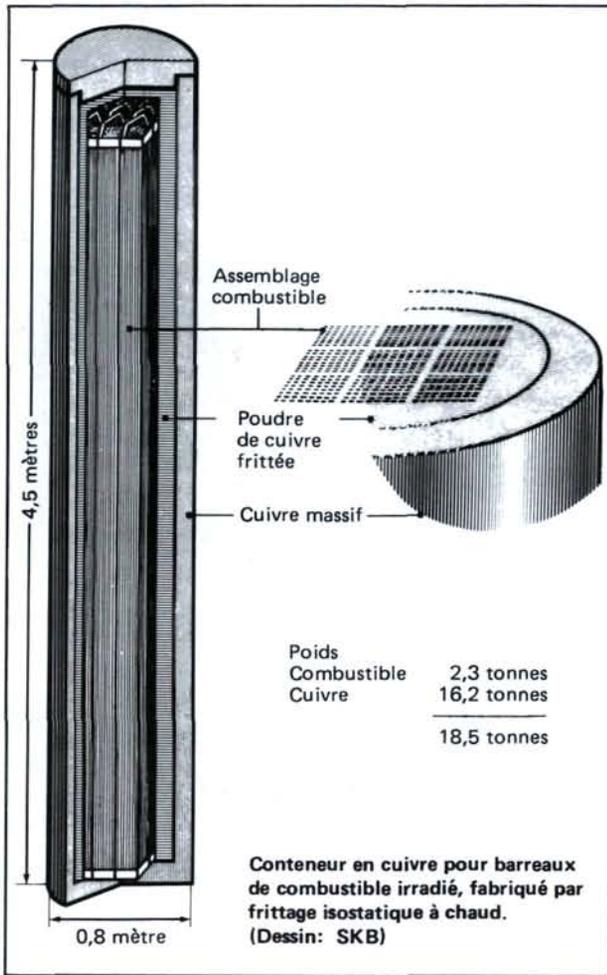
Fabrication de rateliers de stockage de combustible irradié au Danemark. (Photo: RDM)

géochimiques appropriées. Les exigences de la sûreté peuvent ordinairement être satisfaites à une profondeur de 400 à 500 mètres, encore qu'il soit techniquement possible de descendre jusqu'à 1000 mètres. L'état présent des connaissances permet de concevoir un système de stockage définitif sûr du combustible irradié et de le réaliser au cours des vingt ou trente années à venir, ou selon les besoins.

On a le choix entre plusieurs conceptions qui tiennent compte de la charge thermique et des capacités de construction. Les pays qui possèdent des formations massives de granite, de basalte et d'argile ont conçu des dépôts souterrains adaptés à ces formations. Ces études portent non seulement sur les aspects techniques, mais aussi sur les détails de l'emballage (tant en ce qui concerne les matériaux que la fabrication) et des matériaux servant de tampons et de barrières, et comportent des évaluations de performance et de sûreté. La poursuite de vastes travaux de recherche et développement permettra aux pays intéressés d'acquiescer davantage de données pour concevoir leurs dépôts définitifs.

### L'emballage du combustible irradié

L'emballage du combustible irradié doit être envisagé dans le contexte de l'ensemble du système de stockage, car il remplit plusieurs fonctions déterminées par la durée du stockage provisoire, par les considérations de transport et de mise en place, et par la durée du confinement. Les techniques applicables sont diverses. L'une



d'elles, adoptée en Suède, consiste à employer du plomb fondu ou des poudres de cuivre frittées à chaud pour enrober les barreaux de combustible dans une matrice massive qu'on introduit dans des conteneurs en cuivre. Une fois déposés dans les cavités aménagées, ces conteneurs sont enveloppés de matériaux-tampon, telle la bentonite compactée. On obture ensuite le dépôt en remplissant les puits et les galeries d'un mélange de sable et de bentonite.

Le remblayage et le colmatage du dépôt sont indispensables à la solidité de la construction: les cavités, ouvertures d'accès, puits et galeries doivent être comblés; il faut réduire au minimum ou empêcher l'infiltration d'eau, soutenir la roche et réduire au minimum l'affaissement, assurer la protection physique et chimique des colis de déchets, favoriser la dissipation de la chaleur et freiner la dispersion des radionucléides en réduisant le mouvement des eaux. Les déblais d'excavation, le ciment, le bitume, les enrobages à base de résines époxy et le polythène, par exemple, peuvent servir de matériaux de remblayage.

Après la fermeture d'un dépôt contenant du combustible irradié, on ne prévoit plus de surveillance ni de contrôle radiologique ou autres contrôles techniques, mais il appartient aux autorités nationales de prendre des décisions en ce qui concerne le marquage des sites et certains contrôles physiques ou autres. Dans certaines conditions spéciales les dépôts sont conçus de façon à

permettre éventuellement la récupération des matières stockées.

Les coûts du stockage définitif du combustible irradié, qui comprennent l'exploration et la mise en état du site, la construction du dépôt, son exploitation et son déclassement, ont été étudiés en fonction de la sensibilité de la conception et de l'optimisation. On estime que ces coûts représentent de 1 à 3% du coût actuel de la production d'électricité. Dans l'état présent des connaissances, il y a lieu de procéder à des démonstrations au moyen d'installations-pilotes, afin de recueillir des données et des estimations plus concrètes en vue de réalisations à l'échelle industrielle.

### Questions à débattre

Le combustible nucléaire irradié représente incontestablement un danger pour l'humanité et il importe de prendre des mesures pour l'isoler de l'environnement humain. C'est là un des problèmes les plus importants et les plus urgents qui se posent aujourd'hui.

Or, d'autre part, le combustible irradié représente aussi une source exceptionnelle d'éléments essentiels que le monde possède en quantités très limitées. Par exemple, les réserves de rhodium, élément très employé en chimie, en électricité et en médecine, se montent en tout et pour tout à 770 tonnes environ, et sont très faiblement concentrées dans l'écorce terrestre, tandis que la concentration dans le combustible irradié atteint 340 grammes par tonne contre  $1,10^{-3}$  dans le milieu naturel. Si l'on considère que, d'ici à l'an 2050, 600 000 tonnes environ de combustible irradié auront été déchargées des réacteurs du monde entier, il pourrait y avoir là la seule «nouvelle réserve artificielle» de rhodium (ainsi que de palladium et de ruthénium) disponible au siècle prochain.

### Définitions

Quelle est la différence entre le stockage prolongé et l'élimination? L'AIEA définit le premier comme étant le stockage d'éléments combustibles pendant un laps de temps prolongé, nécessitant des installations et/ou des emballages spéciaux. Ce stockage se termine lorsque les éléments combustibles sont retraités ou éliminés.\* En ce cas il faut prévoir l'isolation, la surveillance, la protection de l'environnement, et le contrôle par l'homme. Il faudra aussi prendre ultérieurement des mesures pour le traitement et le transport en vue de l'élimination définitive ou du retraitement.

D'autre part, l'élimination définitive est définie comme étant la mise en place de combustible irradié dans une installation assurant une protection adéquate de l'environnement *sans intention de le récupérer* (italiques de la rédaction).

Ces définitions intéressent les stratégies nationales et internationales de gestion des déchets. De nombreux Etats Membres examinent actuellement quelle doit être la durée du stockage prolongé — 50 ans ou davantage — du combustible irradié. Les premières démonstrations d'élimination définitive auront probablement lieu au début du siècle prochain.

\* Voir *Spent-Fuel Storage Glossary*, TECDOC-354 (1985).