

Différentes solutions pour le stockage du combustible épuisé

par John P. Colton

Le cycle du combustible nucléaire comporte un certain nombre d'opérations distinctes avant et après l'irradiation du combustible dans le réacteur. Les opérations qui précèdent l'insertion et l'irradiation des éléments combustibles dans un réacteur sont généralement appelées *phase de tête*, et celles qui suivent l'irradiation *phase de queue* du cycle du combustible.

L'extraction et le traitement du minerai d'uranium, l'enrichissement de l'uranium et la fabrication du combustible d'uranium constituent la phase de tête du cycle du combustible nucléaire. Le stockage du combustible épuisé, le retraitement, la refabrication de combustible sous forme d'oxyde d'uranium et de plutonium ainsi que la gestion des déchets appartiennent à la phase de queue. La phase de tête du cycle du combustible est bien au point et permet de produire du combustible pour différents types de réacteurs à eau légère, de réacteurs à eau lourde et de réacteurs refroidis par des gaz. La phase de queue du combustible nucléaire n'est pas encore entièrement au point. Diverses considérations économiques (coût élevé des installations), politiques (non-prolifération) et techniques ont empêché jusqu'à présent, dans les Etats qui exploitent l'énergie d'origine nucléaire, une décision unanime et sans équivoque sur la destination finale du combustible nucléaire épuisé.

Comme toujours lorsque les décisions sont ainsi différées, les stocks se sont accumulés au point de poser des problèmes supplémentaires d'entreposage. Pour l'instant, le combustible épuisé provenant des réacteurs est stocké sous l'eau dans des piscines jusqu'à ce qu'on dispose d'installations soit pour retraiter et recycler l'uranium et le plutonium, soit pour stocker de façon permanente le combustible épuisé. Si le combustible épuisé n'est pas retraité, la phase de queue du cycle du combustible se ramène au stockage permanent du combustible épuisé.

Nous examinerons principalement dans le présent article les réacteurs à eau légère de la génération actuelle ainsi que, brièvement, les réacteurs à eau lourde de type CANDU. Pour le cycle du combustible des réacteurs à eau légère, il a toujours été admis que le combustible épuisé séjournerait pendant une brève période dans des piscines à proximité du réacteur et qu'il serait ensuite, après un délai convenable d'environ un an, envoyé dans une installation de retraitement. Le combustible épuisé des réacteurs à eau lourde de type CANDU devait au contraire être stocké de façon définitive et non retraité. L'application de ces principes et le moment où elle interviendra dépendront à cet égard de l'état des techniques et de l'économie de l'industrie nucléaire, des problèmes du cycle du combustible et de la question politique de la non-prolifération.

Selon les estimations récentes de l'étude sur les centres régionaux du cycle du combustible, le stock accumulé de combustible épuisé à base d'oxyde pourrait atteindre 26 000 tonnes en 1985. Certes, cette accumulation sera freinée en proportion par tout ralentissement du développement escompté de la puissance de production nucléaire, mais une décision qui serait prise dans l'immédiat de construire des usines supplémentaires de retraitement ne pourra pas avoir d'incidence sur les besoins de stockage avant 1985, car il faut compter sur un délai de 8 à 10 ans pour que ces usines puissent être intégrées au cycle.

M. Colton est membre de la Section des matières nucléaires et du cycle du combustible à la Division de l'énergie d'origine nucléaire et des réacteurs.

Récemment, des considérations écologiques et politiques ont remis en question l'avenir du retraitement et ont incité les responsables à revoir de plus près les programmes de stockage en fonction des techniques qui offrent aujourd'hui des solutions intérimaires au problème du stockage du combustible.

Caractéristiques du combustible nucléaire

La longueur totale d'un élément combustible destiné à un réacteur à eau légère est de 4 à 6 m alors que celle d'un élément combustible d'un réacteur à eau lourde n'est que de 50 cm. Le poids unitaire des assemblages combustibles est d'environ 700 à 800 kg pour les réacteurs à eau sous pression, 200 à 300 kg pour les réacteurs à eau bouillante et environ 25 kg pour les réacteurs à eau lourde. Parmi les grands réacteurs actuels, les réacteurs à eau sous pression sont conçus pour libérer 33 000 mégawatts thermiques par tonne (MWj/t) avec une puissance spécifique de 36 MW/t, les réacteurs à eau bouillante 27 500 MWj/t avec une puissance spécifique de 22 MW/t, et les réacteurs à eau lourde 7 500 MWj/t avec une puissance spécifique de 15,2 MW/t.

La décroissance radioactive avec éjection du noyau de particules alpha et bêta et dégagement d'énergie sous forme de rayons gamma est à l'origine de la chaleur produite par les assemblages combustibles épuisés. Par exemple, la production de chaleur dans du combustible épuisé qui a libéré dans le réacteur une énergie de 25 000 MWj/t avec une puissance spécifique de 35 MW/t décroît d'une puissance thermique de 100 kW/t au bout de dix jours de refroidissement à moins de 1 kW/t lorsque le combustible en est approximativement à 100 jours de refroidissement. Les gaz de fission qui sont emprisonnés à l'intérieur du tube de gainage constituent un risque pour le cas où apparaîtrait dans le gainage un trou par lequel ils pourraient s'échapper. La production de chaleur, la contamination potentielle par le gaz et par l'eau, les mesures de criticité et de sûreté sont les principales considérations dont on doit tenir compte pour concevoir et construire tous les types d'installation de stockage.

Méthodes actuelles de stockage du combustible des réacteurs à eau légère

Les piscines remplies d'eau servent à la fois au stockage à court terme et au stockage prolongé du combustible épuisé et on considère en somme que leur technique est parfaitement au point. On a choisi le stockage dans l'eau surtout parce qu'il est commode et efficace. L'eau constitue un écran et un liquide de refroidissement qui protège bien contre la radioactivité; on l'obtient facilement et à peu de frais, il est facile de la traiter et sa transparence permet de contrôler visuellement la manutention du combustible.

Les piscines de stockage de combustible sont presque toutes conçues de la même façon, sous forme de parallélépipèdes rectangles de 12 à 13 m de hauteur. Les assemblages combustibles sont placés sur des supports dans le fond de la piscine. Ces supports soutiennent les éléments et assurent en même temps une protection contre une criticité accidentelle. Les assemblages sont mis en place ou enlevés verticalement au moyen de systèmes mécaniques de manutention conçus de façon sûre. Les éléments combustibles doivent rester immergés sous 3 m d'eau pendant toutes les opérations de manutention de combustible afin de protéger l'opérateur contre les rayonnements. Les piscines des réacteurs à eau bouillante sont remplies d'eau déminéralisée tandis que les piscines des réacteurs à eau pressurisée contiennent de l'eau boriquée. La raison de cette différence est que, dans les réacteurs à eau pressurisée, on emploie de l'eau boriquée dans le système primaire de contrôle de la réactivité, et que cette eau se mélange avec l'eau de la piscine lors du rechargement. Dans les réacteurs à eau bouillante, le liquide de refroidissement est constitué par de l'eau déminéralisée. Les piscines sont construites en béton armé suffisamment épais pour offrir la protection et la solidité voulues. Elles doivent être étanches. Actuellement, les piscines des réacteurs mesurent de 10 à 20 m de long et de 7 à 15 m de large. L'étendue de la zone de stockage

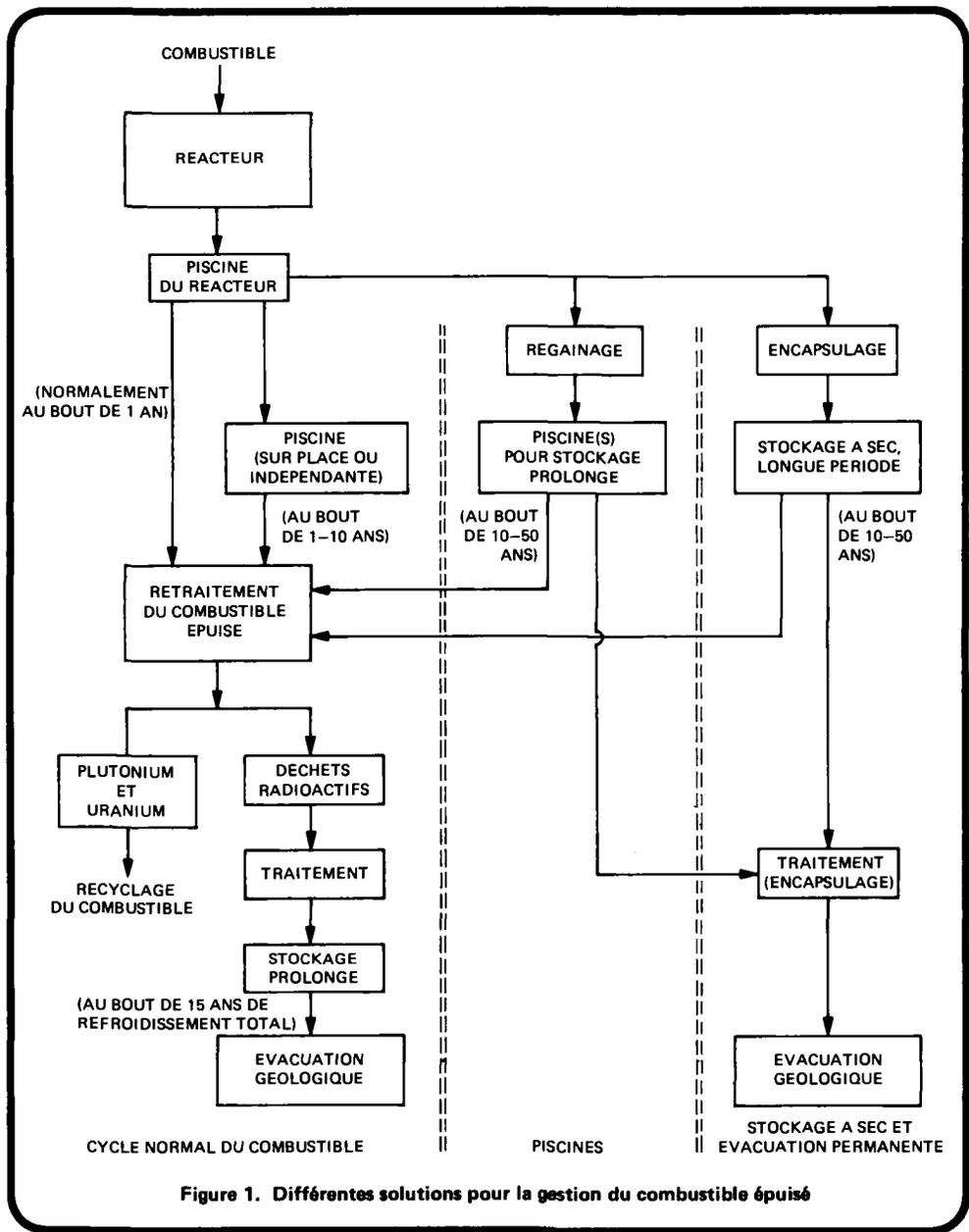


Figure 1. Différentes solutions pour la gestion du combustible épuisé

dépend de la quantité de combustible à stocker, quantité qui varie à son tour selon le type et la taille du réacteur.

L'hypothèse retenue initiale a été que le combustible épuisé serait expédié vers une usine de retraitement dans les 12 mois qui suivraient son déchargement du réacteur. Par conséquent, on prévoit normalement de la place pour un seul déchargement complet du cœur plus un ou deux rechargements annuels (un rechargement correspond généralement à un tiers de la charge complète du cœur). Pour les piscines de stockage situées dans les usines de retraitement du combustible épuisé, on a admis de même que le combustible épuisé serait

retraité peu après sa réception. L'espace prévu suffisait à stocker une quantité de combustible équivalant à ce que l'usine pouvait retraiter en trois ou quatre mois.

En raison de retards survenus dans le retraitement, la place de stockage supplémentaire prévue d'abord dans les premiers réacteurs construits n'a pas suffi, et on a étudié des solutions de remplacement pour ménager plus de place, soit en modifiant les installations existantes soit en les agrandissant:

1. Stockage plus dense (plus compact) — on accroît la capacité de stockage des piscines existantes en resserrant l'espace entre les assemblages et en utilisant pour cela des matières qui absorbent les neutrons.
2. Accroissement du volume des piscines — cette solution consiste à accroître la place disponible en augmentant les dimensions des bassins existants.
3. Installations supplémentaires de stockage sous eau — cette solution consiste à prévoir un moyen de stockage supplémentaire sur le site du réacteur ou à un autre endroit.

Ce sont là des solutions qui permettent seulement d'accroître la capacité de stockage dans l'immédiat, et il faudra étudier des formules nouvelles si l'on veut stocker le combustible pendant une période longue ou indéterminée tout en se réservant la possibilité de le récupérer.

La figure 1 présente différentes options, dont l'évacuation géologique permanente, pour ce que l'on peut considérer comme un cycle normal du combustible.

Stockage à long terme, en piscine, du combustible des réacteurs à eau légère

Le stockage du combustible épuisé dans des piscines, pendant des périodes relativement longues, semble techniquement réalisable. On peut penser que les conditions de stockage dans ce cas seront analogues à celles du stockage à court terme. Les problèmes supplémentaires dont on devra peut-être tenir compte pour le stockage des éléments combustibles pendant plusieurs décennies sont les risques de fuites du combustible plus importantes ou plus graves, l'accélération de la corrosion ainsi que la stabilité thermique et la stabilité des rayonnements. Si l'un ou l'autre de ces problèmes venait à se poser, on pense que ce serait de façon progressive et assez lentement pour qu'on ait le temps d'y faire face, par exemple en enfermant les éléments combustibles dans des capsules ou dans des récipients métalliques. Il faudra aussi pouvoir soumettre à des essais de corrosion des échantillons prélevés sur les matières entrant dans la composition des éléments combustibles et sur le matériel équipant les piscines de stockage.

Autres techniques de stockage des éléments combustibles employés dans les réacteurs à eau légère

Trois techniques fondamentales sont actuellement étudiées par divers Etats Membres:

- Château de transport scellé — casemate proche de la surface contenant un ou plusieurs assemblages scellés à l'abri de l'air au moyen d'un blindage individuel;
- Caisson — un ou plusieurs assemblages scellés à l'abri de l'air et enterrés à faible profondeur dans le sol de façon que celui-ci serve de blindage;
- Casemate refroidie par air — réunion dans une grande zone blindée (bâtiment) de plusieurs assemblages refroidis directement par air;

Les figures 2, 3 et 4 illustrent les trois principes mentionnés ci-dessus. Il semble que ces techniques, qui consistent à refroidir par air le combustible épuisé, exigent que

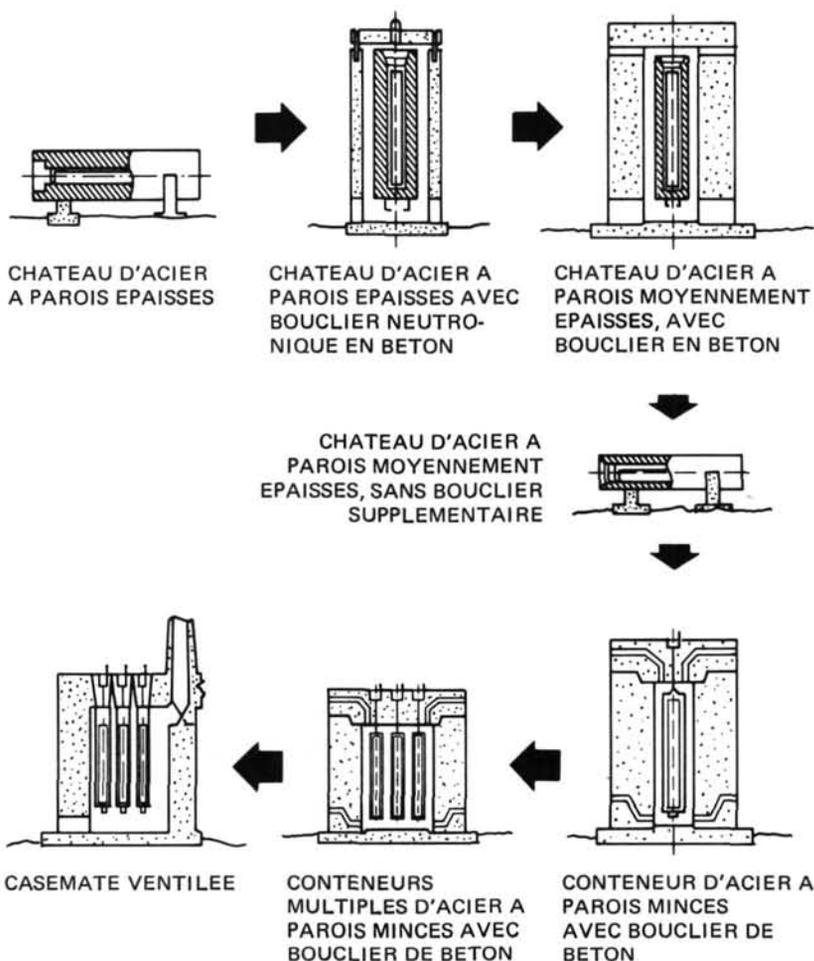
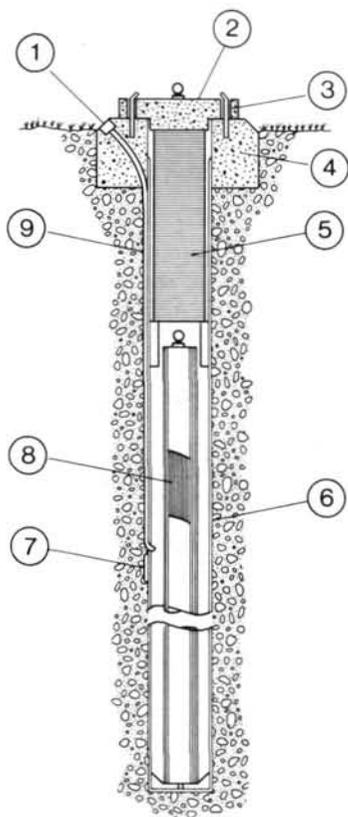


Figure 2. Modèle de château de transport scellé

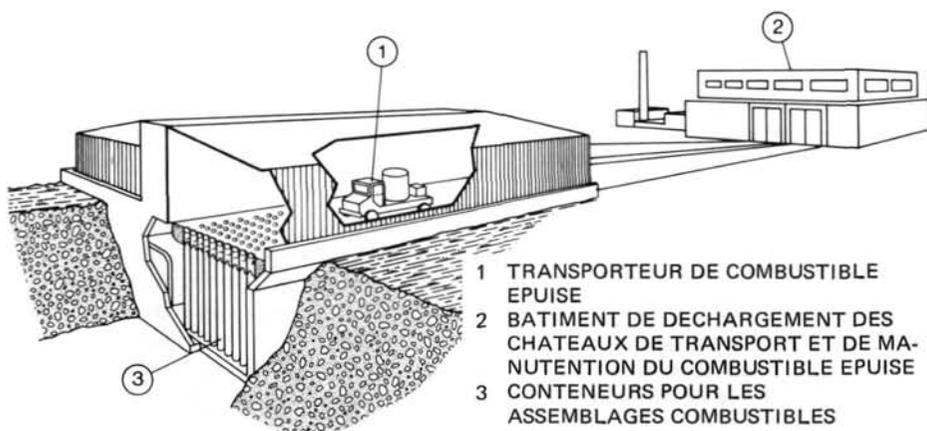
les éléments de combustible subissent une désactivation en piscine pendant au moins cinq ans (des délais de désactivation plus longs sont préférables et sont prévus dans la plupart des programmes). Généralement, on enferme le combustible à l'intérieur de capsules avant de le stocker à l'air; on tient compte du fait que les espaces entre les aiguilles de combustible peuvent servir à véhiculer un agent de transfert de chaleur qui facilite la conduction de la chaleur et donc le refroidissement des éléments. Si l'on envisage de stocker temporairement le combustible à sec avant de le retraiter, il faut que la capsule et les matières filtrantes soient compatibles avec les opérations de découpage et de dissolution dans l'usine de retraitement.

Les casemates ventilées, qui servent actuellement à stocker le combustible de réacteurs à gaz à haute température, ont fait leurs preuves sur le plan des techniques de construction, de manutention du combustible et d'évacuation de la chaleur. Les chercheurs français ont



- 1 PRISE DU DISPOSITIF DE CONTROLE
- 2 COUVERCLE EN BETON
- 3 ERGOT DE FERMETURE
- 4 PROTECTION CIRCULAIRE EN BETON
- 5 PROTECTION BIOLOGIQUE A HAUTE DENSITE
- 6 CAISSON: TUBE LISSE OU TUBE NERVURE
- 7 TEMPERATURE EXTERNE
- 8 ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE
- 9 TEMPERATURE INTERNE

Figure 3. Modèle de caisson



- 1 TRANSPORTEUR DE COMBUSTIBLE EPUISE
- 2 BATIMENT DE DECHARGEMENT DES CHATEAUX DE TRANSPORT ET DE MAINTENTION DU COMBUSTIBLE EPUISE
- 3 CONTENEURS POUR LES ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES

Figure 4. Modèle de casemate refroidie par air

fait fonctionner une casemate ventilée (PIVER) pour déchets de haute activité équipée d'un système de circulation forcée et de filtres à haut rendement. Il serait possible d'adapter ces techniques au stockage du combustible des réacteurs à eau légère. On a expérimenté au Canada des modèles de châteaux de transport scellés avec un chauffage électrique et du combustible pour réacteur à eau lourde de type CANDU. La même conception, adaptée à du combustible solidifié, a fait l'objet d'essais avec chauffage électrique aux Etats-Unis. Dans chaque cas, chaque technologie (transfert de chaleur, blindage, etc.) a été appliquée dans les conditions les plus prudentes. La troisième conception, fondée sur l'emploi d'un caisson, a servi dans plusieurs pays à stocker du combustible de réacteur expérimental.

Stockage du combustible épuisé et solution pour l'évacuation du combustible des réacteurs à eau lourde

La principale différence entre l'élément combustible des réacteurs à eau lourde et celui des réacteurs à eau légère est que le premier est court (0,5 mètre) et qu'il a une combustion massique plus faible (7 600 MWj/t). Ce combustible étant constitué d'uranium naturel, son stockage ne pose aucun problème de criticité si l'on utilise de l'eau légère comme agent de refroidissement.

Le stockage du combustible pour réacteurs à eau lourde sur les sites de réacteurs CANDU se fait normalement dans des bassins remplis d'eau. Les solutions temporaires de stockage du combustible des réacteurs à eau lourde sont analogues à celles qui sont appliquées au combustible épuisé des réacteurs à eau légère. Le stockage dans l'eau, que ce soit ou non sur le site du réacteur, ainsi que des formules de stockage à sec, sont à l'étude. Le stockage à sec peut se faire dans des casemates aérées par convection ou par conduction, des récipients enrobés dans du béton, et des formations salines souterraines. On estime que les bassins de stockage contenant de l'eau ont maintenant fait leurs preuves. Le stockage à sec dans des casemates constitue, dans le cas du combustible des réacteurs à eau lourde, une solution possible mais dont la valeur n'est pas encore prouvée. Le stockage à sec dans des récipients enrobés de béton offre une solution qui est actuellement mise à l'essai dans un programme exécuté au Canada. On devra encore continuer à étudier le stockage à sec dans des formations salines souterraines avant de pouvoir considérer cette technique comme valable.

Bilan

On possède déjà une expérience considérable du stockage du combustible épuisé dans des bassins remplis d'eau. Cependant, ce mode de stockage a été jusqu'à présent de courte durée et on connaît encore mal les prescriptions auxquelles doit satisfaire le gainage ou l'encapsulation du combustible épuisé dans le cas d'un stockage prolongé. Cependant, il suffira de quelques travaux de mise au point pour que l'on puisse considérer le stockage du combustible épuisé dans des piscines comme une solution provisoire satisfaisante.

On étudie actuellement un certain nombre de modes de stockage à long terme sous forme sèche, dans le sol à faible profondeur. Ces modes de stockage sont fondés sur l'emploi de casemates aérées par convection ou par conduction, de récipients enrobés de béton et de caissons. On pense qu'ils constituent des solutions viables bien qu'on doive apporter la preuve pratique de leur valeur avant de pouvoir les accepter.

On examine actuellement comment on pourrait stocker du combustible à sec, tout en pouvant le récupérer, en l'enterrant profondément dans des sols rocheux. On pourrait procéder de façon analogue à ce qui se fait pour le stockage à long terme des déchets

solidifiés fortement radioactifs. Lorsqu'on aura acquis une expérience suffisante, on pourra convertir au besoin l'installation de façon à réaliser une évacuation géologique permanente, en la remplissant et en la scellant. Il est probable qu'on commencera très prochainement à mettre au point ce mode de stockage et à l'expérimenter. Le stockage à sec dans des formations salines est également étudié dans la même perspective.

La communauté nucléaire mondiale ne discerne pas encore nettement de quelle façon elle pourra se débarrasser définitivement du combustible nucléaire épuisé (en le retraitant ou en traitant les déchets). Certains Etats Membres ont décidé d'adopter sans réserve le retraitement, tandis que d'autres ne prendront une décision finale que lorsque des évaluations supplémentaires auront été faites. Les prévisions indiquent toutes que l'on aura besoin, à brève et à moyenne échéance, de capacités supplémentaires de stockage. Le bref exposé que nous venons de faire montre qu'il existe différentes solutions au problème. Il faut bien préciser que le stockage temporaire ne constitue pas la solution cherchée, et qu'une décision définitive doit encore être prise quant à la façon dont on devra traiter ou stocker le combustible de façon permanente et non récupérable.