



LES PROCÉDES DE CONDITIONNEMENT ET D'ENTREPOSAGE DE LONGUE DURÉE

La loi du 30 décembre 1991 porte sur la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue. Dans son article 4, elle prévoit trois axes de recherche :

- la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans les déchets,
- l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains,
- l'étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets.

Le Gouvernement a demandé à l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) de piloter les études sur le stockage géologique et au CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) de piloter celles sur la séparation et la transmutation d'une part et sur le conditionnement et l'entreposage de longue durée d'autre part. Ce sont les résultats obtenus sur ces deux derniers thèmes qui sont présentés ci-après.

LES TECHNIQUES ACTUELLES DE CONDITIONNEMENT ET D'ENTREPOSAGE

Qu'est-ce que le conditionnement ?

Les éléments radioactifs contenus dans les déchets radioactifs émettent des rayonnements de nature variée : ceux-ci peuvent avoir des effets biologiques nocifs sur les organismes vivants. Il faut donc protéger l'homme et son environnement des effets de ces rayonnements en isolant les déchets radioactifs. Pour ce faire, plusieurs barrières de protection sont mises en place : les déchets sont retenus dans des enveloppes successives.

Lorsqu'ils sont produits, les déchets radioactifs, comme les autres déchets, se trouvent sous forme solide (des métaux, des ciments,...) ou liquide : ce sont les déchets **bruts**. Pour pouvoir les manipuler aisément et de façon sûre, ils sont mis sous forme de **colis** de déchets. Le colis garantit que les éléments radioactifs ne se dispersent pas. Il constitue une barrière entre les éléments radioactifs et l'environnement. Il satisfait aux normes de transport, d'entreposage ou de stockage.

Le **conditionnement**, c'est l'ensemble des opérations successives à réaliser pour fabriquer ce colis.

Comment fabrique-t-on un colis de déchets ?

Il faut d'abord caractériser les déchets bruts, c'est à dire déterminer au mieux leur composition chimique, radiologique et leurs propriétés physico-chimiques. Les informations ainsi obtenues servent à trier les déchets,

Ensuite, les déchets bruts sont traités pour réduire au maximum leur volume et les rendre chimiquement stables.

Les déchets vont alors être mis dans une enveloppe métallique ou en béton, le conteneur. Il en existe de nombreuses dimensions, de forme cylindrique ou cubique. Pour mettre les déchets dans le conteneur, trois méthodes sont possibles. Certains déchets solides sont directement placés dans le conteneur et immobilisés par du ciment qui est coulé dans ce conteneur. Pour réduire le volume des déchets, certains déchets solides peuvent être compactés par écrasement par une presse. Les blocs ainsi obtenus sont alors placés dans le conteneur. Les déchets liquides, quant à eux, doivent être mélangés à un matériau pour les solidifier. Trois matériaux sont utilisés : le ciment, le bitume et le verre.

Que signifie entreposage ?

Contrairement à l'usage qui en est fait dans la vie quotidienne, les mots **entreposage** et **stockage** ont un sens différent quand ils s'appliquent aux déchets radioactifs. Dans ce cas, par définition, l'entreposage est toujours provisoire, c'est une solution sûre d'attente qui apporte de la flexibilité à la gestion des déchets. Les colis de déchets entreposés doivent pouvoir être sortis de l'installation d'entreposage à tout moment et ne peuvent y rester définitivement. Le stockage, par contre, est susceptible de devenir définitif.

Qu'entend-t-on par « longue durée » ?

L'entreposage couramment pratiqué par les industriels permet d'attendre quelques dizaines d'années, éventuellement une centaine, pour les installations les plus récentes. L'entreposage de longue durée qui est donc clairement distinct de l'entreposage industriel, veut répondre à des attentes plus longues, de l'ordre de plusieurs siècles. Pour mener les recherches, il a fallu fixer une durée précise : le CEA a retenu 300 ans comme objectif.

A quoi sert l'entreposage ?

L'entreposage apporte de la flexibilité à la gestion des déchets radioactifs : il permet d'attendre, de façon sûre, que les conditions permettant l'élimination du déchet soient réunies. Ces conditions peuvent être techniques, par exemple, attendre que les déchets aient suffisamment refroidi. Dans ce cas, on sait calculer, à partir de la connaissance des déchets, la durée d'entreposage nécessaire. Mais les conditions attendues peuvent aussi être d'autre nature : qu'un site de stockage spécifique soit disponible ou que les progrès de la recherche offrent de nouvelles possibilités pour éliminer ces déchets. La date à laquelle des conditions de cette sorte seront réunies ne peut donc être définie au moment où les déchets sont placés en entreposage.

Que sont les déchets radioactifs d'aujourd'hui ?

La part la plus importante résulte directement de la production d'électricité d'origine nucléaire. Lorsque le combustible utilisé est sorti du réacteur, il contient 95 % de matières recyclables et 5% de déchets. Le retraitement consiste à séparer ces déchets des matières recyclables. Ces dernières servent à fabriquer de nouveaux combustibles.

Faire fonctionner les réacteurs nucléaires ainsi que les usines de fabrication et de retraitement du combustible génère aussi des déchets : par exemple, les filtres qui évitent de rejeter des gaz radioactifs à l'atmosphère, les pompes qui ont été remplacées ou encore les liquides résultant du rinçage des installations. Ce sont les déchets d'exploitation, beaucoup moins radioactifs et plus volumineux que ceux retirés du combustible.

Enfin, les centres de recherche et les hôpitaux produisent une faible quantité de déchets radioactifs.

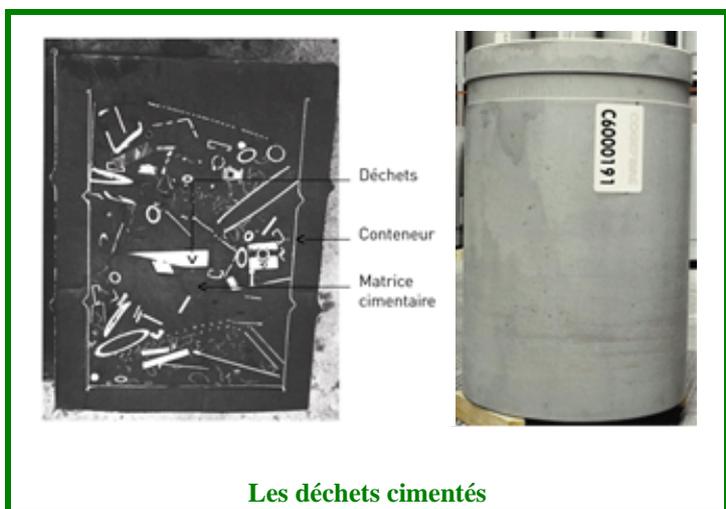


Comment sont-ils conditionnés ?

Les déchets de haute activité retirés du combustible sont **vitrifiés**, c'est à dire qu'ils sont mélangés à très haute température (1200 °C) à du verre en fusion. Ce mélange est ensuite coulé dans un conteneur en acier inoxydable d'environ 200 litres. Le colis de déchets vitrifiés est donc constitué d'un bloc de verre homogène, qui contient les éléments radioactifs, entouré d'une enveloppe étanche en acier inoxydable.



Les déchets d'exploitation sont le plus fréquemment, **cimentés**. C'est à dire que, s'il s'agit de déchets solides, ils sont placés dans un conteneur en métal ou en béton, dans lequel du ciment est ensuite coulé. On parle alors de déchets **bloqués** dans du ciment. Les déchets liquides, quant à eux, sont utilisés comme liquide de gâchage pour fabriquer le ciment. Ce dernier est ensuite coulé dans un conteneur en métal ou en béton. Il existe de nombreux modèles de conteneurs, adaptés à la forme et à la taille des déchets qu'ils doivent contenir.



Certains déchets liquides d'exploitation peuvent être **bitumés** plutôt que cimentés. Cette technique est surtout utilisée pour les déchets qui se présentent sous forme de boues. Ces boues sont mélangées à du bitume à une température d'environ 150°C. Le mélange est ensuite coulé dans un conteneur en acier inoxydable.

Certains déchets solides peuvent être simplement **compactés** par écrasement par une presse et placés dans un conteneur sans être bloqués.

Où les déchets sont-ils conditionnés ?

Sur le site où ils ont été produits. Les centrales nucléaires, ainsi que les centres de recherche, disposent d'installations de cimentation et parfois de bitumage. Les usines de retraitement disposent en outre d'installations de vitrification. En France, environ 3 300 colis de déchets vitrifiés ont ainsi été réalisés à Marcoule, où a fonctionné la première usine française de retraitement (UP1 – 1958 /1997). Depuis 1990, les colis de déchets vitrifiés sont produits, à La Hague où le combustible nucléaire est actuellement retraité : de l'ordre de 10 000 colis ont déjà été fabriqués. La fabrication actuelle est d'environ 600 colis par an

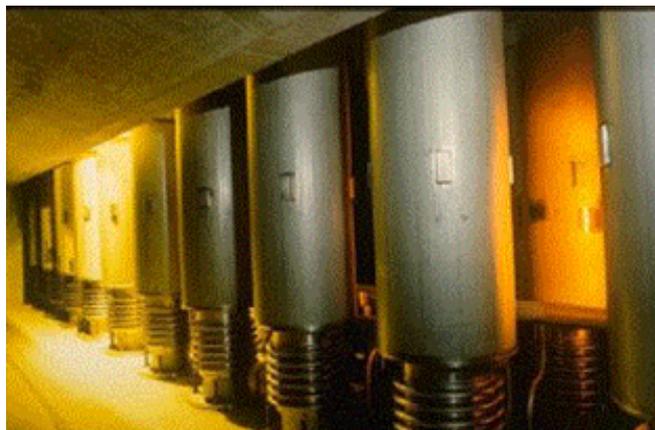
Que deviennent alors ces colis de déchets ?

Les déchets de faible ou moyenne activité à vie courte sont transférés au Centre de stockage de Soulaïnes dans l'Aube, exploité par l'Andra.

Les déchets à vie longue sont conservés sur leur site de production, dans des entrepôts spécifiques pour chaque type de colis. Par exemple, les colis de déchets vitrifiés fabriqués à La Hague y sont entreposés dans l'installation E-EV-SE. Celle-ci est constituée de puits ventilés dans lesquels les colis sont empilés.



Vue extérieure



Partie basse des puits d'entreposage

L'entrepôt de colis de déchets vitrifiés E-EV-SE à La Hague

Toutes les installations d'entreposage sont continûment surveillées. Elles sont régulièrement inspectées par l'Autorité de sûreté nucléaire.

Combien y-a-t-il de déchets radioactifs ?

Un Inventaire national, localisant et quantifiant tous les déchets radioactifs présents sur le sol français, est réalisé par l'Andra. Il est mis à jour chaque année. La première édition de ce document a été publiée en novembre 2004.

| | Volume (m ³) |
|--|--------------------------|
| Haute activité | 1 639 |
| Moyenne activité à vie longue | 45 359 |
| Faible activité à vie longue | 44 559 |
| Faible ou moyenne activité à vie courte | 778 322 (*) |

Les déchets radioactifs existants à fin 2002 (hors très faible activité)

(*) dont 663 562 stockés au Centre de l'Aube.

Pourquoi des recherches sur le conditionnement et l'entreposage de longue durée ?

Le conditionnement et l'entreposage des déchets radioactifs sont pratiqués en France comme dans tous les pays qui ont à gérer ce type de déchets. Les recherches menées visent donc à améliorer l'existant, à en augmenter les performances au regard de critères non seulement techniques mais aussi économiques. La démarche n'est pas différente de celle pratiquée pour les déchets conventionnels : les réduire à la source, mieux les trier, bien les emballer, se doter de moyens pour les éliminer.

RÉDUIRE LE VOLUME DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Pour réduire le volume des déchets radioactifs, deux méthodes sont possibles : d'abord, réduire le volume à la source, c'est à dire en produire moins. L'autre possibilité est d'améliorer le conditionnement des déchets. En effet, comme nous l'avons vu, ce sont des colis de déchets qui seront finalement entreposés ou stockés et non des déchets bruts. Pouvoir incorporer, dans un colis de même volume, plus d'éléments radioactifs réduit donc le volume final des déchets.

Les déchets des usines de La Hague

Dès la mise en service, dans les années 1990, des usines actuelles de La Hague, Cogema a cherché à réduire le volume des déchets produits par ces usines. Un important programme de recherches, **Puretex**, mené par Cogema et le CEA en a découlé. Ce programme a exploré différentes voies, modification des traitements chimiques utilisés dans l'usine, changement de modes de conditionnement. L'exploitation des usines a aussi été optimisée en cherchant à réduire les quantités de produits utilisés (qui deviennent ensuite des déchets radioactifs) dans les diverses opérations que requiert le retraitement du combustible usé.

En combinant toutes ces améliorations, des résultats très significatifs ont été obtenus. Le changement de **traitement chimique** des déchets liquides a conduit à diviser par dix la radioactivité rejetée en mer. Le volume des déchets solides à vie longue a été divisé par dix, grâce notamment à un nouveau mode de conditionnement des déchets de structure des combustibles usés, **le compactage**. Ces déchets compactés sont mis dans un conteneur identique à celui utilisé pour les déchets vitrifiés, standardisant ainsi le conditionnement des déchets ultimes issus des usines de La Hague.

Le compactage

Les assemblages de combustible utilisés dans les réacteurs nucléaires comportent chacun plus d'une centaine de crayons de combustible. Ces crayons sont constitués de tubes métalliques contenant les pastilles de combustible, les « **coques** », fermés par des pièces métalliques, les « **embouts** ».



Lors du retraitement du combustible usé, ces éléments métalliques sont séparés du combustible proprement dit et conditionnés en tant que déchets. Jusqu'en 1995, ces coques et embouts étaient cimentés. Pour réduire le volume final du colis provenant de ces déchets, des procédés alternatifs à la cimentation ont été étudiés. Le choix s'est porté sur un procédé de compactage. Sa mise en service industrielle, intervenue en 2002, permet de diviser par 4 le volume des colis conditionnant les coques et embouts.



Le traitement chimique des déchets liquides

Le procédé mis en œuvre sur les usines de La Hague, depuis leur démarrage, pour le traitement des effluents liquides consistait en une précipitation chimique générant des boues qui étaient ensuite bitumées. Un traitement par évaporation a été mis au point pour remplacer la précipitation chimique. Le résidu après évaporation est vitrifié, ce qui produit moins de colis finaux que le bitumage pour une même quantité d'effluents. De plus, l'évaporation permet de réduire l'activité des effluents liquides mieux que ne le faisait la précipitation chimique. Utiliser l'évaporation a ainsi conduit à diviser par 10 depuis 15 ans, la radioactivité rejetée en mer par les usines de La Hague.

Déclasser les déchets en les décontaminant

Le déclassement consiste à séparer un déchet radioactif en deux parties : un petit volume concentrant le maximum de radioactivité et un grand volume très peu radioactif, qui peut être envoyé dans un des centres de stockage exploités par l'Andra. Cette opération est qualifiée de **décontamination**. Un nombre important d'installations nucléaires arrive actuellement en fin de vie et le nombre de chantiers de déconstruction en cours ou à venir va croissant. Le déclassement d'un maximum de déchets résultant de ces opérations est donc un enjeu important.

Les techniques classiques de décontamination qu'elles soient mécaniques (projection d'abrasif, eau sous pression) ou chimiques mettent en jeu des quantités de réactifs et d'effluents liquides importantes qui deviennent eux-mêmes des déchets radioactifs, dits **secondaires**, se rajoutant au déchet initial à déclasser. Le volume de ces déchets secondaires doit donc être le plus limité possible.

Pour répondre à cet objectif, plusieurs procédés ont été mis au point :

- la décontamination par gels pour le traitement de grandes surfaces planes. Les études ont permis de mettre au point des gels aspirables qui ne génèrent pas de déchets secondaires liquides,
- la décontamination par mousses. Elle permet de réduire les volumes d'effluents liquides secondaires de façon significative par rapport aux traitements classiques en phase liquide, tout en gardant la même efficacité de décontamination. Ceci est particulièrement important pour les installations de géométrie complexe dont le volume peut être très grand et donc nécessiter la mise en œuvre de grandes quantités de solutions décontaminantes.

Plus récemment, l'étude de procédés « voie sèche » a débuté. Ils suppriment totalement les effluents liquides et ne génèrent comme effluent secondaire à traiter qu'un gaz chargé en aérosols. Plusieurs techniques prometteuses, telles que le laser, sont développées en laboratoire.

Améliorer les conditionnements

Le procédé de bitumage a été largement utilisé en France pour conditionner en ligne les déchets résultant du traitement des effluents liquides par précipitation chimique. C'est un procédé éprouvé qui bénéficie d'un large retour d'expérience. Il est toutefois aujourd'hui réservé aux effluents dont les caractéristiques chimiques ne permettent ni la vitrification ni la cimentation. Des études sont notamment menées pour adapter ce procédé au conditionnement de boues anciennes entreposées en silos et optimiser la radioactivité maximale admissible par colis. Cette optimisation conduit à une division par trois environ du nombre de colis produits.

La vitrification est aujourd'hui en France le procédé industriel pour le conditionnement des solutions de produits de fission issues du retraitement des combustibles usés.

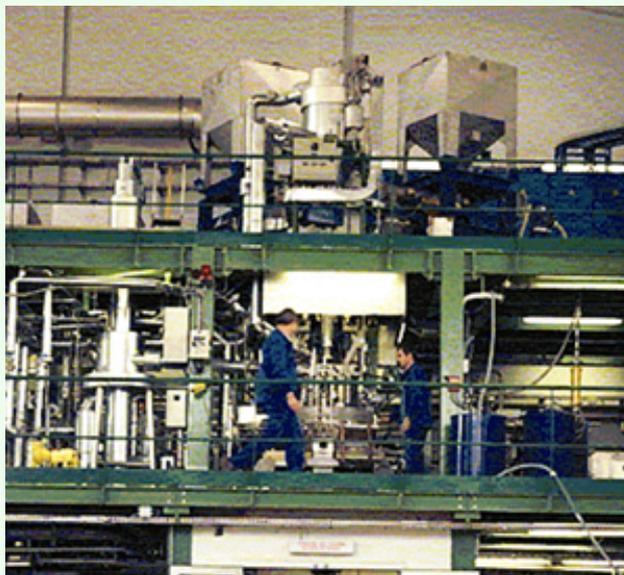
Les principales améliorations obtenues dans la dernière décennie sont :

- une réduction de volume des déchets d'exploitation du procédé de vitrification d'un facteur 2 à 3,
- un gain d'environ 25 % sur le volume des déchets vitrifiés, obtenu en augmentant la proportion d'éléments radioactifs contenus dans le colis de déchets vitrifiés.

La proportion d'éléments radioactifs contenus dans le colis de déchets vitrifiés peut également être augmentée grâce à la technique du **creuset froid**, en cours de développement. La mise en oeuvre de ce procédé permettrait de réduire le volume final des déchets.

Le creuset froid

Dans le procédé de vitrification actuel, le creuset dans lequel est fondu le verre se corrode à cause de la température. Il doit être remplacé régulièrement, générant ainsi des déchets d'exploitation. Pour limiter ces derniers, les fours à induction directe en creuset froid ont été développés. La paroi d'un tel four reste froide et permet la formation d'une fine couche de verre figé qui protège le creuset. Des verres peuvent ainsi être élaborés à haute température sans générer de corrosion du creuset. C'est une technologie utilisée dans l'industrie verrière classique pour la réalisation de verres spéciaux. Travaillant à des températures plus élevées que le procédé actuel de La Hague, le creuset froid permet en plus d'utiliser d'autres types de verres capables d'incorporer plus d'éléments radioactifs. Le volume final des déchets est ainsi réduit.



Pilote de creuset froid

La capacité de ce procédé à élaborer des verres à plus haute température permet d'élargir le domaine d'application de la vitrification à des déchets variés.

S'ASSURER QUE LES ÉLÉMENTS RADIOACTIFS SONT BIEN ISOLÉS DE L'HOMME ET DE L'ENVIRONNEMENT : COMMENT SE COMPORTENT LES COLIS SUR LE LONG TERME ?

Le colis est la première des barrières successives qui sont interposées entre les éléments radioactifs et l'environnement. Dans la perspective d'une gestion à long terme de ces colis, il faut donc juger la qualité de cette barrière au cours du temps.

Compte tenu des échéances de temps à considérer, notamment pour le stockage géologique, une simple extrapolation dans le temps de résultats acquis en laboratoire sur des durées de quelques années n'est pas suffisante.

La première étape consiste à comprendre et à hiérarchiser les phénomènes se produisant pendant l'existence du colis, en entreposage ou en stockage géologique. Ceci se fait notamment en réalisant des expériences en laboratoire et en observant des **analogues naturels ou archéologiques**. A partir de cette compréhension, l'évolution du colis peut être décrite mathématiquement, sous forme de **modèles**.

Les analogues naturels ou archéologiques

Les études d'analogues archéologiques ou naturels comme par exemple les verres présents dans certaines laves volcaniques contribuent à la validation des modèles sur le long terme. Un examen approfondi de ces analogues permet de reconstituer leur histoire. On connaît alors le résultat de l'évolution du matériau sur de très longues durées (quelques milliers à quelques millions d'années) et on peut ainsi vérifier la cohérence de cette évolution avec les connaissances acquises en laboratoire.



Verre volcanique



Verre nucléaire



Verre archéologique

En particulier, une étude approfondie de l'altération de verres volcaniques dont les caractéristiques sont très proches de celles des verres nucléaires, a permis de vérifier que la vitesse d'altération des verres naturels était parfaitement comparable à celle des verres nucléaires.

L'étude de blocs de verres archéologiques ayant séjourné près de 2000 ans au fond de la Méditerranée démontre qu'un bloc de verre industriel peut résister sur des durées millénaires à des conditions très agressives.

Les travaux menés ces dernières années ont permis d'élaborer des modèles d'évolution pour tous les types de colis.

En ce qui concerne les colis de déchets cimentés, le principal risque à prendre en compte en conditions d'entreposage est la fissuration du béton du fait de son évolution physico-chimique, des interactions entre les déchets et le ciment et de la corrosion des armatures. Ce risque peut être réduit par une formulation de béton et un matériau de renfort (fibres ou armature) adaptés. A titre exploratoire, des études ont été menées pour optimiser la cimentation : pré-traitement du déchet et formulation de ciments présentant une meilleure compatibilité avec les déchets à conditionner. En conditions de stockage géologique, le phénomène majeur affectant le comportement des matériaux cimentaires est la dégradation chimique qui dépend fortement de la teneur en ions sulfates et carbonates dans l'eau du site. Différents modèles ont été développés afin notamment de prédire l'évolution du confinement des éléments radioactifs dans le cas de l'altération externe d'un conteneur en béton par de l'eau.

Deux phénomènes principaux peuvent affecter significativement l'évolution à long terme des colis de boues bitumées :

- le bitume gonfle sous l'effet des gaz générés par la radioactivité contenue dans le colis, si celle-ci est importante. Cette production de gaz décroît au cours du temps. Ce gonflement peut affecter le comportement du colis en entreposage,
- le bitume relâche les éléments radioactifs qu'il contient sous l'effet de la lente pénétration de l'eau dans le colis en conditions de stockage.

Des premières estimations de performance des colis de boues bitumées ont été réalisées à partir des modèles développés. Ainsi, on prévoit que la dégradation des colis durera quelques dizaines de milliers d'années, après l'arrivée de l'eau, en stockage géologique.

Le colis de déchets compactés contient des pièces métalliques. Le modèle proposé pour ce colis est basé sur la localisation des éléments radioactifs à l'intérieur. Les éléments radioactifs localisés en surface des pièces métalliques sont directement entraînés par l'eau. Les éléments radioactifs inclus au sein des pièces métalliques sont relâchés au fur et à mesure de la corrosion du métal. D'après les expériences de corrosion menées en laboratoire, les éléments radioactifs inclus dans les pièces métalliques en acier inoxydable, par exemple, sont ainsi relâchés au bout d'une centaine de milliers d'années.

L'évolution des colis de déchets vitrifiés en conditions d'entreposage, est due principalement aux rayonnements produits par les éléments radioactifs contenus : elle n'induit pas de relâchement d'éléments radioactifs. En stockage, les estimations de performances montrent que la dissolution des colis de déchets durera, après arrivée de l'eau, plusieurs centaines de milliers d'années, dans des conditions analogues à celles du stockage géologique.

Les combustibles usés

Bien que les combustibles usés ne soient pas aujourd'hui considérés comme des déchets eu égard à la matière valorisable qu'ils contiennent, des études ont quand même été menées sur l'évolution des combustibles usés. Les assemblages de combustible utilisés dans les réacteurs nucléaires comportent chacun plus d'une centaine de crayons de combustible. Ces crayons sont constitués de tubes métalliques contenant les pastilles de combustible, les « coques », fermés par des pièces métalliques, les « embouts ». Ces tubes fermés sont les gaines. Le principal risque en entreposage à sec est la rupture de la gaine sous l'effet des gaz générés par la radioactivité contenue dans les pastilles de combustible. Ce risque est inexistant lors de l'entreposage en piscine. En stockage, les éléments radioactifs (15% du total) localisés en surface des pastilles de combustible sont directement entraînés par l'eau. Le modèle développé montre que le reste de l'activité sera relâché en plus de 100 000 ans.



Pastilles de combustible

MIEUX TRIER LES DÉCHETS

Nous l'avons vu, le devenir des déchets est différent selon qu'il s'agit de déchets à vie courte ou à vie longue, de faible ou de haute activité ... Il faut donc les trier pour les orienter vers la filière d'élimination adaptée.

La recherche au service du tri des colis des déchets

Les colis de déchets sont triés de façon à être orientés vers la filière d'élimination la mieux adaptée. Ce tri se fait en fonction des connaissances disponibles sur les colis, notamment leur constitution physico-chimique et leur contenu radiologique. Les connaissances disponibles sur un colis de déchets proviennent d'abord des « spécifications de production colis », garanties par le producteur. Les procédures qualité mises en œuvre lors de la fabrication du colis permettent d'assurer le respect de ces spécifications. Lorsqu'elles sont incomplètes ou ne sont pas assez précises, il faut procéder à des mesures directes sur le colis de déchets pour l'orienter vers la bonne filière. Si des mesures ne sont pas disponibles de façon suffisamment précises pour tous les éléments, des valeurs pénalisantes sont choisies. Le colis de déchets est dans ce cas systématiquement orienté vers l'installation accueillant les colis les plus radioactifs.

Disposer de méthodes de mesure très précises et pour tous types d'éléments (radioactifs, chimiques) est donc un point essentiel pour optimiser le tri des colis de déchets. C'est tout l'enjeu des recherches sur ce thème.

Ce tri est basé sur les éléments chimiques ou radioactifs que contiennent les déchets. Disposer du maximum d'informations, de la façon la plus précise possible, sur les déchets et les colis de déchets, est donc indispensable pour optimiser le tri des déchets. Une partie de ces informations est obtenue par **caractérisation** des déchets, c'est à dire par un ensemble de mesures physiques ou chimiques.

Deux types de méthodes sont utilisées pour caractériser les déchets :

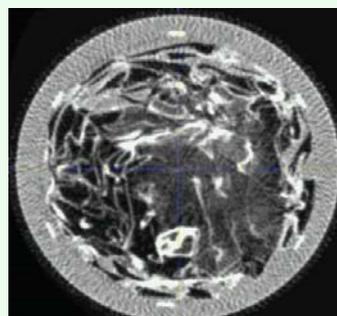
- les méthodes non destructives consistent à mesurer les neutrons ou les rayonnements émis par les déchets et permettent de déterminer les éléments chimiques ou radioactifs présents dans les colis, sans les ouvrir. Par exemple, on peut détecter la présence de 1 g de plutonium dans un colis de déchets cimentés de 800 kg,
- les méthodes intrusives nécessitent de prélever un échantillon de déchet en vue d'analyse chimique ou radiochimique. Elles sont notamment utilisées pour les déchets liquides ou pour les éléments présents en très faible quantité dans les colis, notamment les éléments à vie longue.

La caractérisation des déchets par méthodes non destructives

Les méthodes non destructives consistent à mesurer les neutrons ou les rayonnements émis par les déchets ou colis de déchets. Ces neutrons ou rayonnements peuvent être émis spontanément par les déchets (on parle alors de mesure « passive ») ou résulter de l'activation des déchets par une source de neutrons ou de photons (interrogation neutronique active ou interrogation photonique active). Pour déterminer le contenu radioactif des colis, la spectrométrie gamma, le comptage neutronique passif et, plus récemment, l'interrogation neutronique active sont des techniques bien maîtrisées et largement mises en œuvre dans les installations industrielles. Ces mesures sont souvent complétées de tomographies qui permettent de réaliser l'inspection physique des colis, de leur structure (densité, détection d'hétérogénéités) et de leur contenu (détection d'objets).



Tomographe



Tomographie d'un colis

Les améliorations apportées à chacune de ces méthodes ont permis des gains de performance importants. De plus, le couplage des méthodes, en permettant d'associer caractérisation physique, chimique et radioactive pour une meilleure connaissance des colis, a considérablement réduit les incertitudes associées aux activités ou masses mesurées.

Toutes ces méthodes ont fait l'objet d'améliorations conséquentes pendant ces dernières décennies. La durée nécessaire à la caractérisation des colis avec une précision donnée a été réduite, on peut mesurer des quantités de plus en faibles d'éléments chimiques ou radioactifs, et ce fréquemment sans devoir ouvrir les colis. Au fur et à mesure de leur mise au point, les diverses méthodes ont été mises en œuvre pour les besoins industriels.

DES ENTREPÔTS QUI DURENT PLUS DE CENT ANS

En France, depuis les débuts du nucléaire, on entrepose les combustibles usés et l'ensemble des déchets radioactifs de haute et moyenne activité. Des entrepôts existent sur tous les sites nucléaires et permettent de répondre de façon sûre aux besoins de gestion des industriels et des producteurs de déchets. Les combustibles usés sont entreposés en piscine, dans les centrales EDF pendant quelques mois puis à l'usine de La Hague, en attendant leur traitement. Les déchets de haute activité, issus du traitement actuel des combustibles usés et conditionnés dans des matrices en verre, sont entreposés à La Hague dans deux installations construites spécialement. Les déchets de moyenne activité à vie longue, sont entreposés généralement sur leur site de production.

L'entreposage sert à attendre que les conditions permettant la transformation ou l'élimination des déchets soient réunies. Il s'agit par exemple d'attendre qu'un site de stockage spécifique soit disponible ou que les progrès de la recherche offrent de nouvelles possibilités pour éliminer ces déchets. Il est donc difficile de connaître à l'avance la durée de la période d'entreposage. C'est pourquoi la possibilité d'entreposages prolongés a été examinée.

L'extension de la durée de vie et le renouvellement éventuel des entrepôts industriels est une première manière de répondre à un besoin d'entreposage de longue durée.

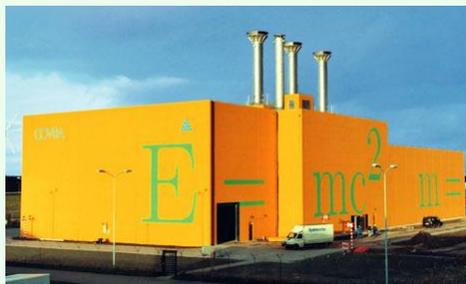
Prolonger les entrepôts existants

Les entrepôts existants ont été conçus, comme les centrales nucléaires actuelles, pour une durée de vie de l'ordre de cinquante ans. Des évaluations de durabilité ont été faites sur les entrepôts les plus récents. Si l'on surveille leur évolution et que l'on prend les mesures nécessaires pour les entretenir tout au long de leur vie, les entrepôts actuels pourront durer cent ans au moins. Bien sûr, cette prolongation n'interviendra que par étapes successives et après des réexamens par l'autorité de sûreté.

Cette tendance à l'allongement de la durée de vie existe aussi au plan international. On constate que les estimations de durée de vie de certains entrepôts industriels récents tendent aussi à dépasser les trente à cinquante ans généralement admis.



Installation d'entreposage (ECC) à La Hague



Installation d'entreposage aux Pays-Bas

Dans le cadre de l'axe 3 de la loi du 30 décembre 1991, une autre voie possible a été envisagée : concevoir des entrepôts spécifiquement étudiés pour la mise en attente et la préservation des colis, leur chargement et leur reprise dans des conditions de sûreté et d'économie viables sur des échelles de temps pouvant aller jusqu'à 300 ans.

Le contexte est alors différent de celui de la prolongation de la durée de vie d'entrepôts industriels. Tout dans la conception doit être prévu pour que l'installation soit peu sensible aux évolutions de son environnement technique et sociétal. En particulier on va jusqu'à envisager un défaut de maintenance durant une dizaine d'années sans que cela ne puisse entraîner aucun problème de sûreté. Il faut aussi s'attacher à ce que les charges d'exploitation soient les plus faibles possible pour les générations futures.

Des études ont donc été réalisées pour démontrer la faisabilité de telles installations d'entreposage de longue durée. Ces études sont des études de concept, destinées à fournir une image d'une installation d'entreposage de longue durée, mais sans objectif de réalisation à court ou moyen terme. Elles visent à démontrer qu'avec les connaissances et les techniques disponibles aujourd'hui il serait possible de construire une installation possédant toutes les caractéristiques nécessaires.

Deux possibilités d'implantation ont été envisagées : en surface ou en subsurface à quelques dizaines de mètres de profondeur, ces derniers étant plus résistants à des agressions externes (chute d'avion par exemple).

Pour l'entreposage, contrairement au stockage, aucune propriété de confinement des éléments radioactifs n'est demandée au site. C'est l'installation qui assure ce confinement. Les études de faisabilité ont donc pu être menées sur un site générique. Elles ont permis de préciser les dimensions des entrepôts et les contraintes de ces ouvrages vis-à-vis des sites d'implantation ultérieurs et ainsi d'établir une liste de critères (une cinquantaine) nécessaires au choix d'un site d'implantation. L'application de ces critères à l'ensemble du territoire français métropolitain montre qu'il paraît techniquement envisageable de trouver des sites pour l'entreposage de longue durée en surface sur 64% du territoire. Ce pourcentage est de 20% dans le cas d'un entreposage de subsurface en relief. Dans l'hypothèse où l'on déciderait de construire une installation d'entreposage de longue durée, la définition complète du projet pourra alors être optimisée en fonction des caractéristiques exactes (topographie, structure...) du site retenu pour implanter cette installation.

La conception de l'entrepôt de longue durée prend en compte deux éléments : les colis de déchets radioactifs et l'installation d'entreposage. Les fonctions qui doivent être maintenues pendant toute la durée de l'entreposage (confinement, possibilité de reprise...) peuvent alors être assurées soit par le colis lui-même, soit par l'installation.

Les conteneurs pour l'entreposage de longue durée

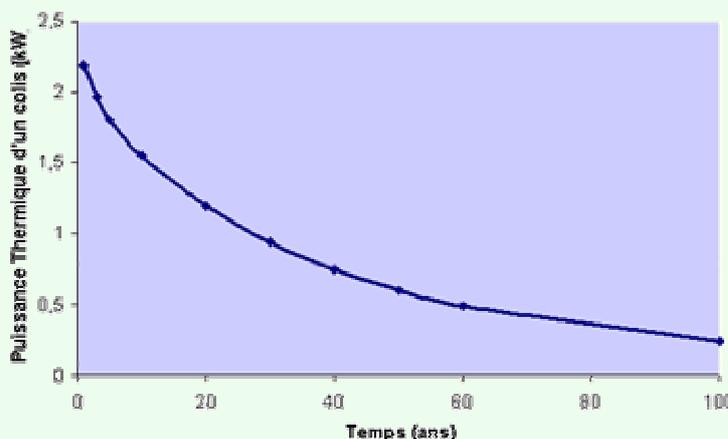
Dans tous les cas, les colis de déchets, issus des installations des producteurs, sont placés dans des conteneurs d'entreposage afin de les isoler complètement de l'environnement.

Certains colis de déchets sont susceptibles de relâcher de faibles quantités de gaz issues des réactions chimiques pouvant se produire sous l'effet des rayonnements, ainsi que des éléments radioactifs sous forme gazeuse. Dans ce cas, le béton a été choisi comme matériau pour le conteneur d'entreposage. En effet, le béton assure la protection des colis tout en permettant si nécessaire la diffusion des gaz émis. Un renfort par des fibres métalliques en acier inoxydable permet également au béton de remplir les critères mécaniques, notamment de tenue à la chute. Les modes de dégradation du béton sont aujourd'hui bien connus et maîtrisés, ce qui permet de prévoir le comportement des conteneurs au cours du temps. Leurs caractéristiques (formulation des bétons, épaisseur, type de fibres...) peuvent alors être spécifiées en fonction des performances que l'on attend de ces conteneurs.

Les colis de déchets de haute activité ou de combustibles usés, quant à eux, dégagent de la chaleur pendant une période très longue, même si cette quantité de chaleur décroît très rapidement. L'ordre de grandeur de la puissance à évacuer peut atteindre plusieurs mégawatts pour un entrepôt.

Evolution dans le temps de la puissance thermique d'un colis de déchets vitrifiés

La puissance thermique des colis de déchets vitrifiés est due pendant les cent premières années aux éléments radioactifs à vie courte qu'ils contiennent. Lorsque ceux-ci ont disparu, la puissance thermique dégagée est beaucoup plus faible. Par contre, comme elle est due à des éléments à vie longue, elle décroîtra alors très lentement.



Pour ces types de déchets, le choix a été fait de conteneurs métalliques d'entreposage étanches qui constituent une barrière de protection supplémentaire entre le colis et l'environnement.

Des démonstrateurs de conteneurs, à l'échelle 1, de tous les types ont été réalisés et sont présentés au centre d'expertise sur le conditionnement et l'entreposage des matières radioactives (CECER) à Marcoule.

Le conteneur d'entreposage pour les déchets de haute activité

Le conteneur spécifique développé pour l'entreposage de longue durée est cylindrique, d'épaisseur 4,5cm. Il a une capacité de sept assemblages de combustible à l'oxyde d'uranium ou une capacité de six colis de déchets vitrifiés. Pour assurer un confinement jusqu'à 300 ans, chaque assemblage de combustible usé est placé dans un étui étanche en acier inoxydable. Ce sont ces étuis qui sont ensuite placés par sept dans le conteneur d'entreposage.

En examinant les critères de tenue à la corrosion, principale cause possible de défaillance en entreposage, les critères d'aptitude à la fabrication et à la fermeture, et les critères d'économie, une fonte particulière, possédant des caractéristiques mécaniques proches de celle des aciers, a été retenue comme matériau pour la réalisation de ces conteneurs d'entreposage.



Continuité entre entreposage de longue durée et stockage

Les déchets nucléaires sont mis sous forme de colis dans l'installation qui a produit ces déchets. Les conteneurs d'entreposage de longue durée sont conçus pour recevoir ces colis.

A l'issue d'une période d'entreposage de longue durée, il faut sortir les conteneurs d'entreposage de longue durée, remplis des colis de déchets, de l'installation. Plusieurs possibilités s'ouvrent alors :

- utiliser tels quels les conteneurs qui ont servi à l'entreposage de longue durée, c'est à dire sans les ouvrir pour en ressortir les colis de déchets. Les conteneurs pour déchets MA-VL ont été conçus dans cette perspective, ils peuvent être directement placés en stockage profond,
- ouvrir les conteneurs qui ont servi à l'entreposage de longue durée et en ressortir les colis de déchets. Tous les conteneurs ont été conçus pour protéger, tout au long de la période d'entreposage, les colis de déchets. Ceux-ci, une fois sortis des conteneurs, peuvent alors être gérés comme des colis venant d'être fabriqués. En particulier, les combustibles usés peuvent être envoyés directement au retraitement.

Tous les choix restent donc possibles à l'issue de l'entreposage de longue durée.



Conteneur commun entreposage de longue durée-stockage pour déchets MA-VL

Les entrepôts de longue durée

Dans leurs principes généraux, les concepts d'entrepôts sont similaires pour les colis de moyenne activité et pour les colis de déchets de haute activité ou de combustibles usés.

Dans un souci de robustesse, la mise en oeuvre de systèmes de ventilation passifs, c'est à dire ne nécessitant pas de pompes ou de compresseurs, a été privilégiée. On s'est, pour les mêmes raisons, interdit toute régulation en température ou en humidité au niveau de la ventilation de l'entrepôt.

Des solutions différentes ont été adoptées pour cette ventilation selon les cas. Les colis de déchets de haute activité ou de combustibles usés dégagent de la chaleur. Une ventilation par un courant d'air naturel transverse permet d'assurer l'évacuation de la chaleur dégagée par les colis et de maintenir l'humidité à un niveau le plus bas possible.

Les déchets de moyenne activité ne dégagent pas de chaleur mais sont susceptibles de relâcher des gaz. Il faut donc ici ventiler suffisamment l'entrepôt pour éviter toute accumulation de gaz, notamment d'hydrogène. En surface, cette ventilation est possible sans l'adjonction de pompe. Par contre, en subsurface, l'efficacité de cette ventilation dépend des caractéristiques géologiques et climatologiques du site. Pour les études de faisabilité, on a donc retenu, par précaution, le principe d'une ventilation assistée par des pompes pour le renouvellement de l'air.

Entrepôts de longue durée en surface

Un entrepôt de surface est composé de bâtiments en béton armé destinés à protéger les conteneurs d'entreposage des agressions externes (par exemple, chute d'avion). L'installation est structurée en deux zones. Dans une première zone d'interface sont effectuées les opérations de réception et de mise en conteneurs. Dans l'autre zone sont regroupés les bâtiments d'entreposage.

Dans les bâtiments de l'entrepôt de déchets de haute activité les conteneurs d'entreposage sont posés au niveau du sol. Dans le cas d'un entrepôt de déchets de moyenne activité, les conteneurs en béton sont empilés par trois pour minimiser l'emprise au sol. Une galerie technique située au niveau supérieur des bâtiments permet les interventions, notamment les opérations de maintenance sur les équipements de manutention.

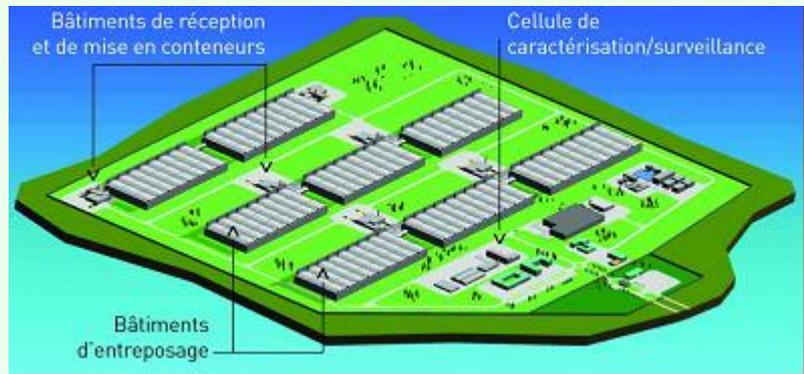


Schéma de principe d'un entrepôt de longue durée pour déchets de moyenne activité

L'entreposage en subsurface de colis de déchets

L'installation d'entreposage de subsurface est constituée d'une partie comportant les installations d'accueil et de mise en conteneur, située en surface, et de galeries d'entreposage proprement dites reliées entre elles par des galeries techniques permettant notamment l'acheminement des colis depuis l'installation de surface. Les galeries se présentent sous la forme de fosses d'entreposage couvertes par des dalles de béton pour l'entrepôt de déchets de moyenne activité et de puits verticaux accueillant chacun deux conteneurs dans le cas de l'entrepôt de déchets de haute activité ou des combustibles usés.

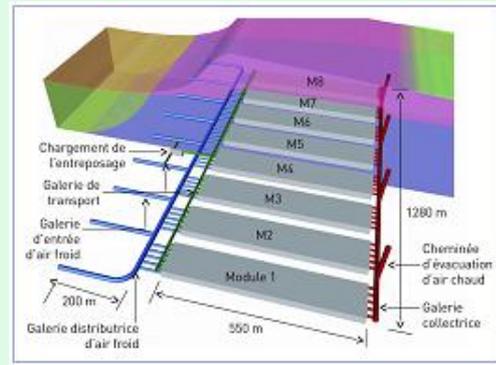
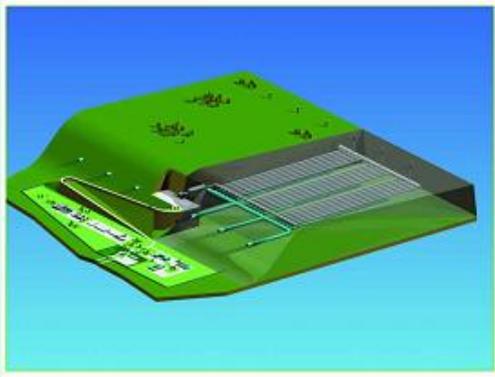


Schéma de principe de l'entrepôt de subsurface

Dans le cadre du centre d'expertise sur le conditionnement et l'entreposage des matières radioactives (CECER), un tronçon de galerie a été réalisé à Marcoule pour illustrer le concept d'entrepôt de subsurface des déchets de haute activité et réaliser, à partir de 2005, des études de démonstration thermique.

Galerie d'illustration et de démonstration de l'entreposage de subsurface (CECER)



L'impact des entrepôts sur l'environnement

L'impact des installations sur l'environnement a été examiné dans les différentes situations qui seront rencontrées au cours de la vie des entrepôts.

En fonctionnement normal, certains colis de déchets de moyenne activité sont susceptibles de relâcher des éléments radioactifs gazeux. Les calculs ont montré que l'impact sur l'environnement de ces rejets restait toujours inférieur à celui de la radioactivité naturelle. Plusieurs situations accidentelles ont aussi été envisagées. Par exemple, la chute d'un conteneur entraînant la perte de confinement du conteneur béton et des colis de déchets qu'il contient, ou un feu de colis de boues bitumées dans la zone de mise en conteneurs des colis de déchets. Toutes ont un impact sur l'environnement qui est inférieur à celui qui est pris en compte par les normes de radioprotection.

Pour ce qui concerne les déchets de haute activité à vie longue, il a été vérifié que les conteneurs d'entreposage sont totalement étanches et il n'y a ni rejet ni impact radiologique sur l'environnement dû au fonctionnement de l'entrepôt. La situation accidentelle qui aurait l'impact le plus important sur l'environnement serait la perte de confinement d'un conteneur d'assemblages de combustible usé en début d'entreposage. L'ensemble des calculs montre que cette situation conduirait à un impact inférieur à la limite réglementaire définie par les normes de radioprotection

La durabilité des entrepôts de longue durée

La démonstration de la durabilité des installations d'entreposage de longue durée est basée d'une part sur le retour d'expérience en matière de matériaux cimentaires et d'autre part sur la connaissance des phénomènes d'évolution des matériaux et des structures.

A partir de cette connaissance on peut retenir, pour concevoir les entrepôts, des dispositions plus sévères que pour des ouvrages classiques (schémas de ferrailage du béton optimisés, prise en compte des modifications chimiques du béton au cours du temps). Ainsi, à l'échelle du siècle, les installations ne présenteront pas de modifications de leurs caractéristiques d'origine et, au-delà, même si des dégradations locales peuvent commencer à se produire, elles n'auront aucune conséquence sur la tenue des entrepôts. Moyennant l'adoption de dispositions de constructions adaptées, la durée de vie des ouvrages pourra donc atteindre 300 ans.

De plus, en utilisant les modèles mis au point et en surveillant les bétons au cours de la vie de l'installation, il sera possible de prédire l'évolution des structures dans la durée et ainsi de prendre des mesures préventives pour minimiser encore plus les dégradations locales.

QU'ONT APPORTÉ CES QUINZE ANS DE RECHERCHES SUR LE CONDITIONNEMENT ET L'ENTREPOSAGE DE LONGUE DURÉE ?

Durant les quinze années écoulées, des avancées très importantes ont été enregistrées sur les procédés de conditionnement et les concepts d'entreposage de longue durée des déchets radioactifs à vie longue.

Tout d'abord, le volume des déchets à vie longue conditionnés lors du traitement des combustibles usés a été divisé par dix et la radioactivité rejetée par les usines de La Hague a été réduite dans la même proportion. De tels résultats ont été possibles grâce aux études menées en étroite collaboration entre Cogema et le CEA, le programme Puretex.

Parallèlement, des progrès significatifs ont été réalisés sur le plan du conditionnement : les déchets sont aujourd'hui bien connus, grâce notamment à la mise en œuvre des méthodes et outils plus efficaces de caractérisation des déchets développés ; des procédés de traitement et de conditionnement performants ont été mis au point et sont disponibles pour tous les types de déchets ; les études de comportement à long terme ont permis d'établir des modèles d'évolution en entreposage et en stockage pour tous les types de colis et de faire de premières estimations de durée de vie de ces colis.

Des concepts d'installations d'entreposage, en surface ou en subsurface, conçues dès le départ pour des durées longues (jusqu'à 300 ans) ont été étudiés pour tous les types de déchets et pour les combustibles usés. Des images d'entrepôts ont été produites et des dossiers de définitions ont été élaborés. Aujourd'hui, au plan technique, on saurait construire de telles installations. Si cette construction était décidée, elle pourrait être réalisée en moins d'une dizaine d'années.

Néanmoins, même si ces concepts d'installations présentent une robustesse particulière aux aléas externes, techniques ou sociétaux, l'entreposage des déchets nécessite de maintenir dans la durée la surveillance et le contrôle de l'installation. En effet, quelles que soient les dispositions constructives prises, il sera indispensable, lorsque les entrepôts auront atteint leur fin de vie, de reprendre les colis, éventuellement de les reconditionner et de construire de nouveaux entrepôts pour y transférer ces colis.

Des avancées notables ont d'ores et déjà été mises en œuvre sur les déchets actuels, les progrès continueront à accompagner l'utilisation durable de l'énergie nucléaire, notamment en matière de réduction des déchets ultimes. Ces améliorations se concrétiseront progressivement grâce à la poursuite de la recherche en concertation avec les différents acteurs concernés par la gestion des déchets radioactifs.