

LES DÉCHETS RADIOACTIFS À HAUTE ACTIVITÉ ET À VIE LONGUE / RECHERCHES ET RÉSULTATS

//////// LOI DU 30 DÉCEMBRE 1991 //////////

— Séparation-transmutation
des éléments radioactifs
à vie longue

— Conditionnement
et entreposage
de longue durée

Axe

1

Axe

3

// Enjeux, questions et réponses //

/ juin 2005



Commissariat à l'énergie atomique
Direction de l'énergie nucléaire
CEA/Saclay
91191 Gif-sur-Yvette

www.cea.fr



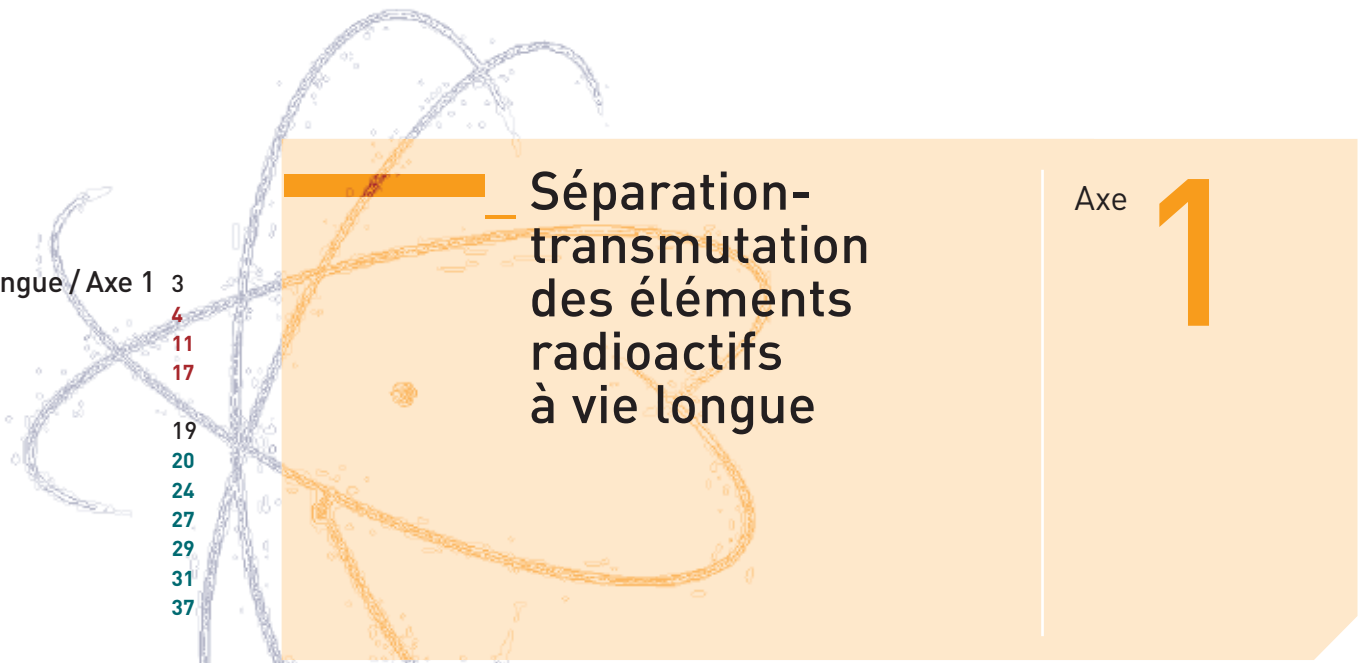
Sommaire //

_ Séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue / Axe 1 3

- L'AXE 1 : LES ENJEUX 4
- LA TRANSMUTATION : ÉLIMINER LES ÉLÉMENTS A VIE LONGUE 11
- LES NOUVELLES PISTES OUVERTES 17

_ Conditionnement et entreposage de longue durée / Axe 3 19

- LES TECHNIQUES ACTUELLES DE CONDITIONNEMENT ET D'ENTREPOSAGE 20
- RÉDUIRE LE VOLUME DES DÉCHETS RADIOACTIFS 24
- COMMENT SE COMPORTEMENT LES COLIS SUR LE LONG TERME ? 27
- MIEUX TRIER LES DÉCHETS 29
- DES ENTREPÔTS QUI DURENT PLUS DE CENT ANS 31
- LES FRUITS DE QUINZE ANNÉES DE RECHERCHES 37



Séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue

Axe 1

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'énergie atomique) de piloter celles sur la séparation et la transmutation ainsi que celles portant sur le conditionnement et l'entreposage de longue durée. Ce sont les résultats obtenus sur la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue, qui sont présentés ci-après. Ces recherches ont été effectuées majoritairement par les équipes du CEA ou par celles du CNRS ou des universités. //

L'AXE 1 : LES ENJEUX

Un principe général : réduire les quantités et la nocivité des déchets ultimes

L'objectif de l'axe 1 est de réduire les quantités de déchets ultimes ainsi que leur nocivité. Cette volonté correspond aux dispositions législatives déjà en vigueur sur la gestion des déchets, qu'ils soient ou non de nature radioactive.

En effet, la loi du 15 juillet 1975 a fixé les principes généraux suivants :

- « prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets, notamment en agissant sur la fabrication et sur la distribution des produits... »
- « valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie... »

La loi du 13 juillet 1992 précise par ailleurs la notion de déchet ultime, défini comme « déchet résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » (article L541-1 du Code de l'environnement).

Comment ce principe s'applique-t-il aux déchets radioactifs ?

Le combustible des réacteurs EDF est constitué d'oxyde d'uranium ou d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium. Après son séjour dans le réacteur, le combustible contient encore une quantité importante de matières valorisables, qu'il est intéressant de récupérer. Par ailleurs, les réactions nucléaires dans le réacteur qui ont produit de l'énergie ont également créé d'autres éléments, que l'on appelle les produits de fission et les actinides mineurs. Ces éléments rendent le combustible usé extrêmement radioactif. C'est la raison pour laquelle, le combustible est retraité, de manière à :

- récupérer les matières énergétiquement valorisables ;
- séparer ces matières des autres éléments radioactifs qui constituent les déchets ;
- conditionner les déchets sous une forme inerte et sûre en les incorporant dans du verre, c'est le procédé de vitrification, qui est mis en œuvre dans l'usine Cogema de La Hague.

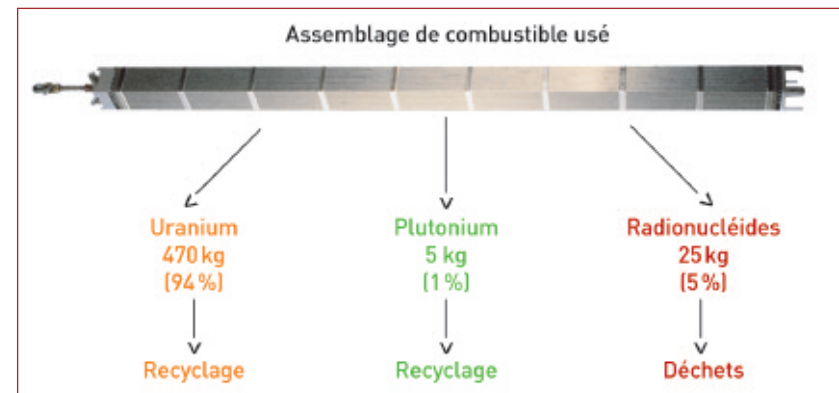
L'axe 1 de la loi de 91 propose d'examiner des solutions industrialisables permettant de réduire encore les quantités de déchets de haute activité contenus dans les verres et d'aller plus loin dans le recyclage des matières contenues dans le combustible usé.

Les déchets vitrifiés qui sont fabriqués actuellement sont gérés selon des règles strictes de sorte qu'ils n'aient aucun impact sur le public ou les professionnels. La réduction de la nocivité étudiée dans le cadre de l'axe 1, est donc une action en profondeur qui concerne quelques éléments radioactifs contenus dans le combustible, qui vise à réduire la nocivité à la source et qui s'ajoute aux dispositions actuelles.

Les éléments présents dans un combustible usé

Chaque année, 1 150 tonnes de combustible usé sont retirées des réacteurs EDF. Ce combustible contient :

Composition du combustible usé



- 94 % d'uranium et 1 % de plutonium, des éléments valorisables qui peuvent fournir beaucoup d'énergie (à titre d'exemple, pour produire la même quantité d'énergie, ce millier de tonnes de combustible nucléaire représente l'équivalent de 23 millions de tonnes de pétrole environ),
- d'autres éléments radioactifs, qui représentent aujourd'hui les déchets de la production d'énergie : les « actinides mineurs » (ainsi qualifiés de par leur faible quantité), notamment neptunium, américium et curium, et les « produits de fission ». Pour décrire la nocivité de ces différents éléments, les spécialistes du domaine nucléaire utilisent le terme de « radiotoxicité ».

Le plutonium, qui peut fournir de l'énergie, est le principal élément radiotoxique du combustible usé, toxique jusqu'à des centaines de milliers d'années. Il faut donc le traiter en priorité. Dès les années 80, le traitement-recyclage du combustible usé a été promu en France. Une véritable stratégie a dès lors été mise en œuvre, permettant non seulement d'en extraire toute l'énergie encore disponible mais aussi de réduire les volumes de déchets. Ceci s'est traduit par l'extraction de l'uranium et du plutonium présents dans le combustible usé puis leur recyclage dans les réacteurs EDF. Cette opération permet de diminuer les importations d'uranium et de concentrer les déchets ultimes dans un volume restreint.

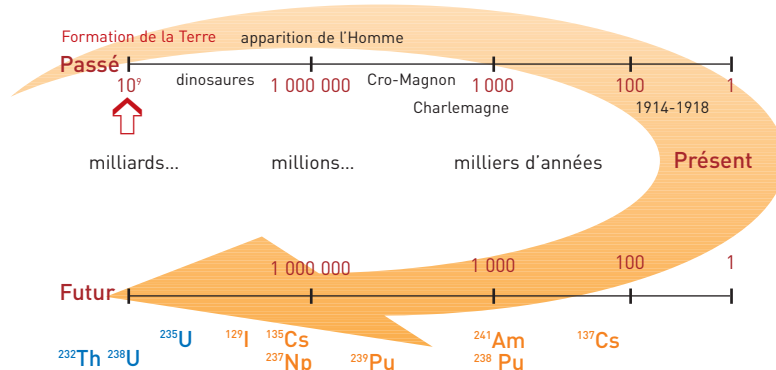
Ce faisant, 95 % du contenu d'un combustible usé est donc traité pour être recyclé. Une part importante des autres éléments radioactifs du combustible usé (4,6 %) a par ailleurs une période de décroissance radioactive inférieure à 30 ans. Leur radioactivité est, durant les premières années après la sortie du réacteur, très importante mais elle décroît vite (elle est divisée par mille au bout de trois cents ans) ainsi que le dégagement de chaleur en résultant. Il n'est donc pas jugé utile d'essayer de diminuer la quantité de ces éléments.

Reste donc 0,4 % de déchets à vie longue : 0,1 % d'actinides mineurs et 0,3 % de produits de fission. Leurs périodes de décroissance radioactive vont de plusieurs milliers d'années (américium, par exemple) à plusieurs millions d'années (neptunium, par exemple). Ils sont donc responsables d'une radioactivité et d'un dégagement de chaleur résiduels sur des durées très longues.

LES ÉLÉMENTS RADIOACTIFS ET L'EFFET DES RAYONNEMENTS : LA RADIOTOXICITÉ

Les constituants de la matière sont des atomes comprenant un noyau et des électrons qui tournent autour. Le noyau est un assemblage de protons et de neutrons concentrés dans un très petit volume et soumis à des forces qui maintiennent sa cohésion. Un atome se caractérise par le nombre de protons et de neutrons de son noyau. Un élément chimique est un ensemble d'atomes contenant le même nombre de protons. Les éléments chimiques dont le nombre de protons est compris entre 57 (lanthane) et 71 sont appelés lanthanides, les éléments dont le nombre de protons est compris entre 89 (actinium) et 103 sont appelés actinides. L'uranium et le plutonium sont des actinides. Actinides et lanthanides sont notamment formés dans le combustible nucléaire, lors de son utilisation en réacteur, puis contenus dans les déchets. Certains de ces éléments sont radioactifs, c'est-à-dire qu'ils se désintègrent en émettant spontanément différents types de rayonnements (alpha, bêta et gamma). La vitesse de désintégration est mesurée par la période radioactive qui est le temps au terme duquel la moitié des atomes radioactifs a disparu. La radiotoxicité, contribution de chaque élément aux effets biologiques quand l'élément entre en contact avec l'organisme humain, par inhalation ou ingestion, mesure le caractère potentiellement dangereux des déchets radioactifs.

Échelles de temps et périodes radioactives des éléments radioactifs



Une fois le plutonium séparé, les actinides mineurs et, bien plus faiblement, les produits de fission à vie longue sont donc les éléments radioactifs responsables au-delà d'un millier d'années de la radiotoxicité des déchets d'aujourd'hui. Ce sont ces éléments radioactifs dont il faut viser à réduire la quantité présente dans les déchets. Pour y parvenir, il faut :

- extraire ces éléments du combustible usé ; c'est l'étape de séparation,
- les éliminer en les transformant en éléments non radioactifs ou à vie plus courte ; c'est l'étape de transmutation.

Les objectifs et les moyens des recherches

Le CEA a décliné en questions opérationnelles les objectifs associés à l'axe 1 et structuré les programmes de recherche selon ces questions :

- Quels éléments radioactifs à vie longue peut-on séparer ? A partir de quels déchets ? Et comment ?
- Que peut-on faire de ces éléments une fois séparés ?
- Quels éléments séparés sont transmutables en éléments à vie courte ? Et comment ?
- Quelles seraient les caractéristiques des déchets ultimes résultant de ces traitements ?

LES COLLABORATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES

Sur l'axe 1, un partenariat important a été développé avec le CNRS. Cela s'est traduit par la création de Groupements de recherche coordonnés dans le cadre du programme sur l'aval du cycle électronucléaire du CNRS. Ces groupements rassemblent de nombreux partenaires, dont les universités et les industriels du secteur nucléaire. Sur le plan européen, d'importantes collaborations, menées au sein des programmes cadres de recherche et développement (PCRD) successifs, ont porté aussi bien sur la séparation que sur la transmutation. L'Institut des transuraniens (ITU), à Karlsruhe en Allemagne, a ainsi contribué aux travaux sur les actinides, et les recherches sur la transmutation se sont enrichies de collaborations expérimentales auprès du réacteur HFR, à Petten aux Pays-Bas. Sur le plan international, une collaboration s'est engagée, d'une part avec le Japon qui poursuit des objectifs proches des nôtres et, d'autre part, avec les instituts russes sur la séparation et les expériences de transmutation. Depuis 2001, une collaboration a été engagée avec les Etats-Unis (notamment avec les laboratoires de recherches dépendant du Département à l'énergie) portant sur la séparation et les irradiations de combustible de transmutation, dans le cadre des études américaines sur le traitement-recyclage du combustible usé.

Pour instruire ces différentes questions, le CEA a mobilisé d'importants moyens humains, techniques et financiers, et a également mis en place de nouvelles coopérations avec les acteurs nationaux (CNRS, universités, grandes écoles...), européens et internationaux.

Depuis 1992, plusieurs centaines de personnes ont travaillé dans des domaines très variés sur l'axe 1 de la loi de 1991. Ces travaux ont fait l'objet de plus d'un millier d'articles dans les revues scientifiques ou de communications dans des conférences françaises et internationales.

Ces travaux ont également été évalués et discutés par des instances internationales spécifiques de très haut niveau, tels que des « Visiting Committees », dont certains membres sont des Prix Nobel.

SÉPARATION POUSSÉE : TRIER POUR MIEUX GÉRER

Comment séparer les éléments radioactifs à vie longue ?

Le traitement des combustibles usés, tel qu'il est réalisé actuellement en France, vise à extraire l'uranium et le plutonium et à conditionner les déchets de haute activité restants dans une matrice de verre. Ce conditionnement satisfait aux critères de sûreté et est de bonne qualité, comme le montrent les études de comportement à long terme. Pour l'extraction de l'uranium et du plutonium, un procédé baptisé Purex est utilisé avec succès depuis plusieurs dizaines d'années. En particulier en France, où Cogema exploite à La Hague une usine d'une capacité de traitement de 1 700 tonnes de combustibles usés par an. Depuis une vingtaine d'années, la France a fait le choix d'utiliser le plutonium extrait par Purex sous forme de combustible MOX dans 20 des 58 réacteurs EDF : le plutonium subit déjà ainsi la transmutation à l'échelle industrielle !

La séparation poussée vise à compléter le procédé industriel Purex en extrayant du combustible usé, par étapes successives, les actinides mineurs, neptunium, américium et curium. La séparation poussée a aussi été étudiée pour extraire

les produits de fission à vie longue suivants : iode 129, technétium 99 et césium 135. Au cours du procédé, tous ces éléments sont dissous dans l'acide nitrique et capturés sélectivement grâce à des « molécules pièges » spécifiques. Il faut donc trouver et mettre au point, pour extraire chaque élément, une molécule hautement sélective, résistante à l'acide nitrique et qui génère pas ou peu de déchets : c'est là l'enjeu des recherches menées depuis une dizaine d'années, dont certains aspects constituaient de vrais défis scientifiques. C'est donc une nouvelle chimie de la séparation qu'il a fallu développer, en concevant, synthétisant et testant plus d'une centaine de nouvelles molécules très sélectives, un travail qui, à lui seul, représente plus de cinq années d'efforts.

Avantages de la séparation poussée

Les déchets ultimes obtenus après séparation poussée, conditionnés sous forme de verres, seront moins radiotoxiques à long terme et moins chauds, car contenant moins d'éléments radioactifs générateurs de chaleur, que les verres actuels. La radiotoxicité après 500 ans du verre allégé de l'uranium, du plutonium et des actinides mineurs, pourra alors être diminuée au maximum de 100 par rapport à la radiotoxicité après 500 ans du verre produit aujourd'hui.

Tels sont sommairement les avantages qui découleraient d'une stratégie de séparation-transmutation des éléments à vie longue contenus dans les déchets de haute activité. Ceux-ci seraient plus faciles à gérer, même s'ils ne peuvent pas être stockés en surface comme les déchets de faible activité actuels. Il faut aussi tenir compte des déchets qu'induirait la mise en œuvre des opérations de séparation et de transmutation.

En outre, la diminution de la puissance thermique des déchets pourrait permettre de réduire le volume du stockage de façon variable selon le concept de stockage retenu.

Peut-on récupérer les éléments radioactifs dans les verres déjà produits ?

Pour les verres déjà produits, une reprise a été étudiée afin d'en extraire les actinides mineurs et les produits de fission à vie longue en vue de les traiter par séparation-transmutation. Différentes voies peuvent être envisagées pour extraire ces éléments radioactifs à vie longue des verres déjà produits :

- un procédé à température ambiante, consistant à dissoudre le verre dans une solution acide après concassage mécanique ;
- un procédé thermique à haute puis basse température, permettant *in fine* la destruction du verre en phase aqueuse.

C'est le second procédé qui paraît accessible aux technologies nucléaires existantes. Toutefois, l'industrialisation de ce procédé complexe, à plusieurs étapes, nécessiterait d'importants développements et entraînerait la construction de plusieurs ateliers similaires aux ateliers existants de La Hague, avec des coûts élevés d'investissement et d'exploitation. En outre, elle générerait un volume de déchets secondaires important.

Compte tenu de ces résultats, il n'est pas réaliste de récupérer les éléments radioactifs à vie longue des verres déjà produits. Ainsi, la séparation ne pourra s'appliquer qu'aux déchets qui seront produits dans le futur.

Les procédés étudiés

Pour mener les expériences sur la séparation poussée, le CEA a notamment construit et exploité une installation spécifique, Atalante.

L'INSTALLATION ATALANTE

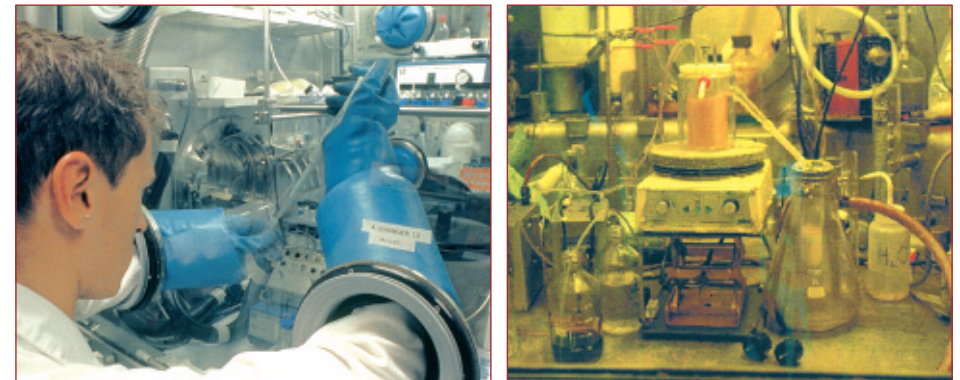
Le projet Atalante a été engagé dès le début des années 1980 dans le but de regrouper sur le site de Marcoule, dans le sud de la France, l'ensemble des moyens nécessaires aux recherches en chimie de haute activité conduites par le CEA. Il a nécessité un investissement de 250 millions d'euros. L'installation, de 19 000 m² de surface utile, comporte un bâtiment de bureaux, un bâtiment de services généraux (sans matière nucléaire) et cinq bâtiments en zone active (équipée pour accueillir les matières nucléaires).

Ces derniers comprennent :

- 15 laboratoires équipés des boîtes à gants (pour les études de radiochimie mettant en jeu des éléments actinides, essentiellement émetteurs de rayonnement alpha peu pénétrants),
- 7 chaînes blindées équipées de télémanipulateurs (permettant la mise en œuvre d'échantillons de combustibles irradiés, émetteurs de rayonnements bêta, gamma et de neutrons en plus des rayonnements alpha).

Atalante est dotée des moyens les plus modernes de recherche et développement et prend en compte les critères concernant, d'une part, la protection de l'environnement et du personnel et, d'autre part, la gestion des effluents liquides et des déchets solides.

Plus de 200 chercheurs travaillent dans cette installation, dont le fonctionnement est, de plus, assuré par 70 personnes.



Les recherches sur la récupération du neptunium, de l'iode et du technétium ont été menées grâce à des adaptations du procédé Purex.

L'extraction de l'américium et du curium s'est révélée plus complexe et n'a pas pu être faite par des adaptations du procédé Purex. Il a donc fallu développer d'autres procédés recourant à de nouvelles molécules pièges.

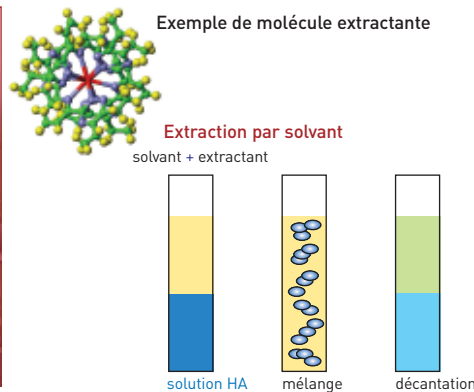
Cette séparation nécessite plusieurs étapes :

- séparation de l'ensemble (actinides mineurs et lanthanides) des produits de fission ;
- séparation des actinides mineurs d'avec les lanthanides ;
- séparation de l'américium d'avec le curium. Un dernier procédé, basé sur une molécule d'un autre type, est nécessaire pour piéger le césium.

Un important volume d'études a tout d'abord été consacré à la recherche de ces nouvelles molécules d'extraction et à l'examen dans le laboratoire Atalante de différentes voies d'extraction, puis à des essais menés sur quelques kilogrammes de combustible usé pour les concepts les plus prometteurs.

SÉPARATION PAR EXTRACTION

L'extraction liquide-liquide par solvant est une technique mettant en jeu deux liquides : un liquide aqueux et un liquide organique non miscibles entre eux. L'ensemble des éléments radioactifs à séparer est dissous dans le liquide aqueux de haute activité (HA) alors que, dans le liquide organique, on dissout dans un solvant une molécule particulière appelée molécule « extractante ». Le rôle de cette molécule est de piéger les éléments que l'on veut séparer dans le liquide aqueux et de les entraîner (ou extraire) avec elle dans le liquide organique. Cette molécule doit être efficace (avoir une bonne affinité pour les éléments à séparer) et sélective (n'avoir de l'affinité que pour ces éléments). Une des difficultés majeures de la conception d'un procédé d'extraction liquide-liquide réside dans le choix de cette molécule extractante.



Résultats des recherches de la séparation poussée

Les équipes du CEA, en collaboration avec des laboratoires français et étrangers, ont montré qu'au prix de quelques adaptations, Purex permet effectivement de récupérer le neptunium, l'iode et le technétium.

Des molécules pièges spécifiques ont été mises au point pour récupérer l'américium, le curium et le césium.

La faisabilité de la séparation poussée des actinides mineurs et produits de fission a été établie par des essais des procédés en laboratoire sur des solutions réelles de dissolution de quelques centaines de grammes de combustible usé. Les performances de séparation sont très satisfaisantes : récupération d'au moins 99 % des actinides mineurs et produits de fission (95 % pour le technétium). Ces résultats démontrent que la séparation des actinides mineurs est acquise avec les rendements visés. C'est un résultat majeur de la recherche. Cette faisabilité devrait être confirmée en 2005 par la réalisation des procédés en continu à partir d'une solution contenant 15 kg de combustible usé, dans le laboratoire Atalante.

Des procédés de séparation encore plus innovants

De façon plus prospective, des procédés de séparation des radioéléments à haute température (entre 250°C et 1 200°C) ont aussi été explorés et évalués. Ils pourraient être plus compacts, plus résistants à l'irradiation et mieux adaptés au traitement de certains combustibles du futur que les procédés décrits précédemment. Toutefois, un grand nombre d'incertitudes, liées aux performances de séparation et aux difficultés technologiques de mise en œuvre des procédés à haute température ainsi qu'à la corrosion des milieux, reste à surmonter avant d'envisager un déploiement de ces méthodes à une échelle industrielle.

La conservation industrielle des éléments radioactifs séparés avant transmutation

Aujourd'hui, le plutonium extrait du combustible usé est conditionné, sous forme d'oxyde, dans des conteneurs métalliques. Ces conteneurs sont entreposés sur le site de La Hague dans l'attente de leur transfert vers l'usine de fabrication de combustible MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) de Marcoule réutilisant ce plutonium.

Dans cette logique, des études ont été menées sur le conditionnement et l'entreposage des actinides mineurs séparés afin de disposer d'une chaîne complète de traitement poussé du combustible jusqu'à l'entreposage dans l'attente de l'utilisation ultérieure des éléments séparés (fabrication de combustibles ou de cibles pour la transmutation).

Un entreposage a donc été étudié pour conserver ces matières pendant quelques années entre ces différentes étapes industrielles.

Dans ces études, les concepts s'appuyant sur les voies industrielles déjà éprouvées ont été privilégiés.

Les résultats obtenus indiquent que l'entreposage des actinides mineurs est faisable :

- l'américium et le neptunium peuvent être entreposés sous une forme et d'une manière similaires à celles utilisées aujourd'hui pour le plutonium, sous réserve d'adaptation aux problèmes spécifiques de criticité et de radioprotection ;
- l'entreposage sous eau, pendant quelques dizaines d'années, des containers de curium est faisable, moyennant quelques études complémentaires d'optimisation (dilution avec de l'uranium ou avec un mélange d'actinides mineurs), notamment pour la gestion de la criticité et des situations dégradées.

LA TRANSMUTATION : ÉLIMINER LES ÉLÉMENTS À VIE LONGUE

Après séparation, la transmutation vise à transformer les éléments radioactifs à vie longue en éléments à durée de vie plus courte ou stables. Pour y parvenir, le moyen le plus efficace est de bombarder les noyaux de ces éléments à vie longue par des neutrons. Ceux-ci sont disponibles en très grande quantité dans les réacteurs nucléaires.

Comment réaliser la transmutation

Dans le cœur d'un réacteur, les actinides mineurs sont soumis au bombardement des neutrons générés par l'uranium et le plutonium. Les neutrons réagissent de deux façons possibles avec les noyaux des actinides mineurs : soit ils sont capturés dans

ces noyaux, soit ils parviennent à les casser par fission en plusieurs fragments. Dans le premier cas, la réaction aboutit à former des éléments à durée de vie plus longue ; au contraire, dans le second cas, les fragments sont à faible durée de vie ou stables et la transmutation recherchée est alors obtenue. Il faut donc privilégier cette seconde voie et concevoir un réacteur nucléaire qui va fonctionner le plus possible avec des réactions de fission sur les éléments à transmuter.

Les trois outils étudiés pour réaliser la transmutation sont les réacteurs à neutrons thermiques (les réacteurs à eau sous pression REP actuels d'EDF), les réacteurs à neutrons rapides (RNR) et les concepts d'installations couplant un accélérateur de particules et un réacteur sous-critique (appelés « systèmes hybrides » ou « *Accelerator Driven Systems [ADS]* »).

Les réacteurs d'aujourd'hui peuvent-ils réaliser la transmutation ?

Les réacteurs aujourd'hui disponibles sont ceux exploités par EDF (les réacteurs à eau sous pression ou REP) ainsi qu'un réacteur expérimental à neutrons rapides (Phénix) situé à Marcoule. Pour étudier la capacité de ces réacteurs à transmuter les éléments radioactifs à vie longue, des simulations ont été faites à partir de logiciels spécialement développés dans cet objectif.

LES OUTILS DE SIMULATION POUR LES RÉACTEURS

Pour évaluer tout d'abord par simulation les capacités de transmutation des réacteurs nucléaires, il faut disposer de logiciels de calcul reproduisant les réactions se déroulant dans le cœur du réacteur. Ces logiciels de calcul neutronique font appel à des « bibliothèques de données », des codes de calcul et des expériences de qualification. La qualité de l'ensemble conditionne le niveau d'incertitude des résultats des calculs.

A partir des logiciels de calcul existants, développés et qualifiés pour les réacteurs classiques, des développements et extensions ont été réalisés sur chacun de ces sous-ensembles pour couvrir les spécificités des réacteurs qui réalisent aussi la transmutation de déchets.

Pour renseigner les bibliothèques de données, de nombreuses mesures nucléaires intéressantes la transmutation ont été réalisées au cours de ces dernières années, la plupart dans le cadre de collaborations impliquant le CEA, le CNRS, des universitaires, ou dans le cadre de projets internationaux. Ces mesures font généralement appel aux grands instruments de physique, tels que ceux du CERN à Genève. Cet effort a permis de progresser dans la simulation des cœurs chargés en éléments radioactifs à vie longue. Certaines mesures très spécifiques nécessitent encore des programmes expérimentaux appropriés.

Pour permettre leur transmutation en réacteur, les actinides mineurs seraient introduits au sein des combustibles, selon deux modes possibles. Dans le premier cas, les éléments à transmuter sont dilués dans le combustible standard (mode homogène). Dans le second, les éléments sont concentrés dans des assemblages de combustibles spécifiques appelés cibles (mode hétérogène).

Pour les réacteurs à eau sous pression, les conclusions sont les suivantes :

- les quantités admissibles d'actinides mineurs en cœur sont faibles (1 % en masse environ) ;
- le combustible standard doit être profondément modifié ;
- les performances de transmutation sont faibles ;
- la transmutation du curium n'est pas efficace.

Pour les réacteurs à neutrons rapides, les conclusions sont les suivantes :

- les quantités admissibles d'actinides mineurs dans les combustibles se situent entre 2,5 et 5 % en masse ;
- les possibilités de transmutation sont plus ouvertes. La transmutation peut se faire en mode homogène et en mode hétérogène ;
- la transmutation du curium est efficace.

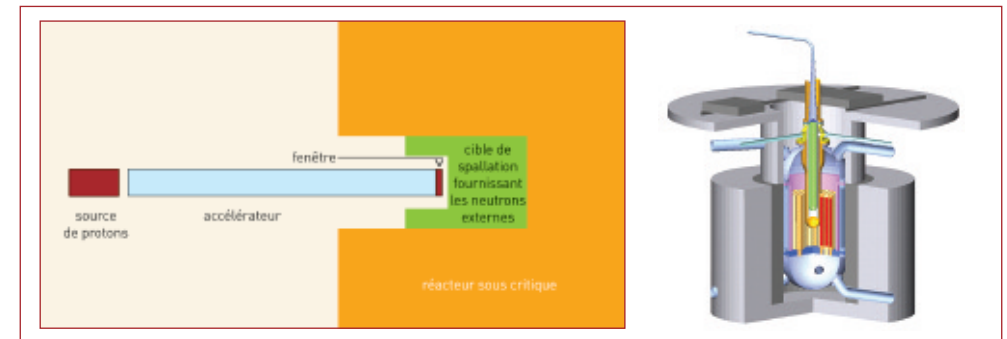
En conclusion, les réacteurs à neutrons rapides, producteurs d'électricité, offrent une plus grande souplesse et autorisent l'obtention de performances de transmutation largement supérieures à celles des réacteurs à eau pressurisée.

Différents concepts peuvent être envisagés pour ces réacteurs à neutrons rapides. Les concepts de type Phénix et Super-Phénix ont déjà été expérimentés en France et pourraient être améliorés. D'autres concepts plus novateurs pourraient être envisagés. Dans ce dernier cas toutefois, les études ne sont qu'au « stade papier » et la solution n'a pas été éprouvée.

Y a-t-il d'autres systèmes pour la transmutation ?

Contrairement aux réacteurs décrits précédemment, les systèmes hybrides à l'étude sont constitués d'un cœur sous-critique : la réaction nucléaire en chaîne n'est possible que grâce à un apport extérieur de neutrons. Cet apport provient d'un accélérateur situé à l'extérieur du réacteur et couplé à celui-ci. Le caractère sous-critique du réacteur permet de le charger fortement en actinides mineurs, ce qui est un aspect favorable pour la transmutation, tout en assurant parfaitement son contrôle et sa sûreté.

Schéma de principe et dessin préliminaire d'un système hybride piloté par accélérateur



La mise au point de ces systèmes, qui n'ont jamais été construits jusqu'à présent, passe par la conception d'éléments spécifiques innovants de haute technicité :

- un accélérateur qui fournit un faisceau intense de protons de haute énergie ; le choix du type d'accélérateur a été fait, mais son fonctionnement en continu n'est pas encore complètement assuré ;
- une cible qui génère des neutrons de haute énergie sous l'effet de l'accélérateur : une telle cible est proposée, mais il reste à régler des problèmes de corrosion ou de comportement des matériaux ;
- un cœur de réacteur sous-critique.

Pour la première fois dans le monde, les principaux composants (la source externe de neutrons et le cœur sous-critique) ont fonctionné ensemble avec succès dans un réacteur expérimental de très faible puissance, au cours d'une expérience commune conduite par le CEA et le CNRS.

Parallèlement, des études d'ingénierie menées au niveau européen ont confirmé la faisabilité de principe du système ADS pour des puissances significatives (environ 30 fois inférieures à celle des REP actuels d'EDF). Toutefois, les éléments spécifiques de haute technicité nécessaires à un tel système ne sont pas encore complètement mis au point ; des études pour y parvenir seront menées de 2005 à 2008 dans le cadre d'un important projet européen.

Les ADS sont des réacteurs originaux mais complexes qui ont des potentialités en tant que réacteurs dédiés à la transmutation. Ces potentialités doivent être démontrées expérimentalement. Leur performance en terme de production d'électricité étant limitée, ils se positionnent donc en complément des réacteurs producteurs d'électricité

Quels combustibles pour la transmutation ?

Un important programme « matériaux » sur les combustibles et les cibles a été mené pour démontrer la faisabilité technique de la transmutation. Des fabrications en petite quantité de combustibles et de cibles, contenant par exemple de l'américium, ont été réalisées. Plus d'une trentaine d'expériences de transmutation ont été effectuées ou sont encore en cours, en utilisant les réacteurs expérimentaux disponibles en France

LE RÉACTEUR PHÉNIX

Implanté au bord du Rhône, faisant partie intégrante du site nucléaire de Marcoule, Phénix est un réacteur prototype à neutrons rapides RNR à sodium construit et exploité par le CEA et EDF. Sa mise en service a eu lieu en 1973 et les premiers kilowattheures ont été livrés sur le réseau en juillet 1974. Le réacteur a fonctionné jusqu'en 1990 avec une disponibilité particulièrement satisfaisante, démontrant ainsi le potentiel des RNR. Les dix dernières années ont été marquées par d'importants travaux de rénovation de la centrale, d'un montant de 250 millions d'euros, entrepris suite à des réévaluations de sûreté successives. La reprise du fonctionnement en puissance (350 MWh) est intervenue en 2003. Elle permet ainsi d'assurer le programme d'irradiations expérimentales pour la transmutation.



(Osiris et surtout Phénix) et à l'étranger (HFR en Hollande, BOR-60 en Russie et JOYO au Japon). Cela représente un effort de recherche considérable. En effet, pour de telles expériences de transmutation, plus de huit années sont nécessaires entre le moment où l'on conçoit l'expérience et l'obtention des premiers résultats expérimentaux. Grâce à ces expériences, des résultats remarquables ont été obtenus : ainsi, environ 70 % des noyaux d'américium du combustible sélectionné ont été cassés en fragments à vie courte en une seule campagne d'irradiation.

Pour les combustibles des réacteurs à neutrons rapides, la transmutation des actinides mineurs américium et neptunium a été démontrée par deux expériences d'irradiations réalisées dans Phénix. Le combustible de ces expériences diffère peu des combustibles standard oxyde industriellement qualifiés. La transmutation du curium a fait l'objet d'une seule expérience en cours dans Phénix, du fait de la très grande difficulté de manipulation de cet élément très radioactif. Pour les cibles, les procédés de fabrication adaptés ont été mis au point au laboratoire. Ils permettent de produire des cibles dont l'ensemble des propriétés respectent les critères d'irradiation en réacteur producteur d'électricité. Plus d'une dizaine d'expériences d'irradiation, notamment dans Phénix, ont été réalisées ou sont en cours.

Les irradiations de transmutation sont en cours, et les résultats des examens après irradiation déjà obtenus ont permis d'améliorer la conception de ces cibles et donc l'augmentation des taux de transmutation à chaque passage en réacteur.

La transmutation des produits de fission

La transmutation des produits de fission à vie longue a été évaluée pour le technétium 99, l'iode 129 et le césium 135. Elle ne se fait que par capture de neutrons, ce qui la rend très coûteuse en termes de bilan neutronique au cœur du réacteur.

Pour le césium 135, les études ont montré que la transmutation en réacteur à eau sous pression (REP) et réacteur à neutrons rapides (RNR) apparaît impossible sans une séparation isotopique préalable, très lourde à mettre en œuvre.

Pour l'iode 129 et le technétium 99, la possibilité la plus attractive serait de les incorporer dans des cibles en périphérie du cœur d'un réacteur à neutrons rapides. Toutefois, même dans ce cas, les taux de transmutation restent faibles. La transmutation du technétium nécessite un grand nombre de recyclages pour une réduction d'un facteur 10 de sa radiotoxicité. Pour l'iode, aucun matériau incorporant cet élément et pouvant fonctionner en réacteur n'a été identifié.

En conséquence, la transmutation des produits de fission n'apparaît pas être une option industrielle raisonnable.

Et si certains éléments radioactifs séparés n'étaient pas transmutables ?

Certains éléments radioactifs séparés peuvent s'avérer difficiles à transmuter ; il faut donc pouvoir proposer une alternative à leur transmutation. L'objectif est alors de disposer de conditionnements, aptes à garantir un confinement sur de très longues durées en stockage, pour ces éléments radioactifs issus de la séparation poussée.

Les études ont été consacrées à la recherche de nouveaux matériaux pouvant jouer ce rôle de matrice de conditionnement à très long terme pour chacun des éléments séparés. Les résultats sont contrastés selon les éléments radioactifs à confiner. Pour les actinides mineurs, quatre matrices performantes ont été mises au point et le choix du meilleur conditionnement reste à faire. Pour le césium, une matrice optimisée a été retenue ; pour l'iode, une seule matrice est possible et sa fabrication est délicate ; pour le technétium, la recherche est encore en cours.

L'intérêt de ces nouveaux procédés de conditionnement n'est pas aujourd'hui réellement avéré. Si certains éléments séparés n'étaient pas transmutables, ils seraient, comme actuellement, conditionnés dans le verre.

Les solutions offertes par la séparation-transmutation

L'évaluation d'une solution de gestion des déchets ne peut se faire qu'avec une vue globale intégrant l'ensemble des installations du cycle nucléaire (usines de fabrication des combustibles, réacteurs, usines de traitement du combustible usé...) et non pas à la lumière des performances d'un seul de ces maillons. A ce titre, des études de « scénarios » ont été réalisées : elles intègrent des hypothèses d'évolution des installations dans le temps et sont essentielles pour évaluer l'intérêt et les possibilités de mise en œuvre de la séparation-transmutation.

LES OUTILS POUR LES ÉTUDES DE « SCÉNARIOS » NUCLÉAIRES

Le CEA utilise un code de calcul pour simuler le cycle nucléaire. L'objectif est de fournir, en fonction du temps, l'évolution des flux et des quantités, à un moment donné, des matières nucléaires présentes dans le cycle ainsi que les caractéristiques des déchets ultimes produits, en quantité et en qualité. Les impacts radioactifs potentiels, les éléments environnementaux, ainsi que les aspects économiques globaux sont aussi considérés dans les évaluations des scénarios.

Les études de scénarios fournissent une vue d'ensemble du cycle et des déchets produits à différents moments et simulent le fonctionnement des différentes installations nucléaires pendant plusieurs décennies à partir de la situation existante. Elles permettent de comparer les potentialités des différents scénarios du point de vue de la réduction de la radiotoxicité des déchets et des besoins théoriques en installations nouvelles par rapport à la situation actuelle.

En partant des réacteurs à eau sous pression existants, c'est le scénario dont le déroulement intègre le remplacement progressif de ces réacteurs par des réacteurs à neutrons rapides qui aboutit de façon réaliste à la plus forte réduction de la radiotoxicité des déchets. Grâce au recyclage de tous les actinides qui est possible dans les réacteurs à neutrons rapides, ceux-ci ont la capacité de traiter leurs propres déchets ainsi que les actinides mineurs produits par les réacteurs actuels à eau sous pression. La faisabilité de principe d'un tel scénario, comportant l'utilisation de réacteurs à neutrons rapides, est acquise.

Dans un tel scénario, seule la part des actinides mineurs non extraite du combustible usé (0,1 % de ces actinides, d'après les performances obtenues en séparation poussée) constitue le déchet ultime. La radiotoxicité des verres est donc fortement diminuée, ce qui contribue à optimiser le stockage.

La mise en œuvre d'un tel scénario ne serait possible progressivement qu'à partir de l'horizon 2040 (réacteurs à neutrons rapides et nouvelles installations du cycle) et nécessite de poursuivre des études conséquentes.

LES NOUVELLES PISTES OUVERTES

Les recherches conduites au titre de l'axe 1 de la loi de 1991 ont porté sur la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans le combustible usé.

Il est possible de situer clairement les enjeux et les limites des études conduites dans le cadre de l'axe 1. Ces technologies visent en effet essentiellement, dans une démarche de progrès continu, à diminuer la radiotoxicité et la quantité des déchets ultimes.

Les principaux éléments concernés sont le plutonium, qui est déjà recyclé, et aussi les actinides mineurs (américium, curium et neptunium). Les produits de fission (césium, iode, technétium...), pour des raisons techniques, ne se prêtent pas au processus de transmutation et ont donc vocation à être conditionnés de façon pérenne dans les déchets vitrifiés.

La séparation des actinides mineurs est possible et ce résultat constitue une avancée considérable. De nouvelles molécules et de nouveaux procédés d'extraction ont été définis et testés en milieu radioactif. Les performances de séparation sont très satisfaisantes (environ 99,9 % pour les actinides mineurs américium et curium) et vont permettre de diminuer au maximum par 100 la radiotoxicité après 500 ans des verres ainsi allégés par rapport à la radiotoxicité après 500 ans des verres actuellement produits.

La possibilité de transmuter à l'échelle d'un combustible expérimental a été démontrée dans le réacteur Phénix. Des expériences d'irradiation se poursuivent dans ce réacteur notamment pour compléter les données disponibles pour la transmutation et pour disposer d'un bilan complet permettant d'envisager

SÉPARATION POUSSÉE ET TRANSMUTATION : LES ÉTAPES-CLÉS

Les recherches sur la séparation poussée ont permis d'établir la faisabilité :

- en 1995 : de la séparation du neptunium, de l'iode, du technétium et du césium,
- en 2001 : de la séparation de l'américium et du curium par rapport aux autres éléments radioactifs des déchets,
- en 2002 : de la séparation entre l'américium et le curium.

En 2005, les recherches doivent aboutir à la confirmation technique des possibilités du procédé Purex modifié pour extraire le neptunium et d'un nouveau procédé d'extraction par solvant de l'américium et du curium à un rendement supérieur à 99 %.

Les recherches sur la transmutation ont permis d'aboutir à l'obtention :

- en 2001 : de la faisabilité, démontrée notamment dans le cadre d'études de scénarios de cycles nucléaires,
- depuis 2001 : d'éléments techniques importants de faisabilité pour les réacteurs à neutrons rapides et les combustibles de transmutation.

Les expériences de transmutation en cours dans différents réacteurs permettront de conforter cette faisabilité d'ici 2008.

la réalisation de prototypes de « réacteurs transmuteurs ». Un tel bilan pourrait être effectué à l'horizon 2015 environ.

Le déploiement à une échelle industrielle de la séparation/transmutation nécessite de disposer d'une usine de traitement de combustible usé intégrant la séparation poussée et de réacteurs à neutrons rapides permettant la transmutation. Ce déploiement est envisageable progressivement à partir de l'horizon 2040.

Les déchets vitrifiés existants ne peuvent pas être repris de manière simple et économique pour se voir appliquer les technologies issues des recherches de l'axe 1. De plus, cette reprise, compte tenu des déchets supplémentaires en résultant, n'apporterait pas de gain significatif en termes de réduction de volume ou de radiotoxicité des déchets.

Les importants résultats scientifiques et techniques produits contribuent donc à la disponibilité de solutions pour les choix à venir sur la gestion à long terme des déchets radioactifs. /////

Conditionnement et entreposage de longue durée

Axe **3**

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'énergie atomique) de piloter celles sur la séparation et la transmutation ainsi que celles portant sur le conditionnement et l'entreposage de longue durée. 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 (métaux, ciments...) ou liquide : ce sont les déchets bruts. Pour pouvoir être manipulés 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 placés 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 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 afin d'être solidifiés. Trois matériaux sont utilisés : le ciment, le bitume et le verre.

_Entreposer n'est pas stocker

Contrairement à l'usage courant, l'entreposage et le stockage ne sont pas synonymes lorsqu'ils s'appliquent aux déchets radioactifs. En effet, dans ce domaine, l'entreposage est toujours provisoire, c'est une solution sûre d'attente qui permet de gérer les déchets avec flexibilité. 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 se distingue donc clairement de l'entreposage industriel ; il 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 permet de gérer les déchets radioactifs avec flexibilité : on peut ainsi 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 usé 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.



Source de Cobalt 60 utilisée en radiothérapie

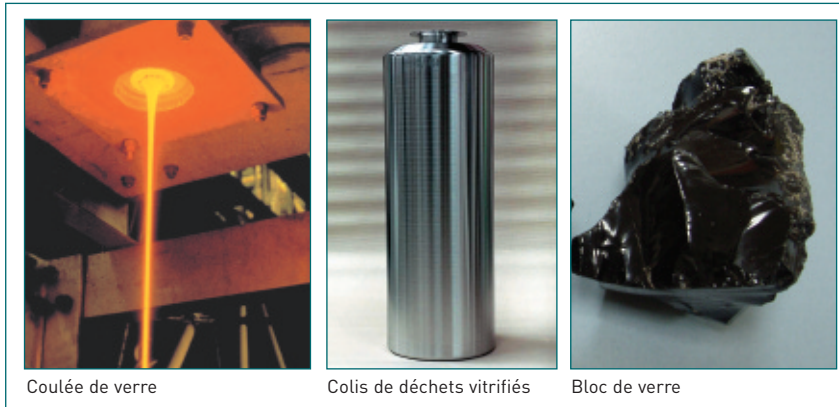
Faire fonctionner les réacteurs nucléaires ainsi que les usines de fabrication et de retraitement du combustible génère aussi des déchets : il en va ainsi des filtres qui évitent de rejeter des gaz radioactifs dans l'atmosphère, des pompes qui ont été remplacées ou encore des liquides résultant du rinçage 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 ?

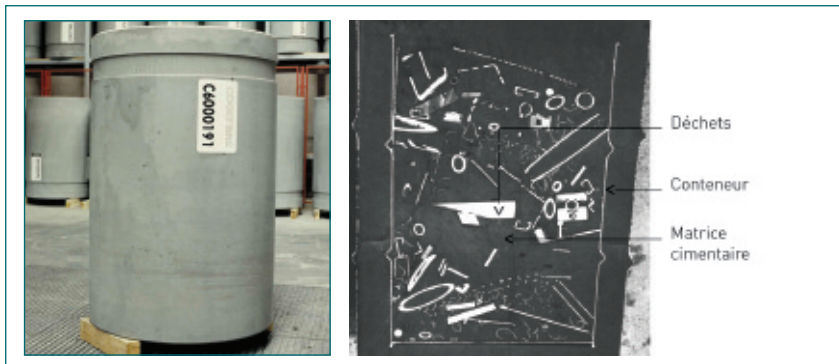
Les déchets de haute activité retirés du combustible sont **vitrifiés**, c'est-à-dire qu'ils sont mélangés à très haute température (1 200 °C) à du verre en fusion. Ce mélange est ensuite coulé dans un conteneur en acier inoxydable d'environ 200 litres. Le colis de déchets vitrifiés est donc constitué d'un bloc de verre homogène, qui contient les éléments radioactifs, entouré d'une enveloppe étanche en acier inoxydable.

Les déchets vitrifiés



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 conteneur, adaptés à la forme et à la taille des déchets qu'ils doivent contenir.

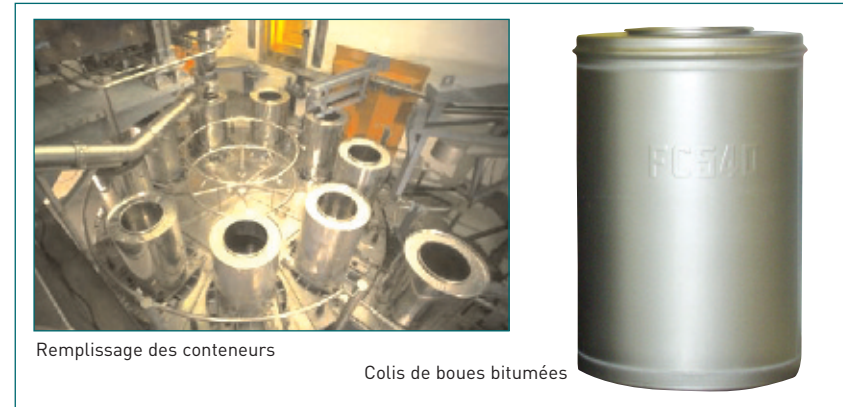
Les déchets cimentés



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 de 150°C environ. 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.

Les boues bitumées



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 : environ 10 000 colis ont déjà été fabriqués. La fabrication actuelle est d'environ 600 colis par an.

Que deviennent 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.

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



Celle-ci est constituée de puits ventilés dans lesquels les colis sont empilés. 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.

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

	Volume (m³)
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*

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

But 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 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 : réduire le volume à la source, c'est-à-dire en produire moins. Et améliorer le conditionnement des déchets. En effet, 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, Purex, 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 placés 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 importantes de réactifs et d'effluents liquides, qui deviennent eux-mêmes des déchets radioactifs, dits **secondaires**, s'ajoutant 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. Cela 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. Ceux-ci 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 permet de produire trois fois moins de colis environ.

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 du 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 œuvre de ce procédé permettrait de réduire le volume final des déchets.

LE TRAITEMENT CHIMIQUE DES DÉCHETS LIQUIDES



Pilote de 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. 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.

COMMENT SE COMPORTEMENT 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 fil 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 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

LES ANALOGUES NATURELS OU ARCHÉOLOGIQUES

Les études d'analogues archéologiques ou naturels, comme 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.

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 2 000 ans au fond de la Méditerranée démontre qu'un bloc de verre industriel peut résister sur des durées millénaires à des conditions très agressives.



Verre volcanique et verre nucléaire



Verre archéologique

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 fil 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.

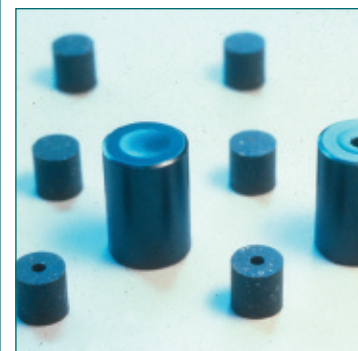
Des premières estimations de performance des colis de boues bitumées ont été réalisées à partir des modèles développés. Ainsi, on prévoit que la dégradation des colis durera quelques dizaines de milliers d'années, après l'arrivée de l'eau, en stockage géologique.

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



Pastilles de combustible

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.

MIEUX TRIER LES DÉCHETS

Etant donné que le devenir des déchets diffère selon qu'il s'agit de déchets à vie courte ou à vie longue, de faible ou de haute activité, un tri est nécessaire pour les orienter vers la filière d'élimination adaptée.

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 méthode sont utilisés 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. On peut ainsi 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.

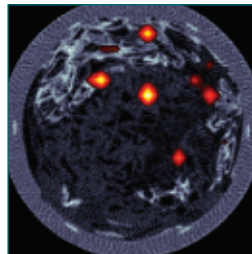
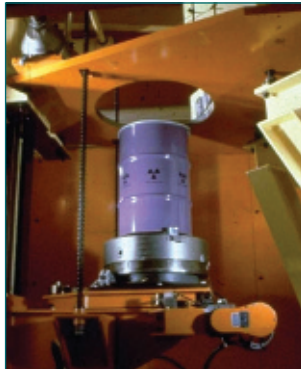
LA RECHERCHE AU SERVICE DU TRI DES COLIS DE DÉCHETS

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 insuffisamment 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.

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). 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.



Tomographie

Tomographe

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 plus faibles d'éléments chimiques ou radioactifs, et ce souvent 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 conçues à cet effet. Les déchets de moyenne activité à vie longue, sont généralement entreposés 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 au moins cent ans. 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 années généralement admises.



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. On va en particulier 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 le 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, cette dernière solution offrant la meilleure résistance 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

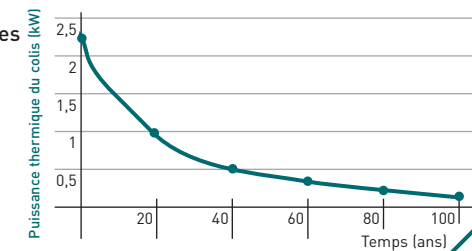
Dans tous les cas, les colis de déchets, issus des installations des producteurs, sont placés dans des conteneurs d'entreposage afin de les isoler complètement de l'environnement.

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, types de fibre...) 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.

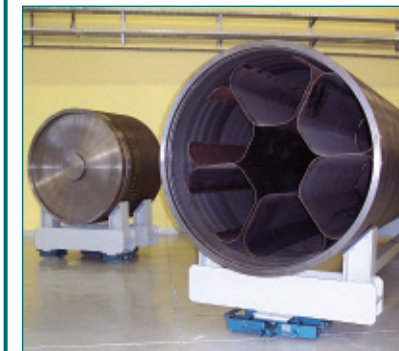
ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE THERMIQUE D'UN COLIS DE DÉCHETS VITRIFIÉS

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.

LE CONTENEUR D'ENTREPOSAGE POUR LES DÉCHETS DE HAUTE ACTIVITÉ



Le conteneur spécifique développé pour l'entreposage de longue durée est cylindrique, d'épaisseur 4,5 cm. 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.

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.

CONTINUITÉ ENTRE ENTREPOSAGE DE LONGUE DURÉE ET STOCKAGE



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

Les déchets nucléaires sont placés 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 de l'installation les conteneurs d'entreposage de longue durée, remplis des colis de déchets. Plusieurs possibilités s'offrent 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.

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.

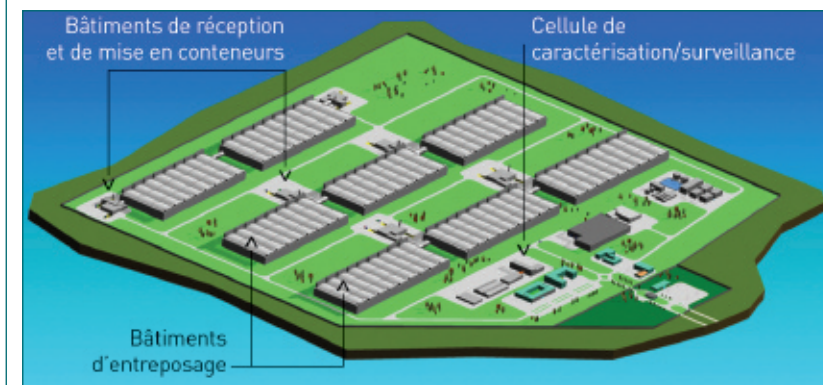
Dans un souci de robustesse, la mise en œuvre de systèmes de ventilation passifs, c'est-à-dire ne nécessitant pas de pompes ou de compresseurs, a été privilégiée. On s'est, pour les mêmes raisons, interdit toute régulation en température ou en humidité au niveau de la ventilation de l'entrepôt.

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 au 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 (chute d'avion, par exemple). 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.



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 ; 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

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 de combustibles usés.

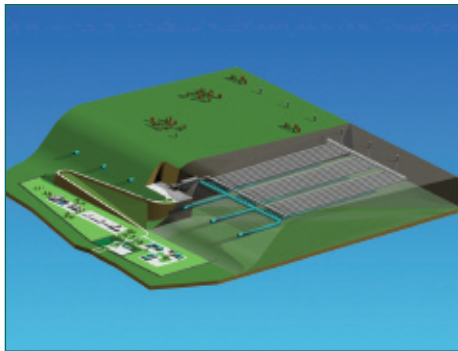
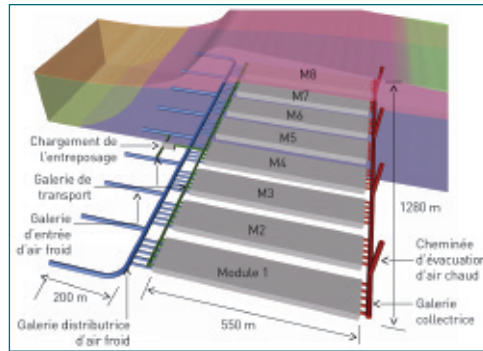


Schéma de principe de l'entrepôt de subsurface



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)

La durabilité des entrepôts de longue durée

La démonstration de la durabilité des installations d'entreposage de longue durée est basée à la fois sur le retour d'expérience en matière de matériaux cimentaires et 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. 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.

LES FRUITS DE QUINZE ANNÉES DE RECHERCHES

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 de méthodes et d'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 résistance 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. //

