LES STRATÉGIES POSSIBLES D'ENTREPOSAGE ET/OU DE STOCKAGE

La gestion à long terme des matières issues des centrales nucléaires est devenue un enjeu de société majeur. Une des options est le stockage des déchets ultimes, voire des combustibles usés complets, dans des structures géologiques, éventuellement réversible. Une autre option, qui peut d'ailleurs précéder la première, est l'entreposage. À titre de solution d'attente, c'est déjà la réalité industrielle. Le CEA a commencé à démontrer que l'entreposage est faisable sur des durées séculaires, de manière standardisée, pour tous les types d'objet (combustibles usés, colis de déchets vitrifiés, colis prospectifs issus de la séparation poussée), dans des installations robustes et passives, en surface ou en subsurface. Certaines dispositions techniques restent à approfondir, ainsi que l'évaluation du coût de tels entrepôts.

Cogema

Puits dans la casemate en béton sur le site Cogema d'entreposage de colis de verres à La Hague.

L'aval du cycle du combustible : entreposage *versus* stockage ?

Suivant la stratégie de gestion choisie, les matières à **entreposer** et/ou **stocker** diffèrent largement. Dans une des options, il pourrait s'agir des **combustibles** usés, bien qu'ils contiennent une grande quantité de matières **fissiles** réutilisables pour produire de l'énergie. À ce titre, ils ne sont pas, dans la logique actuelle, destinés au stockage : leur destination privilégiée est le **recyclage**. Les **colis** de verre et de **coques**, issus des opérations de **traitement** sont, eux, considérés comme des déchets ultimes et donc *a priori* justiciables du stockage définitif. Il en va de même *a fortiori* de tous les autres déchets provenant des installations nucléaires (**bitumes**, **ciments**, **déchets technologiques**…).

Le stockage en formation géologique profonde, solution de référence

La solution de référence envisagée aujourd'hui pour les déchets nucléaires ultimes est le stockage après conditionnement. Le mode de stockage dépend de la catégorie de déchets. Les déchets de faible et de très faible

activité peuvent être stockés en **surface**, et cette solution est mise en œuvre industriellement en France et dans la plupart des pays (encadré H, ***Que font les pays étrangers ?***). Le problème est plus complexe pour les déchets de **haute activité** et **à vie longue** contenus dans les colis de verre et dans les colis de coques. Leur nocivité reste importante sur des durées allant jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'années. De plus, leur radioactivité se traduit par un dégagement thermique important, qui nécessite des dispositions particulières.

Dans ce cas, le stockage en formation géologique profonde est approprié. Ce mode de gestion permet, d'une part, de placer les colis dans un environnement chimiquement, thermiquement et mécaniquement très stable sur des échelles de temps géologiques, et, d'autre part, de s'affranchir de la charge de surveillance au bout d'un certain temps. Le **conditionnement** initial (encadré G, ***Le conditionnement, une étape essentielle***) et la **barrière ouvragée** assurent le **confinement** et la **barrière** géologique prévient les intrusions et, en dernier ressort, retient les **radionucléides** qui auraient pu s'échapper. Techniquement, le stockage en formation géologique profonde est, en France, étudié par l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs). Les concepts aujourd'hui envisagés reposent sur quelques caractéristiques principales, la première étant une conception modulaire permettant la gestion distincte de divers types de colis disposés dans des alvéoles accessibles par des galeries de manutention. Un système de puits verticaux permettrait de descendre les colis à des profondeurs de l'ordre de 500 mètres. L'évacuation des calories se ferait par conduction, ce qui oblige à répartir les colis sur de grandes surfaces. Pour tenir compte de l'exigence de **réversibilité**, il est prévu une série de phases de vie allant de la phase d'exploitation à la phase "post-fermeture" (encadré I; ***En quoi un stockage peut-il être réversible ?***). C'est seulement au cours de la dernière phase que les alvéoles et les galeries de manutention seraient rebouchées.

Dans un stockage profond, les colis seront en outre entourés par des barrières de confinement supplémentaires. Des argiles compactées, des bétons pourront être progressivement interposés entre les colis et la barrière géologique (**roche-hôte**), afin de protéger encore plus efficacement les colis, retarder l'arrivée de l'eau et fixer les **radioéléments** après dégradation des propriétés de confinement des colis.

L'Andra est en train de construire à Bure, dans la Meuse, un laboratoire pour y mener des expériences de géochimie, de géomécanique, de thermique et d'hydrogéologie. Le stockage géologique est aujourd'hui en phase d'étude. Le site approprié pour installer un tel stockage définitif ne sera déterminé qu'à l'issue d'un processus dûment contrôlé par le Parlement. De nombreux choix techniques restent encore ouverts.

L'entreposage de longue durée, outil de flexibilité

Un autre volet de la gestion de l'aval du cycle électronucléaire est l'entreposage, étape indispensable en amont d'un éventuel stockage mais non définitive. Des installations d'entreposage industriel sont aujourd'hui opérationnelles en France pour chaque type de déchet : entrepôts pour les **déchets B**, piscines pour les combustibles usés, puits pour les déchets de haute activité et pour certains combustibles. Il s'agit dans tous les cas de solutions provisoires, valables sur quelques dizaines d'années.

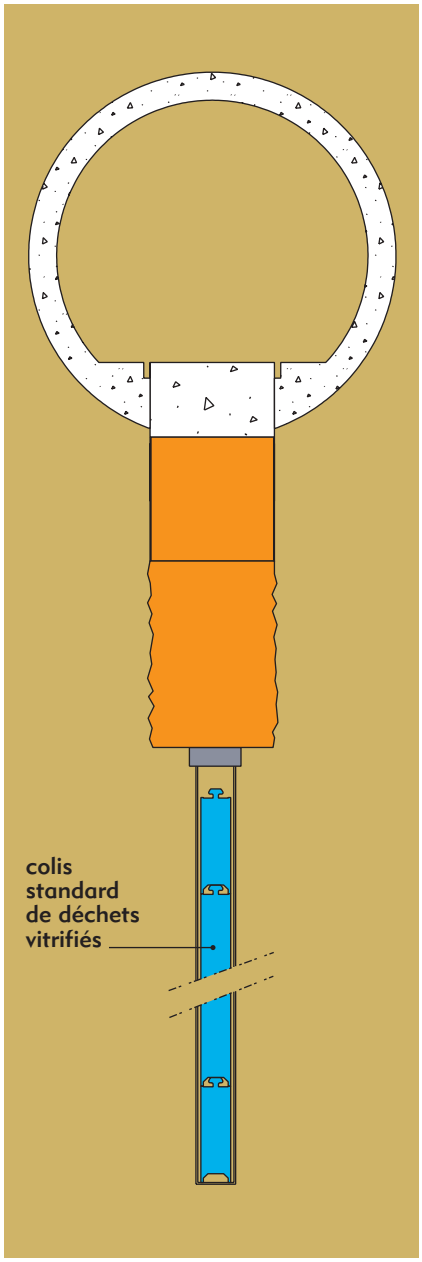
Les incertitudes calendaires et techniques rendent nécessaire une vision à long terme, car les durées caractéristiques de l'industrie nucléaire sont longues. Si les installations actuelles peuvent être renouvelées périodiquement, il est utile d'en envisager de nouvelles qui permettraient dès leur conception de franchir de longues périodes de temps.

L'entreposage de *longue durée* est un outil de flexibilité pour la gestion de l'aval du cycle. Il permet d'assurer la gestion des combustibles usés dans l'attente d'un éventuel traitement futur. Le délai entre l'entreposage et ce traitement dépend de la gestion des flux et des décisions industrielles : il peut aller jusqu'à une centaine d'années. Pour les déchets ultimes, cet outil permet d'attendre de manière sûre la décision définitive sur le stockage et sa mise en exploitation. Il fournit la possibilité de tirer parti de la **décroissance radioactive** pour optimiser la charge thermique du stockage. Enfin, il donne l'occasion, dans une unité centralisée, de procéder à une standardisation des conditionnements et des méthodes, enjeu particulièrement important pour les déchets B, vu leur grande diversité (voir *Vers un conteneur universel pour les déchets B*).

L'entreposage de longue durée vise à assurer la pérennité d'un maintien en conditions sûres des colis, pour des durées non définies au chargement, tout en garantissant leur reprise ultérieure dans de bonnes conditions (ce qui n'est pas toujours le cas des installations existantes).

Des préconisations plus que des plans

Le CEA est en charge de la conception de ce type d'installation d'entreposage de longue durée, mais le produit de ses études n'est pas une installation, ni même un dossier d'une installation "prête à construire". Au-delà des résultats techniques et scientifiques, ces études produiront des préconisations de conception et de construction pour la maîtrise de la durée.



Andra

Détail d'un puits pour le stockage de colis de verres.

Un examen attentif des solutions existantes et la prise en compte des contraintes a conduit à identifier un certain nombre de "points durs" scientifiques et technologiques, qui font l'objet de programmes spécifiques.

Les études de concepts d'entrepôts et de conteneurs permettent d'intégrer les résultats de l'ensemble des programmes de recherche (voir les trois articles suivants sur le comportement à long terme des **matrices**) en considérant les interfaces : conditionnement, transport, manutention, entreposage, reprise, compatibilité avec des exutoires divers (traitement ou stockage pour le combustible, par exemple). Une des difficultés est de faire s'exprimer l'innovation

Que font les pays étrangers ?

La plupart des pays possédant une industrie électronucléaire significative ont étudié une solution durable de **stockage** de leurs déchets nucléaires de **moyenne** et **haute activité à vie longue**, que ceux-ci aient ou non été préalablement séparés des matières **fissiles** récupérables. Le stockage en couches géologiques profondes a été mis en œuvre dans un seul pays, les États-Unis, mais plusieurs autres, en dehors de la France, le préparent ou l'envisagent.

Une vingtaine de laboratoires souterrains visant à étudier *in situ* les conditions d'un tel stockage, dans l'argile, dans des structures cristallines ou salines ont été installés en Allemagne, en Belgique, au Canada, aux États-Unis, en France, en Hongrie, au Japon, en Suède et en Suisse ainsi qu'en République tchèque.

En **France** : la création par l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) du laboratoire souterrain du site de Bure (Meuse), dans l'argile, a été autorisée en août 1999. Les expérimentations doivent y commencer en 2003. Un site doit encore être choisi pour un second laboratoire, dans le granite. L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) effectue ses propres recherches dans le tunnel de Tournemire (Aveyron).

L'Andra gère les centres de stockage de déchets de **faible activité** de Soulaines (Aube), en cours d'exploitation, et de la Manche, désormais en phase de surveillance.

Aux **États-Unis**, l'Office chargé de la gestion des déchets **radioactifs** civils (OCRWM), dépendant du Department of Energy (DOE), prévoit que les **combustibles** usés d'origine seront stockés définitivement en profondeur sur le site de Yucca Mountain (Nevada). Le projet a obtenu en août 2001 le feu vert du DOE, en février 2002 celui du Président Bush et a été approuvé par le Congrès en juillet 2002. Le DOE va maintenant soumettre à la Nuclear Regulatory Commission (NRC) une demande de licence de construction. Ce site, qui devait à l'origine entrer en service en 1998, sert déjà de laboratoire souterrain et pourrait recevoir 70 000 tonnes de déchets entre 2010 et 2060 environ (40 000 tonnes de combustibles usés sont actuellement stockées dans des piscines proches de la saturation).

Le WIPP (*Waste Isolation Pilot Plant*) accueille depuis mars 1999 des déchets d'origine militaire de moyenne activité contenant des **transuraniens** dans une couche de sel profonde près de Carlsbad (Nouveau-Mexique). Le WIPP a reçu l'autorisation de fonctionner le 10 mars 2000 et doit recevoir des déchets pendant une trentaine d'années.

En **Suisse**, la coopérative nationale pour l'**entreposage** des déchets radioactifs (Nagra/Cedra) exploite depuis 2001 l'installation d'entreposage Zwilag (*Zwischen-Lagerung*) de combustibles usés à Würrenlingen (Argovie). Le stockage définitif des déchets est prévu dans des formations cristallines ou argileuses (Opalinus). Des sondages à grande profondeur ont été réalisés dans de telles formations à Benken (Zürich). Les recherches dans l'argile sont conduites dans le laboratoire souterrain international du Mont-Terri (Jura), et dans le granite, dans le GTS à Grimsel (Berne), géré par Nagra.

Hans Krebs/Zwilag

Installations d'entreposage des déchets radioactifs de haute activité (déchets vitrifiés et combustibles usés) Zwilag exploitée depuis 2001 à Würrenlingen par la coopérative suisse Nagra/Cedra. La centrale nucléaire de Beznau est en arrière-plan.

Un projet d'entreposage en **subsurface** à Wellenberg (Nidwald) est en cours d'étude pour des déchets de faible et moyenne activité.

En **Finlande**, les parlementaires, Verts compris, ont autorisé le 18 mai 2000 à une large majorité la construction sur la période 2010-2020 d'un centre de stockage en profondeur dans le granite pour les combustibles usés (considérés en l'occurrence comme déchets ultimes). Implanté à Olkiluoto (municipalité de Eurajoki), site d'une des deux centrales nucléaires (quatre tranches) du pays, ce centre, exploité par Posiva Oy, filiale des exploitants des réacteurs chargée de la gestion des déchets radioactifs, devrait être opérationnel en 2020.

En **Suède**, la solution du stockage définitif des combustibles usés dans le granite, à 500 m sous terre, adoptée il y a une vingtaine d'années, a été étudiée dans les laboratoires souterrains de Stripa et d'Äspö où fonctionne le HRL (*Hard-Rock Laboratory*), dans la même commune d'Oskarshamm où un centre d'entreposage centralisé du combustible irradié en subsurface, le CLAB, a été ouvert en 1985. Le centre de stockage définitif serait opérationnel entre 2015 et 2050-2060, date de sa fermeture définitive, recevant au total 9 300 tonnes de combustibles usés. Des reconnaissances en surface sur trois sites (Oskarshamm, Tierp et Östhammar) sont envisagées.

SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB), société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires, stocke sous la Baltique au SFR, dans une roche granitique à un kilomètre en mer de la centrale nucléaire de Forsmark, des déchets de basse et moyenne activité et à **vie courte**.

En **Belgique**, un laboratoire de recherche (Hades) sur le stockage des déchets nucléaires dans l'argile fonctionne à Mol (province d'Anvers) depuis 1980. Le programme Praclay s'y déroule depuis 1997. L'organisme Ondraf/Niras envisage à terme un stockage de combustibles usés et/ou de déchets retraités et vitrifiés en couches profondes et en subsurface des déchets de faible activité et à vie courte. Un rapport sur la faisabilité de stockage des déchets de haute activité devait être soumis au gouvernement fin 2001.

Au **Japon**, où une loi sur le stockage final des déchets radioactifs a été promulguée en juin 2000, un site de stockage de déchets de faible activité est géré depuis 1992 par Japan Nuclear Fuel Limited sur le site de Rokkasho-Mura. Les déchets haute activité vitrifiés issus du retraitement seront entreposés entre 30 et 50 ans avant d'être stockés définitivement sur un site qui reste à définir. Des mines désaffectées ont servi de laboratoires méthodologiques dans le granite et des roches sédimentaires à Kamaishi et à Tono. Des laboratoires dédiés sont en préparation à Mizunami et en projet à Horonobe.

En **Corée**, le Korea Atomic Energy Research Institute étudie deux types de roches hôtes pour un éventuel stockage de déchets de haute activité.

En **Allemagne**, l'évacuation de tous les déchets nucléaires en formations géologiques profondes (et plus particulièrement dans des mines de sel), est envisagé depuis les années 60. Des expérimentations ont eu lieu en Basse-Saxe à Asse, Gorleben et Konrad, ce dernier site – une mine de fer – ayant été choisi pour les déchets de moyenne activité et à vie longue. Gorleben a été abandonné le 1er octobre 2000 en tant que site de stockage "définitif". Un unique centre de stockage géologique profond reste envisagé pour l'élimination finale de l'ensemble des déchets nucléaires (dont ceux issus du retraitement en France) compte tenu du programme d'arrêt progressif des centrales nucléaires. Les combustibles usés sont actuellement entreposés à Gorleben, Ahaus (Rhénanie du Nord-Westphalie) et Greifswald (Saxe-Anhalt). L'étude de projets d'en-

H

trepôts au voisinage des centrales (17 sites) a été engagée.

L'ancienne mine de sel de Morsleben a été utilisée entre 1981 et 1998 pour le stockage de déchets de faible et moyenne activité (ERAM).

L'**Espagne** ne devrait pas prendre avant 2010 de décision sur la gestion à long terme des combustibles usés et des déchets à haute activité. La création d'ici 2040 d'un centre de stockage centralisé pour ces combustibles et les déchets non acceptables sur le site d'El Cabril (équivalent du centre de l'Aube, en France, réservé aux déchets de faible activité) est envisagée.

Les **Pays-Bas** prévoient de stocker à partir de 2003 les déchets de haute activité dans une installation de surface, le Habog, en cours de construction par la Covra, l'organisation centrale pour les déchets radioactifs, sur le site de Borsele. Le pays rejette *a priori* toute solution non **réversible**. Le rapport final du programme de recherche CORA sur un tel stockage en formations géologiques a été remis au Parlement le 21 février 2001.

L'**Italie** est à la recherche d'un site d'entreposage pour les combustibles usés et les déchets de haute activité et d'un site de stockage pour les déchets de faible activité.

En **Norvège**, un site d'entreposage et de stockage des déchets de faible et de moyenne activité a été inauguré en 1998 à Himdalen.

Au **Royaume-Uni**, le projet d'un laboratoire souterrain pour l'étude du stockage géologique de déchets à Sellafield a été abandonné en 1997, mais l'idée d'un stockage souterrain réversible reste à l'étude. Il existe un site de stockage de déchets de faible activité à Drigg, près de Sellafield.

Le **Canada**, où un laboratoire souterrain, l'URL, est exploité par AECL à Whiteshell près de Pinawa (Manitoba), est à la recherche d'un site pour un stockage géologique.

L'**Australie** prévoit de stocker en surface ses déchets de haute activité sur un site non encore choisi avant un éventuel stockage en moyenne profondeur (moins de 100 m) et ses déchets de faible et moyenne activité en subsurface à partir de 2003 dans la région de Billa Kalina, dans le sud du pays.

Des études plus ou moins poussées sur le stockage en couches géologiques ont également été entreprises dans d'autres pays, en particulier la **Hongrie** et la **République tchèque**.

Des projets liés à l'importation de déchets étrangers ont par ailleurs été évoqués en **Russie**.

dans des domaines traditionnels de compétence du CEA, fortement encadré par la réglementation existante de l'exploitation.

Un projet sur la maîtrise de la durée

Une installation d'entreposage est une installation nucléaire de base(1). Elle relève à ce titre de l'analyse de sûreté classique pour la prise en compte des risques, nucléaires et non nucléaires. L'ambition des études menées au CEA est de donner un sens opérationnel à la notion de longue durée, en la traduisant par des dispositions techniques permettant un gain à la fois significatif, quantifiable et démontrable vis-à-vis de la sûreté. Des principes de maîtrise de la durée, complémentaires de l'analyse de sûreté classique, ont été définis, ainsi que des méthodes d'analyse de la durabilité d'un système, largement inspirés d'approches développées dans la sûreté de fonctionnement des systèmes complexes. Ces principes reposent essentiellement sur la minimisation des charges d'exploitation et de maintenance pour les générations futures, la prise en compte des phénomènes de vieillissement dès la conception, le juste dimensionnement de la surveillance, une organisation permettant la réévaluation périodique de l'ensemble.

(1) Une INB est une grande installation nucléaire au sens d'un décret de 1963, c'est-à-dire un réacteur nucléaire, un accélérateur de particules, une usine de préparation, de fabrication ou de transformation de substances radioactives, ou une installation destinée au stockage, au dépôt ou à l'utilisation de substances radioactives, y compris les déchets, lorsque la quantité ou l'activité totale des substances radioactives pouvant y être détenues est supérieure au minimum fixé par arrêté.

La distinction entre phase active et phase passive permet d'appliquer à chacune les principes de robustesse, consistant d'une part à minimiser les risques de défaillance de tous les composants, la présence humaine et les spécifications sur l'environnement, et d'autre part à maximiser la **passivité**, la rusticité et la simplicité.

Les incertitudes sociales liées à la longue durée

Sur des durées couvrant plusieurs générations, les incertitudes sont grandes sur l'évolution des conditions environnementales et sociétales. La manière de prendre en compte cette incertitude est d'imaginer les scénarii conduisant à une perte de maîtrise technique limitée dans le temps et d'en quantifier l'impact. Cette démarche permet d'évaluer les risques et d'envisager des solutions techniques et organisationnelles correspondantes. La difficulté de l'acceptabilité d'une telle installation en amont de la décision de construction est exacerbée par l'aspect de longue durée, conduisant à la controverse socio-technique (voir *La technique, un terrain pour construire le débat*).

Les acquis des études

Les études menées au CEA ont donné d'importants résultats, tant en matière d'objets à entreposer et de grands choix techniques que dans l'identification des "points durs".

Les objets à entreposer

Parmi l'ensemble des objets actuellement produits par les installations nucléaires industrielles, le projet du CEA a donné la priorité aux études concernant le combustible usé,

Emmanuel Joly/CEA

Têtes des puits contenant divers combustibles dans la casemate d'entreposage à sec Cascad, au CEA/Cadarache, actuelle référence de ce concept.

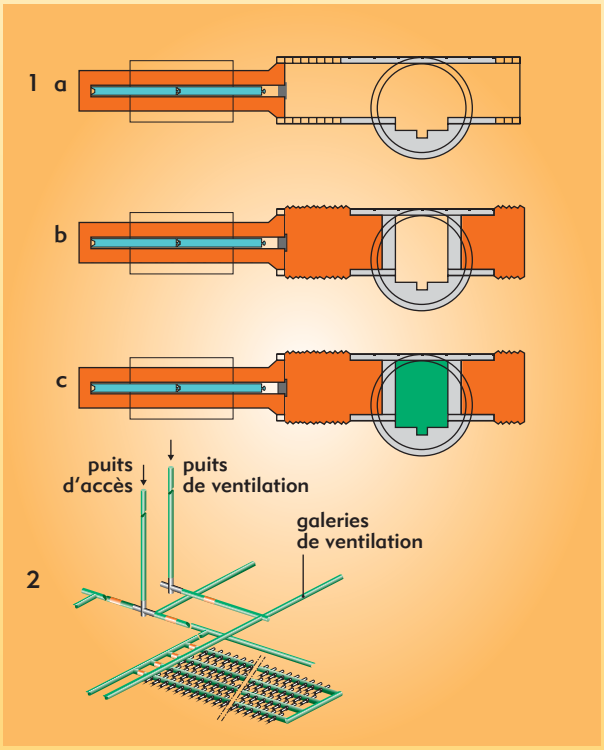
En quoi un stockage peut-il être réversible ?

I

Alors qu'un **entreposage** de déchets nucléaires est, par définition, réversible, puisqu'il représente une solution d'attente, même si elle peut être de très longue durée (de l'ordre d'un ou plusieurs siècles), un **stockage** peut être définitif. L'exigence de **réversibilité** est de conserver la possibilité de retirer les **colis** de l'installation après les y avoir mis, et ce pendant un certain temps, jusqu'à une éventuelle fermeture définitive. Ceci implique de nombreuses contraintes par rapport à un stockage irréversible, en particulier une phase d'exploitation importante.

Aujourd'hui, en France, l'Andra définit la réversibilité suivant des étapes successives présentant des "niveaux de réversibilité" décroissants. Schématiquement, chaque étape consiste à effectuer une opération technique de fermeture qui rendra la reprise des colis plus difficile qu'à l'étape précédente. Ceci permet de passer graduellement d'un état où il est facile d'accéder aux colis à un état où le stockage est définitivement fermé. La décision de fermeture est ainsi rendue plus flexible et le passage d'une étape à une autre se fait en fonction de critères bien définis.

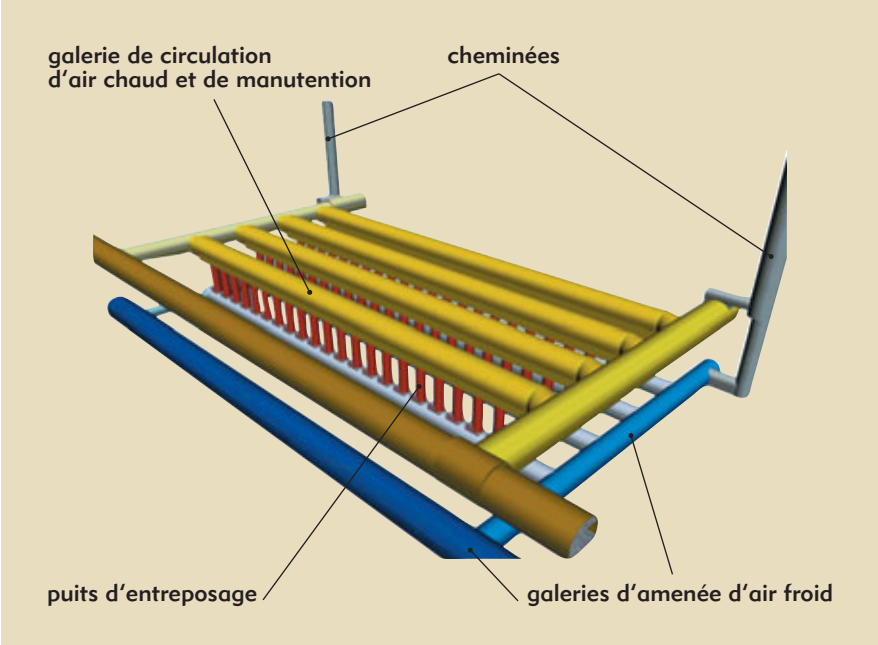
Le processus aujourd'hui envisagé comporte cinq étapes. Dans la première, le bouchon du tunnel est en place et le stockage est analogue à un entreposage (figure 1a) ; dans la deuxième, l'alvéole est fermée (figure 1b) ; dans la troisième, la galerie de manutention l'est à son tour (figure 1c). Enfin, au cours des quatrième et cinquième étapes, les galeries de roulage et le puits sont remblayés (figure 2). (Source Andra ; présentation à la Commission nationale d'évaluation du 25 avril 2001).



qui ne bénéficie aujourd'hui en France d'aucune filière d'entreposage à sec en dehors de l'installation de référence Cascad, au CEA/Cadarache, qui n'accueille que des combustibles expérimentaux. Pour les colis de verre, un entreposage à sec reposant sur un concept de puits refroidis par ventilation naturelle est opérationnel à La Hague (Manche). Une étude menée en collaboration avec Cogema, l'exploitant, a conclu que cette installation avait une bonne aptitude à la longue durée et que ses limitations éventuelles sur ce point étaient bien identifiées. Le CEA a choisi pour cette raison de proposer une solution de ce type pour la gestion des verres, moyennant des améliorations à examiner dans le cadre des études sur le combustible usé. L'entreposage d'autres colis prospectifs liés à la filière de séparation poussée (voir *Des matrices sur mesure pour les radionucléides à vie longue*) pourra ensuite être considéré et largement extrapolé à partir des études déjà menées.

Les grands choix techniques

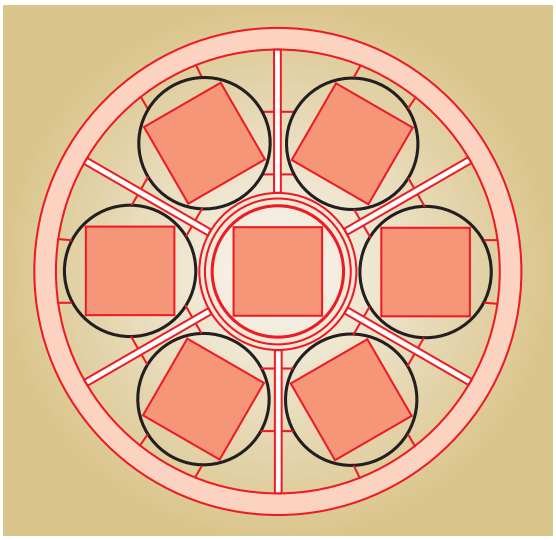
L'option de base des concepts choisis est l'entreposage à sec. L'entreposage en piscine, industriellement opérationnel, ne répond pas aux principes retenus pour la longue durée, en particulier en ce qui concerne la surveillance et la maintenance. C'est pourquoi ont été choisis des systèmes à refroidissement par ventilation naturelle, à l'exclusion de tout système actif (au moins dans les phases d'attente).



CEA/DEN

Réseau de galeries et de puits d'un entreposage en subsurface. Un tel entrepôt, situé à environ 50 mètres sous la surface du sol, serait implanté dans un massif en relief constitué de roche dure, au-dessus de la nappe phréatique, avec un drainage des eaux d'infiltration par gravité. L'accès à l'entrepôt se ferait à l'horizontale depuis la bordure du relief, le massif assurant la protection physique de l'entrepôt vis-à-vis des agressions externes.

Le confinement est entièrement assuré par le colis. Il n'est pas apparu possible de garantir sur la longue durée l'intégrité de la gaine du combustible usé (voir les articles suivants). Le choix a donc été fait de conditionner les **assemblages** dans un étui puis dans un **conteneur**. Les conteneurs entreposés, pour répondre aux objectifs de reprise, doivent être intègres et présenter le moins possible de corrosion. L'entrepôt doit donc assurer le maintien des colis en régime de corrosion sèche. Il prend également en charge la fonction de protection biologique, que le conteneur n'assure pas. Enfin les entrepôts sont modulaires afin d'être plus flexibles vis-à-vis des scénarios industriels. Ces choix sont techniquement et économiquement compatibles avec les options de stockage.



CEA

Figure 1. Section d'un conteneur métallique de sept étuis contenant chacun un assemblage de combustible usé à l'oxyde d'uranium, dans l'état actuel des études de conception par le CEA.

Les points durs identifiés

Les "points durs" devant encore faire l'objet d'études ont été identifiés dans quatre domaines : fermeture du colis, thermique de l'installation, surveillance et maîtrise de la criticité.

La fermeture du colis

La performance de confinement du colis de combustible irradié est au cœur du dispositif d'entreposage de longue durée (figure 1). Les procédés de mise en étui, réalisant le passage du combustible de la piscine à une atmosphère sèche, doivent répondre à des spécifications très précises de minimisation de la quantité d'eau résiduelle. Le comportement sur des durées séculaires des composants cruciaux que sont les systèmes de fermeture de l'étui et du conteneur doit être extrapolé à partir d'expériences sur de courtes durées. Aussi la soudure pleine épaisseur, voie de référence, et le système innovant du joint fusible font-ils l'objet d'expérimentations représentatives des conditions d'entreposage (figure 2). Un programme est en cours, qui aboutira vers 2004 à la réalisation et au test en vraie grandeur d'un démonstrateur permettant de valider les solutions technologiques retenues. En ce qui concerne le choix des matériaux, la fonte ou l'acier noir conviennent pour l'**enveloppe** externe en situation d'entreposage et l'étui sera en inox pour faciliter la décontamination et éviter une corrosion simultanée des deux barrières. Ce programme "colis" fait l'objet d'une collaboration étroite entre le CEA, EDF et l'Andra.

La thermique de l'installation

Le fonctionnement thermique global des installations nécessite des études très approfondies de manière à trouver des dispositifs technologiques permettant le fonctionnement en régime de corrosion sèche, qui limite considérablement les vitesses de corrosion (1 µm par siècle). La température maximale aujourd'hui admissible pour les matériaux d'infrastructure est de 80 °C, compatible avec une température de la gaine inférieure à 350 °C, ce qui la préserve d'un **fluage** rapide. La thermique des colis eux-mêmes, difficile à gérer en début d'entreposage lorsqu'il s'agit de limiter les contraintes sur l'installation, devient un point dur en matière de prévention de la corrosion quand ils ont refroidi.

La surveillance

La mise en œuvre d'une double barrière sera d'autant plus sûre qu'il sera possible de garantir longtemps et indépendamment l'intégrité de chacune. Des études approfondies sont engagées pour évaluer les moyens de prévoir leur état et de la contrôler.

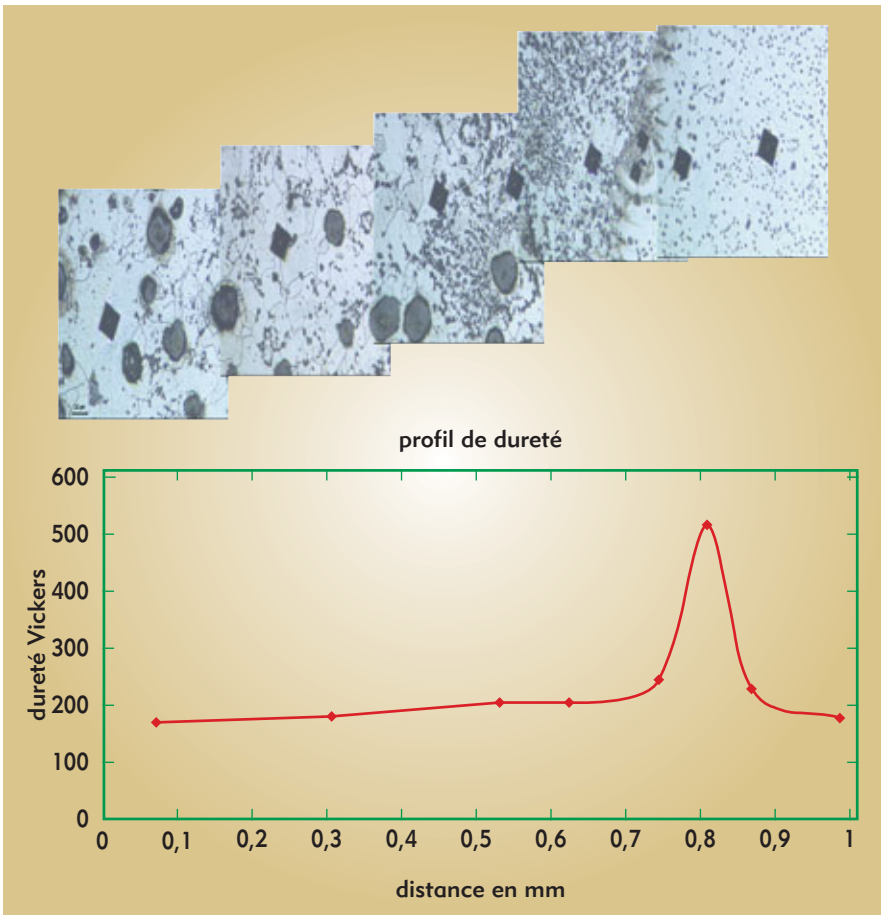
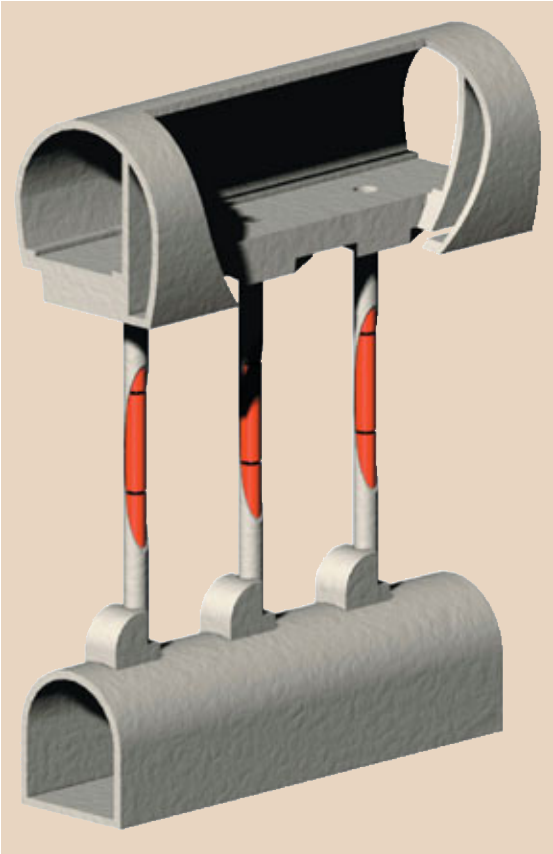


Figure 2. Évolution de la microstructure d'une soudure de conteneur par mesure de microdureté sur coupe métallographique étudiée dans le cadre de l'évaluation de la durabilité de ces structures.

Vue en écorché des puits contenant des étuis de combustibles usés dans un entrepôt en subsurface.



CEA

La criticité

Il faut démontrer qu'il n'y aura jamais de situation présentant un risque de **criticité** sur des temps aussi longs et pour des quantités de combustibles allant jusqu'à plusieurs milliers de tonnes. Des dispositions particulières sont prises concernant la géométrie de la collection d'assemblages dans l'entrepôt et contre le risque d'apparition d'une situation de criticité en cas d'inondation, en évitant un coûteux recours à des matériaux borés[2].

Deux concepts intégrés étudiés en détail

Après avoir envisagé plusieurs voies possibles, les chercheurs du CEA examinent en détail deux concepts principaux pour l'entreposage des colis, l'un en **subsurface**, l'autre en surface.

Un entrepôt en *subsurface*, à flanc de colline par exemple, permet de gagner fortement en robustesse vis-à-vis des agressions externes (chute d'avion, situations climatiques exceptionnelles, intrusions…). Ce concept innovant, dont la faisabilité industrielle est à étudier sur certains points particuliers (gestion de l'eau, manutention, circuits d'air) ne bénéficie toutefois d'aucun retour d'expérience industrielle. La réalisation d'un tel entrepôt est plus complexe que celle d'une installation de surface et les risques liés à la manutention y sont plus importants, en particulier en cas d'incident. La solution de référence, dont le fonctionnement thermique a été validé, repose sur une installation des colis en puits verticaux.

Le concept de casemate modulaire pour un entrepôt de *surface*, en plaine est, quant à lui, proche des entrepôts industriels existants. Son étude permet d'approfondir les dispositifs spécifiques à la longue durée (figure 3). Les conteneurs sont disposés à la verticale dans des salles aux murs en béton. Leur manutention se fait à travers une dalle qui assure la protection biologique. La faisabilité d'un refroidissement par un courant d'air transverse, permettant d'augmenter les échanges thermiques, est en cours d'étude. Par ailleurs sera mené un examen approfondi de l'aptitude à la durabilité des casemates Nuhoms[3], en service industriel aux États-Unis et en Arménie, et très adaptées à un entreposage décentralisé.

(2) Voir à ce sujet *Clefs CEA* n° 45, Physique nucléaire et sûreté, p. 55.
(3) De *NUtech* (nom de la société américaine qui a développé le concept) et de *HOrizontal Modular Storage*.

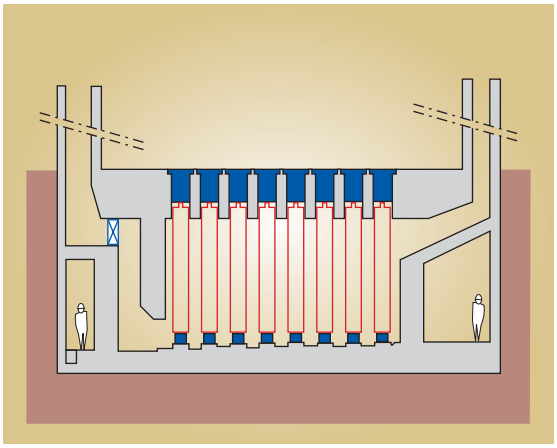


Figure 3. Exemple de concept CEA d'une installation d'entreposage de type casemate béton proche des systèmes industriels existants.

La contrainte économique

Les aspects économiques de la production d'énergie nucléaire doivent être pris en compte. L'enjeu industriel est important dans le contexte de libéralisation des marchés de l'électricité. L'évaluation complète, de la sortie du réacteur au stockage, est très complexe et reste à consolider. Une phase d'entreposage préalable est considérée comme incontournable. Le coût de l'entreposage est aujourd'hui estimé à plus de 300 000 euros par tonne de combustible (investissement initial, exploitation pendant 60 ans et coût des installations annexes compris). La référence actuelle pour l'entreposage à sec est le système américain de silo horizontal, dont le coût (sans aucun dispositif "longue durée") est estimé à un peu plus de 38 000 euros par tonne de combustible. Les solutions proposées devront se mesurer à cette aune.

L'année 2002 doit voir l'aboutissement des études techniques au niveau d'un avant-projet sommaire. Par ses études, le CEA est donc en mesure de proposer des solutions à la question de l'aval du cycle qui permettent non seulement de répondre au exigences de la loi mais également, par le partage de sa capacité de R&D avec ses partenaires de l'industrie, de jouer un rôle majeur dans l'élaboration des concepts industriels du nucléaire de demain.

Alain Lioure
Direction de l'énergie nucléaire
CEA/Valrhô-Marcoule