

LES RECHERCHES POUR LA GESTION DES DÉCHETS NUCLÉAIRES : des résultats aujourd'hui, des solutions demain

Les recherches pour la gestion des déchets nucléaires ont enregistré au cours de la décennie écoulée d'importants progrès qui permettent de dessiner les contours des solutions parmi lesquelles les décideurs auront à choisir les plus adaptées, plus particulièrement en ce qui concerne les éléments à haute activité et à vie longue. C'est notamment vrai en France, où une loi encadre ces recherches, dont il sera rendu compte au Parlement en 2006.

L'ensemble des laboratoires Atalante, au CEA/Valrhô-Marcoule, où sont réalisées les principales expérimentations en actif sur le traitement et le conditionnement des déchets nucléaires.



CEA

Le contexte national et international

Parmi les principaux pays qui ont recours à l'énergie nucléaire, la France poursuit depuis longtemps des recherches sur la gestion des déchets nucléaires (encadré A, *Qu'est-ce qu'un déchet nucléaire ?*). Cette

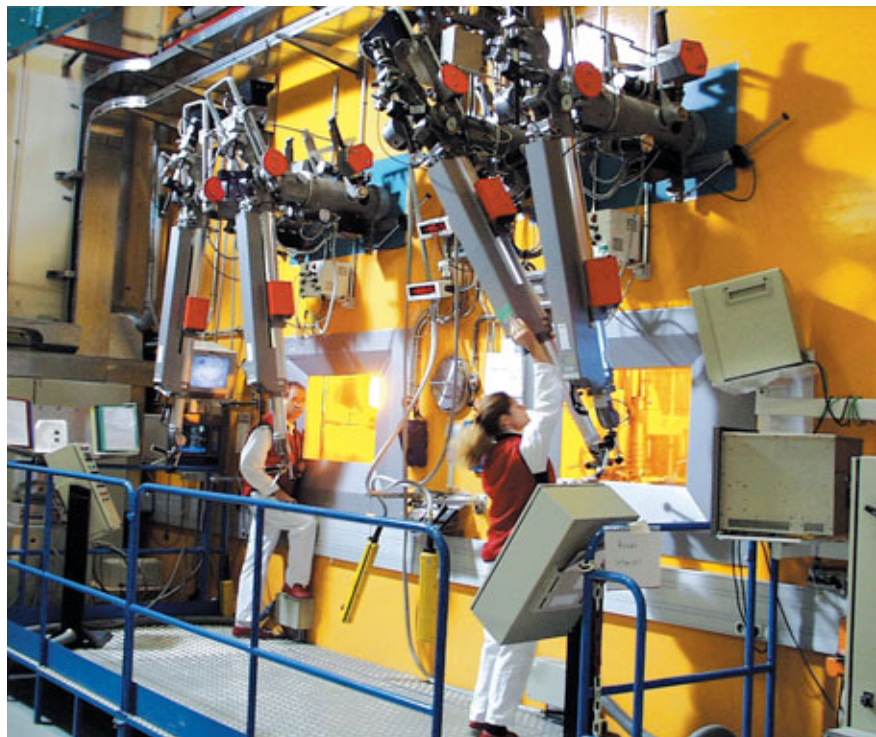
gestion, pour ce qui est des éléments à **vie longue**, fait pour l'instant appel à des solutions d'**entreposage** sûres mais non définitives. À ce jour, aucun pays n'a mis en œuvre une politique de gestion des déchets nucléaires de haute **activité** et à vie longue (encadré H, *Que font les pays étrangers ?*). Parmi les plus avancés, la Suède et la Fin-

lande s'engagent vers le **stockage** direct des combustibles usés dans une formation géologique profonde. Les États-Unis ont, pour leur part, commencé en 1999 à stocker des déchets de moyenne activité en profondeur. En ce qui concerne la France, la loi demande non seulement d'étudier le stockage en formation géologique, étude dont le pilotage est confié à l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), mais aussi d'explorer les possibilités de **transmutation** des déchets et d'un entreposage de longue durée, le pilotage de ces deux axes de recherche étant à la charge du CEA (encadré 1).

Les résultats de dix ans de recherche

De nombreux chercheurs du CNRS et des universités se sont mobilisés aux côtés de ceux du CEA et de l'Andra (encadré 2). D'importants résultats ont été obtenus. De nouveaux concepts ont émergé et une science "de la longue durée" s'est mise en place. Ces dernières années ont vu évoluer les perspectives concernant les déchets radioactifs.

En ce qui concerne les volumes, les gains d'efficacité du traitement à l'usine de La Hague ont permis de diviser le volume des effluents par dix et celui des déchets solides par trois. Au plan scientifique, la démonstration a été apportée qu'il est possible,



E. Joly/CEA

Télemanipulateurs de la cellule Alceste de caractérisation des déchets A et B par méthodes destructives ou non destructives au CEA/Cadarache.



dans le cadre d'un processus dit de **séparation poussée** (voir le chapitre I, *Trier*) d'extraire les éléments les plus radio-toxiques du flux des déchets en vue de leur transmutation (voir le chapitre II, *Transformer*) ou de leur **conditionnement** spécifique (voir le chapitre III, *Conditionner*); la possibilité de transmutation dans divers

La loi de 1991

1

Aujourd'hui incorporée au Code de l'environnement, la loi 91-1381 du 30 décembre 1991 (aussi connue sous le nom de "loi Bataille", du nom de son rapporteur) relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs est née des difficultés rencontrées dans le courant des années 80 par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) à trouver un site pour l'implantation éventuelle d'un centre de stockage de déchets nucléaires de haute activité et à vie longue. Assortie d'un moratoire de quinze ans sur toute décision sur le devenir à long terme de ces déchets, la loi a tracé les contours d'un programme de recherches à réaliser pendant la durée du moratoire et stipule que le Parlement devra se voir remettre en 2006 un rapport global d'évaluation de ces recherches.

Le pilotage de l'axe 1 (*recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces*

déchets), a été confié au CEA, celui de l'axe 2 sur *l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains*, l'a été à l'Andra.

Les travaux sur l'axe 3 (*étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface des déchets radioactifs à vie longue et à haute activité*) sont également pilotés par le CEA. Le Gouvernement a par ailleurs demandé au CEA de réfléchir aux concepts d'entreposage en subsurface.

La loi a introduit un contrôle parlementaire des travaux de recherche via l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques auquel est soumis chaque année un rapport sur l'avancement des recherches établi par une Commission nationale d'évaluation (CNE) composée d'experts nationaux et internationaux désignés par le Gouvernement, l'Assemblée nationale et le Sénat.

Qu'est-ce qu'un déchet nucléaire ?

Selon la définition de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), est considéré comme déchet radioactif "toute matière pour laquelle aucune utilisation n'est prévue et qui contient des radionucléides en concentration supérieure aux valeurs que les autorités compétentes considèrent comme admissibles dans des matériaux propres à une utilisation sans

contrôle". Pratiquement, ces matières doivent être conditionnées de telle façon que les radionucléides qu'ils contiennent restent **confinés** jusqu'à l'extinction de leur **radioactivité** et qu'ainsi les rayonnements ionisants qu'ils émettent, potentiellement dangereux pour les organismes vivants, soient arrêtés par des substances faisant écran.

En France, la production de déchets nucléaires par habitant est d'environ 1 kg par an (dont seulement 20 g de déchets de radioactivité élevée), à comparer à une production totale de déchets (y compris industriels) de l'ordre de 2500 kg, dont 100 kg de déchets chimiques toxiques "éternels" (métaux lourds notamment) pour lesquels il n'existe pas à ce jour de filière d'élimination ou de stockage.

Les différents types de déchets

Les déchets radioactifs sont essentiellement caractérisés par la nature des éléments qu'ils contiennent et par l'**activité** par unité de volume ou de masse (exprimée en becquerels, nombre de **désintégrations** spontanées par seconde, elle permet d'évaluer la quantité d'atomes de radionucléides contenus dans le déchet). À chacun de ces radionucléides correspond une **période de décroissance radioactive**, qui indique le temps nécessaire pour diminuer son activité d'un facteur 2, un type de rayonnements émis (**alpha**, **bêta**, **gamma** ou **neutrons**) et l'énergie transmise par ces rayonnements. Les déchets voient donc leurs caractéristiques évoluer dans le temps, d'autant qu'il faut également tenir compte des **produits de filiation** des radionucléides puisqu'en se désintégrant spontanément, les noyaux radioactifs peuvent donner naissance non seulement à des noyaux stables mais aussi à d'autres noyaux radioactifs qui se désintègreront à leur tour selon leurs caractéristiques propres. C'est ainsi qu'il existe des **chaînes radioactives**, en particulier pour des éléments naturels comme l'uranium ou le thorium.

Les déchets radioactifs, suivant leur nature, leur niveau de radioactivité et la durée de vie des radionucléides les constituant, ont été classés en différentes catégories, des déchets **TFA** (très faible activité) aux déchets **HA** (haute activité) en passant par les déchets **FA** et **MA** (faible et moyenne activité). Ils sont dits à **vie longue** lorsque leur période dépasse 30 ans, à vie courte dans le cas contraire.

En France, quatre grandes catégories sont ainsi distinguées par l'Autorité de sûreté nucléaire selon leur filière de gestion à long terme (tableau). Des confinements (verre, béton, etc.) spécifiques à chaque type de

déchet ont été mis au point, assurant une gestion adaptée, pour certains d'entre eux dans l'attente des décisions engageant le très long terme. Tous ces déchets sont finalement conditionnés dans des **colis** qui peuvent être regroupés en cinq grandes classes : les colis de déchets bitumés, les colis à base de liants hydrauliques (ciments, mortiers, bétons), les colis de déchets vitrifiés, les

déchets par filières adaptées à leurs caractéristiques ; il n'y a pas de seuils génériques de libération des déchets. Le CEA, pour sa part, entrepose ses déchets TFA à Cadarache (Bouches-du-Rhône), à raison d'une activité massique moyenne et maximale respectivement de 10 et 100 Bq/g pour les émetteurs bêta-gamma, et de 1 et 10 Bq/g pour les émetteurs alpha.

- les déchets de **faible activité** (classés dans la catégorie **A**, qui inclut également certains déchets d'activité moyenne) ne renfermant principalement que des **radioéléments** émetteurs de rayonnements bêta (β) et gamma (γ) de période inférieure ou égale à 30 ans qui présentent ainsi une nuisance faible ou moyenne qui devient négligeable au bout de 300 ans (10 périodes) et des émetteurs alpha (α) ou à vie longue d'activité inférieure ou égale à 3700 Bq/g après 300 ans. Ils proviennent des installations nucléaires (gants, filtres, résines, etc.), des laboratoires de recherche et des utilisateurs médicaux et industriels de radioéléments. Leur volume atteindrait d'ici 2020 quelque 500 000 m³, soit près de 90 % du total des déchets nucléaires. Ils sont stockés en France sur un site de **stockage** de surface. L'Andra en gère deux : le Centre



Surbottes et gants, ôtés ici par un technicien quittant une zone contrôlée du réacteur Osiris, au CEA/Saclay, finissent en déchets A.

Antoine Gonin/CEA

colis de déchets compactés et les colis de combustibles usés, cette dernière catégorie étant en cours d'étude.

- les déchets de **très faible activité**, appelés TFA, proviennent essentiellement du démantèlement des installations nucléaires (250 000 m³ attendus d'ici 2020 et de 1 000 000 à 2 000 000 m³ au total) ; leur statut définitif est encore à l'étude, entre recyclage et décharge dédiée (projet Omega-tech, du nom du GIE créé par l'Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, et France-Déchets). La démarche est basée sur une gestion des

de la Manche (CM), qui est plein, et le Centre de l'Aube (CA) qui reçoit actuellement les déchets. Selon la Règle fondamentale de sûreté (RFS) n° 1-2 du 19 juin 1984, l'activité massique moyenne en émetteurs a de l'ensemble des colis du centre de stockage ne devra pas dépasser 370 Bq/g à l'issue de la phase de surveillance (300 ans). Pour les déchets de faible activité à vie longue (**FAVL**) tels les déchets radifères et les déchets de graphite (moins de 15 000 m³ en 2020), des stockages dédiés sont à l'étude.

- les déchets de **moyenne activité** (catégorie **B**, qui inclut également des déchets

A

de faible activité) contiennent en quantités significatives des radioéléments, généralement des **actinides**, émetteurs de rayonnements alpha d'activité supérieure à 3700 Bq/g et de période supérieure à 30 ans pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers d'années, mais sans dégagement important de chaleur. Ces **MAVL** (déchets de moyenne activité à vie longue) proviennent principalement des usines du cycle du combustible (fabrication, retraitement) et des centres de recherche du CEA. Ce sont des restes des structures ayant contenu du combustible nucléaire (encadré B, **Les déchets du cycle électronucléaire**) et des déchets solides technologiques de natures diverses, ainsi que des boues issues des stations de traitement des effluents (provenant des opérations de **traitement** et des laboratoires de recherche du CEA), stabilisées au sein de matrices en **bitume**, solution aux utilisations de plus en plus limitées, ou à base de **ciment**. La quantité de ces déchets est évaluée à 60 000 m³ en 2020. Ils font actuellement l'objet d'un **entreposage** intermédiaire et provisoire dans l'attente d'un exutoire à définir selon les modalités issues des recherches préconisées par la loi du 30 décembre 1991 (encadré 1).

● les déchets de **haute activité** (C) contiennent des radioéléments émetteurs de rayonnements alpha, bêta et gamma de période supérieure à 30 ans. Ils sont constitués de solutions de **produits de fission** et d'**activation** issues du traitement des combustibles usés. Ils représentent de loin la principale source de déchets *en termes d'activité* alors qu'en volume ils ne représenteront au total en 2020 qu'un volume cumulé d'environ 5 000 m³, soit un cube de 17 m de côté.

Au total, la France produit aujourd'hui moins de 200 m³ de déchets de haute acti-



Exemples de déchets conditionnés dans une matrice béton.

tivité par an, soit un cube de 6 m de côté. Actuellement **vitrifiés**, les déchets de haute activité font l'objet d'un entreposage intermédiaire et provisoire dans des installations appropriées, comme les déchets B.

L'activité confinée, pour ces déchets de haute activité, varie lors de la production du verre de 10¹⁰ à quelques 10¹³ Bq par litre de verre suivant les solutions. Elle décroît ensuite pour revenir après 10 000 ans à un niveau proche du minerai d'origine. Les principales sources d'irradiation dans les verres nucléaires résultent des désintégrations β provenant des produits de fission comme le césium 137 (période de 30 ans) et le strontium 90 (période de 28 ans), des désintégrations α issues des actinides (Am, Cm, Pu...) et des transitions γ accompagnant les désintégrations β et α .

	courte durée de vie principaux éléments < 30 ans	longue durée de vie principaux éléments > 30 ans
très faible activité (TFA)	stockage dédié et filières de recyclage *	conversion en stockage des entreposages actuels*
faible activité (FA)	(déchets A) stockage de surface au Centre de stockage de l'Aube (Andra)	stockage dédié * (déchets radifères, graphites)
moyenne activité (MA)	stockage dédié pour les déchets tritiés *	(déchets B) filières à l'étude (loi du 30 décembre 1991)
haute activité (HA)	filières à l'étude (loi du 30 décembre 1991)	(déchets C)

* Filières de gestion en cours d'étude.

Tableau. Classification des déchets nucléaires en France et situation de leurs filières de gestion.

Des déchets de différentes natures

Les déchets sont classés par nature physique, eu égard au traitement qu'ils doivent subir avant entreposage et/ou stockage, en distinguant les déchets solides et les déchets liquides. Quant aux combustibles usés, ils ne sont pas considérés comme des déchets.

Les déchets solides

Relèvent de cette catégorie les matériaux incinérables (accessoires de protection, résines échangeuses d'ions, etc.), les pièces métalliques ayant servi en réacteurs et en laboratoires "chauds" ou issues du traitement des éléments combustibles, ainsi que d'autres matériaux appartenant à la classe des **déchets technologiques** (câbles, appareillages divers, terres, etc.) S'y rattachent également les déchets à comportement spécifique (sodium, graphite, déchets radifères, carbure de bore et métaux toxiques) ainsi que les sources radioactives.

Les déchets liquides

Les déchets liquides comprennent les liquides aqueux produits dans les laboratoires, les réacteurs et les installations de retraitement (solutions de produit de fission) et qui peuvent contenir différents sels (nitrates, borates, phosphates, sulfates...) à des teneurs variables et les liquides organiques (huiles, solvants de retraitement [tributylphosphate, dodécane] ou autres, liquides scintillants).

Les combustibles usés

La plupart des combustibles usés – ceux du parc électronucléaire – ne sont pas considérés comme des déchets dans la mesure où ils sont retraitables par le procédé Purex dans les ateliers de Cogema à La Hague : les quantités de combustibles entreposés en fin du parc électronucléaire représentent actuellement 3 500 tonnes de métal lourd (encadré B, **Les déchets du cycle électronucléaire**). Sont également retraitables les combustibles des réacteurs expérimentaux et prototypes comme Phénix et des réacteurs des anciennes filières uranium naturel/graphite/gaz et eau lourde, contrairement à des combustibles anciens provenant de certains autres réacteurs expérimentaux (combustibles silicieux ou oxydes irradiés dans Rapsodie, premier réacteur à neutrons rapides français) et à des échantillons de laboratoire irradiés et enrobés dans de l'araldite.

Les principales collaborations

Les recherches sur la gestion des déchets radioactifs menées par l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) et le CEA s'inscrivent pour la plupart dans des collaborations au niveau national, européen ou international.

Dans le cadre national, les partenaires au sein de la recherche publique sont le CNRS (Centre national de la recherche scientifique) et l'Université, qui coordonnent leurs actions dans ce domaine avec le programme **Pace** (Programme sur l'aval du cycle électronucléaire) organisé autour de cinq groupements de recherches (GdR) sur d'importants thèmes de recherches. Ces collaborations ont également pour partenaires les industriels EDF (Électricité de France), Cogema (Compagnie générale des matières nucléaires) et Framatome, ces deux dernières appartenant au groupe Areva. Le CEA participe directement à quatre de ces cinq GdR :

Practis (Physico-chimie de Radioéléments, des Actinides, aux Interfaces et en Solutions) (CEA, CNRS, EDF, Andra);

Gedeon (GEstion des DÉchets par des Options Nouvelles) pour étudier notamment les systèmes sous-critiques assistés par accélérateur et les combustibles à base de thorium (CEA, CNRS, EDF et Framatome);

Nomade (NOuvelles MATrices DÉchets) pour l'étude des nouvelles matrices de conditionnement (CEA, CNRS);

MoMas (Modélisation Mathématique et Simulations numériques) pour le développement de moyens de simulation liés aux problèmes de gestion des déchets nucléaires (CEA, CNRS, Andra, BRGM, EDF).

Un autre GdR, **Forpro** (FORmation géologique PROfonde), associe le CNRS à l'Andra sur les recherches à conduire dans les laboratoires souterrains de qualification.

Avec EDF, le CEA mène par ailleurs le programme **Precci** (Programme de Recherches sur l'Evolution à long terme des Colis de Combustibles Irradiés).

Au niveau européen, des programmes sont actuellement conduits dans le cadre du 5^e PCRD (programme-cadre de recherche et de développement qui couvre la période 1998-2002), comme **Partnew**, programme sur les séparations poussées qui a pris la suite de **Newpart** du 4^e PCRD, **Calixpart** sur l'extraction sélective des radioéléments par des molécules spécifiques ou **Spire** sur les effets de l'irradiation sur des matériaux pour les systèmes hybrides sous-critiques avec accélérateur. Un

certain nombre de ces thèmes de recherche ont le CEA pour coordonnateur, d'autres des organismes comme le CERN européen, le FZK allemand, l'ENEA italienne, le SCK/CEN belge, le NRG hollandais ou le KTH suédois. Le Centre commun de recherche de l'Union européenne, le GSI allemand, l'ILL franco-germano-britannique et des organismes extra-communautaires comme le Paul Scherrer Institute (Suisse) participent aussi aux programmes de recherche.

Avec les autres grands pays nucléaires, les collaborations couvrent les trois grands axes de recherche avec des partenaires japonais comme JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*) et JNC (*Japan Nuclear Cycle Development Institute*), russes (Minatom, IPC, Institut Vernadsky,...) et américains (*Department of Energy*).

Le réseau international de coopération entretenu par le CEA, l'Andra et le CNRS s'étend enfin aux organismes internationaux comme l'AEN, Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE, en ce qui concerne en particulier les données nucléaires de base, ou l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique) pour la modélisation des biosphères.

types de réacteurs a été prouvée; enfin, la capacité à prédire le comportement de **colis** de déchets radioactifs sur une très longue durée a été démontrée (voir le chapitre IV, *Entreposer et/ou stocker*).

Grâce à ces recherches, l'énergie nucléaire, outre ses atouts propres (voir l'avant-propos) montre qu'elle peut recycler ses déchets très **radiotoxiques** par le biais de la séparation poussée et donc ne garder comme déchets ultimes que des **radionucléides** à durée de vie raisonnablement courte tout en les conditionnant de manière efficace en vue d'empêcher leur dissémination dans la **biosphère**.

Les équipes de physiciens et d'ingénieurs du CEA travaillent sur ces objectifs en collaboration avec celles de tous les grands pays nucléaires (Europe, Japon, États-Unis) et en particulier avec ce dernier pays, qui a relancé ses recherches sur l'énergie nucléaire dans le cadre du forum "Generation IV".

Des déchets vitrifiés sans actinides

Le traitement des déchets est le domaine où les recherches ont obtenu les plus grands succès. Il sera notamment possible, en 2006,

de décider d'extraire, au-delà du plutonium et de l'uranium comme cela se pratique aujourd'hui à La Hague, l'américium, le curium et le neptunium, c'est-à-dire tous les **actinides** émetteurs **alpha** qui présentent une très forte radiotoxicité. Débarrassés de ces derniers, les déchets perdent beaucoup plus vite leur charge thermique et radiotoxique : en quelques centaines d'années, cette dernière redescend au niveau de celle de l'uranium minier initial.

Le cas des produits de fission

Restent quelques **produits de fission** à vie très longue comme l'iode 129, le césium 135 et le technétium 99. Trois éléments importants à cause de leur mobilité chimique et de leur abondance dans le **combustible** usé. Les recherches ont montré qu'il était également possible de les extraire.

Au final, les déchets restants pourront être stockés en profondeur, c'est-à-dire placés dans des conditions telles qu'ils n'exigeront pas de surveillance à terme, ou entreposés, solution qui, par définition, n'est pas définitive. La règle d'or de l'entreposage est en effet que les colis doivent rester par-

faitement intègres et pouvoir être repris à tout moment pour être retraités, reconditionnés ou transférés vers un stockage en profondeur.

Que faire des éléments séparés ?

Quel sera le sort des différents éléments séparés ? L'uranium issu du **traitement** constitue une réserve stratégique. Le plutonium devra être brûlé, comme il l'est actuellement pour sa majeure partie, au fur et à mesure de son extraction tandis que les **actinides mineurs** pourront, si la décision est prise, être séparés en vue de leur transmutation ou éventuellement de leur conditionnement spécifique.

La transmutation

Les possibilités de transmutation ont été passées au crible en simulant le fonctionnement de réacteurs chargés d'actinides mineurs. Les données nucléaires de base manquantes ont été mesurées. Des capsules (appelées "cibles" dans le jargon des spécialistes) contenant de l'américium ont été préparées et, pour certaines, testées dans différents réacteurs. Un concept de **réacteur sous-critique** associé à un accélérateur a été élaboré.

Il ressort de ces études que les transmutations envisagées sont physiquement possibles. Cependant, les durées nécessaires pour atteindre l'équilibre production/destruction peuvent être de l'ordre de 100 ans. La mise en œuvre est difficile car les manipulations de quantités substantielles d'éléments très radioactifs sont des opérations lourdes. Enfin, le pilotage de réacteurs chargés d'actinides mineurs en quantités significatives peut s'avérer délicat. Toutefois, aucune de ces objec-



Les films de Roger Lennhardt/Cogema

tions n'est insurmontable et l'on dispose dès aujourd'hui de réacteurs capables de recycler les actinides mineurs.

Le conditionnement spécifique

Par son caractère amorphe, le verre accepte bien la diversité des éléments présents dans le combustible usé. Les dernières études montrent que c'est une **matrice** de durabilité exceptionnelle en situation de stockage.

Entreposage de colis standard de déchets compactés à l'atelier de compactage de l'usine de Cogema à La Hague. À côté de ceux de la recherche, la réduction des volumes est un des progrès enregistrés ces dernières années dans la gestion des déchets nucléaires.

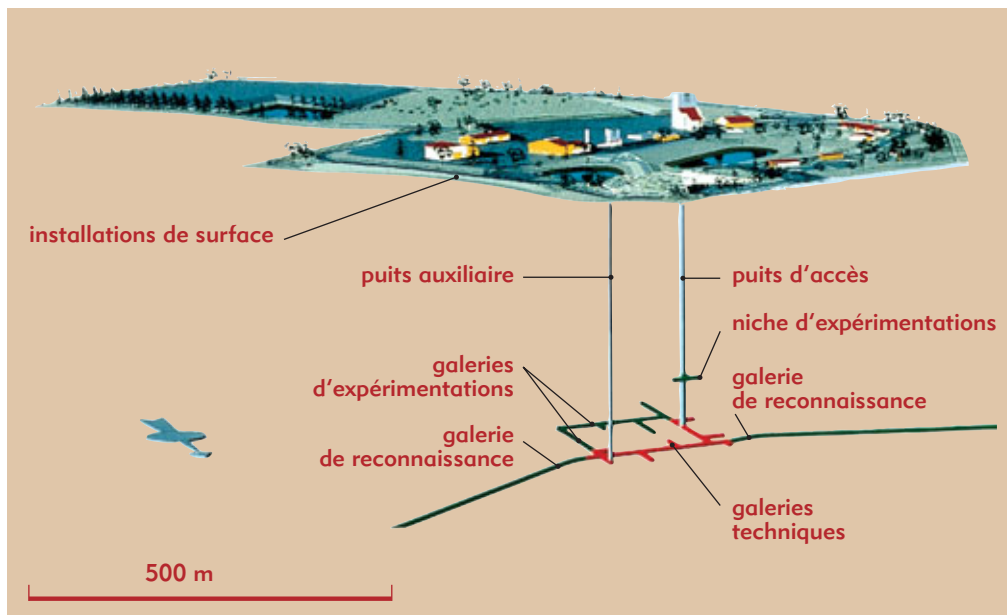


Image de synthèse du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, en cours de construction à Bure.



Andra

Le volume de déchets en chute constante

Indépendamment des travaux réalisés sur des solutions à très long terme, voire définitives, la gestion industrielle des déchets nucléaires s'est traduite en France, ces dernières années, par une réduction drastique de leur volume, que ce soit par compactage (pour les déchets métalliques), incinération ou par l'application d'autres procédés. C'est ainsi que pour les déchets de faible **activité** à durée de **vie courte (A)**, les plus volumineux (90 % du volume total mais moins de 1% de la **radioactivité**), la production cumulée en 2020 est aujourd'hui estimée à 500 000 m³, alors qu'elle était encore évaluée au milieu des années quatre-vingt-dix à 900 000 m³ à l'horizon... 2000 !

Les principaux progrès ont porté sur la suppression des **bitumes** dans lesquels étaient conditionnées les boues résultant du traitement des effluents liquides du cycle du combustible, la décontamination des **déchets technologiques** (conditionnés dans des blocs de béton) et le compactage des coques et embouts (restes des pièces métalliques des combustibles usés) autrefois coulés dans du ciment. Ces recherches ont permis de réduire le volume global de déchets **à vie longue** à l'issue des opérations de **traitement** d'un **facteur 5** entre la période de conception des usines, dans les années quatre-vingt, et l'année 2001, et d'un **facteur 3** depuis 1991 (la figure 1 illustre les progrès réalisés dans l'usine UP3 à La Hague, où Cogema traite les combustibles usés d'origine étrangère).

Une nouvelle gestion des effluents liquides générés dans le procédé de traitement qui permet de vitrifier l'ensemble des radioéléments a permis d'aboutir en 1995 à l'arrêt de la production de bitumes dans l'usine UP3 (soit environ 0,6 m³ par tonne retraitée). Les recherches ont porté sur des optimisations de procédé visant

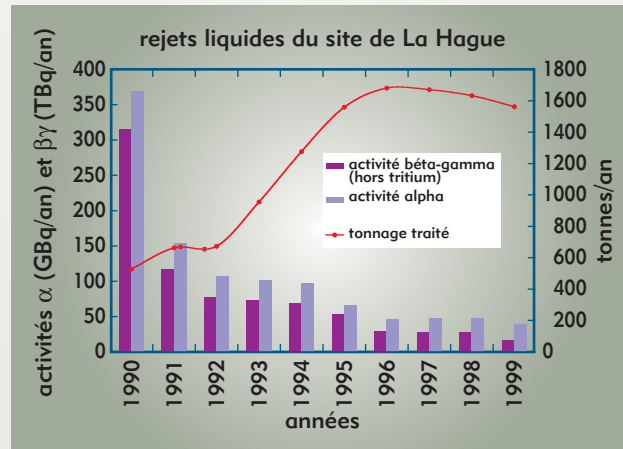


Figure 2. Evolution des rejets liquides du site de La Hague mettant en évidence leur chute sensible malgré l'augmentation des tonnages traités.

à limiter la présence d'éléments minéraux dans les réactifs utilisés (en particulier le sodium) afin de permettre d'une part une concentration poussée des effluents et d'autre part d'en garantir la bonne incorporation dans le verre, qui assure un meilleur confinement des radioéléments. L'arrêt des ateliers "bitume" n'a pas pour seul effet une réduction du volume des déchets : il permet aussi une moindre dissémination de l'activité dans des colis de déchets de diverses natures (diminution de l'inventaire des déchets de moyenne activité et à vie longue), et une diminution significative de l'activité résiduelle des effluents issus des traitements associés à l'opération de bitumage, rejetés en mer.

D'autres recherches ont porté sur la mise au point des techniques de récupération du plutonium fixé sur divers déchets technologiques.

La réduction du volume des "coques" (tronçons de la gaine métallique des combustibles) a également fait l'objet de nombreuses études : le CEA a développé un procédé de fusion en creuset froid apte à procurer à la fois une diminution de volume et un certain degré de déconta-

mination par une concentration de l'activité des **transuraniens** dans la zone de fusion.

La réduction des rejets

En ce qui concerne les effluents liquides, les recherches ont essentiellement concerné la mise au point d'une technologie de filtration assistée, afin de parfaire l'épuration vis-à-vis des radiocontaminants des effluents rejetés en mer. Ce procédé, adapté au traitement d'effluents d'un très grand volume mais d'un niveau de contamination extrêmement faible, vise à diminuer d'un **facteur voisin de 10** la teneur résiduelle des contaminants en les adsorbant sur des macromolécules avant filtration. Les essais à l'échelle d'une maquette ont permis de vérifier la faisabilité d'un tel procédé ; l'intérêt de sa mise en œuvre devrait se renforcer dans la perspective des opérations d'assainissement des installations, qui devraient générer un flux d'effluents important. Par ailleurs, diverses actions particulières ont été menées, notamment sur le traitement des effluents analytiques qui contribuent pour une large part à la teneur en émetteurs alpha des effluents ; concourant ainsi, au terme d'une décennie, à la réduction de près d'un facteur 10 de l'activité rejetée, malgré l'accroissement très important des tonnages traités (figure 2).

Pour ce qui est des effluents gazeux, les recherches ont essentiellement porté sur le piégeage de l'iode (**produit de fission**), avec la mise au point d'un procédé de récupération de l'iode déposé sur les filtres à adsorbant solide ainsi que d'un procédé de piégeage dans le nitrate d'hydroxylammonium, qui pourrait être mis en œuvre pour réduire dans les effluents à vitrifier les quantités de sodium qui a servi à détruire les composés acides issus de la dégradation des solvants de traitement.

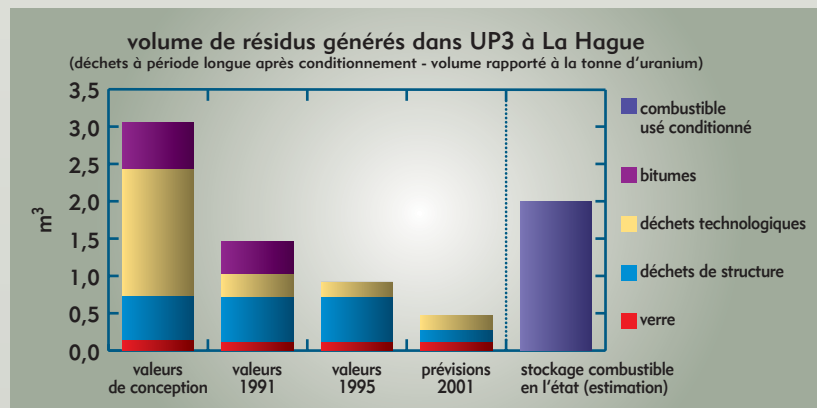
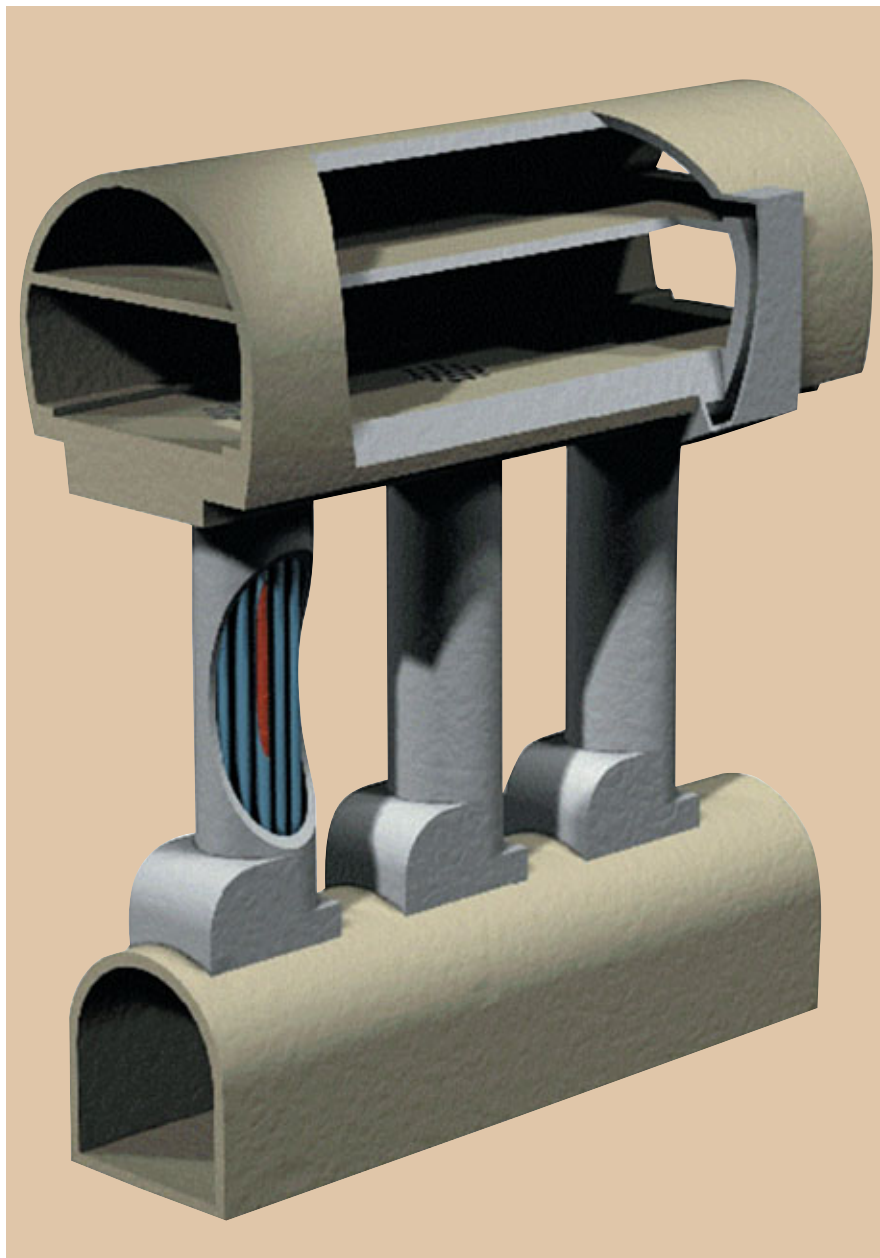


Figure 1. Volume de résidus générés dans l'usine UP3 à La Hague suivant la nature de ces déchets.

Concept d'entreposage en subsurface de déchets vitrifiés.



CEA

Mais s'il a été procédé à une séparation poussée, on dispose de corps chimiquement purs et en petite quantité : ces avantages pourraient être mis à profit en introduisant ces corps dans une **céramique** spécialement adaptée qui pourrait résister à la dissolution dans l'eau jusqu'à ce que leur **radioactivité** soit éteinte. La possibilité de retour vers la biosphère des éléments qui y seraient piégés serait réduite d'autant. Les études menées dans le cadre de la collaboration **Nomade** évaluent plusieurs pistes.

Les déchets de moyenne activité

Si les déchets de haute activité à vie longue posent les problèmes les plus pointus, ils ne représentent qu'une petite partie du volume des déchets radioactifs à vie longue (1 550 m³ sur les 30 000 m³ accumulés en France entre le début de l'ère nucléaire et l'an 2000)

(encadré 3), le reste des déchets à vie longue étant des déchets de moyenne activité qui se présentent sous des formes très diverses (encadré B, **Les déchets du cycle électro-nucléaire**). Les plus récents sont conditionnés sous forme standardisée. Les plus anciens sont en cours de reconditionnement. Des méthodes de caractérisation ont été développées afin de les orienter vers les bonnes filières de conditionnement, puis les entreposer ou les stocker.

Un déchet bloqué dans une matrice et enfermé dans un **colis** étanche perd toute nocivité effective. Les recherches menées au cours de la décennie écoulée ont permis d'affiner considérablement les connaissances sur le comportement à long terme des principaux conditionnements : verres, bitumes, bétons, matrice oxyde d'uranium (UO₂) et sa gaine en ce qui concerne le combustible utilisé, etc.

Les déchets du cycle électronucléaire

Les déchets radioactifs à haute **activité** et à **vie longue** (déchets HAVL ou de type "C" dans la classification retenue en France) proviennent pour l'essentiel des **combustibles** usés du parc électronucléaire.

L'irradiation en réacteur des combustibles conduit à la formation en leur sein de **radio-nucléides** très divers, résultant de réactions nucléaires de **fission** ou de **capture** impliquant les **noyaux lourds** (uranium et plutonium), ou, à un degré moindre, d'**activation** d'autres éléments présents dans le combustible ou les structures environnantes (tableau 1). C'est ainsi que les "**coques**" (tronçons de gaines métalliques ayant contenu le combustible des réacteurs à eau sous pression (REP) et les "**embouts**" (pièces qui constituent les extrémités des assemblages combustibles de ces mêmes REP) constituent pour leur part des déchets de catégorie "**B**".

Les déchets radioactifs à haute activité et à vie longue ne représentent qu'une faible part de la masse du combustible (environ 4 % pour un combustible à base d'oxyde d'uranium enrichi tel qu'il est utilisé dans la majorité des 58 REP d'EDF). Ils sont composés de produits issus de la fission nucléaire, appelés **produits de fission** (PF) et d'**actinides mineurs** (neptunium, américium et curium) ainsi qualifiés de par leur faible quantité (moins de 0,1 % de la masse du combustible usé). Un nombre limité de ces éléments, dits à vie longue, a une **période** de décroissance radioactive élevée, c'est-à-dire supérieure à 30 ans. Moins

de 10 % des PF sont dans ce cas et certains ont une période de plusieurs milliers, voire de plusieurs millions d'années (tableau 2). Il convient de bien noter qu'une très longue durée de vie n'est pas un inconvénient dans la mesure où elle correspond à une très faible radioactivité. Les actinides mineurs (AM), qui sont des noyaux lourds (contrairement aux PF qui en sont des fragments), sont pour leur part constitués d'éléments comportant au moins un **isotope** ou un **produit de filiation** à vie longue.

Ces déchets "C" sont hautement radioactifs et thermogènes pendant les premières décennies de leur existence car ils renferment aussi de fortes concentrations de produits de fission à vie courte comme le strontium 90 et le césium 137. Ils sont actuellement considérés comme les déchets ultimes du cycle du combustible électronucléaire car dépourvus d'intérêt énergétique.

Ce n'est pas le cas des 96 % de la masse des combustibles usés que représentent l'uranium (95 %) et le plutonium (1 %), **actinides** qualifiés de majeurs. Ces deux éléments sont réutilisables pour produire de l'énergie alors que trois tonnes du combustible qui les contient ont déjà permis de produire 1 milliard de kWh, couvrant ainsi tous les besoins en électricité d'environ 70 000 personnes pendant un an !

Le plutonium est aujourd'hui recyclable sous forme de combustible **MOX** dans une partie du parc (une vingtaine de réacteurs actuellement). L'uranium résiduel peut être

pour sa part ré-enrichi (et recyclé en lieu et place de l'uranium minier) mais il apparaît surtout comme une très importante ressource potentielle valorisable dans le futur, avec l'avènement de nouvelles technologies de réacteurs.

Ce recyclage (immédiat ou différé) de l'uranium et du plutonium est à la base de la stratégie de **traitement** aujourd'hui appliquée en France à la majeure partie des combustibles usés (les deux tiers des 1200 tonnes de combustibles annuellement déchargés du parc). Pour les quelque 500 kg d'uranium initialement contenu dans chaque élément combustible et après la séparation de 475 kg d'uranium résiduel et d'environ 5 kg de plutonium, les déchets "ultimes" représentent moins de 20 kg de produits de fission et moins de 500 grammes d'actinides mineurs.

Le procédé Purex pour extraire l'uranium et le plutonium

Le traitement des combustibles repose pour l'essentiel sur le procédé hydrométallurgique Purex (*Plutonium Uranium Refining by Extraction*) mis en œuvre à l'usine Cogema de La Hague (Manche). Le combustible est dissous dans de l'acide nitrique bouillant, l'uranium et le plutonium étant sélectivement extraits par un **solvant**, le phosphate tributylrique (TBP), avec un taux de récupération proche de 99,9 %. Les déchets de ces opérations, en

1																	2				
H																	He				
3	4	noyaux lourds produits de fission radionucléide à vie longue produits d'activation produits de fission et d'activation														5	6	7	8	9	10
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
11	12															13	14	15	16	17	18
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
55	56	Ln		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86			
Cs	Ba			Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
87	88	An	104	105	106	107	108	109	110												
Fr	Ra	An	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun												
lanthanides		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71					
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
actinides		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103					
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr					

Tableau 1. Principaux éléments présents dans le combustible nucléaire usé.

B

nature	élément	isotope	période (ans)	masse (g/t)	teneur isotopique
actinides mineurs	Np	237	2 140 000	430	100 %
	Am	241	432	220	67 %
		243	7 380	100	31 %
	Cm	243	28,5	0,3	1 %
		244	18,1	24	94 %
		245	8 530	1	5 %
produits de fission	Se	79	65 000	4,7	9 %
	Zr	93	1 500 000	710	20 %
	Tc	99	210 000	810	100 %
	Pd	107	6 500 000	200	16 %
	Sn	126	100 000	20	40 %
	I	129	15 700 000	170	81 %
	Cs	135	2 300 000	360	10 %

Tableau 2. Inventaire des principaux éléments à vie longue présents dans un combustible usé à l'oxyde d'uranium (UOX) déchargé à 33 GW·j/t.

dehors des restes métalliques des assemblages de combustible (voir plus haut) se trouvent dissous à raison d'une quarantaine de kilos dans environ 600 litres de solution nitrique acide. Ils sont calcinés puis mêlés à 200 kg de verre qui, une fois solidifiés, représentent un volume de 110 L. C'est dans cette **matrice**, aux propriétés de durabilité éprouvées, qu'ils sont

entreposés sur place, dans des conteneurs métalliques insérés dans des puits spécialement aménagés et contrôlés.

À côté de ce *Colis standard de déchets vitrifiés*, Cogema a mis au point un colis de même format sans matrice, le *Colis standard de déchets compactés*, pour les coques, embouts et autres déchets technologiques métalliques.



Sidney Jezequel/Cogema

Chargement de conteneurs de verres dans un emballage TN 28 à l'usine de Cogema à La Hague.

Le stockage en formation géologique profonde

Quelles que soient les décisions prises, elles nécessiteront la création de lieux pour recevoir des colis radioactifs en **surface**, en **subsurface** ou/et en profondeur. Cette dernière solution présente des avantages. Le stockage en couche profonde assure en effet l'existence d'une **barrière** géologique pour séparer les colis de la biosphère, une grande stabilité chimique de l'eau pour une maîtrise de la corrosion des matrices et un moindre risque d'intrusion humaine, ce qui limite l'obligation de surveillance.

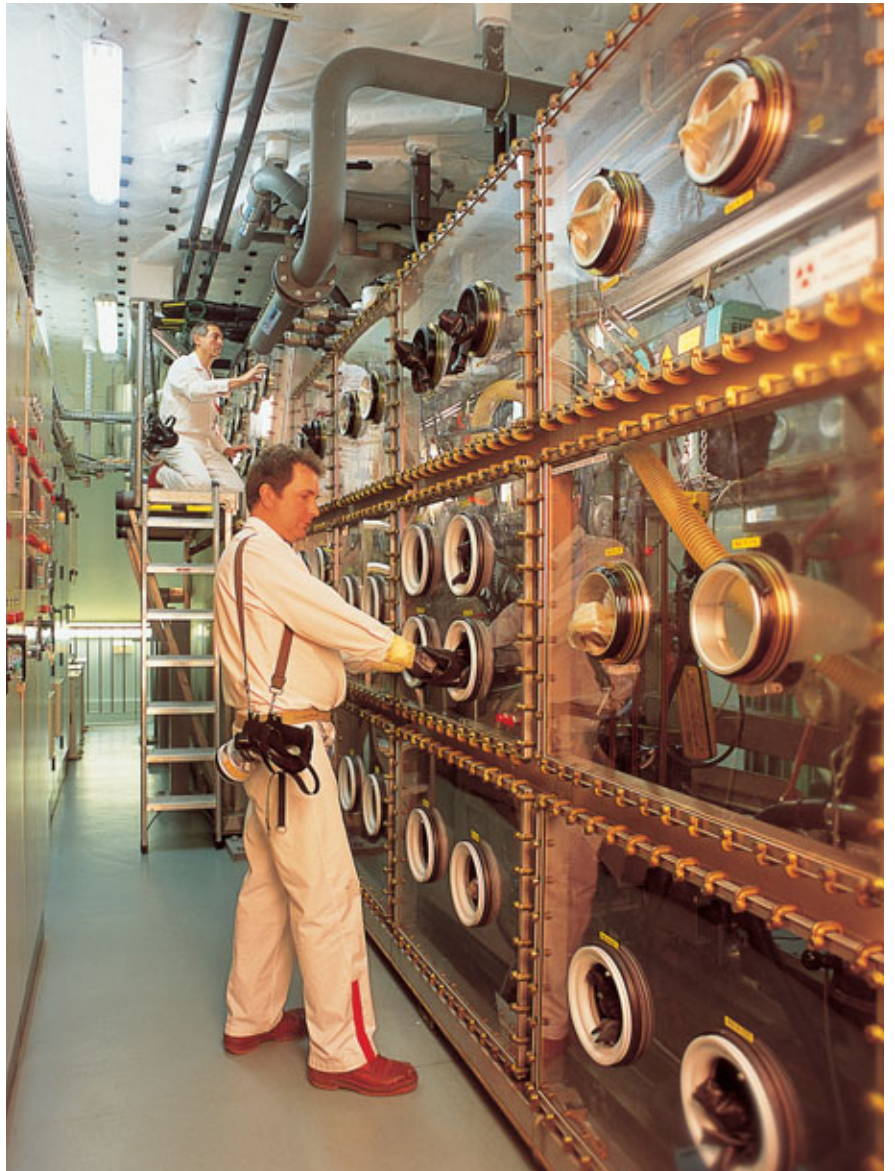
Stocker des déchets en profondeur n'est, cependant, pas un geste anodin. Cela exige que s'établisse une grande confiance entre tous les acteurs concernés. La Suède semble prête à faire le pas. La France n'en est pas là aujourd'hui. L'introduction de la notion de **réversibilité** pourra jouer un rôle important dans la décision.

Diverses solutions pour éliminer les déchets radioactifs ont été naguère imaginées, puis abandonnées : les envoyer dans le soleil, les mettre dans une zone de subduction d'une plaque continentale ou encore les introduire dans les fonds sédimentaires sous-océaniques... Il reste aujourd'hui celles du stockage bien contrôlé, en formation géologique profonde et stable et la solution industrielle actuelle : entreposer les déchets en surface ou en subsurface. Cogema dispose déjà à La Hague d'une installation d'entreposage pour les déchets vitrifiés qui respecte, à quelques aménagements près, les critères définis par le CEA pour le "label" longue durée. La nécessité de surveillance fait que ce mode de gestion ne peut pas être définitif. Le CEA a mené des études approfondies pour concevoir des modes de conditionnement et des installations capables d'affronter des durées séculaires avec une charge de surveillance minimale.

La gestion des combustibles usés sans traitement de séparation

Si la décision est prise de ne pas traiter tout ou partie des combustibles usés, il faudra les entreposer ou les stocker tels quels. Ils garderont leur plutonium, importante ressource énergétique et principale composante radiotoxique. L'entreposage en piscine n'étant pas une solution pour le long terme, le CEA mène d'importantes recherches en vue de déterminer les meilleures conditions d'entreposage. Il proposera en 2006 une filière de mise en conteneur et des concepts d'entreposage de longue durée, là encore en surface et en subsurface. Le CEA collabore également avec l'Andra pour les études sur le stockage en profondeur.

L'incinérateur alpha de la Direction des applications militaires du CEA à Valduc (Côte-d'Or) traite les déchets combustibles (PVC, néoprène, latex, polyéthylène, cellulose) contaminés par du plutonium en boîtes à gants et dont l'activité ne permet pas l'admission en entreposage de surface. Issu du procédé Iris (Installation de recherche en incinération des solides), mis au point au CEA/Marcoule en collaboration avec le CEA/Valduc et réalisé par SGN, il vise à réduire les volumes à conditionner et à assurer un entreposage sûr sans hypothéquer la réversibilité du conditionnement et une récupération éventuelle du plutonium. La pyrolyse des déchets et une calcination du brai obtenu, dans des fours tournants alimentés électriquement, sont suivies par une post-combustion des gaz produits. Après refroidissement à 165 °C, ceux-ci subissent une préfiltration par des filtres électrostatiques, une filtration sur filtres de très haute efficacité et une épuration chimique à sec par de la chaux spongieuse, permettant d'obtenir un effluent gazeux respectant strictement les règles de rejet dans l'environnement. Depuis sa mise en actif en 1999, l'installation a permis de réduire d'un facteur 20 le volume des déchets, sous la forme de cendre emprisonnant près de 93 % de l'activité initiale, le reste du plutonium étant ensuite récupéré dans les poussières des électrofiltres et les résidus de nettoyage.



Foulon/CEA

La radiotoxicité des déchets

Les normes de radioprotection ont été établies à partir d'études épidémiologiques portant sur des cas d'exposition historiques. La gestion actuelle des déchets radioactifs permet de se situer très en dessous de ces normes. Ces dernières n'ont toutefois pas été conçues pour couvrir les situations correspondant au stockage ou à l'entreposage de longue durée. C'est la raison pour laquelle le CEA poursuit des études de radiotoxicologie et de radiobiologie, notamment dans le domaine des effets chroniques des faibles doses.

Les choix de 2006

Après le foisonnement initial des pistes de recherche, il importe désormais de converger vers une présentation claire des résultats et donc d'entreprendre une certaine inflexion dans la conduite des recherches au profit de celles dont les résultats pèseront dans les

décisions de 2006. Cette définition des priorités doit éviter deux écueils : trop réduire l'éventail aboutirait à l'absence de choix; le laisser trop ouvert le rendrait illisible.

Pour chaque type de déchets, il sera proposé un cheminement avec des embranchements possibles. Chaque choix sera proposé avec les éléments de jugement permettant d'en appréhender les avantages et les inconvénients ainsi que l'ordre de grandeur des coûts impliqués. Ainsi, pour chaque option proposée, le programme des recherches aura exploré des voies aussi concrètes que possible pour apporter des solutions au problème des déchets nucléaires.

Philippe Leconte

Directeur de programme
"recherche pour la gestion des déchets"
Direction de l'énergie nucléaire
CEA/Saclay