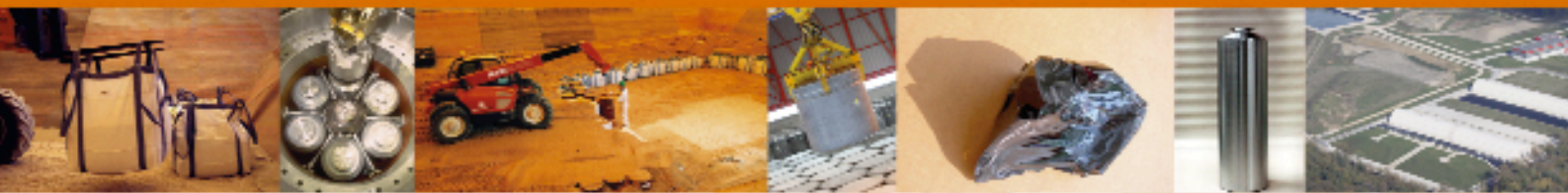


le dossier

Les déchets nucléaires et leur gestion
par P. Rigny, B. Bonin et J.-M. Gras



**l'actualité
chimique**

publié avec le n° 346 de L'Actualité Chimique, novembre 2010



Figure 1 - Conditionnement « big bag » pour des déchets de très faible activité et alvéole de stockage de déchets de très faible activité en exploitation. © Andra/R. Leenhardt (à gauche) et © Andra/E. Gaffard (à droite).

Résumé Cet article présente les déchets radioactifs selon les catégories officielles qui les distinguent d'après notamment leur niveau d'activité et la durée de vie de la radioactivité qu'ils contiennent, puis les solutions de gestion mises en œuvre actuellement en France pour les moins dangereux d'entre eux. Pour les plus dangereux (déchets de haute activité et à vie longue), les solutions de gestion à long terme sont à l'étude : les problématiques scientifiques posées en chimie et physico-chimie par leur stockage géologique sont présentées ainsi que les recherches en cours pour définir les installations adéquates respectant les règles de la sûreté nucléaire.

Mots-clés Déchets radioactifs, classification, entreposage, stockage souterrain, migration des radioéléments, sûreté nucléaire.

Abstract **The radioactive wastes management**

The different types of radioactive waste are presented in this paper in the frame of the official categories which take into account their dangerousness and the lifetimes of their radioactivity. It is indicated how the less dangerous of them are handled in France. The ways of protecting the environment from the more dangerous ones (high activity and long lifetimes) are object of studies. Scientific questions, in the field of chemistry and physical chemistry, related to the implementation of deep underground repository facilities with full respect of nuclear safety are presented.

Keywords Radioactive waste, classification, storage, underground repository, migration of radioelements, nuclear safety.

Le dossier de *L'Actualité Chimique*

- Ce dossier est publié pour sensibiliser un grand nombre de lecteurs intéressés aux développements actuels dans le domaine des sciences chimiques. Il s'appuie sur des résultats de recherches pouvant avoir d'importantes conséquences, soit dans le domaine purement scientifique, soit par leurs applications.
- Il s'adresse à un large public de scientifiques : étudiants, chercheurs, professeurs, industriels... désireux de comprendre les évolutions scientifiques, ou tout simplement curieux.

Ce dossier est détachable : n'hésitez pas à le faire lire autour de vous !

Les déchets nucléaires et leur gestion

Paul Rigny, Bernard Bonin et Jean-Marie Gras

La gestion des déchets est la phase finale du cycle du combustible nucléaire, qui a fait l'objet du dossier publié dans notre précédent numéro (Rigny P., Le cycle du combustible nucléaire : de la mine d'uranium jusqu'au recyclage et aux déchets, 345, p. I-XII).

Les déchets radioactifs : une très grande diversité prise en compte pour leur gestion

62 % du volume des déchets radioactifs produits ont pour origine la production d'électricité. Les 38 % restants proviennent des industries non nucléaires, des hôpitaux, des universités ou de la recherche, ainsi que de la production et de l'entretien de l'armement nucléaire. Nous ne considérons ici que les premiers.

Il est parfois reproché à l'industrie nucléaire de produire des masses importantes de déchets radioactifs. Ceci doit être relativisé. Si la production française annuelle de déchets radioactifs est de l'ordre de 55 000 m³, la production des déchets hospitaliers est de l'ordre de 700 000 tonnes, celle des déchets industriels spéciaux de 18 millions de tonnes, celle des déchets ménagers (nos « poubelles ») de 30 millions de tonnes, celle des déchets industriels et banals de 130 millions de tonnes et, enfin, celle des déchets agricoles de 600 millions de tonnes.

Gérer les déchets radioactifs, c'est prendre des mesures pour les isoler de l'homme et de l'environnement aussi longtemps qu'ils présentent un risque. En effet, contrairement aux déchets classiques, leur dangerosité diminue au rythme de leur décroissance radioactive, mais cette durée est considérablement différente d'un déchet à l'autre : par exemple, le temps caractéristique est d'environ trente ans pour le césium 137 et pour le strontium 90, mais de plusieurs centaines de milliers d'années pour certains éléments actinides. Dans les déchets de l'électronucléaire, on distingue :

- Les « **déchets de procédé** » issus de la matière nucléaire fissile transformée par son utilisation en réacteur. En plus des flux non valorisables provenant des usines de retraitement et contenant principalement les produits de fission et les actinides mineurs, ils peuvent comprendre des combustibles usés, éventuellement non destinés au recyclage de la matière fissile⁽¹⁾.

- Les « **déchets technologiques** » : les composants contenant la matière fissile et les installations ou équipements (dont certains souvent banals : gants, chiffons, outils) en permettant la manipulation sont soumis au rayonnement radioactif et subissent donc une contamination ou une activation qui les rend radioactifs et non réutilisables. Les matériaux et équipements correspondants constituent les déchets technologiques.

Pour permettre une gestion adaptée pour chaque type de déchet, on utilise une classification, notamment selon la durée de vie et le niveau de la radioactivité. Le conditionnement et le stockage des déchets dépendent de :

- la période radioactive des nucléides contenus déterminant le temps de décroissance de la radioactivité, qui permet de définir la durée de dangerosité du déchet : on distingue les déchets à **vie très courte** (période inférieure à cent jours), les déchets à **vie courte** (la majorité des radionucléides contenus ont une période inférieure ou égale à trente et un ans) et les déchets à **vie longue** (la majorité des radionucléides présents ont une période supérieure à trente et un ans) ;
- le niveau de radioactivité initial du déchet, c'est-à-dire l'intensité du rayonnement qu'il émet, qui conditionne l'importance des protections à utiliser : on classe les déchets en **activités très faible (TFA)**, **faible (FA)**, **moyenne (MA)** ou **haute (HA)**.

Le *tableau I* résume la classification usuelle des différentes catégories de déchets radioactifs. À titre indicatif, le *tableau II* donne quelques ordres de grandeurs d'activité initiale des principales catégories de déchets (en GBq/m³).

Les déchets gérés industriellement de façon définitive

Les déchets de très faible radioactivité (TFA)

Il s'agit de matériaux de type gravats, conditionnés en « big bag » (*figure 1*) ou ferrailles, n'ayant pas été au contact direct des processus nucléaires ni de substances hautement

Tableau I - Classification des matières et des déchets radioactifs.

	Vie très courte (période < 100 jours)	Vie courte (période ≤ 31 ans)	Vie longue (période > 31 ans)
Très faible activité (TFA)	Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis élimination dans les filières conventionnelles	Stockage de surface (Centre de stockage des déchets de très faible activité de l'Aube)	
Faible activité (FA)		Stockage de surface (Centre de stockage des déchets de faible et moyenne activité de l'Aube)	Stockage à faible profondeur (à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)
Moyenne activité (MA)			Stockage profond (à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)
Haute activité (HA)		Stockage profond (à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)	

Tableau II - Ordre de grandeur de la radioactivité des différentes catégories de déchets.

Radioactivité des déchets (en GBq/m ³)	Activité α	Activité β, γ
Très faible activité (TFA)	10 ⁻²	10 ⁻² à qq 10 ⁻¹
Faible ou moyenne activité à vie courte (FMA)	< 1	1 à 10 ²
Moyenne activité à vie longue (MA-VL)	10 ³	10 ⁶
Haute activité à vie longue (HA-VL)	10 ⁶	10 ⁸



Figure 2 - Vue aérienne des alvéoles du centre de stockage TFA de Morvilliers. © Andra/P. Bourguignon.

radioactives. La totalité des déchets de ce type, prenant en compte le parc électronucléaire actuel, sa production et le produit de son démantèlement, représentera à terme un volume de l'ordre de 1,5 millions de m³ (hors déchets miniers) et des études sont conduites pour réduire ce volume en optimisant leur traitement et leur conditionnement ou favoriser leur recyclage.

Le centre de stockage TFA (CSTFA), situé sur les communes de Morvilliers et La Chaise dans l'Aube a été ouvert par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) en juillet 2003 (figure 2). Il a une capacité de 650 000 m³ et fin 2009, le volume total stocké était de 142 990 m³. Les déchets concernés ont, pour la plupart, un niveau de radioactivité comparable à celui de la radioactivité naturelle. Ce centre a le statut d'une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE).

Les *déchets miniers* (DM) de l'uranium (stériles, boues de traitement stabilisées) ne sont pas concernés par ce centre de stockage. La réglementation en vigueur prévoit pour ces déchets TFA à vie longue, contenant notamment de l'uranium et du radium, le maintien sur le site de la mine sous la responsabilité de l'exploitant minier, dans des conditions garantissant l'absence d'impact sanitaire. Cela représentait pour la France, à la fin 1998, une vingtaine de sites et environ 50 millions de tonnes de matériaux.

Les déchets de faible ou moyenne activité à vie courte (FMA-VC)

Les déchets FMA-VC, autrefois désignés sous l'appellation « déchets A », représentent aujourd'hui la part la plus importante de la production de déchets radioactifs en France : en moyenne 18 000 m³/an actuellement. Grâce à une meilleure gestion (procédures, tri, compactage, incinération), elle a été réduite de près de la moitié en quinze ans malgré l'augmentation de la production d'électricité d'origine nucléaire.

Ces déchets sont très divers : filtres, résines de traitement d'eau, outils utilisés par les travailleurs, accessoires de laboratoire, gants... et proviennent principalement de l'industrie nucléaire. Pour environ 30 %, ils sont issus de laboratoires de recherche, des universités, des hôpitaux et de l'industrie.

Ils sont conditionnés pour former des « colis », c'est-à-dire rendus solides (s'ils étaient liquides au départ), enrobés dans un matériau (*matrice*) – le plus souvent du ciment mais quelquefois du bitume ou des résines thermodurcissables – et enfermés dans un conteneur en béton ou en acier, constituant ainsi un bloc solide, transportable et peu altérable : le « colis » de déchets radioactifs. Ces colis sont destinés à être stockés dans des ouvrages en béton dans un centre de stockage de surface adapté. Depuis l'arrêt des immersions en 1969, ces déchets ont été pris en charge jusqu'en 1994 dans le Centre de la Manche (aujourd'hui fermé et en surveillance), et depuis 1992, c'est dans le Centre de stockage FMA (CSFMA) de l'Andra, situé dans l'Aube, qu'ils sont stockés (figure 3). Le principe de sûreté de tels centres consiste à isoler les radionucléides de l'environnement pendant le temps nécessaire (300 ans) à la décroissance de la radioactivité jusqu'à un niveau comparable à celui de la radioactivité naturelle. L'Andra établit les spécifications auxquelles chaque type de colis doit satisfaire pour être admis en stockage. Elle prononce l'agrément d'un type de colis donné après l'examen du dossier technique de sa fabrication et de sa caractérisation que lui transmet le producteur de déchets concerné et après vérification de la mise en œuvre effective des procédés décrits (par des inspections techniques et des audits du système qualité).



Figure 3 - Le centre de stockage des déchets radioactifs de faible et moyenne activité. © Andra.

La figure montre les alvéoles de béton qui accueillent les colis de stockage (© Andra/P. Maurein), une alvéole de stockage en exploitation et un colis béton en cours de mise en place dans une alvéole (© Andra/E. Gaffard).

La capacité nominale du CSFMA est de 1 million de m³ ; fin 2009, 231 046 m³ y ont été stockés.

Les déchets dont la gestion industrielle définitive est encore à l'étude

Le *tableau III* indique les quantités existantes et prévisionnelles des différentes catégories de déchets radioactifs.

Tableau III - Volumes des déchets radioactifs, entreposés ou stockés, à fin 2007 et quantités prévisionnelles des stocks des différentes catégories de déchets en 2020 et 2030 (en m³ équivalent conditionné).

Source : Inventaire national des matières et déchets radioactifs, Andra, 2009 et PNGMDR 2010-2012.

(m ³)	fin 2007	fin 2020	fin 2030
TFA	231 688 (dont 89 331 stockés)	629 217	869 311
FMA-VC	792 695 (dont 735 278 stockés)	1 009 675	1 174 193
FA-VL	82 536	114 592	151 876
MA-VL	41 757	46 979	51 009
HA	2 293 (dont 74 de combustibles usés)	3 679	5 060
Filière de gestion à définir	1 564		
Total	1 152 533 (dont 824 533 stockés)	1 804 142	2 251 449

Les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL)

Cette catégorie recouvre deux réalités distinctes : les déchets dits « radifères » (généralement d'origine industrielle non électronucléaire) et les déchets dits « graphite », provenant des premiers réacteurs construits en France.

Les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL)

Les déchets MA-VL, autrefois désignés sous l'appellation « déchets B », sont des déchets dont la quantité de

radionucléides de longue période (transuraniens) est trop importante pour satisfaire aux conditions d'admission en stockage de surface comme les déchets FMA-VC. Ils sont produits principalement au cours des opérations de traitement des combustibles usés. Ils comprennent notamment les structures métalliques des combustibles (tronçons de gaines en alliage de zirconium, appelées « coques », et différentes pièces en acier inoxydable), et des déchets – métalliques ou non – de maintenance des installations. Ceux-ci sont puissamment compactés et enfermés dans des conteneurs en acier inoxydable pour former les colis CSD-C (colis standard de déchets compactés), de même géométrie que les colis de déchets vitrifiés (CSD-V, voir ci-après). L'entretien des installations produit également des déchets métalliques de grande taille : pompes, vannes..., non compactables, qui sont cimentés et conditionnés dans des colis en béton. Dans le passé, des boues de traitement d'effluents liquides, conditionnées dans du bitume, relevant de cette catégorie de déchets, ont été produites. Ces déchets sont entreposés par leurs producteurs (Areva et CEA). En France, la production de déchets MA-VL est de l'ordre de 500 m³ par an ; un cumul de 51 000 m³ est attendu en 2030.

Les déchets de haute activité à vie longue (HA-VL)

Les déchets HA, autrement désignés sous l'appellation de « déchets vitrifiés » ou « déchets C », représentent moins de 0,2 % des déchets radioactifs, mais concentrent près de 95 % de la radioactivité de ces déchets. En France, ils sont vitrifiés après les opérations de traitement des combustibles usés. Les colis de déchets HA se présentant sous la forme de cylindres de 43 cm de diamètre et de 1,4 m de hauteur ; leur volume externe est de 180 dm³ et ils contiennent environ 160 dm³ de verre pour une masse de 400 kg renfermant près de 11 kg de déchets (*figure 4*). Du fait de la radioactivité des produits de fission contenus dans les colis de verre – essentiellement de celle des éléments strontium 90 et césium 137 –, les colis représentent une puissance thermique élevée. Au moment de son introduction en



Figure 4 - Échantillon du matériau verre représentatif de la matrice de déchet de haute activité et à vie longue et colis agrégé pour contenir ces déchets. © Andra.

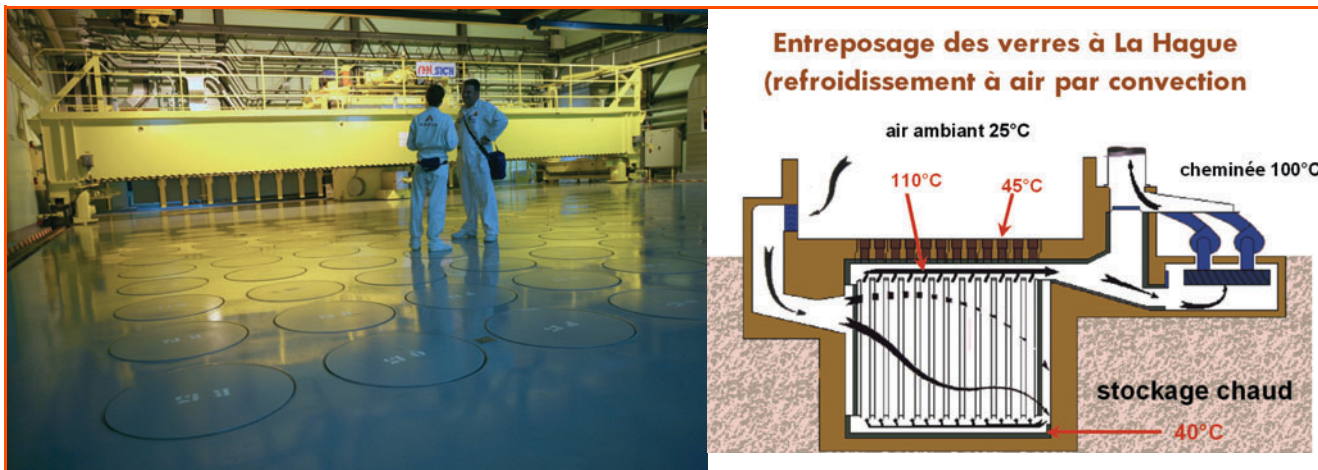


Figure 5 - À gauche : hall d'entreposage de l'atelier de vitrification (hall R7), usine de traitement des combustibles usés Areva, établissement de La Hague, © Areva/C. Dupont. À droite : schéma de principe de l'entreposage.

entreposage, un colis présente une puissance thermique de l'ordre de 2 kW.

En France, ces déchets sont aujourd'hui entreposés à La Hague (et à Marcoule pour certaines productions anciennes). Une vue du hall de l'entreposage de La Hague et le principe du fonctionnement de cet entreposage (hall T7) sont montrés sur la *figure 5*. L'entreposage dit « T7 » consiste en puits contenant neuf conteneurs de verre empilés. Une circulation d'air s'effectue de bas en haut dans l'espace annulaire situé entre les conteneurs et la paroi du puits. Les puits sont disposés selon un réseau à pas carré ; cent puits forment un module. Le caractère modulaire de l'installation en permet l'extension dans des conditions simples en fonction des besoins. La capacité de l'entreposage de La Hague est adaptée à la production du parc EDF.

Areva produit de l'ordre de 110 m³ de déchets vitrifiés par an à La Hague, ce qui représente environ 800 conteneurs ; un cumul de 5 060 m³ est attendu en 2030. Pour une partie des *combustibles usés* (CU) – 300 t sur 1 150 t annuellement déchargés, 150 t depuis 2010 –, la décision de retraitement n'est pas prise et la solution d'attente est l'entreposage sous eau. Il est prévu que ces combustibles soient traités quand se fera le déploiement des réacteurs à neutrons rapides (Génération 4), dont la date de mise en service dépend en particulier des conditions économiques et du marché de l'énergie, notamment de la disponibilité dans le futur des ressources énergétiques fossiles et fissiles. En cas d'arrêt du nucléaire et donc de non-déploiement de réacteurs rapides, ils seraient considérés comme des déchets HA.

Pour le plus long terme, il est prévu que ces déchets soient placés dans une installation de stockage en formation géologique profonde (voir ci-après). Avant de le faire, il est nécessaire de respecter une période d'attente pour refroidissement de plusieurs dizaines d'années.

Le cadre législatif et réglementaire en France

La France s'est dotée d'un cadre juridique et institutionnel pour la gestion des matières et déchets radioactifs. De 1991 à 2006, les recherches sur les méthodes possibles pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité ou à vie longue ont été conduites sous le régime de la loi du 30 décembre 1991 (dite « loi Bataille »), qui était une loi de

recherche. Cette loi stipulait dans son article 4 que les recherches devaient être conduites simultanément selon les trois axes suivants :

- la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs, axe confié au CEA,
- l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans des formations géologiques profondes, axe confié à l'Andra,
- l'étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets, axe confié au CEA.

Après quinze ans d'études, les trois voies de gestion des déchets correspondant à ces axes de recherche apparaissent comme complémentaires plutôt que comme concurrentes. La transmutation des éléments ne peut s'appliquer aux produits de fission, mais seulement aux actinides mineurs. Dans le très long terme (de l'ordre de la centaine de milliers d'années), ce sont eux qui domineront l'activité des déchets après décroissance des principaux éléments des produits de fission. La transmutation des actinides mineurs est étudiée dans le cadre de la loi du 28 juin 2006, en relation avec le développement des réacteurs à neutrons rapides de Génération 4 qui pourraient voir le jour au milieu du siècle.

La loi du 28 juin 2006 sur la gestion durable des matières nucléaires

Cette loi, incluse dans le code de l'environnement, aborde trois grands sujets : (i) définition d'une politique de gestion des matières et déchets radioactifs, (ii) amélioration de la transparence et du contrôle démocratique, (iii) dispositions de financement et d'accompagnement économique.

Elle définit également un programme d'études et recherches, reprenant, avec des modifications d'objectifs calendaires, les orientations de la loi du 30 décembre 1991 (voir *encadré 1*).

En ce qui concerne la politique de gestion des déchets, la loi stipule que :

- l'on adopte la politique du traitement des combustibles usés pour, en particulier, réduire la quantité et la nocivité des déchets radioactifs ;
- l'on entrepose les matières radioactives en attente de traitement et les déchets radioactifs en attente de stockage, dans des installations spécialement aménagées à cet usage ;

Encadré 1**La loi du 28 juin 2006 sur la gestion durable des matières nucléaires : recherches et études**

Pour assurer, dans le respect des principes énoncés à l'article L. 542-1 du code de l'environnement, la gestion des déchets radioactifs à vie longue de haute ou de moyenne activité, les recherches et études relatives à ces déchets sont poursuivies selon les trois axes complémentaires suivants :

La séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue : les études et recherches correspondantes sont conduites en relation avec celles menées sur les nouvelles générations de réacteurs nucléaires.

Le stockage réversible en couche géologique profonde : les études et recherches correspondantes sont conduites en vue de choisir un site et de concevoir un centre de stockage de sorte que, au vu des résultats des études conduites, la demande de son autorisation puisse être instruite en 2015 et, sous réserve de cette autorisation, le centre mis en exploitation en 2025.

L'entreposage : les études et recherches correspondantes sont conduites en vue, au plus tard en 2015, de créer de nouvelles installations d'entreposage ou de modifier des installations existantes, pour répondre aux besoins, notamment en termes de capacité et de durée.

- les déchets ultimes de haute activité et à vie longue font, après entreposage, l'objet d'un stockage en couche géologique profonde.

Par ailleurs, la loi demande que ce stockage soit réversible pour une durée minimum de cent ans. Elle juge également utile de rappeler un certain nombre de définitions, reproduites dans l'encadré 2. Elle prévoit en outre l'élaboration tous les trois ans du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), qui vise à (i) dresser le bilan

Encadré 2**Quelques définitions légales (extrait de l'article 5 de la loi du 28 juin 2006)**

Une **substance radioactive** est une substance qui contient des radionucléides, naturels ou artificiels, dont l'activité ou la concentration justifie un contrôle de radioprotection.

Une **matière radioactive** est une substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement.

Un combustible nucléaire est regardé comme un **combustible usé** lorsque, après avoir été irradié dans le cœur d'un réacteur, il en est définitivement retiré.

Les **déchets radioactifs** sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée.

Les **déchets radioactifs ultimes** sont des déchets radioactifs qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux.

L'**entreposage** de matières ou de déchets radioactifs est l'opération consistant à placer ces substances à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, dans l'attente de les récupérer.

Le **stockage** de déchets radioactifs est l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive dans le respect des principes énoncés à l'article L. 542-1.

Le **stockage en couche géologique profonde** de déchets radioactifs est le stockage de ces substances dans une installation souterraine spécialement aménagée à cet effet, dans le respect du principe de réversibilité.

des modes de gestion existants des matières et déchets radioactifs, (ii) recenser les besoins prévisibles d'installations d'entreposage ou de stockage, (iii) déterminer les objectifs à atteindre pour les déchets radioactifs qui ne font pas encore l'objet d'un mode de gestion définitif.

Le stockage des déchets en couche géologique profonde apparaît comme la seule des solutions envisagées à pouvoir isoler des déchets sur le très long terme (en dizaines, voire centaines de milliers d'années). Une des principales difficultés rencontrées n'est pas d'ordre technique ; elle concerne le choix d'un site où creuser et construire les installations de stockage. L'association intime des populations au processus de décision selon des méthodes de démocratie nouvelles, qui restent largement à inventer, est une préoccupation majeure dans tous les pays concernés. Comme la Suède et la Finlande, la France mettrait industriellement en œuvre le stockage vers 2025.

L'entreposage des déchets HA en surface ou proche de la surface, qui est évidemment incontournable puisque les déchets produits doivent subir une période de refroidissement de plusieurs dizaines d'années avant stockage, est un outil de flexibilité et d'optimisation de la gestion des déchets et des combustibles usés. Les installations Areva de La Hague donnent l'exemple de réalisations industrielles. C'est à notre génération d'assumer la gestion de ses déchets, même si, dans une réflexion sur les perspectives de l'ordre du siècle ou de quelques siècles, l'entretien des installations d'entreposage pourrait être compromis par de possibles instabilités de nos sociétés (qui conditionnent la pérennité des financements) et ne pourrait donc être garanti.

Gestion des déchets radioactifs et sûreté nucléaire

La sûreté nucléaire est prise en compte dès la conception des installations d'entreposage et de stockage en couche géologique profonde des déchets radioactifs : les études correspondantes sont une part importante des recherches qui sont conduites. La particularité est ici dans la durée extrêmement longue qu'il y a lieu de considérer. Les modélisations du comportement à long terme (des dizaines, voire dans certains cas des centaines de millénaires) ont conduit à s'interroger sur la description de phénomènes ultra-lents dont les mécanismes physico-chimiques ou géochimiques sont mal connus. Un outil d'étude indispensable dans ce contexte est le laboratoire souterrain de l'Andra, creusé à la limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne, qui permet d'étudier des phénomènes à l'origine des évolutions à long terme qu'il faut prévoir pour assurer le respect de la sûreté nucléaire. Il existe actuellement une dizaine de laboratoires souterrains dans le monde, dédiés à l'étude des stockages profonds. L'activité qui y est menée vise à valider les prédictions des modélisateurs sur l'impact d'un stockage ; des études sur les propriétés et caractéristiques de la roche et des essais technologiques (creusement, test de creusement d'alvéole HA...) y sont aussi réalisés. L'image qui se dégage de ces études en laboratoire souterrain ou sur des analogues naturels d'un stockage profond se précise au fil du temps. Citons quelques résultats marquants :

- les formations salines, argileuses et, dans une moindre mesure, granitiques, semblent convenir comme roches-hôtes pour un stockage profond ;
- les réactions chimiques entre ces roches, l'eau et les éventuels polluants qu'elle transporte contribuent à ralentir

notamment la migration de nombreux radionucléides et sont à peu près comprises ;

- la migration de l'eau à travers ces formations rocheuses peu perméables est elle aussi comprise dans ses grandes lignes ;
- l'étude des traceurs naturels permet de reconstituer l'histoire de ce voyage lors des époques géologiques passées et de montrer que les migrations dans une roche-hôte bien choisie peuvent être très lentes.

Après une période d'entreposage, les déchets, dans la solution de référence, iront en stockage profond (voir figure 6). Les deux phases, entreposage et stockage, présentent des risques de natures différentes pour l'environnement.

La phase d'entreposage

Un entreposage de déchets nucléaires ressemble à bien d'autres entrepôts de matières ou d'objets industriels, et les ingénieurs ne sont guère dépaysés par la durée de vie envisagée pour l'installation. L'entreposage de verres ou de combustibles usés se pratique de façon industrielle depuis de nombreuses années. En situation normale, et si l'on excepte la très faible dose reçue par les professionnels travaillant dans l'installation, un entreposage n'a aucun impact radiologique sur l'environnement puisqu'il est conçu pour confiner totalement les déchets qu'il contient. Cependant, les installations existantes ne sont pas passivement sûres, et l'entreposage présente un risque intrinsèque par rapport à l'intrusion humaine et aux actes de malveillance. Elles demandent donc une intervention pour leur maintenance, ce qui les rend fragiles vis-à-vis d'événements comme l'abandon ou le défaut de maintenance.

Conception d'une installation de stockage respectant la sûreté nucléaire

Le stockage doit confiner les déchets suffisamment longtemps pour que la décroissance radioactive puisse faire son œuvre. Il s'agit de placer les déchets dans un endroit où leur radiotoxicité ne pourra pas avoir d'impact significatif sur l'homme et son environnement, pendant toute la durée où ils présentent des risques.

L'idée directrice du stockage est d'opposer au transfert de l'eau, principal vecteur de la contamination d'un stockage géologique à la migration des radionucléides, un système de barrières successives et redondantes, jouant des rôles complémentaires (confinement, rétention, dilution) (voir figure 7). Le rôle attribué à chacune des barrières dépend de la phase d'évolution du stockage, du lieu de son implantation, de la nature des radionucléides et du scénario d'évolution du stockage. Le dispositif de stockage comprend :

- La matrice de confinement (verre, céramique, bitume, béton) dans laquelle sont incorporés les radionucléides ; par exemple, pour les déchets vitrifiés, le verre nucléaire constitue la première barrière, confinant la radioactivité grâce à sa faible vitesse de lixiviation dans l'eau (en conditions de stockage, la durée de vie des verres nucléaires se compte en centaines de milliers d'années).
- Les barrières ouvragées qui servent à enrober les colis radioactifs ; le conteneur métallique dans lequel le verre a été coulé et un surconteneur éventuel en acier constituent une deuxième barrière, qui empêche que la lixiviation du verre ne

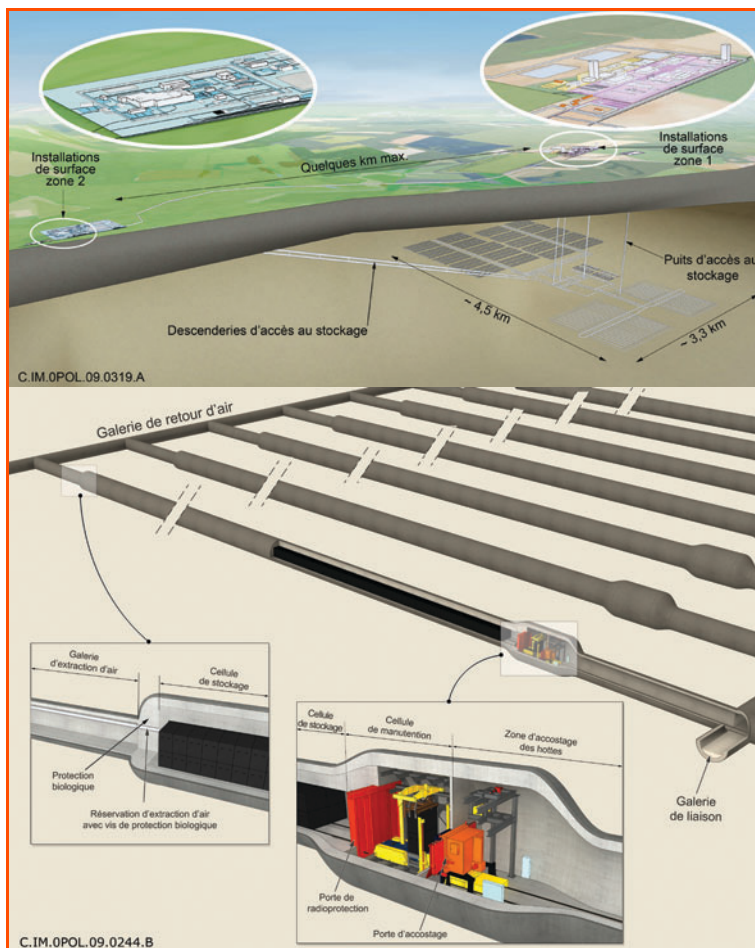


Figure 6 - Architecture d'un stockage profond. © Andra.

commence pendant la phase de réversibilité ou avant que la température du verre ait suffisamment décreu.

- Autour du conteneur, si le site géologique le justifie (cas des granites notamment), on peut envisager de mettre une barrière supplémentaire, constituée d'une couche d'argile, qui d'une part protégera le conteneur de l'eau, ralentissant sa vitesse de corrosion, et d'autre part ralentira la migration des radionucléides quand le conteneur sera corrodé et que commencera la lixiviation des verres.

- Enfin, après cette couche d'argile, la formation géologique où le site est implanté, puis les couches qui séparent cette roche de la surface forment l'ultime barrière, dont le rôle est non seulement de freiner la migration des radionucléides vers la biosphère, mais aussi, si des fuites existent, d'en assurer la dilution dans un volume important.

Ainsi, le système multibarrières est conçu pour :

- protéger les déchets vis-à-vis des agents extérieurs susceptibles de provoquer une dégradation du colis et par la suite une dissémination des radionucléides qu'il contient ;
- limiter et retarder la migration éventuelle des radionucléides libérés vers l'homme et son environnement, pour profiter de leur décroissance le plus longtemps possible.

Un stockage profond se singularise avant tout par la durée de la mission qui lui est assignée – au moins 100 000 ans –, ce qui diffère de tous les autres objets créés par l'homme. Nous ne disposons pas de retour d'expérience sur ce type d'installation ! De par son principe, un stockage en évolution normale finira par relâcher de la radioactivité, même si c'est en quantité infime et dans un avenir extrêmement éloigné (dizaines ou centaines de milliers

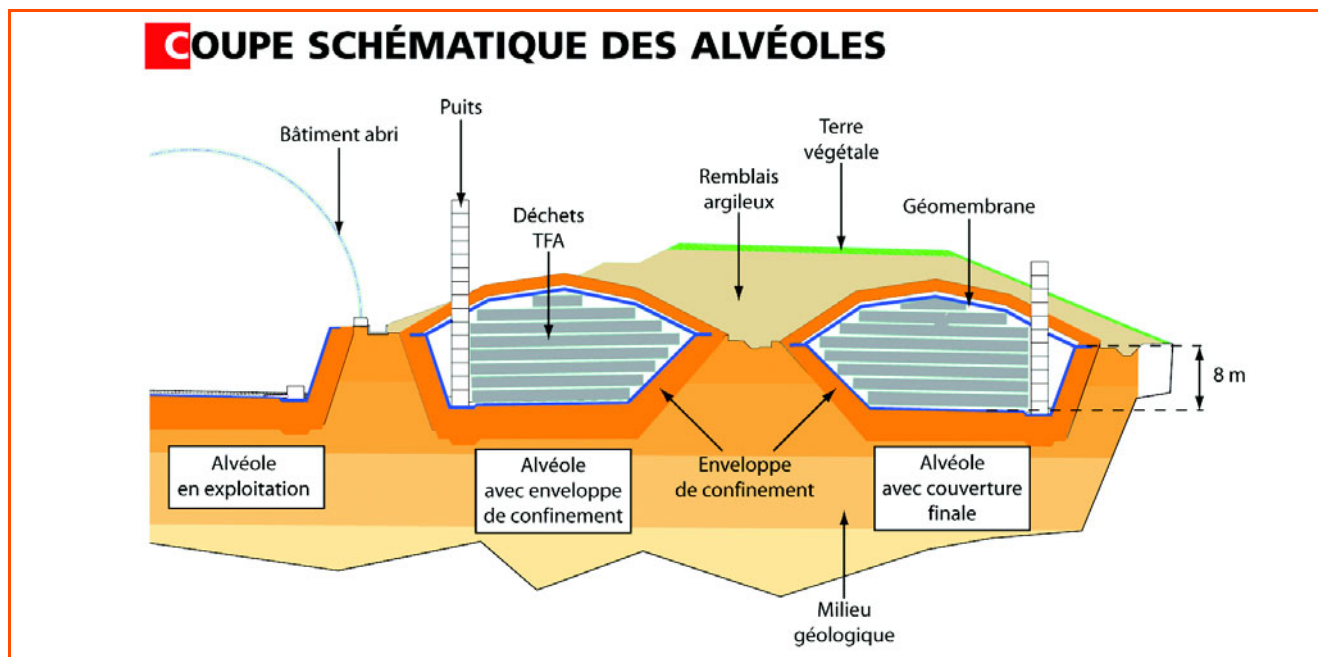


Figure 7 - Schéma de principe d'une installation de stockage de déchets TFA montrant les barrières de confinement des déchets. © Andra.

d'années). Du fait de ces échelles de temps, ce relâchement ne peut que se calculer... Le recours à la modélisation prédictive est donc nécessaire.

Pour évaluer la performance de la protection à très long terme et s'assurer de la qualité d'un stockage, il faut tout d'abord modéliser son évolution en décrivant les phénomènes et les processus, souvent couplés, se produisant dans tous les sous-systèmes du stockage : ceci implique une modélisation du milieu géologique et des barrières ouvragées. On évalue ensuite les conséquences radiologiques des scénarios d'évolution du stockage, qui couvrent aussi bien une histoire normale du stockage que des perturbations diverses ; il s'agit de définir la large gamme des conditions futures possibles à prendre en considération dans la modélisation et les calculs d'impacts. L'évaluation de la protection demande ensuite le calcul de l'impact sur l'humanité lointaine, supposée figée dans ses caractéristiques actuelles : ceci implique la modélisation de la biosphère future selon diverses hypothèses. En France, la réglementation demande que l'analyse soit précise sur les premiers 10 000 ans ; au-delà, l'évaluation doit être poursuivie en gérant les incertitudes inhérentes aux très longues durées.

L'évolution probable du stockage est décrite dans le scénario « normal » : au début de leur histoire, disons dans les cent premières années, les colis de haute activité vont échauffer la roche avoisinante, jusqu'à lui faire atteindre une température de l'ordre d'une centaine de degrés. La roche refroidira ensuite lentement, au rythme de la décroissance radioactive des déchets. Dans le même temps, l'eau va resaturer les galeries du stockage ; en effet, à quelques centaines de mètres de profondeur, les roches sont saturées d'eau car elles sont en général sous la nappe phréatique. Pendant la première centaine d'années, il restera possible de récupérer les colis. Entre 100 et 1 000 ans après la fermeture du stockage, les ouvrages souterrains vont se tasser, ouvrant éventuellement des fissures dans la roche située à proximité. Encore plus tard (entre 1 000 et 10 000 ans), la corrosion des enveloppes métalliques fera son œuvre et l'eau arrivera en contact avec le verre. Beaucoup plus tard

(au moins 10 000 ans), un processus de dissolution des verres (ou de l'oxyde d'uranium en cas de stockage de combustibles usés) par l'eau souterraine pourrait intervenir. Il entraînerait une dispersion des rares radionucléides relâchés par l'installation de stockage, qui entameraient alors une lente migration à travers les roches du sous-sol. L'eau souterraine percolera à travers les pores et fissures de la roche-hôte, avant de parvenir dans une nappe aquifère⁽²⁾ où sa migration horizontale aboutira finalement à une rivière⁽³⁾.

Une roche-hôte très imperméable ralentira beaucoup la migration. Un aquifère « lent » et un exutoire éloigné devraient rallonger encore le temps de trajet. Dans des formations géologiques peu perméables, il peut s'écouler des millions d'années avant un éventuel retour des eaux vers leur exutoire de surface (voir l'encadré 3). Au terme de son

Encadré 3

Distance caractéristique de migration dans la roche-hôte du site de Bure pour différents ions présents dans les déchets nucléaires

Le temps finira par altérer les installations de stockage, du fait de la corrosion due aux circulations d'eau souterraines. Le site est choisi pour que ces dernières soient minimales et que la corrosion des déchets n'intervienne pas avant de nombreux millénaires. Dans le cadre des études de sûreté, on évalue cependant comment cette dernière pourrait avoir des conséquences dans la biosphère. Le phénomène à considérer est celui de la migration des radioéléments au travers de la roche, rendue possible par la présence d'eau souterraine. Les calculs faits pour des roches-hôtes convenant *a priori* pour un stockage et des expériences de traçage à échelle réduite indiquent que cette migration est d'une extrême lenteur.

Une étude faite pour la migration par diffusion dans un milieu homogène dont les caractéristiques sont celles de l'argilite de Callovo-oxfordien du site Meuse-Haute Marne étudié par l'Andra fait ressortir cette lenteur. L'argile considérée est si compacte que même les ions les plus mobiles ne s'éloignent pas, avec les hypothèses retenues, de plus d'une dizaine de mètres après 100 000 ans.

évolution, un stockage profond aura bien un certain impact radiologique sur l'environnement, puisque la quantité de radionucléides qui rejoindront la biosphère n'est pas nulle. Mais un concept de stockage bien réalisé, combiné à une barrière géologique bien choisie, retarderont tellement le retour des radionucléides vers la biosphère, que les relâchements resteront minimes en matière d'émission radioactive en comparaison de la radioactivité naturelle.

Les grands phénomènes géologiques ou climatiques susceptibles de se produire (volcanisme, sismicité, réchauffement climatique, glaciation) sont évalués par les experts. Pour les sites de stockage potentiels, il apparaît que les effets restent faibles pour les intensités réalistes de ces perturbations dans nos contrées.

Aucune expérience de validation globale de toutes les modélisations mises en œuvre n'est évidemment possible, les échelles de temps mises en jeu par le stockage étant trop importantes. On a donc recours à une validation « par morceaux », permettant de vérifier que les principaux phénomènes ont bien été pris en compte et bien décrits, ce qui apporte une garantie sur la fiabilité des prédictions faites sur le comportement à long terme du système. Il reste que le milieu naturel étant fort complexe, variable et hétérogène, les recherches doivent se poursuivre pour nourrir les codes avec des données d'entrée les plus précises.

Il est intéressant de noter que les rejets du stockage en biosphère après des dizaines de millénaires de silence ne seraient constitués que par les produits de fission les plus mobiles à vie très longue (^{129}I , ^{136}Cl), principaux contributeurs aux doses individuelles. À cette période éloignée, ce sont pourtant les éléments transuraniens (essentiellement les actinides de longue période : neptunium, plutonium, américium, curium) qui porteront la plus grande partie de la radioactivité, mais du fait de leur très faible solubilité dans les eaux souterraines réductrices et de leur forte capacité de sorption sur les roches, ils n'auront qu'un impact radiologique très faible et très tardif.

Pour clore ce paragraphe sur la sûreté nucléaire, il faut rappeler que les échelles de temps inusuelles associées à l'évolution d'un stockage créent une situation très particulière : les études de sûreté seront assez approfondies pour construire la confiance en leurs conclusions et permettre de parler de « démonstration de sûreté », assurant que le stockage est robuste et maîtrisé.

Remerciements

La rédaction remercie vivement la Photothèque de l'Andra et la Médiathèque d'AREVA pour leur collaboration à l'illustration de ce dossier.

Cet article a été rédigé en 2007 dans le cadre du programme « Énergie Nucléaire » de l'association ECRIN, dissoute en 2009, et mis à jour avec l'aide de l'Andra en 2010.

Notes

- (1) Selon la loi française du 28 juin 2006, le traitement du combustible permet de générer d'une part des matières valorisables (Pu) ou pouvant l'être (U), et d'autre part des déchets « ultimes ».
- (2) Les *aquifères* sont des couches poreuses et perméables du sous-sol, dans lesquelles l'eau souterraine s'infiltré et circule.
- (3) La description du scénario « normal » faite ici correspond plutôt à un stockage dans une formation granitique ou argileuse (c'est sur ces deux milieux que se concentrent actuellement les travaux de recherche français). Le stockage géologique dans des formations salines, pratiqué aux États-Unis (au WIPP) et envisagé jadis en Allemagne, représente un

cas à part dans la mesure où on ne peut guère décrire le sel comme un milieu poreux saturé en eau, et où les mécanismes de migration des radionucléides sont assez différents de ceux qui sont à l'œuvre dans le granite ou l'argile.

Pour en savoir plus

- *Inventaire national des déchets radioactifs et des matières valorisables*, Andra, **2009** (disponible sur www.andra.fr).
- *Dossier Argile 2005 - Synthèse. Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse*, Andra, **2005** (disponible sur www.andra.fr).
- *Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) 2010-2012*, ASN (disponible sur www.asn.fr).
- *Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde*, ASN, **2008** (disponible sur www.asn.fr).
- Cahen B., Griffault L., Voinis S., *Sûreté à long terme du stockage de déchets HA et MAVL*, Techniques de l'ingénieur, Génie Nucléaire, **2010**, BN 3675.
- *Le conditionnement des déchets nucléaires*, CEA, Éditions du Moniteur, **2008**.
- Guillaumont R., Techniques de l'ingénieur, Génie Nucléaire, **2010** : *Déchets radioactifs - Gestion institutionnelle et opérationnelle*, BN 3660v2 ; *Déchets radioactifs - Gestion opérationnelle*, BN 3661v2 ; *Déchets radioactifs - Gestion par stockage géologique*, BN 3662v2.
- Jorda M., Dumont X., Les déchets radioactifs en France, *L'Act. Chim.*, **2005**, 285-286, p. 13.
- Lebon P., Landais P., *Laboratoires souterrains pour l'étude du stockage géologique des déchets à vie longue*, Techniques de l'ingénieur, Génie Nucléaire, **2009**, BN 3672.
- Poinssot C., Fillet C., Gras J.-M., Post-containment performance of geological repository systems: source-term release and radionuclide migration in the near- and far-field environments, *Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste*, CRC Press, Woodhead Publishing, **2010**, p. 421-493.
- RGN, Gestion des déchets radioactifs à vie longue : les éléments du débat, *Revue Générale Nucléaire*, **2005**, 4, p. 15.
- Toulhoat P., Grambow B., Simoni E., Migration ou confinement des radioéléments ?, *L'Act. Chim.*, **2005**, 285-286, p. 41.



P. Rigny



B. Bonin



J.-M. Gras

Paul Rigny, rédacteur en chef de *L'Actualité Chimique*⁽¹⁾, a été conseiller scientifique « Chimie, nucléaire et environnement » à l'association ECRIN de 2002 à 2008.

Bernard Bonin⁽²⁾, rédacteur en chef des Monographies DEN, est directeur scientifique adjoint à la Direction de l'énergie nucléaire, CEA Centre de Saclay.

Jean-Marie Gras⁽³⁾ a été responsable du programme « Aval du cycle du combustible nucléaire » à EDF R & D. Il est actuellement consultant.

- (1) L'Actualité Chimique, 28 rue Saint-Dominique, F-75007 Paris.
Courriel : paul.rigny@lactualitechimique.org
- (2) Courriel : bernard.bonin@cea.fr
- (3) Courriel : jma.gras@orange.fr



L'Actualité Chimique

SCF, 28 rue Saint-Dominique, F-75007 Paris

Tél. : 01 40 46 71 64 - Fax : 01 40 46 71 63

redaction@lactualitechimique.org

www.lactualitechimique.org