



# Énergie nucléaire

## Déchets nucléaires

Le **becquerel** (ou **Bq**) correspond à une désintégration radioactive par seconde. Le corps humain par exemple a une radioactivité naturelle d'environ 8000 Bq. Pour mesurer le risque de la radioactivité sur la santé, il faut utiliser la notion de radio-toxicité. En effet, une particule émise lors d'une désintégration radioactive peut avoir différents effets sur les cellules humaines, selon son type (particule alpha, bêta, gamma), son énergie, et le lieu où elle se désintègre, qui dépend de la nature chimique de l'élément. Pour les risques associés au stockage des déchets, on parle souvent de radio-toxicité par ingestion (mesurée en Sievert ou Sv), qui représente la dose reçue après ingestion des matières radioactives. Les calculs effectués concernant les scénarios de stockage donnent une radioactivité résultante de l'ordre de 1mSv/an au maximum après un million d'années de stockage, à comparer à la radio-toxicité naturelle qui est de l'ordre de 2 à 20 mSv/an selon les régions.

### Le cas français et la loi de 1991

La notion de « déchets nucléaires » dépend fortement de la stratégie de gestion choisie pour le combustible utilisé, et comporte nombre d'ambiguïtés qui rendent souvent difficile toute approche claire du problème. En France, est considérée comme déchet nucléaire toute matière radioactive non valorisable, c'est-à-dire n'ayant aucun potentiel énergétique. La source principale de radioactivité artificielle produite par l'industrie provient des combustibles usés de l'industrie électronucléaire, qui sont à l'origine des déchets dits de type C, dont la radioactivité est supérieure à 1 milliard de **becquerels** par gramme. Les effluents de retraitement et les matériaux de structure constituent les déchets dits de type B (radioactivité supérieure à 1 million de Bq/g). Enfin, il existe des déchets de très faible activité ou déchets A (blouse, bétons, etc...) qui sont stockés définitivement en subsurface, c'est-à-dire dans des zones proches de la surface. Ces matières radioactives doivent être confinées afin de limiter au maximum les risques de contact avec l'homme et d'éviter toute contamination de l'environnement et tout impact sur la santé. La loi Bataille, votée en France en 1991 demande aux organismes de recherche d'explorer trois voies afin d'optimiser la gestion de ces déchets : séparation et transmutation; stockage en couche géologique profonde, conditionnement et entreposage.

Nous tenterons ici d'expliquer ce que sont les déchets les plus radioactifs produits actuellement, en nous focalisant sur le cas français, et de distinguer la notion de déchets de celle de matière valorisable. Nous donnerons les grandes lignes concernant les trois axes de recherche à la fin de cet article.

### La stratégie de retraitement

Les réacteurs français (REP : Réacteur à Eau sous Pression) utilisent un combustible à uranium enrichi en  $^{235}\text{U}$  (environ 4%) sous forme d'oxyde (appelé UOX, voir Élémentaire 1). Dans leur cœur, la fission de noyaux lourds génère des produits de fission, dont 10% environ sont radioactifs. Parmi ces derniers, certains ont une durée de vie « moyenne » (environ 30 ans :  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) ou « longue » ( $^{129}\text{I}$  : 15 millions d'années,  $^{99}\text{Tc}$  : 210000 ans,  $^{135}\text{Cs}$  : 2,3 millions d'années, etc). Ces produits de fission radioactifs sont considérés sans ambiguïté comme des déchets.

En outre, lorsqu'il est bombardé de neutrons, un noyau lourd comme l'uranium peut tantôt fissionner, tantôt capturer le neutron sans fissionner. Ces captures successives par les isotopes de l'uranium conduisent à la production de noyaux plus lourds. Le plutonium est le plus produit. Les autres sont appelés actinides mineurs : il s'agit du neptunium (Np), de l'américium (Am) et du curium (Cm). Ces noyaux lourds sont tous radioactifs, avec des durées de vie allant de quelques dizaines à plusieurs millions d'années. Une fois utilisé, le combustible UOX contient (en poids) 1% de plutonium, 0,07% d'actinides mineurs (Np, Am et Cm), 3,7% de produits de fission et encore 1% d' $^{235}\text{U}$ . Certains pays comme la Suède ou les États-Unis considèrent aujourd'hui ce combustible usé comme un déchet à stocker, après un « simple »



© J. Serreau



# Déchets nucléaires

conditionnement. En France, on le traite pour en extraire la matière dite valorisable, c'est-à-dire le plutonium et l'uranium. En effet, le plutonium est essentiellement composé de  $^{239}\text{Pu}$ , qui est un noyau fissile au même titre que  $^{235}\text{U}$ .

Lors de la phase de retraitement du combustible UOX usé :

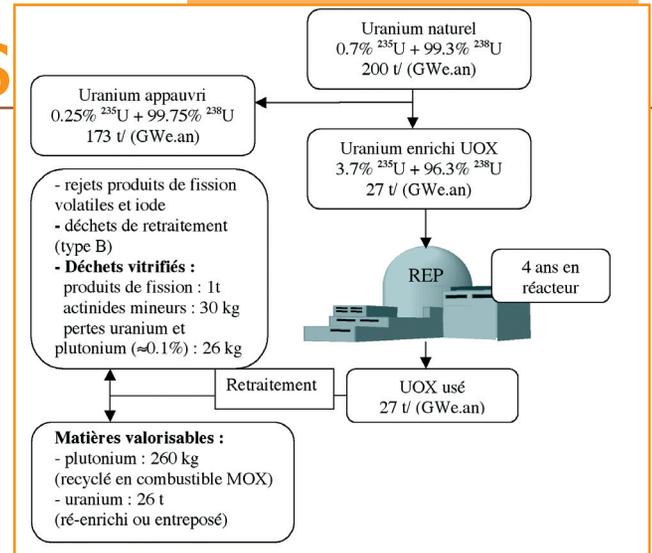
- les produits de fission volatiles sont relâchés dans l'atmosphère (les gaz rares comme le krypton) ou dans la mer (**iode** et tritium). Ces rejets de faible radioactivité doivent répondre à des normes d'émission très strictes.
- les autres produits de fission et les actinides mineurs (Np, Am et Cm) sont coulés dans des verres très résistants (vitrification), ce qui constitue un conditionnement et un stockage considérés aujourd'hui comme définitifs.
- le plutonium est séparé pour être utilisé sous forme de combustible MOX (Mixed Oxyde), qui est un mélange d'uranium appauvri (uranium issu de la phase préliminaire d'enrichissement de l'uranium naturel et qui contient environ 0,25% d' $^{235}\text{U}$ ) et de plutonium (environ 7% de Pu).
- l'uranium, qui contient encore 1% d'uranium fissile  $^{235}\text{U}$ , est également séparé, une partie est ré-enrichie pour être utilisée en réacteur, l'autre partie est entreposée.

Le retraitement n'étant pas parfait, une petite partie des matières valorisables uranium et plutonium sont perdues dans les déchets vitrifiés et les déchets de retraitement. Les performances actuelles des procédés de retraitement permettent de limiter ces pertes à 0,1% environ.

## Le combustible MOX, réserve de déchets et d'énergie

Le combustible MOX est utilisé dans 20 réacteurs REP de 900 MWe (mégawatts électriques), à hauteur de 30% du cœur, et produit environ 8% de la puissance électrique nucléaire française (les 92% restant proviennent des combustibles UOX). Aujourd'hui, environ 80% du plutonium issu des UOX usés est recyclé sous forme de MOX. Cela signifie que 20% des combustibles UOX usés ne sont pas retraités.

Les combustibles MOX usés ne sont pas retraités : ils sont entreposés tels quels dans des piscines de refroidissement. Ils contiennent encore environ 4% de plutonium et une quantité non négligeable d'actinides mineurs lourds (Am et Cm) produits par captures successives de neutrons à partir du plutonium. Du fait de la présence initiale de plutonium dans le combustible, la concentration finale en actinides mineurs est bien supérieure à celle atteinte dans les UOX usés. Notons que ces combustibles MOX usés contiendront à terme la quasi-totalité du plutonium civil français, ce qui constitue une réserve de matière fissile, éventuellement utilisable dans des réacteurs surgénérateurs (dits de 4<sup>ème</sup> génération) pour remplacer l' $^{235}\text{U}$ . Ces réacteurs pourraient être déployés dès 2030, et permettraient d'optimiser l'utilisation des ressources en uranium : alors qu'un REP actuel consomme près de 200 tonnes d'uranium naturel pour produire 1GWe.an, un surgénérateur en consommerait moins d'une tonne. Le



### Le cas de l'iode

L'iode radioactif est actuellement rejeté à la mer. Il s'agit de l'iode 129, dont la durée de vie est de 15 millions d'années. Cette très longue durée de vie conduit à une radioactivité très faible. De plus, le rejet à la mer dilue l'iode radioactif dans l'iode stable ( $^{133}\text{I}$ ) présent en grande quantité dans l'eau de mer. Ainsi, si la concentration en iode radioactif est bien contrôlée, il n'y a aucun risque d'accumulation d'iode dans la faune et la flore marine, et par conséquent, aucun risque d'accumulation pour l'homme. Dans la zone de rejet de l'iode près de l'usine de retraitement de La Hague, la concentration mesurée de l'iode radioactif par rapport à l'iode stable ( $^{129}\text{I} / ^{133}\text{I}$ ) vaut un millionième. Si l'on consommait uniquement des aliments issus de cette zone (très réduite et très protégée), cela conduirait à une irradiation supplémentaire de la thyroïde (glande où se fixe l'iode) de 0,05 Bq, à comparer par exemple aux 2,5 Bq reçus par la thyroïde par la radioactivité intrinsèque du corps humain. Dans ces conditions, il apparaît que le rejet dans la mer d'iode radioactif de très longue durée de vie constitue une façon de gérer cet élément meilleure que le stockage en surface. D'une part l'iode est très mobile et donc très difficile à stocker et d'autre part, le stockage d'iode pourrait conduire, dans une situation accidentelle, à une ingestion massive d'iode radioactif (non dilué), et donc à des doses reçues par la thyroïde bien supérieures à celles liées à la méthode actuelle.

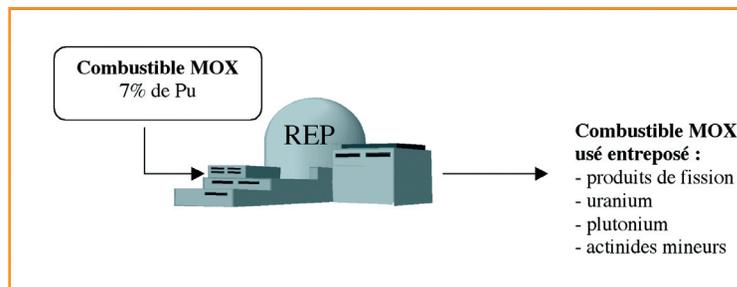


# Déchets nucléaires



© SEGG

Étude du comportement de la roche sous un effet thermique simulant l'échauffement provoqué par le stockage de déchets nucléaires



déploiement de ces réacteurs dépend de la disponibilité des ressources en uranium, et donc de la demande mondiale, qui pourra être amenée à croître significativement dans les décennies à venir. Il semble donc important d'accumuler un stock « stratégique » de plutonium suffisant (700 tonnes au niveau français) afin de pouvoir démarrer ces réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération.

## Déchets ultimes et matières valorisables

Résumons la stratégie française de retraitement du point de vue des déchets, qui s'appuie sur l'usine de retraitement de La Hague (qui est disponible en l'état jusqu'en 2040).

La capacité d'utilisation de combustible MOX étant limitée dans les réacteurs français, seules 850 tonnes de combustible UOX usé sont retraitées chaque année (sur 1100 tonnes produites), afin de ne pas accumuler du plutonium séparé non utilisé. Les 250 tonnes non retraitées sont entreposées. Pour les produits de fission non volatiles, 70% environ sont vitrifiés (issus des UOX usés retraités), les 30% restants correspondent à ceux contenus dans les UOX et les MOX non retraités, et sont donc entreposés. Enfin, 30% des actinides mineurs sont vitrifiés (issus des UOX usés retraités), et 70% sont entreposés dans les UOX et les MOX usés non retraités.

Seuls les verres issus du retraitement des UOX usés, qui contiennent produits de fission et actinides mineurs, sont considérés sans ambiguïté comme déchets. Les MOX usés constituent, comme nous l'avons expliqué, une réserve de plutonium, et sont pour l'instant considérés comme matière valorisable, même s'ils contiennent des produits de fission et des actinides mineurs, eux-mêmes non valorisables. Selon les différents scénarios envisagés, le plutonium contenu dans les combustibles MOX irradiés sera considéré comme une matière fissile utile (par exemple lors du déploiement de surgénérateurs), ou, dans le cas de l'arrêt du nucléaire, comme un déchet. Dans le cas où le plutonium est un déchet, il devra être

conditionné et stocké, et il dominera les risques associés à la radio-toxicité des déchets. De plus, son caractère fissile sera une contrainte supplémentaire pour le site de stockage, puisqu'il faudra éviter toute réaction nucléaire en chaîne dans le site, ainsi que les détournements de ces matières stockées à des fins militaires ou terroristes.



© CEA

Installation prototype pour la vitrification des déchets en développement à Marcoule.



© CEA

L'usine de retraitement des déchets nucléaires de La Hague.



# Déchets nucléaires

La loi de 1991 propose trois axes de recherche :

- Axe 1 : **séparation et transmutation**. Cette stratégie s'applique uniquement aux déchets C, de haute activité et à vie longue, et principalement aux actinides mineurs qui dominent la radioactivité à long terme des colis vitrifiés. Il est en effet possible de les séparer des combustibles irradiés et de les détruire par fission dans des réacteurs. Les réacteurs du futur à neutrons rapides sont les plus efficaces du point de vue de l'incinération de ces noyaux. Deux voies sont explorées : le recyclage homogène des actinides mineurs avec l'uranium et le plutonium dans les réacteurs électrogènes, ou l'incinération des actinides mineurs dans un petit nombre de réacteurs ad hoc (stratégie de double strate). Dans les deux cas, la transmutation nécessitera le développement de nouveaux types de réacteurs.

- Axe 2 : **étude de la possibilité de stockage géologique**, réversible ou non. La loi prévoyait la construction de deux laboratoires souterrains afin d'y mener des expériences, un dans l'argile, un autre dans le granit. Aujourd'hui, seul le laboratoire de Bure (argile) a été construit. Les travaux sont menés par l'Andra (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs) et tendent à démontrer la faisabilité du stockage. Mais une vingtaine d'années est encore nécessaire pour aboutir à la phase industrielle.

- Axe 3 : **conditionnement et entreposage**. Il s'agit ici d'étudier et d'optimiser le confinement des déchets (colis), de mettre en œuvre des méthodes efficaces de caractérisation et de contrôle, et d'étudier également la possibilité de les entreposer pendant une longue durée, en surface ou en subsurface. Contrairement au stockage géologique, la notion d'entreposage est cohérente avec une stratégie de réversibilité.

Il faut noter que les combustibles irradiés et non retraités (une partie des combustibles UOX et la totalité des combustibles MOX) ne sont pas concernés par cette loi, même s'ils contiennent une quantité importante d'actinides mineurs et de produits de fission. Les déchets C (verres) sont conditionnés d'ores et déjà sous une forme définitive. Pour les déchets actuellement vitrifiés, la solution implicitement retenue est donc un stockage définitif. Cette stratégie de vitrification n'est pas remise en cause actuellement, puisqu'il faudrait soit disposer de moyens de transmutation (qui ne verront le jour que dans 30 ans au plus tôt), soit envisager un conditionnement provisoire des matières sur plusieurs décennies (stratégie difficile à mettre en œuvre au niveau politique et industriel).

La loi de 1991 représente donc une ouverture des possibilités de gestion future des déchets, et non un « moratoire » sur les déchets actuels. En 2006 cette loi doit être reconduite sous une autre forme. Concernant le stockage, il est acquis qu'il s'agit de l'option de référence pour les déchets accumulés jusqu'alors. Le projet de loi actuel (voté en première lecture en avril 2006) prévoit un nouveau rendez-vous en 2015 pour définir un site de stockage des déchets, qui ne peut être le laboratoire actuel de Bures, et qui pourrait entrer en opération dès 2025. Ce projet de loi prévoit également la poursuite des recherches sur la transmutation, qui devront être menées dans le cadre des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération.



Le « carreau » du laboratoire de recherche souterrain sur le stockage géologique de déchets à haute activité et à vie longue du site de Bure, en mai 2001.



Inspection d'un container de déchets vitrifiés à l'unité R7 de l'usine UP2-800 de la Cogema à la Hague.