

# Le conditionnement, le traitement et le stockage des déchets électronucléaires

Claude Cavaller

## 1- Rappels sur la radioactivité

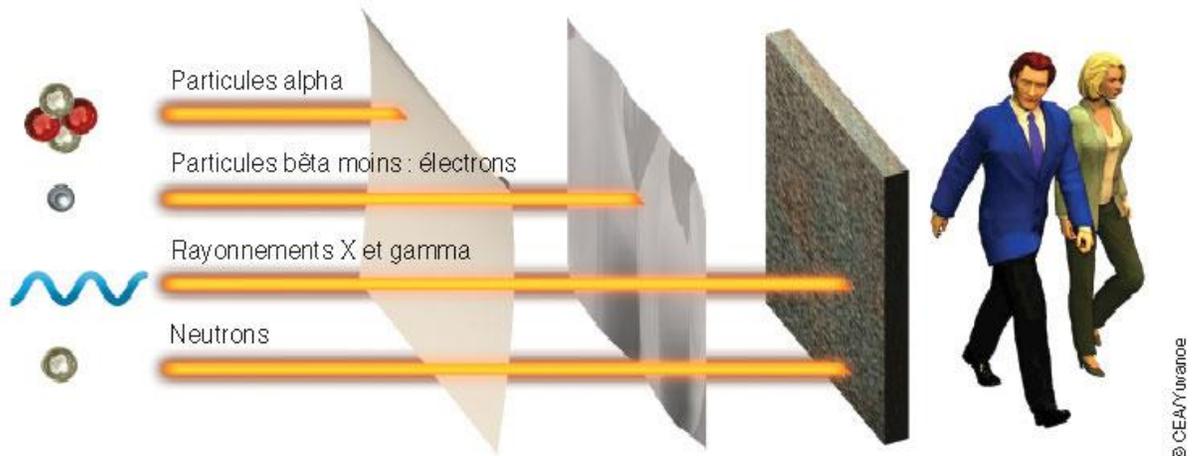


Figure 1 : pouvoir de pénétration des rayonnements

Tous les corps de la nature sont constitués d'atomes; chaque atome est composé d'un noyau (neutrons + protons) et d'un nuage d'électrons tournant autour du noyau à très grande vitesse. Les atomes sont tout petits : il faut en aligner 10 millions pour faire 1 mm.

Tous les noyaux ne sont pas stables: certains se divisent spontanément en d'autres noyaux en libérant des neutrons. A la suite de quoi ils se stabilisent en dégageant de l'énergie sous forme de particules éjectées à grande vitesse ou sous forme d'ondes électromagnétiques.

Cette désintégration spontanée se caractérise par une émission de rayonnements de 3 types : alpha éjection d'un noyau d'Hélium, Beta éjection d'un électron, Gamma émission électromagnétique de même nature que la lumière ou les rayons X.

Cette émission de particules ou d'ondes se nomme RADIOACTIVITE.

La désintégration des atomes d'un élément radioactif provoque sa disparition.

La période T est le temps nécessaire pour que la moitié des atomes initialement présents se désintègre (24 000 ans pour le Plutonium). Il faut attendre 10 périodes pour que le nombre de noyaux initialement présent soit divisé par 1000.

La figure 1 présente le pouvoir de pénétration de différents rayonnements : si les particules alpha sont arrêtées par une simple feuille de papier il faudra une forte épaisseur de plomb et un mur de béton pour arrêter les rayonnements X qui, s'ils sont très énergétiques, peuvent se propager sur une centaine de m; il faudra un mur de paraffine ou une forte épaisseur d'eau pour arrêter les neutrons.

L'activité d'un produit radioactif se mesure en becquerel (Bq): c'est le nombre de désintégrations par seconde. Une dose reçue par un individu s'exprime en grays (Gy). Pour tenir compte des sensibilités différentes des organes atteints et des nocivités variées des rayonnements on transforme la dose reçue en grays en une dose efficace en sieverts (Sv).

La vie sur terre et l'humanité se sont développées dans un taux de radioactivité naturelle donnée. Chacun de nous est radioactif : plus de 8000 atomes se désintègrent par seconde dans le corps d'un individu de 80 kg ; cet individu est donc radioactif à 8000 becquerels. La terre, les murs et les aliments sont tous naturellement radioactifs y compris le lait, la salade et l'eau! En médecine, des injections de 750 000 becquerels d'iode 131 sont pratiquées pour faire des coronographies sans risque pour les patients.

En France la dose moyenne reçue est de 2.4 milli sieverts par an ; cette dose est plus forte en Bretagne, dans le massif Central ou dans les Alpes (jusqu'à 5 msv à cause du granite un peu plus radioactif que les autres minerais). Dans certaines régions d'Iran et d'Inde et sur certaines plages du Brésil des populations vivent sur un sol 10 fois plus radioactif (30 à 50 msv par an) sans aucune conséquence due aux radiations.

Les limites réglementaires pour l'exposition industrielle sont très faibles en France : 1 msv par an pour le public et 20 pour les travailleurs du nucléaire bénéficiant d'un suivi régulier.

Les rayonnements émis par la radioactivité sont dangereux à partir d'une certaine dose car ils peuvent abimer les cellules du corps. Au dessous d'une centaine de msv aucun effet nocif n'a pu être mis en évidence. A dose moyenne, pas d'effet immédiat mais dans certains cas des cancers des années après ; à plus forte dose, des malaises, voire le décès immédiat ou sous quelques semaines.

La radioactivité peut aussi agir de l'intérieur du corps si une radiosource entre en contact avec la peau ou dans le corps : on parlera de contamination. Une fois incorporés aux cellules vivantes, les radioéléments émettent leur rayonnement autour d'eux pouvant détruire des cellules ou les empêchant de se reproduire.

Il existe deux façons de libérer de l'énergie nucléaire : la fission consiste à casser un gros noyau atomique, celui de l'uranium, en deux plus petits, sous l'impact d'un neutron. La fusion, à l'inverse, est l'assemblage de deux petits noyaux atomiques pour en obtenir un plus gros. Dans les deux cas, ces réactions libèrent de l'énergie qui se traduit par une émission de chaleur.

C'est avec cette chaleur que les centrales nucléaires produisent de l'électricité.

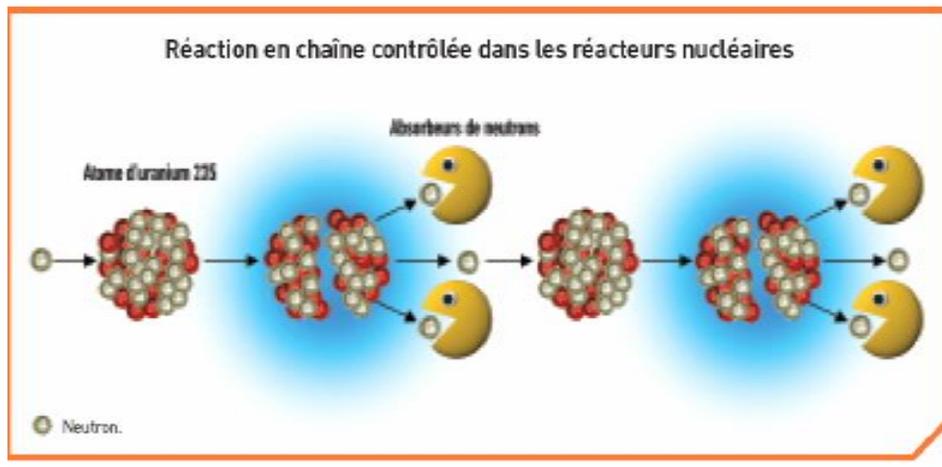


Figure 2 : réaction en chaîne contrôlée

Un réacteur nucléaire actuel exploite la réaction de fission de l'uranium et sa multiplication. Chaque fission émet des neutrons qui peuvent, à leur tour heurter d'autres noyaux d'uranium et provoquer d'autres fissions : c'est la réaction en chaîne. Dans un réacteur fonctionnant à l'équilibre, on contrôle le nombre de neutrons pour qu'il reste constant à l'aide des barres de contrôle (bore absorbent de neutrons) et avoir une réaction en chaîne stable (figure 2).

## **2- Le combustible nucléaire**

Le minerai contenant de l'uranium (figure 3) est extrait dans des mines souterraines ou à ciel ouvert dans environ 10 pays (USA, Canada, Niger, Australie, Russie). La concentration d'uranium naturel (Unat) varie de 3 kg à 100 kg (Canada) par tonne de minerais. La croûte terrestre contient environ 3 g d'uranium naturel par tonne ce qui veut dire que si l'on creuse à Toulon un trou de 10 par 10 par 10 m on devrait extraire 3 kg d'uranium naturel. En 2011, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) évaluait à 6 millions de tonnes les ressources d'Unat récupérables à un coût inférieur à 130 \$ le kg ; le monde consommant 60 000 tonnes d'Unat par an au rythme actuel, il y a pour une centaine d'années de réserves dans ces conditions économiques. Si l'on portait ce prix à 200\$ le kg on pourrait allonger la durée de fonctionnement du parc de plusieurs centaines d'années.

La France paye son uranium 100 euros/kg soit pour les 7 600 tonnes consommées annuellement un montant total de 0,76 milliard d'euros; le prix du combustible nucléaire représente 0.2 centimes sur les 13 centimes d'€ (1,5%) payés par les français pour 1 kWh à la prise électrique, soit 130 € par MWh. Si ce prix d'achat devait doubler, il faudrait déboursier 0.2 centime d'euro en plus par kWh, soit 2 € de plus par MWh.

A ce propos relevons que ce prix de l'électricité en France (130€) est nettement moins élevé qu'au Danemark (271€) et qu'en Allemagne (244€).

L'extraction de l'Unat du minerai et sa concentration s'effectuent de manière chimique sur le lieu d'extraction. On obtient un concentré d'Unat (80%) sous forme d'une poudre jaune appelée « yellow cake ».

Cette poudre jaune est importée en France à Malvesi près de Narbonne; elle est constituée de 2 types d'uranium dits isotopes: l'uranium 238 à 99.3% et l'uranium 235 (U235) à 0.7% qui est l'isotope recherché car il est fissile. Les REP français ne peuvent fonctionner qu'avec un combustible contenant 4% d'U235 dont on fabrique 1000 tonnes par an. Il faut donc enrichir l'Unat en le mettant sous forme gazeuse et en le fluorant (cristaux verts d'UF4).

Ces cristaux verts sont ensuite transportés à PIERRELATE pour être transformés en cristaux blancs d'UF6 qui ont la particularité d'être gazeux à partir de 57°C à la pression atmosphérique.

Ces cristaux blancs sont amenés au centre d'enrichissement Georges Besse 2, au Tricastin, où ils sont transformés en gaz pour être enrichis par centrifugation.

Après enrichissement et défluoration les 7600 tonnes initiales fournissent 975 tonnes de cristaux noirs d'oxyde d'uranium enrichi à 4 % d'U235 (Uo2à 4 % aussi appelé Uox) qui servent à fabriquer le combustible nucléaire et 6625 tonnes d'uranium appauvri dont 100 tonnes environ serviront à fabriquer un autre type de combustible (le Mox). Le reste Uapp issu de l'enrichissement (6525 tonnes) est transformé en poudre gris noir d'U3O8, très stable, incombustible, insoluble, non corrosive, entreposé à Bessine ou au Tricastin dans des conteneurs pour être éventuellement utilisé comme combustible du futur dans des réacteur de quatrième génération (voir paragraphe 5). Il est prévu de disposer de 450 000 tonnes de ce combustible du futur fin 2040.

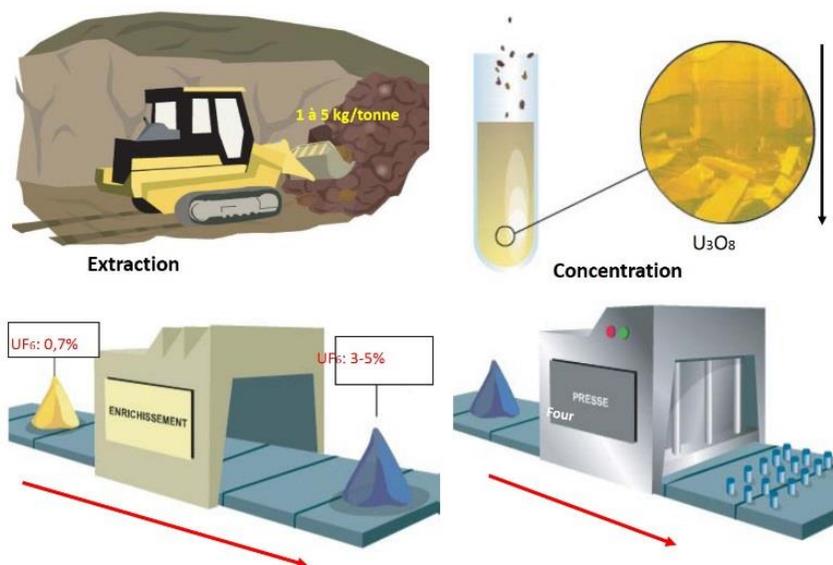
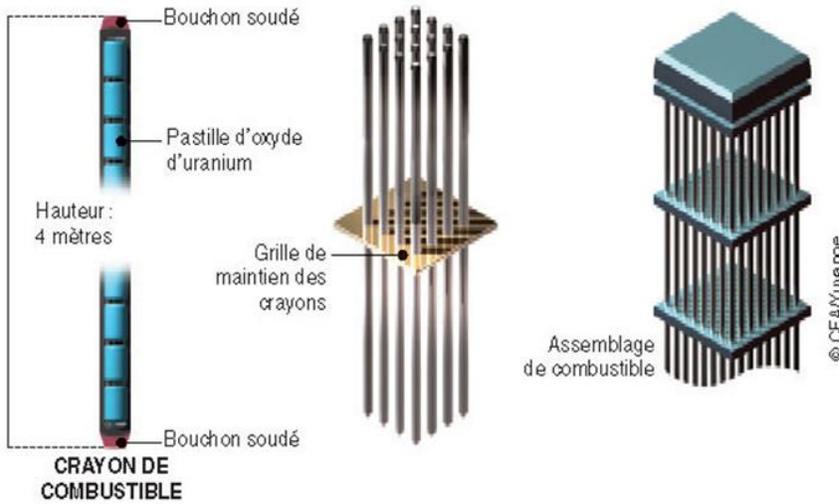


Figure 3 : fabrication du combustible

## La préparation des assemblages de combustible



Les deux usines d'assemblage de Marcoule et de Roman préparent les combustibles dans des assemblages de tubes métalliques en zirconium (figure 4). Ces tubes contiennent des empilements de pastilles solides de combustible qui se mettront à chauffer une fois insérées dans le cœur du réacteur.

Figure 4

Un cœur contient environ 200 assemblages qui mesurent 4 m de haut et 20 cm de côté. La consommation totale des 58 réacteurs français est de 1170 tonnes de combustible pour une production électrique de 390 TWh

### 3-Le cycle du combustible

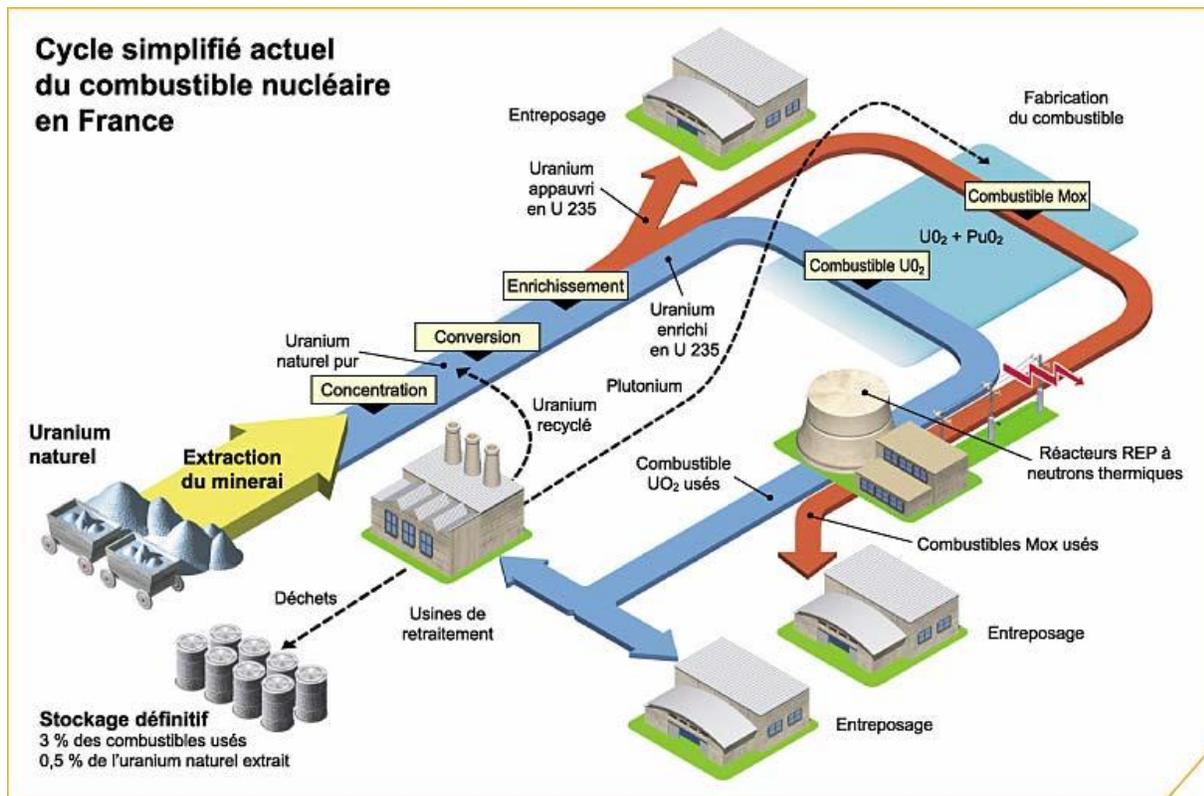


Figure 5

La figure 5 présente le cheminement simplifié du combustible nucléaire, avec en amont l'uranium naturel et en aval le réacteur nucléaire (REP).

Nous allons maintenant décrire toutes les opérations qui se passent en aval du réacteur après la production de l'électricité.

Après 3 ou 4 ans passés dans le cœur le combustible est déchargé par tiers ou par quart dans des piscines implantées sur place et il y reste environ 3 ans. Ce séjour permet de faire baisser la radioactivité et le dégagement résiduel de chaleur avant transfert vers La Hague.

Depuis 2011 La Hague peut retraiter tout le combustible Uox utilisé annuel : 975 tonnes car 120 tonnes de Mox utilisé ne sont pas retraitées et sont stockées ainsi que 75 tonnes d'uranium ré-enrichi qui ne sont pas enrichi de nouveau car un deuxième passage en réacteur accumulerait des noyaux néfastes à la réaction en chaîne; à La Hague le combustible Uox séjourne encore 3 à 5 ans en piscine pour faire encore décroître sa radioactivité (figure 6).

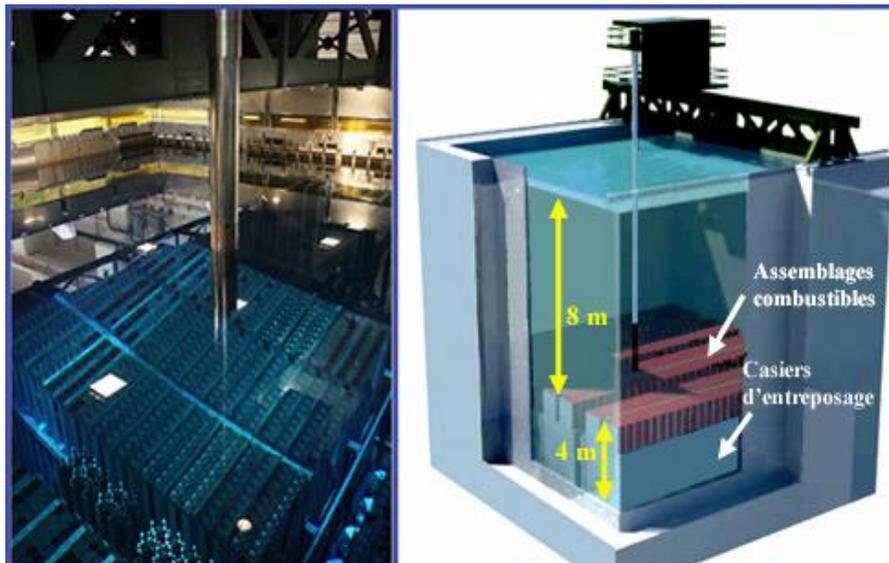


Figure 6 : les piscines de refroidissement

Ensuite, les assemblages contenant ces 975 tonnes de combustible sont traités chimiquement à l'acide nitrique par le procédé 'Purex' (figure 7) pour séparer d'un côté les gaines de combustible, tubes et embouts métalliques vides mais radioactifs et de l'autre une solution contenant l'Uranium, le Plutonium, les produits de fission (PF) et les actinides mineurs (AM). Le Tributylphosphate (TBP) permet alors d'extraire l'Uranium (924.5t), le Plutonium (10.5t) et une solution contenant les produits de fission (PF) et les actinides mineurs (40t AM = Neptunium, Américium, Curium qui sont les plus radioactifs au début: 300 ans).

Le TBP est ensuite régénéré.

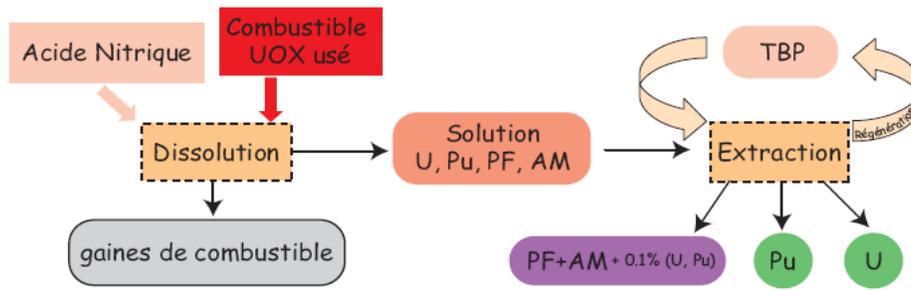


Figure 7 : le traitement chimique actuel

#### 4-Les déchets nucléaires

Les déchets nucléaires sont essentiellement caractérisés :

- Par l'activité par unité de masse (figure 8) qui permet d'évaluer la quantité de radionucléides contenus dans le déchet : avec l'activité très faible (< 100 000 Bq/kg), l'activité faible (< 100 000 000 Bq/kg), l'activité moyenne (<1 000 000 000 Bq/kg) et l'activité haute au-delà.
- Par la période de décroissance radioactive et par les rayonnements émis par les radionucléides présents.

	période courte (< 30 ans)	période longue (> 30 ans)
activité très faible (< 100 000 Bq/kg)	matériaux résultants du démantèlement des centrales	
activité faible (< 100 000 000 Bq/kg)	gants, surbottes, outils, filtres, résines... ("déchets A")	
activité moyenne ( < 1 000 000 000 Bq/kg)		gaines métalliques du combustible résidus de traitement des effluents ("déchets B")
activité haute		combustible usé ("déchets C")

Figure 8 : les catégories de déchets radioactifs

Les déchets de type A contiennent des radioéléments émetteurs de rayonnements beta ou gamma à période courte ou moyenne (< 30ans) et une très faible teneur de radioéléments à période longue. Ce sont des déchets communément dénommés déchets de faible et moyenne activité : matériaux résultant du démantèlement des centrales, gants, filtres provenant des centrales ou d'autres utilisateurs (CEA, Hôpitaux, Universités, Laboratoires...).

Ils subissent un traitement qui consiste à diminuer leur volume par incinération, évaporation, découpage et compactage. Le produit obtenu est ensuite conditionné dans un bloc de béton ou enrobé dans du bitume ou des polymères (figure 9).

Les colis ainsi constitués sont pris en charge au centre Morvilliers de l'Aube, mis en service en 1992 et géré par l'Andra (figure 10). Ce site a pris la suite du site de stockage de la Manche à la Hague (figure 11)

Dans ce site, le stockage à long terme de ces déchets permettra de faire décroître leur radioactivité dans des conditions sûres. Le concept retenu repose sur un stockage en surface des colis de déchets qui sont ensuite recouverts d'un coulis de béton puis d'une couverture imperméable pour limiter les infiltrations vecteur de dissémination de la radioactivité.

Ce site restera sous surveillance pendant 300 ans au maximum avant d'être banalisé.

Les déchets de type B contiennent des quantités significatives de radioéléments à période longue (> 30 ans) généralement émetteurs de rayons alpha. Ils proviennent principalement des usines du cycle du combustible (fabrication, retraitement). Ce sont par exemple les tubes et embouts métalliques obtenus après mise en œuvre du procédé Purex (cf. paragraphe 3) ou les boues issues du retraitement du combustible irradié. Ces déchets de type B sont des déchets solides conditionnés dans du bitume et mis temporairement en entreposage au CEA Cadarache et à La Hague car ils sont destinés au stockage géologique.



Figure 9 : les déchets TFA

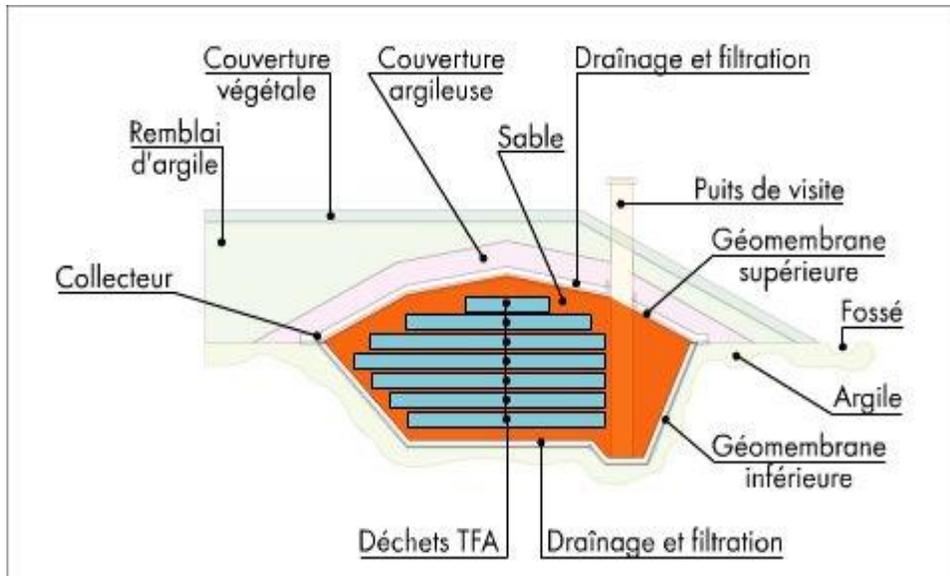


Figure 10 : le site de Morvilliers dans l'Aube pour les TFA depuis 2002



La Hague

**Site pour les déchets de type A**  
(faibles et moyenne activité, vie courte)

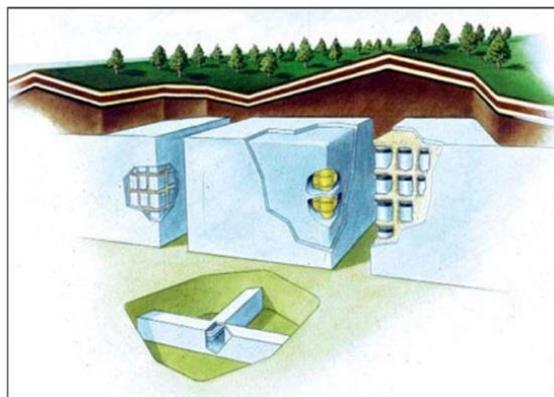


Figure 11

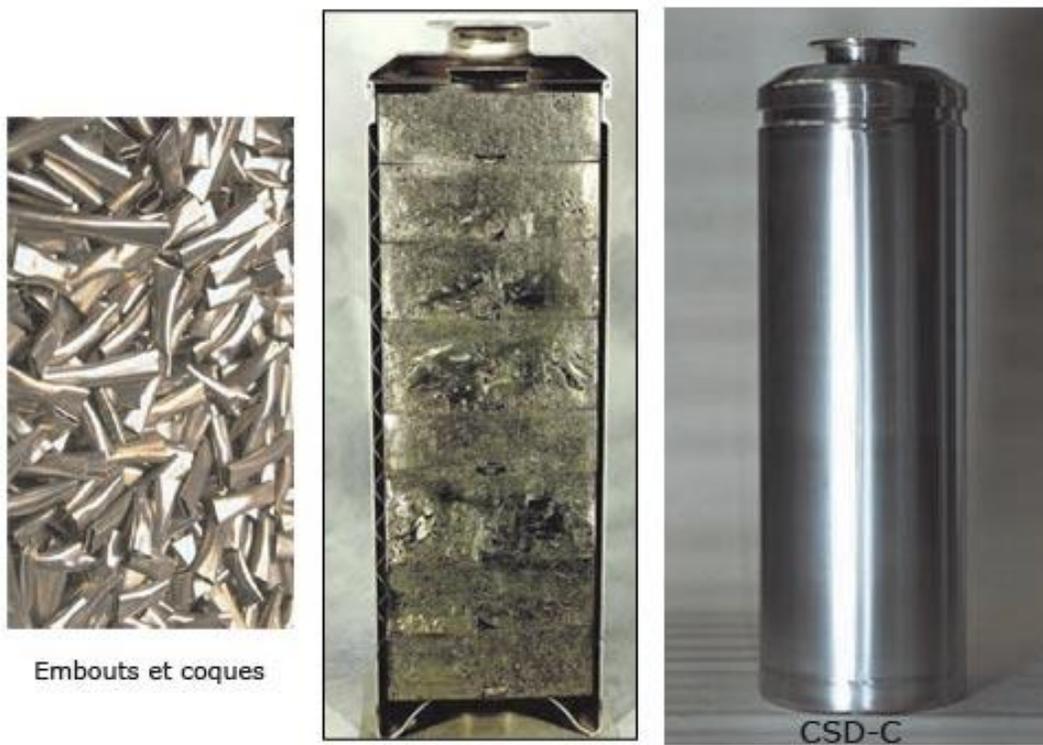


Figure 12 : les déchets de type B

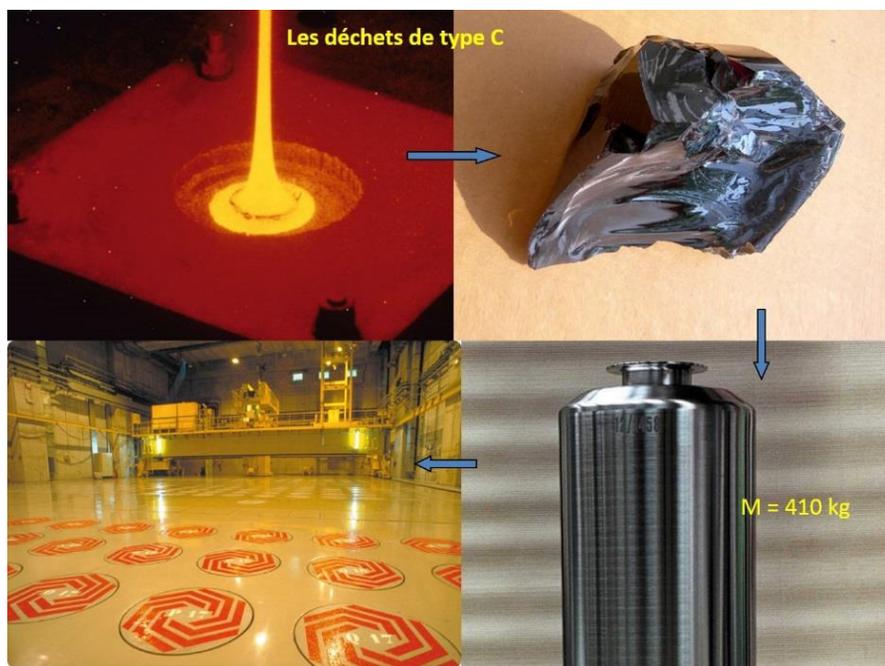


Figure 13 : les déchets de type C (haute activité)

Les déchets de type C (figure 13) de haute activité, contiennent des radioéléments émetteurs de rayonnements alpha, bêta, gamma de période longue.

Ils proviennent du conditionnement sous forme solide des effluents liquides de très haute activité (produits de fission) issus de retraitement des combustibles irradiés dans les réacteurs.

Ces 40T de déchets ultimes sont fondues dans une matrice de verre conditionnée annuellement dans 620 containers spécialisés de 180 litres (soit un cube de 5m de coté ou 120 mètre cube).

Ils sont actuellement entreposés à La Hague 1 (total du stock 2300 m<sup>3</sup> fin 2010 et environ 5000 m<sup>3</sup> en 2030 si nos centrales nucléaires fonctionnent à l'identique durant les 15 prochaines années) avec les coques et embouts métalliques issus des structures des assemblages de combustible (27000 m<sup>3</sup> fin 2010 et 34 000 en 2030) et vont refroidir en surface pendant plusieurs dizaines d'années (entre 60 et 100 ans) avant d'être définitivement stockés en profondeur.

**Ces déchets de haute activité ne représentent que 10% des déchets nucléaires et occupent une partie d'un bâtiment entourant une piscine olympique.**

Plus ils refroidissent, plus sûr et moins cher sera le stockage de ces déchets dont le dégagement de chaleur est un facteur dimensionnant.

Les responsables politiques ne voient donc pas l'intérêt dans la mise en œuvre, à court terme, de ce stockage qui serait source de polémique et déplaire à certains électeurs.

Cette attitude frileuse encouragée par les antinucléaires et néfaste car elle contribue à accréditer l'idée fausse que l'on ne sait pas quoi faire des déchets nucléaires.

Des études ont été menées par le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) pour diminuer encore le volume des déchets à très haute activité : un prototype industriel (démonstrateur) de traitement chimique futur a été mis en œuvre et qualifié (figure 14) ; il consiste en de la séparation poussée qui va au-delà du procédé Purex.

Après la mise en œuvre de celui-ci, les produits de fission (sauf les Lanthanides) sont extraits de la solution (procédé Diamex) ; ensuite le Cm et l'Am sont séparés des Lanthanides (procédé Sanex).

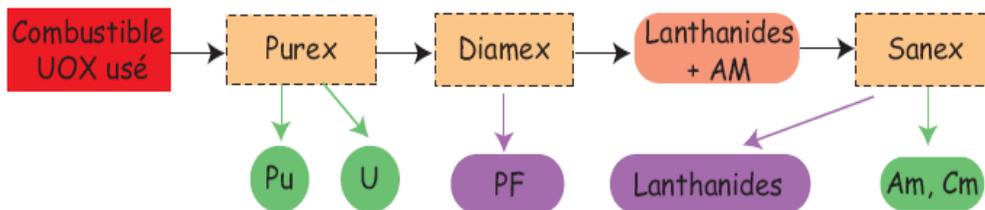


Figure 14 : le traitement chimique futur

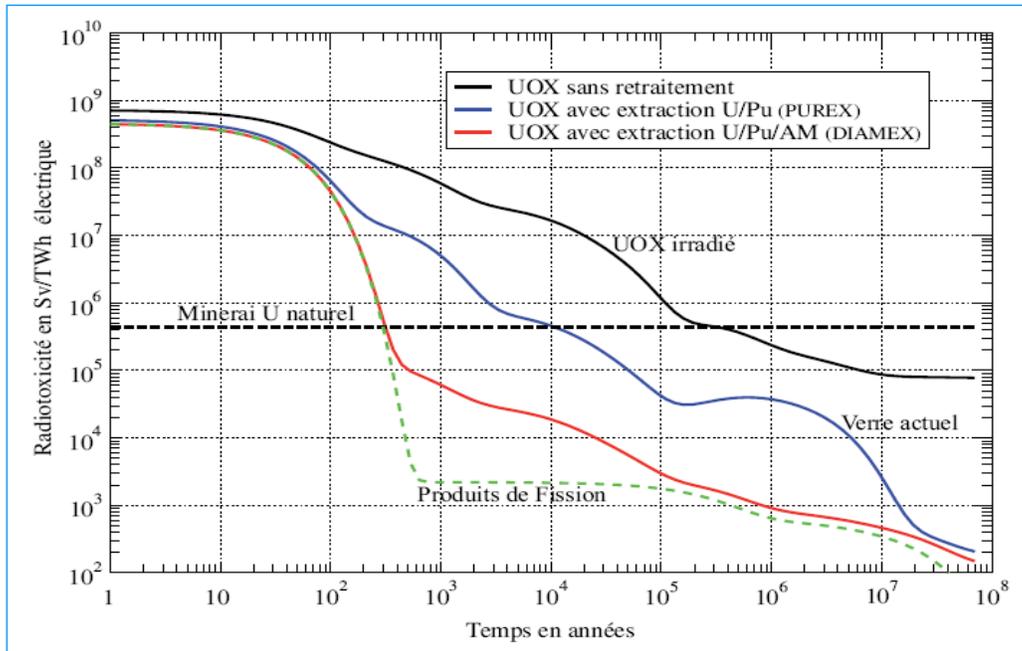


Figure 15 : Radiotoxicité d'assemblages UOX et MOX en fonction du retraitement choisi

La figure 15 présente l'immense avantage de la mise en œuvre à grande échelle industrielle d'un tel procédé qui contribuerait à encore diminuer le volume de déchets à très haute activité. En abscisse est représenté la durée de la radioactivité en années sur un échelle logarithmique. (1, 10, 100, 1000, 10 000, 100 000, 1, 10 et 100 millions d'années) et en ordonnée la radio toxicité des matières nucléaire : avec en pointillé celle de l'Uranium naturel et sur les courbes celles de l'Uox irradié (en noir) qui mettra 200 000 ans pour revenir au niveau de l'Uranium naturel, celle de l'Uox traité avec le traitement chimique actuel (en bleu) qui arrivera au même niveau en 10 000 ans et celle en rouge avec le nouveau traitement chimique (DiameX) qui permettra de revenir au niveau de radioactivité de l'Uranium naturel en 200 à 300 ans. Dans ce dernier cas il restera à stocker les éléments, en beaucoup plus faible quantité, à durée de vie très longue (10 000 ans et plus).

Les réflexions de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique en 2003, de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE en 2008 et de l'Union Européenne en 2011 ont convergé pour considérer que le stockage géologique à grande profondeur (500 m) était la meilleure solution disponible. Le conseil de l'Union Européenne a adopté la directive 2011/70/Euratom en 2011 mentionnant le stockage géologique comme solution de référence.

Il faut savoir que le stockage naturel d'éléments radioactifs existe depuis la nuit des temps. Des concentrations naturelles d'éléments radioactifs, tels que l'Uranium ou le thorium sont enfouies dans l'écorce terrestre depuis des milliards d'années.

Au Canada, le gisement de Cigar Lake est resté confiné sous 400 m de sédiments pendant plus d'un milliard d'années avant sa découverte.

Au Gabon, dans le gisement d'Oklo, des réacteurs nucléaires naturels se sont déclenchés il ya 1,7 milliard d'années ; ils ont fissionné de l'Uranium pendant des milliers d'années en produisant plusieurs tonnes de déchets dont du Plutonium. Il n'y a pas eu de dispersion des déchets radioactifs puisque l'on retrouve sur place les éléments ultimes de la désintégration des radioéléments qui ne sont plus dangereux.

La figure 16 présente une vue d'artiste du stockage profond qui est en cours d'installation à BURE entre Haute Marne et Meuse (colis insérés dans des alvéoles, aménagées le long de galeries creusées dans une couche d'argile, à 500m sous terre).

Notons enfin que le financement de ce stockage géologique est provisionné dans le cout du kWh que nous acquittons dans notre facture électrique et, que selon la Cour des Comptes (rapport de janvier 2012, page 379) si le cout du stockage venait à doubler le surcout pour le kWh ne serait que de 0.3 centime d'euro.

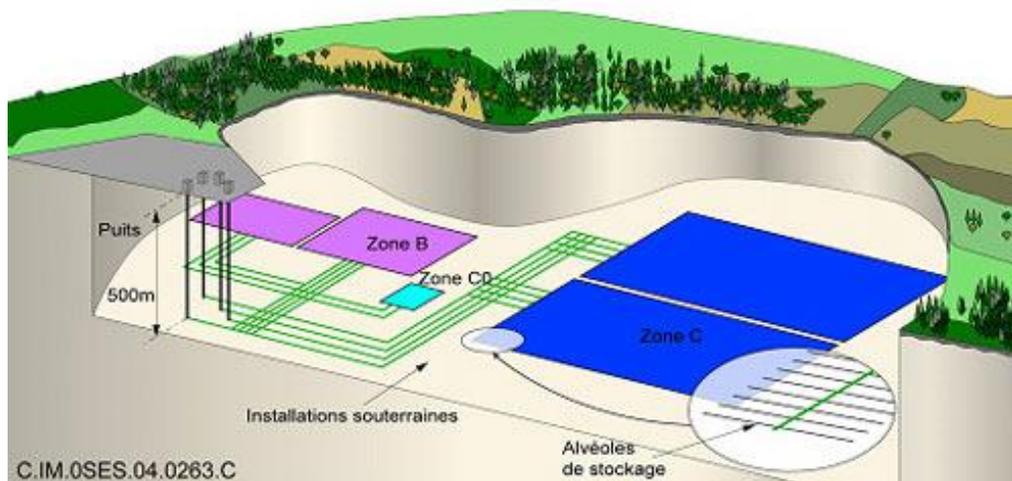


Figure 16 : Futur site de stockage profond

### **5-Les réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération : une solution pour l'avenir**

Le Forum International Génération 4 a abouti, en 2002, à retenir six systèmes candidats à étudier comme réacteurs du futur dans le cadre d'un programme de recherche international regroupant une dizaine de pays utilisateurs de centrales nucléaires.

Un avantage notable de ces réacteurs à neutrons rapides ou surgénérateurs est leur flexibilité vis-à-vis de la consommation de Plutonium. Ainsi selon les conditions de fonctionnement associées à la configuration du cœur, les réacteurs à neutrons rapides peuvent être surgénérateurs, régénérateurs ou sous-générateurs.

Pour produire de l'électricité, ils peuvent brûler les différents isotopes du plutonium issus du retraitement des combustibles des REP. Pour ces éventuels réacteurs du futur nous disposerons en 2040 de 400 000 tonnes d'Uapp, ce qui représente 4000 ans de consommation à raison de 100 tonnes par an.

Ces surgénérateurs peuvent aussi être utilisés comme incinérateurs d'actinides (neptunium, américium, curium ...). Les neutrons rapides permettraient la transmutation d'éléments radioactifs à vie longue en éléments radioactifs à vie courte.

La France a longtemps été en première ligne sur ce type de réacteurs. Les recherches menées en 1960 ont abouti à la mise en service de Phénix à Marcoule et de Superphénix à Crey Malville (plus gros surgénérateur du monde fermé en 1998).

## **6-Conclusions**

Le stockage des déchets nucléaires ne présente pas de danger, ni pour nous, ni pour les générations suivantes. Il est d'un coût que l'on pourra assumer financièrement.

Si le gouvernement décidait de sortir du nucléaire comme l'a fait l'Allemagne récemment, nous aurions à stocker et entreposer l'intégralité des combustibles irradiés et non seulement les produits de fission de très forte activité soit une masse de déchets environ 20 fois plus importante.

L'industrie nucléaire constitue un énorme atout pour la France : le faible coût de l'énergie favorise nos industriels, cette industrie représente un gisement de création d'emplois non délocalisables et une valeur importante pour l'économie française. La production massive d'électricité d'origine nucléaire est le seul moyen pour doter la France d'une politique énergétique efficace à long terme.

Des pays comme l'Espagne et l'Italie se sont fourvoyés dans l'éolien et le photovoltaïque.

En Allemagne le rêve d'une société sans nucléaire alimenté par le vent et le soleil commence à faire long feu. Après avoir investi des sommes colossales dans les énergies renouvelables, ce grand pays augmente de plus en plus sa consommation de charbon importé et de lignite (existant en abondance dans son sous-sol) et ses émissions de CO<sub>2</sub>. Sa transition énergétique visait le contraire ...

Grace à l'énergie nucléaire, qui est un formidable moyen de production d'énergie durable, massif et bon marché, le besoin en électricité de la France est assuré pour des siècles .

## **Bibliographie**

**Exposé privé de Mr Robert Isnard directeur au CEA**

**Parlons nucléaire Paul Reuss La documentation Française**

**Déchets Nucléaires : bonnes nouvelles Michel Gay**