

# Panorama international : nature et origine de l'impasse plutonium et quelques options de sortie

Frank von Hippel - Program on Science and Global Security, Princeton University  
- Co-chair, International Panel on Fissile Material (IPFM).

## Distribution internationale des stocks de plutonium

Il existe actuellement environ 500 tonnes de plutonium séparé, essentiellement en France, Japon, Russie, Royaume-Uni et États-Unis

Tableau 1 : Stocks de plutonium dans les 5 principaux pays

Tonnes	France	Japon	Russie	Royaume-Uni	Etats-Unis
<b>TOTAL, dont</b>	<b>62,0</b>	<b>35,6</b>	<b>170,4*</b>	<b>95,3</b>	<b>91,9</b>
Stocks civils	56,0	35,6	48,4	87,7	
<i>dans le pays**</i>	56	0,9	48,4	86,8	
<i>à l'étranger</i>		35		0,9	
Stocks militaires	6		122	7,6	91,9
<i>stratégiques supplémentaires</i>			34	4,4	53,9
<i>excédentaires aux besoins de défense</i>	6		88*	3,2	38

Tableau 2 : Stocks de plutonium des autres pays et total général du stock de plutonium mondial

Tonnes	Chine	Allemagne	Inde	Israël	Corée du Nord	Pakistan	Autres	TOTAL général
<b>TOTAL, dont</b>	<b>1,8*</b>	<b>7,6</b>	<b>4,7*</b>	<b>0,82*</b>	<b>0,03*</b>	<b>0,13*</b>	<b>10,7</b>	<b>480,5</b>
Stocks civils		7,6	4,2*				10,7	250,5
<i>dans le pays**</i>		5,6	4,2*					201,9
<i>à l'étranger</i>		2						48,6
Stocks militaires	1,8*		0,5	0,82*	0,03*	0,13*		230,8
<i>stratégiques supplémentaires</i>					0,03*	0,13*		92,5
<i>excédentaires aux besoins de défense</i>	1,8*		0,5	0,82*				138,3

\* : estimations (incertitude de plus ou moins 8 t pour le stock en Russie).

\*\* : plutonium séparé pour utilisation éventuelle comme combustible.

La quantité totale de plutonium séparé, disponible dans les stocks civils et militaires, est de l'ordre de 500 tonnes. Un tel potentiel permettrait de fabriquer plusieurs dizaines de milliers d'armes nucléaires, soit de première génération du type de la bombe qui a détruit Nagasaki (8 kg de plutonium de qualité réacteur), soit d'un modèle moderne (4 kg). Il convient également de noter que le plutonium civil sous forme d'oxyde (combustible MOX par exemple) peut être converti chimiquement en métal avant utilisation dans un engin explosif.

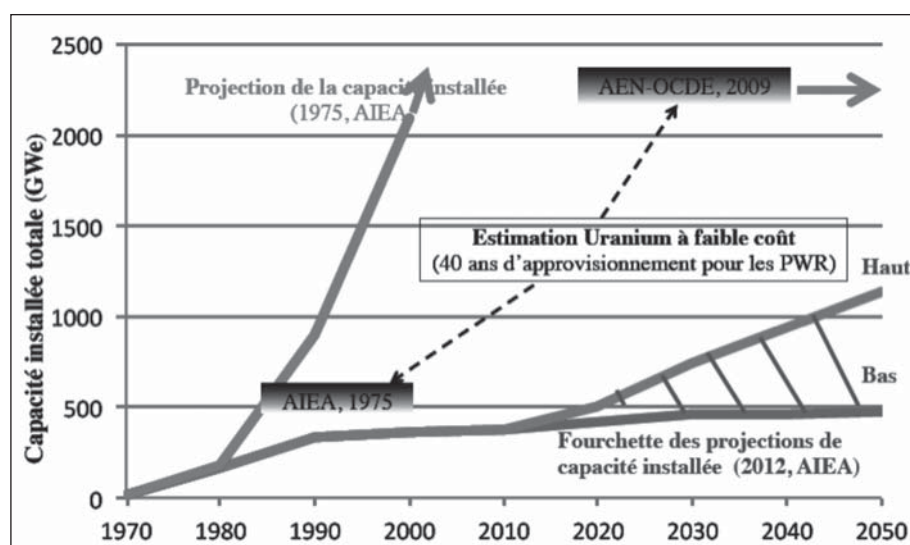
## La production du plutonium à des fins civiles est-elle intéressante ?

En 1975, les prévisions de l'AIEA<sup>1</sup> concernant le développement de la production d'électricité d'origine nucléaire étaient très élevées (voir graphique ci-dessous) : on atteindrait environ 2 500 GW<sup>2</sup> en 2000. Dans ces conditions, on considérait que les ressources mondiales en uranium ne permettraient pas d'alimenter à long terme les réacteurs à eau légère. La pression sur le marché de l'uranium devait alors conduire à une augmentation considérable des coûts justifiant le développement de la production de plutonium par le retraitement des combustibles irradiés et le développement des surgénérateurs et plus tard celui du combustible MOX.

Avec les années, les réalisations comme les prévisions de capacités (puissances) installées de l'AIEA (et de l'AEN, Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE) ont subi des révisions drastiques, comme le montre le même graphique.

Aujourd'hui, le coût de l'uranium naturel ne représente que quelques pour cent du coût du kWh produit par les centrales nucléaires : le recyclage du plutonium dans les éléments combustibles comme la filière des surgénérateurs au plutonium ne sont pas rentables.

Figure 1 : Les prévisions de la capacité nucléaire installée dans le monde



## Retraitement et production de plutonium dans le monde

La plupart des pays ont opté pour le stockage des combustibles irradiés en l'état, après leur déchargement du réacteur. Ils sont en général entreposés dans des « piscines » situées auprès des réacteurs (à l'extérieur ou à l'intérieur des enceintes de confinement). Dans certains pays, ils sont transférés après quelques années en stockage à sec.

En France, en Inde et en Russie, les gouvernements restent engagés dans le retraitement des combustibles irradiés et donc dans la production de plutonium. En Chine, au Japon, aux Pays-Bas et en Ukraine, la question du retraitement est en débat.

### Le retraitement dans le monde

Il existe des quantités considérables de plutonium séparé comme le montre le tableau suivant :

	Fin 2011: Pu civil et en excès des armes	Stratégie de gestion
<b>France</b>	80 t (dont 23 étrangères)	MOX REL, opérationnelle
<b>Japon</b>	9 t (+35 en France/UK)	MOX REL au point mort Début retraitement en 2014
<b>Russie</b>	82 tonnes	Recyclage dans des plutonigènes
<b>U.K.</b>	118 t (dt 28 étrangères)	Usine MOX abandonnée
<b>U.S.</b>	49 tonnes	Usine MOX peut-être abandonnée
<b>Total</b>	340 tonnes (équivalent 40.000 à 85.000 bombes nucléaires)	

1 - L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) – International Atomic Energy Agency (IAEA) – est une organisation internationale, sous l'égide de l'ONU. Elle rend un rapport annuel à l'assemblée générale de l'ONU et à chaque fois que demandé par le Conseil de sécurité. Fondée en 1957 et basée à Vienne, elle cherche à promouvoir les usages pacifiques de l'énergie nucléaire et à limiter le développement de ses applications militaires. Ce double rôle entraîne des ambiguïtés sur ses interventions.

2 - GW : Gigawatt (milliard de watts) ou 1 000 MW (mégawatt ou million de watts). C'est la puissance électrique moyenne des tranches nucléaires.

L'utilisation de ce plutonium pour fabrication de MOX ou de combustible pour surgénérateur, ou son stockage sans danger prendront des décennies dans certains cas. Pourquoi dans ces conditions continuer à en séparer ?

- **Le retraitement, un procédé coûteux, non fiable et dangereux**

Les figures suivantes illustrent ce propos ainsi que les échecs du retraitement dans la plupart des pays.

- **Le retraitement est coûteux (estimations officielles) :**

Augmentation des coûts d'exploitation sur la durée de vie d'un réacteur par rapport au non-retraitement :

- France (2000) : 0,5 milliard de dollars US par GWe.
- Japon (2011) : 3 milliards de dollars US par GWe

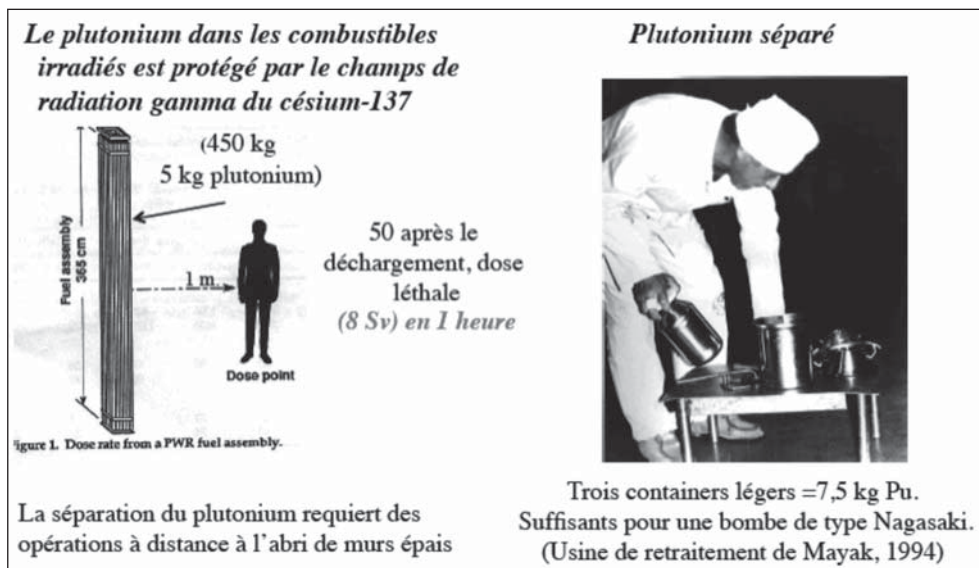
- **Le retraitement n'est pas fiable (hors France) :**

- Japon : l'exploitation de l'usine de retraitement de Rokkasho actuellement en retard de 16 ans.
- Royaume-Uni : le fonctionnement de l'usine de retraitement britannique THORP n'a pas dépassé en moyenne 50 % de sa capacité.

- **Le retraitement est dangereux**

**Figure 2 : Le retraitement amplifie la menace de prolifération et de terrorisme**

(bombe de Nagasaki : 8 kg ; inhalation collective d'1 kg de  $\text{PuO}_2$  ~ 10 000 morts par cancer).



- **Échecs et impasses des programmes MOX**

**De nombreux programmes MOX sont dans l'impasse comme au Japon ou aux États-Unis**

- a) Échec des directives de l'AIEA de 1997 relatives à la gestion du Pu (directives signées par la France, le Japon, la Russie et les États-Unis, la Belgique, la Chine, l'Allemagne et la Suisse):
- « (Nous nous engageons à gérer le plutonium dans des stratégies (...) qui en garantiront l'utilisation pacifique ou l'évacuation sûre et durable (...)) »

La formulation de cette stratégie devra prendre en compte :

- « la nécessité d'éviter de contribuer aux risques de prolifération nucléaire » (certains pays s'intéressent encore au retraitement, car c'est un chemin vers la bombe).
- « les coûts et les bénéfices en jeu » (coûts élevés, bénéfices négligeables).
- « l'importance d'équilibrer l'approvisionnement et la demande » (250 tonnes de Pu civil permettraient plus de 30 000 armes nucléaires).

- b) L'impasse du MOX au Japon :

- 9 tonnes de plutonium séparé au Japon, plus 35 tonnes issues de combustibles usés japonais en France et au Royaume-Uni.
- Mais une opposition massive à l'utilisation du MOX : seules 2,5 tonnes sur les 40 tonnes de plutonium séparées en Europe des combustibles irradiés japonais ont été chargées au Japon sous forme de combustible MOX depuis le premier transport en 1999. Tous les réacteurs japonais, à l'exception de deux, sont à l'arrêt, mais AREVA prévoit un nouveau transport de MOX pour avril 2013.

- Le début de la séparation de plutonium supplémentaire à l'usine de retraitement de Rokkasho (RRP) est prévu en 2014, avec montée en puissance jusqu'à 8 tonnes par an (équivalent à 1 000 bombes) d'ici 2018.
- Si RPP est mise en service et que les transports depuis la France se poursuivent, le stock de plutonium non-irradié au Japon va croître rapidement.

c) L'échec du plan américain d'évacuation du plutonium via le MOX :

- En 2002, la COGEMA (aujourd'hui AREVA) estimait un coût de 2 milliards de dollars pour évacuer 34 tonnes de plutonium de qualité militaire via le MOX entre 2007 et 2019.
- En 2013, 4 milliards de dollars ont été déjà dépensés et les besoins sont estimés à :
  - 3 milliards de dollars supplémentaires pour terminer l'installation et,
  - 10 milliards de dollars pour l'exploitation entre 2019 et 2039.

Avec la crise fiscale à Washington, le projet pourrait être gelé pendant que l'on étudie les alternatives.

• Des alternatives pour l'immobilisation du plutonium ?

Différentes solutions sont présentées pour immobiliser les quantités de plutonium déjà séparé.

Figure 3 : L'immobilisation du Pu comme alternative au MOX

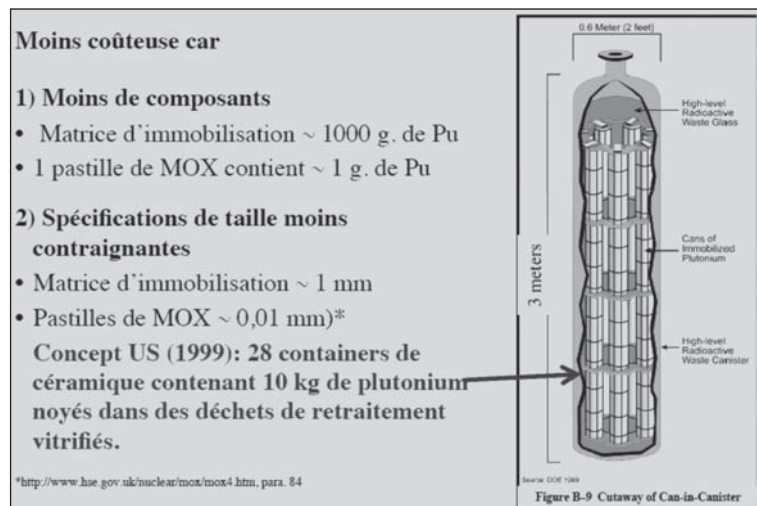
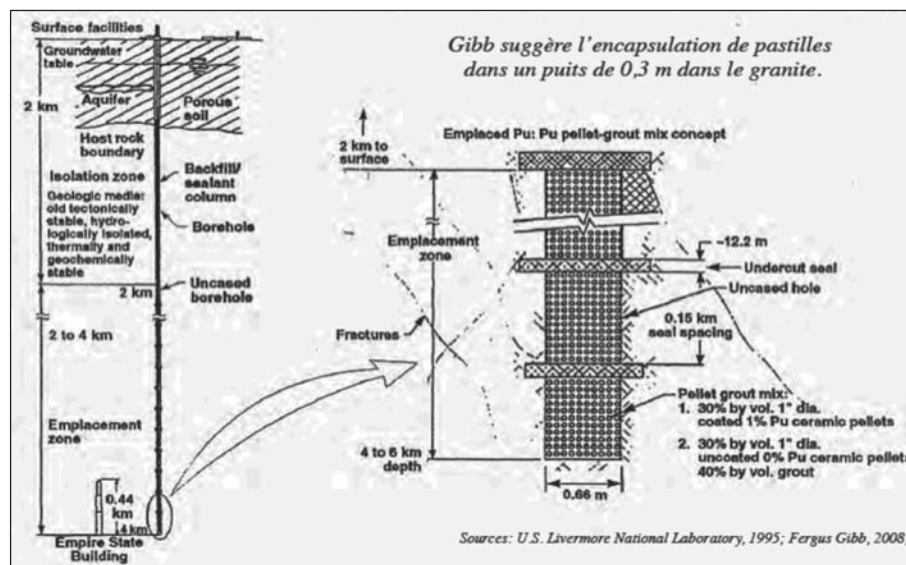
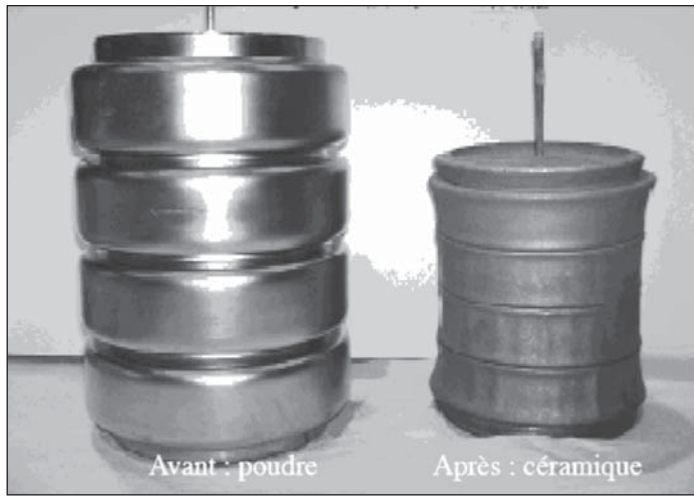


Figure 4 : Les pastilles de MOX pourraient être stockées dans des puits profonds



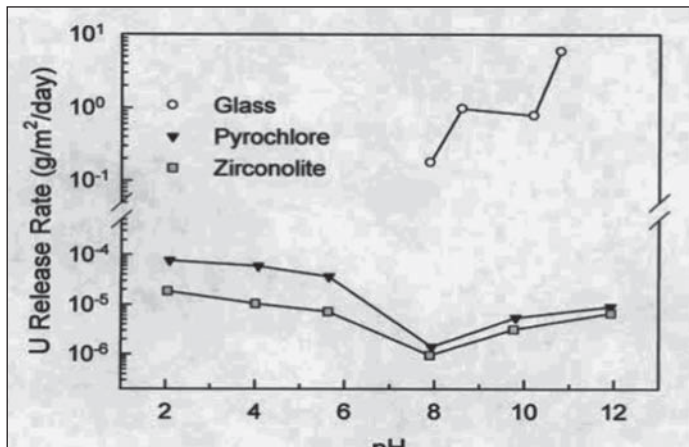


**Figure 5 : Processus d'immobilisation pour le plutonium impur (UK) : Compression isostatique à chaud (~ 2 kg de Pu par container à 10 wt %, National Nuclear Lab, Sellafield)**



- Des alternatives au retraitement ?

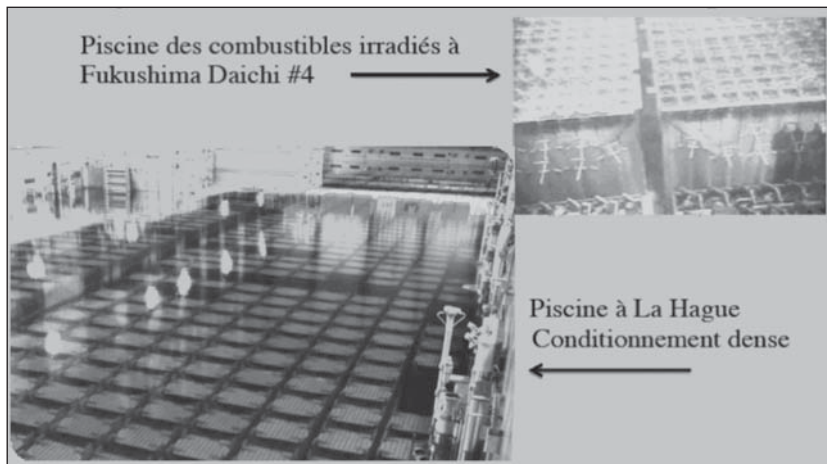
**Figure 6 : Des matrices céramiques pour l'immobilisation avec une solubilité de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle du verre ont été développées.**



Source : WJ. weber and R.C. Ewing (in press) « Ceramic waste forms for uranium and transuranium elements », Mineralogical Association of Canada Short Course, vol. 48.

Le stockage des combustibles irradiés en piscine présente des risques importants en particulier si le conditionnement y est dense comme à la Hague.

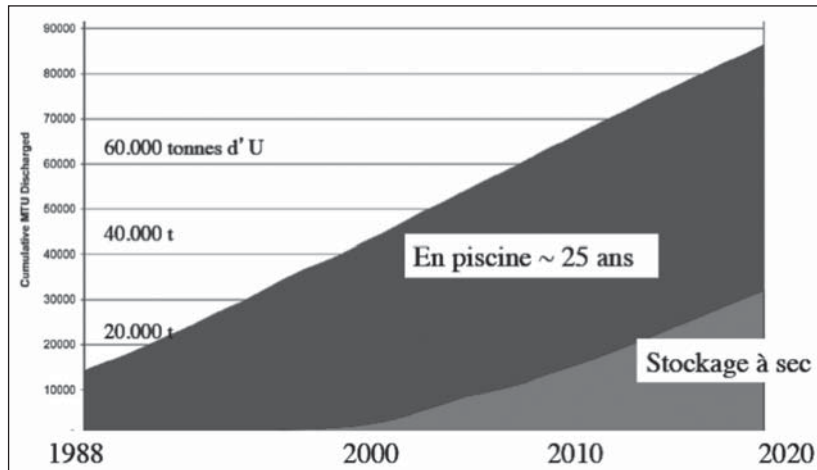
**Figure 7 : Les piscines sont dangereuses - en particulier avec un conditionnement dense. Le combustible irradié doit être transféré dans des containers à sec au bout de cinq ans.**



Les assemblages combustibles usés sont regroupés (9, 12 ou 16) dans des « paniers » afin d'assurer leur manipulation lors de déplacements sous eau, dans la piscine. La protection contre le risque de criticité, dans les piscines d'entreposage d'EDF ou de La Hague, consiste en la séparation des assemblages entre eux par une lame d'eau suffisante ou par des matériaux riches en bore. Dans ce dernier cas, il est possible de réduire l'espace qui sépare les assemblages. La densité du stockage dans la piscine est ainsi augmentée.

En cas de malveillance (explosion, projectile) détruisant l'arrangement des assemblages, si une partie de quelques dizaines de centimètres de deux assemblages venait à entrer en contact, cela déclencherait un accident grave de criticité.

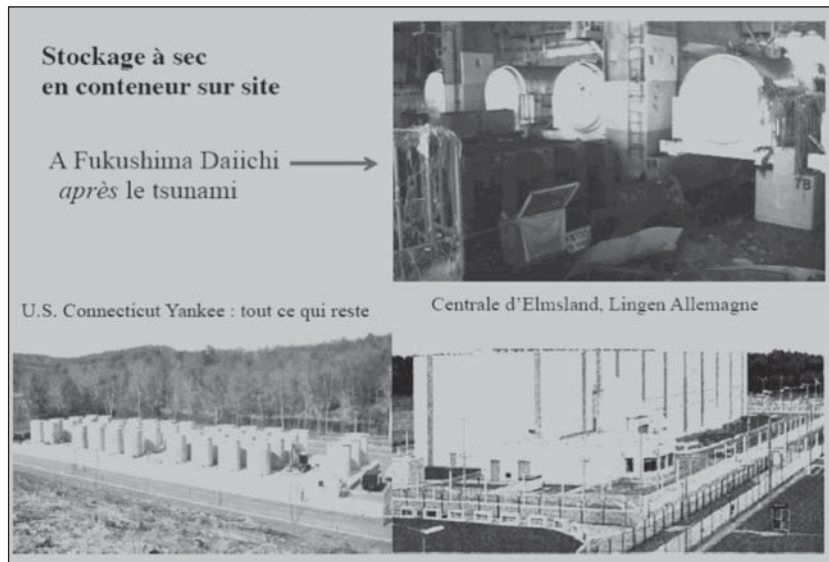
**Figure 8 : Les piscines de presque tous les réacteurs américains actuels sont pleines.**



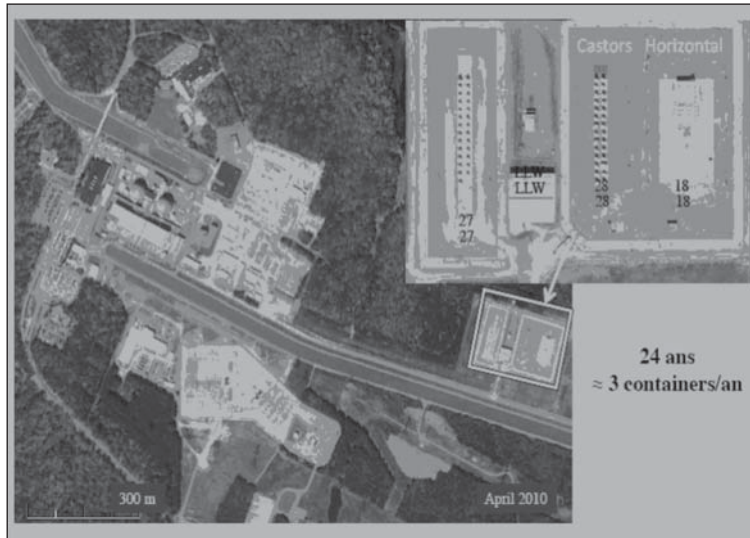
*Categorization of Used Nuclear Fuel Inventory in Support of a Comprehensive National Nuclear Fuel Cycle Strategy, ORNL/TM-2012/308.*

Les combustibles plus anciens et refroidis sont transférés vers du stockage à sec afin de libérer la place pour les combustibles chauds que l'on décharge. Débat sur le conditionnement dense.

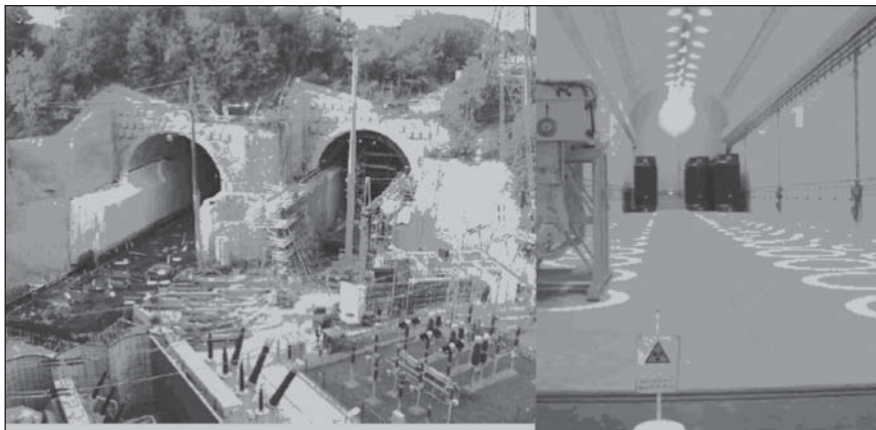
**Figure 9 : L'alternative au retraitement**



**Figure 10 : Centrale de Surry (1973, REP 2x0,84 GWe)  
Première centrale américaine à adopter le stockage à sec (1986)**



**Figure 11 : Même sur les petits sites, le stockage près des réacteurs est possible.  
(Galerie de stockage sous les bâtiments administratifs, Neckar-Westheim, Allemagne, 2006)**



## Conclusions

- Pour des raisons de coût et de non-prolifération, la tendance est à l'abandon de la séparation du plutonium. Seuls cinq pays, sur les trente et un possédant des centrales nucléaires, ont encore recours au retraitement des combustibles irradiés.
- Le stockage en profondeur des combustibles irradiés et des déchets du retraitement a subi des retards dans de nombreux pays.
- Le stockage à sec en conteneurs des combustibles irradiés est une stratégie intermédiaire sûre et à faible coût.
- Le recours à l'immobilisation pour l'évacuation du plutonium séparé est une alternative à faible coût au MOX.