

**DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE AUX DÉCHETS :
RECHERCHES ACTUELLES**
FROM NUCLEAR FUELS TO WASTE: CURRENT RESEARCH

Confinement des radioéléments de haute activité et des combustibles nucléaires usés

Jean Paul Martin ^a, Willy J. Fournier ^{b*}

^a 7, rue Guillaume Fouace, 50100 Cherbourg, France

^b Direction de l'énergie nucléaire, C.E.A./DEN Saclay, 91191 Gif sur Yvette, France

Reçu le 5 avril 2002 ; accepté après révision le 8 juillet 2002

Note présentée par Édouard Brézin.

Résumé

Cet article présente les données synthétiques quantifiées des produits de haute activité radiologique générés par la production d'énergie nucléaire depuis ses débuts, et les met en regard des deux types d'entrepôts en cours de développement que sont les verres, après retraitement des combustibles usés, et les combustibles eux-mêmes, entreposés en piscines et, plus récemment, pour des quantités moindres, dans des conditions atmosphériques sèches.

La principale conclusion de l'article souligne que les quantités de combustibles à ce jour déchargées sont immenses et croissantes, et que les solutions industrielles autres que les piscines n'existent pas aujourd'hui et n'existeront pas dans les vingt prochaines années, au développement près d'un stockage centralisé à sec, fondé sur un retour d'expérience qui a trente années de retard sur celle des piscines.

On conclut, enfin, sur le retour d'expérience et les améliorations continues apportées à ce dernier type de confinement. *Pour citer cet article : J.P. Martin, W.J. Fournier, C. R. Physique 3 (2002) 867–877.*

© 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

energie nucléaire / produits de haute activité / combustibles usés / entreposages / piscines / verres / retour d'expérience du confinement

High activity radioisotopes and nuclear spent fuel confinement

Abstract

This article gives a compilation of quantified data on high activity radiological products generated in Nuclear Power Plants since their beginning, comparing them to the capabilities of the main types of spent fuel storage, which are under development: i.e., glass canisters of fission products, after reprocessing, and Fuel assemblies themselves, for storage in ponds, and, more recently, for smaller quantities, under dry atmospheric conditions.

The main conclusion underlines that today, quantities are large and increasing, and that industrial solutions other than ponds, do not exist at present and will not be implemented in the next twenty years, with the exception of dry centralized storage, based on the feed back experience which is now thirty years late compared to pond storage.

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : fournier@aquilon.cea.fr (W.J. Fournier).

Technical conclusions are, finally, drawn on the feedback knowledge and the continuous improvements implemented in the wet type of confinement system. *To cite this article: J.P. Martin, W.J. Fournier, C. R. Physique 3 (2002) 867–877.*

© 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

nuclear energy / high activity products / spent fuels / storage / ponds / glass canisters / confinement knowledge feed-back

1. Contexte industriel de l'entreposage des matières nucléaires de haute activité

Un des grands défis de la planète pour le siècle à venir est la disponibilité d'énergie pour une population mondiale qui avoisinera dix milliards d'hommes. Une majorité croissante se trouve en état de disette énergétique, ce qui oblige à en considérer les conséquences humanitaires désastreuses. Il faut par ailleurs noter que la montée en puissance de chaque pays, dans son utilisation de l'énergie, passe systématiquement par un accroissement relatif de sa part d'énergie électrique.

C'est ainsi que le dernier quart du vingtième siècle a vu la montée en puissance industrielle de l'énergie nucléaire dans le monde, ainsi qu'une rationalisation finale à cinq types principaux de réacteurs à fission (neutrons lents). Quelque 400 réacteurs produisent, en l'an 2000, un peu moins de 10% de l'énergie mondiale consommée. Ce pourcentage paraît devoir rester stable pour les 15 ans à venir.

Quelles que soient les péripéties qu'a connues la mise en place d'un tel parc de plus en plus standardisé, on dispose, à ce jour, d'un retour d'expérience de plusieurs milliers d'années-réacteur cumulées. Ces constats doivent rassurer les décideurs quant à la fiabilité des générateurs d'énergie nucléaire.

S'il subsiste un problème, diversement traité par les États possédant le « Nucléaire civil » à ce jour (sur 188 pays de l'ONU, 33 États, représentant 63% de l'humanité, Inde et Chine incluses), c'est celui que l'on nomme globalement : Entreposage, Stockage ou Traitement des Résidus radioactifs issus de ces réacteurs. Ces résidus représentent une contrepartie proportionnelle à l'énergie produite.

Là encore, les observations et pratiques sur ce dernier quart de siècle ont amené un important retour d'expérience sur des solutions alternatives qui s'étayaient les unes les autres plus qu'elles ne se concurrencent.

Le but de cet article est de décrire brièvement un historique technologique, l'état des installations actuelles et les perspectives de ce que l'on appelle l'entreposage sous eau, ou sous forme de « verres de produits de fission après traitement » des déchets de très haute activité.

2. Rappel historique

Depuis le début du nucléaire civil, l'eau ordinaire a toujours été considérée comme un facteur d'ambiance radiologique banal et peu coûteux, transparent et bien adapté à la protection contre les rayonnements, en conditions d'exploitation et de maintenance.

Après quelques décennies d'expérience, une partie des fonctions, notamment celles qui concernent l'aval du cycle du combustible pour les produits de haute activité, a été réalisée dans des dispositifs en « cellules blindées » (atmosphère sèche). Ces dispositifs utilisent le confinement par ventilation dynamique (maintenance mécanique à distance, entreposage des verres séparés, ...). L'utilisation de l'eau a été réservée aux réacteurs eux-mêmes (principalement eau-légère), aux piscines d'entreposages amont et aval de ces réacteurs, aux piscines centralisatrices plus performantes dont l'exutoire privilégié est les traitements des combustibles pour séparation des produits très irradiants contenus en faible pourcentage (3 à 4%).

Les progrès réalisés en matière de traitement des eaux depuis 1980 sur ces installations ont abouti à maintenir une qualité d'eau qui garantit l'intégrité et la propreté des éléments combustibles usés issus des réacteurs tout en ne générant, in fine, par des systèmes d'épuration adaptés, que des déchets susceptibles d'être stockés en surface.

En effet, la qualité de l'eau des piscines amont des usines de traitement, où le combustible est immobile et l'eau très convenablement épurée s'avère en général être cent fois moins contaminée que celles des piscines réacteurs, normalement dédiées aux mouvements fréquents « réacteurs-piscines » ou « combustible neufs ou usés- piscines ».

2.1. Procédé de vitrification des produits de fission

Depuis une trentaine d'années, développé en laboratoire puis en pilotes de capacités croissantes, le procédé de vitrification des produits de fission, (à la fois pour les sous-produits des combustibles gaz-graphite et eau légère), a maintenant fait ses preuves industrielles. Dans des usines de traitement de haute capacité, ces installations permettent de résorber « en ligne » une production de cisailage de 1600 à 1700 tonnes par an (exemple de l'usine de La Hague).

L'expérience industrielle est, à ce jour, de treize années. Ses capacités mondiales sont, par contre, limitées au flux du petit nombre d'installations de traitement. Tous les conteneurs produits depuis 1989 sont entreposés à proximité des installations de « coulée » puis transportés vers des installations de même type, construites dans chaque pays propriétaire des combustibles retraités.

La qualité des conteneurs de verres produits est assurée par un mode de conduite de procédé en « process control », agréé par 33 compagnies d'Electricité nucléaires appartenant à 8 états différents. Chaque compagnie est propriétaire des conteneurs qui lui sont affectés.

3. Panorama mondial des combustibles usés (an 2000)

Les tonnages de combustibles usés accumulés depuis le début du nucléaire civil dans le monde représentent environ 230 000 tonnes issues de plus de 400 réacteurs nucléaires, d'ailleurs encore presque tous en service. La mutation progressive des parcs des filières MAGNOX et UNGG vers celles d'Eau Légère (REP, REB, VVER) amène à ne s'intéresser aujourd'hui qu'à ces dernières qui représentent 85% des déchargements annuels actuels (11 000 tonnes). Chacun de ces réacteurs, en particulier, est interfacé avec un stockage en piscine locale dédiée. Pour la France, par exemple, la capacité d'entreposage liée à ses soixante centrales représente un potentiel de 12 000 tonnes dont 7000 sont utilisées en permanence. Par ailleurs, la durée de vie progressivement allongée, en ce qui concerne la Sûreté démontrée des éléments des parcs s'applique évidemment aussi à la durée de vie des piscines adjacentes, dont la vocation première était la manutention unitaire des quelque 200 éléments combustibles, en moyenne, qui constituent un cœur.

Le second retour d'expérience significatif est celui des piscines amont des quelques usines de traitement réparties dans le monde (France, Royaume Uni, Russie, Japon). Le potentiel d'entreposage centralisé mondial peut être évalué à 50 000 tonnes. On doit y inclure l'expérience originale Suédoise du « CLAB », désignée comme piscine d'entreposage « souterrain » de longue durée.

Enfin, il faut noter quatre types d'installations d'entreposage à sec : en France, CASCAD, pour des combustibles issus notamment de réacteurs divers de faible puissance (retour d'expérience d'une dizaine d'années sur une cinquantaine de tonnes) ; en Suède, COVRA, pour les conteneurs de verres et de déchets « B », ainsi que des combustibles usés Eau Légère, dont, pour ces derniers, l'entreposage n'est pas encore démarré ; aux USA, les NUOMS, qui sont des installations combinées de châteaux de transport entreposés à l'horizontale, pour reprise ultérieure, dans des casemates en béton, puis, pour finir, les châteaux de transports eux-mêmes, entreposés sur les sites des centrales. L'ensemble de ces quatre dispositifs est, à ce jour, conçu pour permettre, à terme, une reprise vers un exutoire de type retraitement.

Deux graphiques inclus ci-après explicitent l'état des 230 000 tonnes de combustibles à ce jour déchargés des réacteurs, ainsi que leur évolution dans les 15 ans à venir.

Il faut noter qu'un tiers du tonnage a été retraité : cela pourrait paraître très important, mais, en fait, ce quota concerne en majeure partie les combustibles Magnox et GG (80%) pour lesquels les opérations de fin de cycle sont pratiquement arrêtées.

Tableau 1. État mondial de la quantité cumulée de combustibles usés déchargés (fin 2000)

Total	230 000 tonnes
REL	125 000
Autres	70 000
CANDU	35 000
Retraités	77 000 tonnes
REL	22 000
GG + MA	55 000
En piscines	145 000 tonnes (2/3)
Réacteurs	110 000
Séparées	35 000
À sec (châteaux autres)	8000 tonnes

Pour ce qui est des combustibles Eau Légère, ce quota se réduit à 18%, avec des perspectives politiques de réduction. Pour ce qui est du Candu, il est nul.

Une autre observation est importante : les combustibles entreposés à sec à ce jour ne représentent qu'une faible partie de la quantité déchargée non retraitée. L'essentiel est entreposé dans des NUOMS ou des châteaux de transport immobilisés sur les sites des centrales. Malgré la remarque de bon sens explicitant la possibilité d'entreposer systématiquement dans ces dernières conditions, il ne paraît pas raisonnable de transformer chaque site de centrale en entreposage intérimaire de durée indéfinie !

Pour résumer en quelques lignes le Tableau 1 :

- Le tonnage mondial actuellement déchargé des réacteurs nucléaires s'élève à 230 000 tonnes ;
- Elles représentent toute l'expérience accumulée à ce jour :
 - 55 000 tonnes GG et MAGNOX ont été pratiquement retraitées ;
 - 35 000 tonnes Candu sont entreposées en piscines ;
 - 145 000 tonnes Eau Légère, dont 22 000 ont été retraitées, la majeure partie demeure principalement dans les piscines des réacteurs (110 000 tonnes, soit 76%) ou dans des piscines séparées (35 000 tonnes, soit 24%).

Le tonnage restant est entreposé en NUOMS ou châteaux de transport, sur les sites des Centrales Nucléaires (principalement USA).

4. Évolution des tonnages mondiaux dans les 15 prochaines années

Deux remarques permettent de décrire cette évolution :

- la Première est que la majeure partie du combustible usé est et sera produite par un très petit nombre de pays : États Unis, France, Russie, Japon, Allemagne. Ils représentent et représenteront environ 80% de la quantité mondiale, ce quota baissant de 5 à 7 points entre 2000 et 2015 pour tenir compte d'une modeste montée en puissance de pays émergents (Chine, Corée, Inde, ...).

Le Tableau 2 montre les quantités absolues déchargées depuis le début du Nucléaire Civil, indépendamment du retraitement que l'on retrouve essentiellement en France et au Royaume Uni (bientôt le Japon) pour le combustible Eau Légère, ainsi qu'au Royaume Uni et en France pour les MAGNOX et UNGG (on voit clairement qu'en France tout l'UNGG est retraité et toutes les centrales de ce type arrêtées).

Tableau 2. Principaux pays contributeurs—évolution dans les 15 prochaines années

	2000 (t)	2015 (t)	
États Unis	43 000	72 000	REL
France	18 500	34 000	REL
Japon	17 000	33 000	REL
RFA	11 000	17 000	REL
Canada	28 000	47 000	CANDU
Royaume Uni	41 000	53 000	MAGNOX + AGR
France	16 000	16 000	UNGG
Russie	17 500	20 500	RBMK + VVER
Part mondiale des 7 pays	83%	76%	

Tableau 3. Les quantités annuelles déchargées sont à peu près constantes dans les deux décennies à venir

Eau Légère (REP + REB + VVER)	7200 tonnes par an
Candu	2100 tonnes par an
Autres	1800 tonnes par an
Environ 11 000 tonnes par an	

Tableau 4. Les capacités mondiales d'accueil sont limitées

Piscines des centrales	155 000 tonnes
Piscines séparées	55 000 tonnes
Potentiel à sec	20 000 tonnes

- La Seconde est l'observation des quantités déchargées annuelles prévisibles dans les 15 ans à venir. On s'aperçoit que ces quantités sont à peu près constantes : l'essentiel provenant de l'utilisation des centrales à eau légère, l'augmentation des taux de combustion par élévation de la proportion d'U5 compense les tonnages complémentaires nécessaires aux nouvelles centrales construites et démarrées dans la période.

Pour les autres types de réacteurs, c'est la stabilité des parcs qui induit la constance des tonnages.

On observe le passage gigantesque des quantités déchargées de 230 000 tonnes à près de 400 000 tonnes en 2015 ! Il faut, par ailleurs souligner que, le rythme de retraitement soutenu se limitant drastiquement dès à présent, ce sont les piscines, et principalement celles des centrales, qui constituent l'exutoire privilégié des combustibles usés. Les piscines séparées, liées principalement aux combustibles à retraiter ne représentent qu'un quart de la capacité totale pour un potentiel annuel mondial de 3500 tonnes retraitées (donc susceptibles de produire des produits de fission vitrifiés). La capacité de stockage à sec reste technologiquement et politiquement bien lointaine pour les quantités évoquées dans le Tableaux 3 et 4.

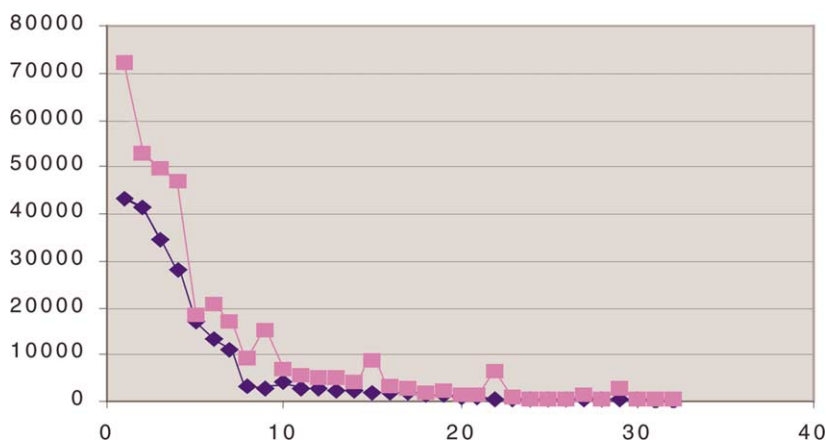


Figure 1. Tonnages cumulés à la fin 2000 des combustibles nucléaires usés, par rang décroissant de nations nucléaires : courbe grise—tonnages cumulés 2000 ; courbe rose—tonnages cumulés 2015.

5. Évolution des nations nucléaires—Parc Français

La Fig. 1 montre clairement qu'à quinze ans, une petite dizaine de nations seulement a du poids dans la génération du combustible usé et que ce sont les mêmes que celles qui comptent aujourd'hui : par ordre décroissant États Unis, Royaume Uni, France, Canada, Japon, Russie, Allemagne.

Leur poids total est en légère régression, au profit notamment de la Chine et de l'Inde dont on perçoit le décollage, matérialisé par les décrochements de courbes en quelques points à partir du 9ème rang.

Enfin, pour ce qui concerne l'exemple du Parc Français, l'ensemble des piscines déportées du site de La Hague représente un potentiel de 18 000 tonnes environ. Cet entreposage, réalisé en paniers de 9 à 16 assemblages (et non unitairement, comme dans les piscines de réacteurs) n'a pas une vocation première de transports multiples d'éléments, mais plutôt d'entreposage et d'alimentation – en paniers – des opérations de cisailage.

Certains E.C. ont été entreposés entre 20 et 30 ans dans ces piscines, sans présenter de facteur de rupture sur les gaines ou de difficulté de cisailage ; par ailleurs, la dispersion « alpha » dans l'eau de ces immenses bassins est inférieure d'un facteur cent aux valeurs observées dans les piscines des réacteurs.

Enfin, le démantèlement des premières piscines, notamment UNGG, a montré que cela pouvait être réalisé en produisant exclusivement des déchets de surface ; il en est de même pour les systèmes d'épuration permanente de l'eau.

6. Retour d'expérience français

Trois générations de piscines ont accompagné la transformation de la méthode de production d'énergie et de traitement des résidus.

La première génération a concerné des Combustibles Conteneurés : les piscines n'étaient pas cuvelées (une piscine à Marcoule, encore en fonctionnement, une piscine à La Hague, déclassée en 1987).

La Seconde génération a concerné les Combustibles « Magnésiens » : les piscines étaient cuvelées en peau inox ; la Non Conteneurisation des combustibles (UNGG) a amené des teneurs en émetteurs « alpha » de l'eau de ces piscines jusqu'à des valeurs dix à cent fois plus fortes que les premières, malgré le faible taux de combustion des éléments. Quatre piscines ont été dans ce cas sur les deux sites (LH et MAR). Une décontamination complète a été entreprise entre 1987 et 1989 sur les deux piscines de La Hague, pour dégager une capacité d'entreposage sous eau de coques issues du cisailage des combustibles Eau Légère.

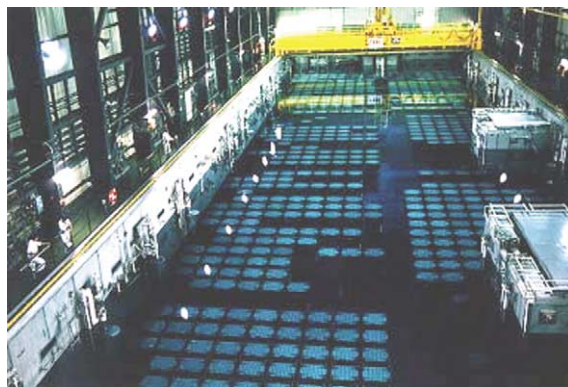


Figure 2. Entreposage en piscine à La Hague.

La Troisième génération est celle des 5 Grandes Piscines Existantes sur La Hague (Fig. 2). Elles sont reliées entre elles, ainsi qu'aux puits d'introduction des combustibles dans les dispositifs de cisailage.

C'est, bien entendu sur ce dernier concept de piscine (la première a été mise en exploitation en 1976, la seconde en 1980) que nous devons tirer l'essentiel du retour d'expérience dont les 10 points majeurs sont relevés dans le Tableau 5.

On peut, effectivement, regarder le dispositif des piscines comme une installation moins « robuste » qu'un entreposage centralisé à sec : il faut noter que ces derniers dispositifs commencent seulement à être mis en exploitation dans un cadre de réversibilité. Chacun des dispositifs nécessitera des moyens de manutention sophistiqués. A ce propos, on peut souligner que l'expérience accumulée sur les ponts perches des piscines permet maintenant d'atteindre un niveau d'erreur de dépose de l'ordre d'un millimètre en coordonnées horizontales.

Les trois points importants demeurent les suivants :

- il n'y a plus de circuits de filtration ou de refroidissement d'eau externes aux piscines ;
- la teneur « alpha » de l'eau des bassins est très basse ;
- les résidus issus des dispositifs de filtration donnent des colis de surface.

7. Retour d'expérience comparée des piscines et des verres

Après avoir analysé dans le détail l'utilisation inéluctable et les améliorations apportées aux piscines d'entreposage depuis environ quarante cinq ans, il est indispensable de décrire la technologie d'entreposage des verres élaborés avec les produits essentiels de ce qui rend les combustibles usés « de Très Haute Activité », c'est-à-dire les Produits de Fission.

Le retour d'expérience est un peu plus court (15 ans en pleine puissance) mais de la même quantité de combustibles usés pour ce qui concerne les tonnages (UNGG et Eau Légère) par le biais du retraitement.

Il faut noter, compte tenu d'un retour d'expérience diversifié, ainsi que des simulations pour l'avenir, que les entreposages de déchets « C » issus des réacteurs et coulés sous forme de conteneurs de verre sont parfaitement compatibles entre eux, et, pour les seconds, compatibles avec un concept de système « robuste = conduit sous simple surveillance » d'un stockage à sec et en subsurface, en puits ventilés, quelle que soit la stratégie d'aval du cycle retenue et sous réserve d'une limitation raisonnable de teneur en actinides : cette remarque peut faire basculer le concept d'entreposage de conteneurs en « solution » de Stockage Généralisé de Longue Durée des déchets de Très Haute Activité.

Pour ce qui est de l'entreposage des combustibles irradiés, l'essentiel de l'expérience a été obtenu dans les piscines et n'a montré que des aspects technologiquement positifs pour les objets considérés : facilité de suivi de l'intégrité des EC, Longévité et Sécurité des installations concernées.

Tableau 5. Expérience française : retour d'expérience majeur de 45 ans d'exploitation des piscines

1ère génération
Combustibles conteneurés/piscines non cuvelées (1958–2002)
Déclassement temporaire de S1/LH après usage (1966–1987)
2ème génération
Combustibles magnésiens/piscines cuvelées (1973–1998)
4 piscines sur les sites LH et MAR
Décontamination complète de S2/S3/LH
3ème génération
Combustibles REL (tous types) et RNR (1976–2002)
5 piscines de grande capacité sur le site de LH
50 000 m ³ de volume/15 000 tonnes capacité/40 000 MW évacués
25 ans de REX sur 24 000 t REL réceptionnées
Plus de circuits internes de filtration (NYMPHEAS)
Détections de fuite négatives
Combustibles à plus de 20 ans d'âge
Teneur alpha très faible (bet.gam/alpha # 1000)
Pas de résidus de type autre que « A » – (ACR)
Radiométrie très basse pour les opérateurs
Expérience du déchargement à sec à distance
Maintenance :
Mécanique de « déplacement » classique, aéros, ventil., circuits eau
Nettoyage fonds de bassin

Note : L'expérience GG a porté sur 18 000 tonnes de combustibles. Les 3 piscines de LH ont été complètement nettoyées puis dédiées au stockage des coques du HAO de 1989 à 1999.

Cette expérience couvre plus de trente ans d'Entreposage effectif et peut prouver, compte tenu des améliorations déjà apportées, en ce qui concerne l'exploitation et la maintenance, une longévité d'utilisation jusqu'à cinquante ans et même au delà.

Les piscines de réacteurs dureront vraisemblablement plus longtemps que les réacteurs eux-mêmes.

Enfin, il a semblé utile de donner un tableau comparatif (Tableaux 6 et 7) de « foisonnement de stockage de produits de très haute activité », comparant les aires respectives en surface ou subsurface nécessaires au conditionnement des résidus, ramenés à la tonne de combustible Eau Légère déchargée de réacteur. La disposition des entreposages est supposée d'une hauteur de 15 mètres.

- L' écart est impressionnant : de 0,2 tonne·m⁻² pour une piscine réacteur, on passe à 21 tonne·m⁻² pour l'entreposage compact sous forme de conteneurs de verres (facteur 100) ;
- Un coefficient $R_0 \gg R_3$ tente de classer des degrés de robustesse à chaque technologie ;
- Dans tous les cas, les solutions ne sont pas antagonistes : l'importance primordiale est de conserver une harmonie entre ces potentiels d'entreposage déjà connus et utilisés :
 - dans les piscines Réacteurs (impératif de sûreté de déchargement),

- dans les piscines Déportées de déchargement pour recyclage,
- dans les entreposages de Conteneurs de produits de fission,
- dans les entreposages à sec, en installations déportées,
- dans les entreposages en NUOMS,
- dans les entreposages en châteaux, à proximité des centrales.

Sans omettre la création possible de stockages géologiques de longue durée.

Tableau 6. Entreposages « C »

Réacteurs	EDF/Piscines		0,4 t·m ⁻²		
Piscines (Fr et Et)	HAO → C, D	LH	3 → 4 t·m ⁻²	(> 30 ans)	R ₀
Verres Phase 1 (Et)	R7 → T	LH	9 t·m ⁻²	(50 ans)	R ₁
Verres Phase 2 (Fr)	E/EVT7	LH	21 t·m ⁻²	(> 100 ans)	R ₂ [*]
Entreposage A sec.	Cascad	CAD	0,3 t·m ⁻²	(50 ans)	R ₂

Tableau 7. REL ou autres (Mondial)

Verres Phase 2		21 t·m ⁻²		R ₂ [*]
Verres + EC/COVRA	NL HABOG	2,5 t·m ⁻²	(> 100 ans)	R ₂
Verres + EC/Châteaux	RFA, SW	4,7 t·m ⁻²	(50 ans)	R ₁
Piscine souterraine	Suède CLAB/SKB		(≫ 100 ans)	R ₃

Tableau 8. Conclusions—colis de type C

Les quantités produites sont maîtrisées
Les solutions d'entreposage existent : piscines réacteurs, déportées, puits csdv ...
Critère de robustesse des solutions
La solution retraitement est éprouvée et largement utilisée :
Réduction drastique du volume des colis
Consensus scientifique sur la durabilité des verres
L'élément combustible utilisé n'est pas un déchet
Le mono-recyclage Mox étend ++ le potentiel des piscines
La durée de vie des piscines réacteurs est supérieure à celle des réacteurs
Dans les 50 ans à venir toutes les solutions sont nécessaires
Dans 20 ans la majorité des EC sera en piscines
Le retour d'expérience de solutions autres que la matrice verre sera très faible.
Dans tous les cas (de pays à pays), les choix politiques seront incontournables
Besoins d'énergie
Sous produits (déchets nucléaires, effet de serre)
Essais démarrage dans le tiers monde
Non contradiction des choix/pays

Ces remarques sont évidemment pertinentes sur le parc Français, mais encore plus dans les parcs étrangers où les forces de dérégulation et les motivations environnementales peuvent bloquer les programmes d'optimisation (Tableau 8).

8. Conclusion

A la lumière de ce qui vient d'être exposé, deux évidences sont à souligner :

- Les quantités de combustibles à décharger dans les 15 années à venir sont très importantes, même dans l'hypothèse (étayée) où les États nucléaires restent à peu près les mêmes qu'aujourd'hui et que le pourcentage d'énergie nucléaire mondiale demeure à son modeste taux de l'an 2000.
- Aucun système de grande ampleur ne peut venir à la rescousse, dans un laps de temps si bref pour ce type d'industrie, des solutions actuelles qui permettent au cycle de ne pas gripper :
 - l'entreposage en piscine,
 - le retraitement, malgré son manque d'équipements installés,
 - l'entreposage « compact » des verres,
 - l'utilisation du MOX qui permet de dégager la place dans les piscines déportées,
 - l'entreposage à sec en installations déportée.

Il reste, bien sûr, l'entreposage en châteaux à proximité des centrales, mais ce ne peut être qu'un palliatif partiel au problème du choix robuste pour un stockage final.

Trente ans d'expérience ont néanmoins des retombées scientifiques très positives : la solution du retraitement est largement éprouvée. Elle réduit drastiquement le volume des colis. Il existe un consensus sur la durabilité des verres. Un EC usé n'est plus considéré comme un déchet (cf. US).

Le recyclage MOX est industriel et augmente de facto la capacité des piscines d'un facteur huit.

Tous les acteurs du cycle essaient, par ailleurs, de compacter leurs entreposages sous eau.

En résumé : dans 20 ans, la majorité des EC déchargés sera en piscines.

Le Retour d'Expérience de solutions autres que la matrice Verre sera faible.

Dans tous les cas (État par État), les choix Politiques à court ou long terme seront incontournables !

Discussion

Remarque de R. Dautray

Le Pu contenu dans les combustibles en piscine et celui potentiellement produit par capture de neutrons dans l' ^{238}U présent représente plus que la totalité des réserves connues de pétrole de la planète.

Réponse de W.J. Fournier

M. Dautray a tout à fait raison dans sa comparaison.

Si l'on considère qu'aux quantités de plutonium séparé à ce jour, s'ajoutent environ 200 000 tonnes de Pu et d'U8 dans ces combustibles, et que grossièrement on considère qu'un gramme de fissile équivaut à 1 million de tonnes d'équivalent pétrole transformé en électricité (qui plus est !!!). On doit estimer à environ 200 gigatep de pétrole « efficace » l'énergie contenue dans ces combustibles, à comparer aux réserves mondiales en pétrole estimées à 150 gigatep !!!

On pourrait même y rajouter les fameuses 11 000 tonnes annuelles et récurrentes qui, par l'extinction « passagère » des réacteurs à neutrons rapides, représentent une mine de capacité comparable au pétrole mis chaque année sur le marché (11 gigatep contre 4 à 5 pour le pétrole !) mais tout cela est une autre affaire puisqu'elle touche l'avenir lointain !

On pourrait rajouter avec le même facteur d'équivalence le tonnage mondial d'uranium appauvri qui n'attend que les réacteurs à neutrons rapides pour utiliser l'énergie contenue :

125 000 tonnes (REL) \times facteur 7 = 875 000 tonnes Uapp \gg soit 875 gigatep : cela représente l'ensemble des réserves mondiales de tous les combustibles fossiles répertoriées à ce jour (y compris le charbon, bien entendu, qui en représente les deux tiers).

Question de J.M. Kindelan

Vous indiquez une capacité de stockage à sec de 20 000 tonnes en 2015 : le stockage à sec ne serait-il pas capable de répondre à la totalité des besoins ?

Réponse de W.J. Fournier

La capacité de stockage a sec correspond, comme je l'ai dit à un parc raisonnable de châteaux de transports immobilisés sur les sites des centrales.

Deux remarques doivent être rajoutées : nous n'avons aucun retour d'expérience sérieux sur la qualité du confinement dans ces châteaux pendant une période qui ne peut pas être éternelle.

Par ailleurs, il est impensable en 13 ans d'installer et de remplir un stockage sec dédié pour des quantités qui vont avoisiner les 400 000 tonnes vers 2015.

Ma remarque reste pertinente : tout le monde essaie de compacter drastiquement les quantités de combustibles dans ses piscines existantes.