ENTREPOSAGE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE USÉ – STOCKAGE

1. ÉLÉMENTS DE CONCEPT

Pour la gestion du combustible usé, deux modes principaux de politique nationale sont développés dans le monde : le traitement des combustibles en vue du recyclage des matières valorisables dans de nouveaux combustibles **(cycle du combustible dit « fermé »)** ou le stockage direct dans des installations souterraines profondes, après une période d'entreposage à sec ou en piscine **« (cycle du combustible dit « ouvert »)** où le combustible usé est considéré comme un déchet[1].

Selon l'option retenue, les mouvements de combustibles suivent le cheminement indiqué dans la figure 1 ci-dessous. La présente fiche à pour objet de décrire les opérations d'entreposage ou de stockage figurant dans les cases bleues de ce diagramme.

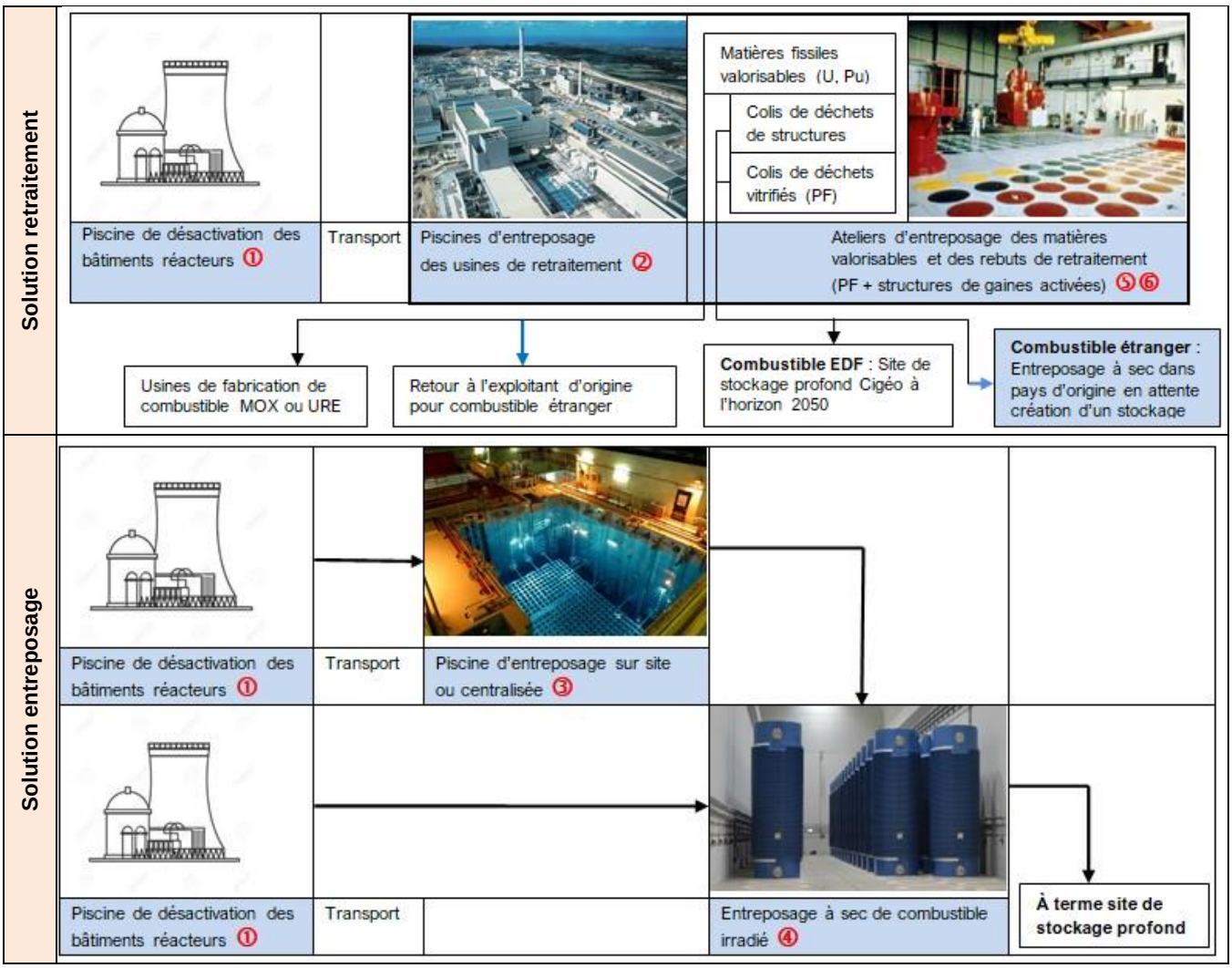

Figure 1 : Mouvements opérés par le combustible usé selon l'option retenue (retraitement ou entreposage)

[1] *Dans l'optique du développement durable, c'est le choix effectué par la France de récupérer les 96 % de matière valorisable d'un combustible usé, pour ne garder comme déchets finaux que les produits de fission et les actinides mineurs qui ne représentent que 4 % de la masse du combustible avant irradiation. De plus, au regard de la radioactivité des combustibles irradiés, pour atteindre le bruit de fond de l'uranium naturel : il faut 100.000 ans en conservant le plutonium dans les colis de déchets, 10.000 ans en l'extrayant.*

Les autres opérations figurant dans ce diagramme sont décrites dans :

- **la fiche argumentaire GAENA N° 3** : *Les déchets radioactifs*
- **la fiche argumentaire GAENA N° 7** : *Le traitement pour recyclage du combustible nucléaire usé en France.*
- **la fiche argumentaire GAENA N° 8** : *Le transport des matières radioactives*
- **la fiche argumentaire GAENA N° 64** : *Le projet CIGEO.*

2. TECHNIQUES D'ENTREPOSAGE EN VIGUEUR

2.1. Revue des différentes solutions d'entreposage sous eau

2.1.1 – Option retraitement

❖ **Piscines de décroissance (ou de désactivation) du bâtiment combustible (BK) du réacteur ①**

Ces piscines sont situées dans un bâtiment, dit bâtiment combustible, accolé au bâtiment réacteur. Elles ont vocation à refroidir le combustible usé après déchargement du cœur du réacteur (piscine BK en France) [voir Figure 2]. Les durées d'entreposage (dit de décroissance radioactive) des combustibles UNE et URE sont d'environ 18 mois et 30 mois pour le combustible MOX, avant leur transfert à l'usine de retraitement de La Hague en vue de leur recyclage[2]. À noter qu'à la différence des REP, seul le bâtiment BK de l'EPR de Flamanville est renforcé par une coque avion qui le protège, quelque soit l'angle et le point de chute de l'impact d'un avion de taille et de masse importante.

Pour faire face à la saturation des capacités d'entreposage des piscines attenantes aux réacteurs, plusieurs pays ont eu recours à une solution dite de compaction, consistant à remplacer les râteliers d'entreposage de combustibles par des râteliers plus compacts pour permettre d'entreposer plus de combustibles usés à encombrement équivalent.

Cette solution permet notamment d'attendre une décroissance suffisante de la puissance thermique des combustibles usés avant de les transférer dans des entreposages à sec. Elle est cependant peu appropriée sur les centrales EDF en raison de contraintes d'exploitation et de problèmes d'impact sur les ouvrages existants

Note : Les repères numériques des opérations énumérées dans les différents paragraphes qui suivent correspondent à ceux indiqués en chiffres rouges sur le diagramme général de page 1.

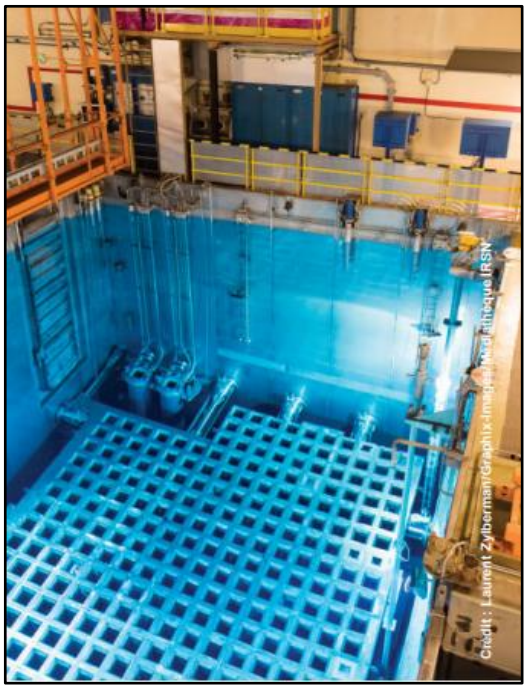

Figure 3 : Piscine de désactivation du combustible irradié dans l'usine de retraitement La Hague (Orano)

◄ **Figure 2 : Piscine de refroidissement des bâtiments combustibles usés des réacteurs (BK)**

❖ **Piscines d'entreposage des usines de traitement de combustible usé ②**

En cas de traitement des combustibles usés (cas de la France, du Japon et de la Russie), les usines correspondantes disposent de piscines permettant l'entreposage intermédiaire avant traitement, généralement entre cinq et dix ans après déchargement du réacteur, afin de poursuivre leur refroidissement (voir Figure 3).

[2] *UNE : combustible fabriqué à partir d'uranium extrait d'une mine puis enrichi ; URE : combustible fabriqué avec de l'uranium récupéré lors des opérations de recyclage puis ré-enrichi ; MOX : combustible contenant un mélange d'oxyde de plutonium (récupéré lors du retraitement) et d'oxyde d'uranium (provenant des activités minières).*

Le site d'Orano La Hague dispose de quatre piscines d'entreposage des combustibles usés : la piscine dite NPH (Nouvelle Piscine de la Hague) et les piscines C, D et E. Les différentes piscines communiquent entre elles. Elles permettent le refroidissement complémentaire des combustibles UNE avant recyclage ainsi que l'entreposage des combustibles URE et MOX qui ne font pas l'objet d'un traitement à l'heure actuelle. Les combustibles neufs et usés RNR de Superphénix sont entreposés dans la piscine de l'APEC à Creys-Malville), dans l'optique d'un traitement différé.

2.1.2 – Option entreposage de longue durée sur site ou centralisé

❖ Entreposage sous eau sur site ③

Une autre solution, pour augmenter les capacités d'entreposage sous eau attenantes aux réacteurs, consiste à créer une piscine d'entreposage supplémentaire de site dans laquelle les combustibles usés sont réputés rester plus de 40 ans. Le transfert depuis les piscines des réacteurs vers ces installations est réalisé à l'aide d'un emballage dans lequel le combustible usé est maintenu sous eau. Le recours à cette alternative est peu développé à l'international, mais quelques exemples peuvent être cités (Gösgen en Suisse, Tihange en Belgique, Olkiluoto en Finlande [voir Figures 4 et 5]).

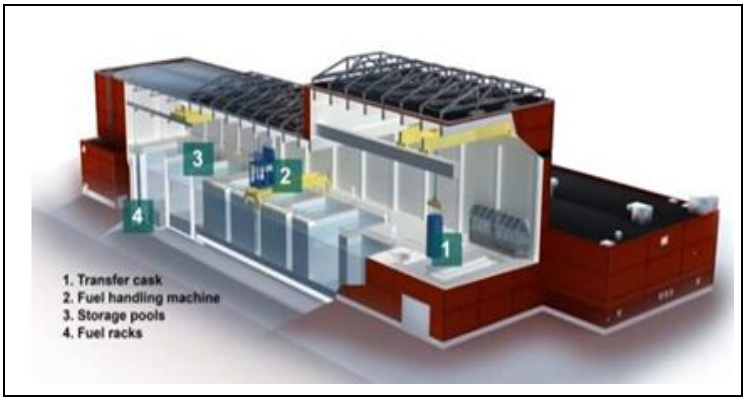

Figure 4 : Vue écorchée de la piscine d'entreposage TVO-KPA-STORE (site d'Olkiluoto – Finlande)

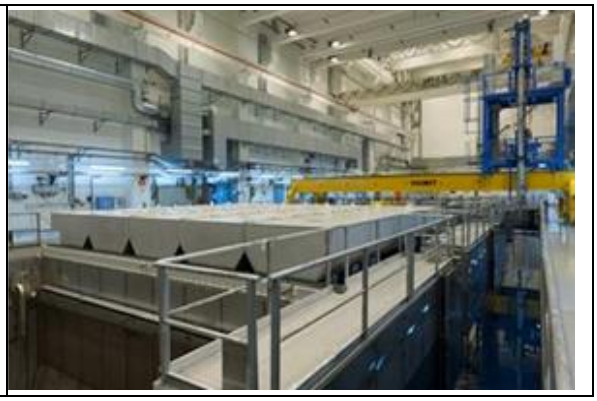

Figure 5 : Piscine d'entreposage dénommée TVO-KPA-STORE (site d'Olkiluoto – Finlande)

❖ Entreposage sous eau centralisé ③

À l'international comme en France, plusieurs installations d'entreposage sous eau centralisé existent ou sont en projet. Elles ont pour objectif de permettre un entreposage d'attente en prévision d'un choix quant à leur devenir (futur traitement ou stockage direct).

● À l'étranger

Parmi les installations opérationnelles à l'international, il convient de citer l'installation CLAB10[3] à Oskarshamn (Suède), exploitée par SKB depuis 1985.

L'originalité de cette installation, dans laquelle l'ensemble des combustibles usés issus de l'exploitation des centrales suédoises est entreposé dans l'attente de son stockage, réside dans son implantation souterraine (Figure 6).

Les piscines d'entreposage sont situées à 30 m de profondeur et le combustible usé, placé dans des paniers, est recouvert par huit mètres d'eau. La capacité initiale de l'installation de 8.000 tonnes de métal lourd a été portée à 11.000 tonnes (en généralisant l'utilisation de paniers compacts).

Figure 6 : Vue des piscines de l'installation CLAB à Oskarshamn (Suède)

● En France

Un projet de construction d'une seconde piscine d'entreposage à La Hague est à l'étude par EDF (voir Figure 7). Il s'agit d'une piscine d'entreposage centralisée, destinée à recevoir en particulier les combustibles usés MOX et URE (incluant ceux actuellement entreposés à La Hague), dont le traitement n'est pas envisagé à court ou moyen terme. Sa durée d'exploitation couvrirait une centaine d'années. EDF envisage également que cette piscine permette, si besoin, l'entreposage des combustibles RNR usés issus du fonctionnement du réacteur Superphénix, ainsi que l'entreposage transitoire de combustibles UNE usés.

[3] CLAB pour Centralt Lager för Använt Bränsle (Entreposage centralisé de combustible usé).

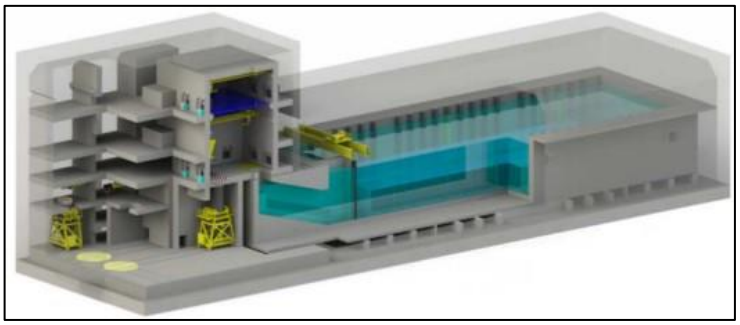

Figure 7 : Vue écorchée du projet de nouvelle piscine de La Hague (EDF) - Image EDF®

Cette piscine aura une capacité de l'ordre de 10.000 tmli[4] répartie entre deux bassins. Les bâtiments hébergeant les bassins enterrés, seront équipés de parois renforcées devant résister aux agressions externes (coque avion). Ils pourront comporter une modulation du type entreposage à sec dans des conteneurs TN Eagle® initialement prévus pour le transport.

La conception de la piscine sera a priori proche de celles existant dans l'établissement Orano de La Hague, avec notamment l'utilisation de paniers d'entreposage et un système de refroidissement avec échangeurs immergés.

2.2. Revue des différentes solutions d'entreposage à sec ④

Comme pour l'entreposage sous eau, l'entreposage à sec peut être réalisé sur le site du réacteur ou sur un site centralisé qui nécessite alors des transports sur la voie publique. Les opérations de chargement des combustibles usés en emballages ou conteneurs peuvent être réalisées à partir d'une piscine d'entreposage de combustibles usés, notamment celles associées aux réacteurs, ou d'une installation spécifique (conditionnement à sec par exemple). Trois principaux concepts d'entreposage à sec existent.

❖ Entreposage en casemates regroupant des puits[5]

L'entreposage en casemates avec puits (parfois dénommés alvéoles) est réalisé dans des installations construites en surface ou semi-enterrées, pouvant être constituées de structures en béton ou en métal, dont les parois assurent la protection radiologique des opérateurs et de l'environnement contre les rayonnements ionisants ainsi que la protection contre les agressions externes.

Il s'agit essentiellement de bâtiments dans lesquels les combustibles usés, introduits dans des conteneurs étanches, sont placés dans des puits. Une circulation d'air autour des puits permet d'extraire la puissance thermique des combustibles usés et de garantir une température maximale pour ceux-ci et les structures de l'entreposage. Un exemple d'installation représentative du concept d'entreposage en puits est le MVDS (*Modular Vault Dry Stor*) de la centrale nucléaire de Paks en Hongrie, mise en exploitation en 1997 pour une durée de 50 ans. Il est dédié à l'entreposage à sec des combustibles usés des quatre tranches VVER du site (voir Figure 8).

Ce concept MVDS a également été mis en œuvre pour l'entreposage des combustibles usés provenant du réacteur de puissance à haute température refroidi au gaz (*high temperature gas cooled reactor* - HTGR) du site de Fort St Vrain (USA) et arrêté en 1998 (voir Figure 9).

En France il convient de citer l'installation Cascad à Cadarache destinée à l'entreposage des combustibles pour lesquels aucun traitement n'est prévu (assemblages EL4).

Figure 8 : Vue de l'entreposage MVDS du site nucléaire de Paks (Hongrie)

Figure 9 : Vue de l'extérieur de l'entreposage de type MVDS du Fort St. Vrain (États-Unis)

[4] *Le **t**onnage de **m**étal **l**ourd correspond à la masse avant **irradiation** du combustible nucléaire sans ses structures et sans l'oxygène auquel il est associé.*

[5] *Le terme anglais consacré est « vault storage », soit, textuellement, « entreposage en voûte » ; il apparaît plus explicite et approprié d'utiliser le terme « entreposage en casemate ».*

❖ Entreposage en silos

Les silos sont des structures en béton disposant de cavités (ou alvéoles) dans lesquelles sont placés les conteneurs renfermant les combustibles usés. Ce sont des structures modulaires contenant chacune un conteneur. Elles sont destinées à l'entreposage et indépendantes des installations nucléaires du site.

Un exemple représentatif du concept d'entreposage en silos de surface à chargement vertical est le MACSTOR® d'AECL (voir Figure 10), développé au Canada sur le site de Gentilly pour le stockage des combustibles CANDU. Il existe aussi des concepts de silos à chargement horizontal, tels que le système NUHOMS® d'Orano TN aux USA (voir Figure 11).

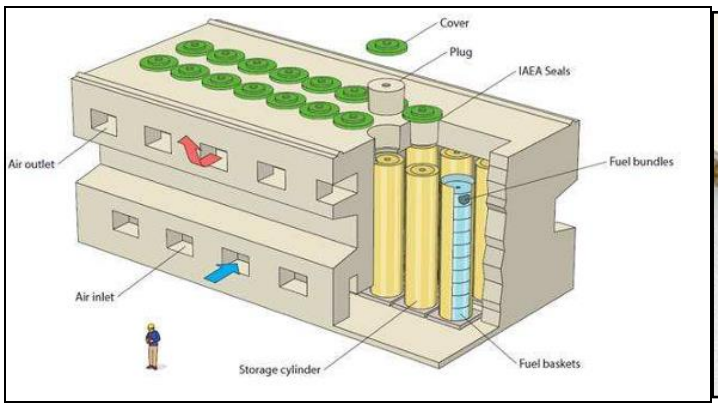

Figure 10 : Vue du concept d'entreposage MACSTOR d'entreposage MACSTOR® à chargement vertical

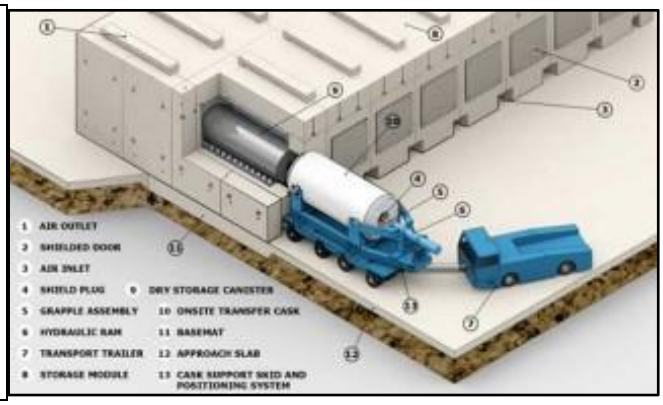

Figure 11 : Schéma d'un module NUHOMS® à chargement horizontal

❖ Entreposage en emballages

● Entreposage sur site

Ce concept concerne les emballages de transport et d'entreposage, dits « à double usage » (*dual purpose cask*). Ces emballages répondent d'une part aux exigences réglementaires du transport de matières radioactives sur la voie publique, d'autre part aux exigences de sûreté des sites d'entreposage. Deux types d'emballages sont utilisés : les emballages métalliques et les emballages en béton.

De nombreux concepts d'emballages métalliques à double usage existent, dont la famille de CASTOR® de GNS et la famille des TN®24 d'Orano TN, qui permettent d'entreposer des combustibles REB ou REP pour une puissance thermique totale pouvant aller jusqu'à 40 kW (voir Figures 12 et 13). Ce procédé d'entreposage sur site en emballages CASTOR® est également utilisé en République Tchèque (centrale VVER de Dukovany) et en Lituanie (centrale RBMK d'Ignalina).

Figure 12 : Vue intérieure des TN®24 dans le bâtiment d'entreposage à sec du site de Doel (Belgique)

Figure 13 : Vue de l'entreposage des CASTOR® V/19 en tunnel de Neckarwestheim (Allemagne)

● Entreposage centralisé

Des variantes dédiées à des **entreposages centralisés** à sec en emballages existent, dont:

- ceux des sites de Gorleben et Ahaus (Allemagne), dédiés à l'entreposage des combustibles REP et REB ainsi qu'aux colis de déchets HA vitrifiés dans des emballages CASTOR®. Ces deux sites peuvent accueillir jusqu'à 420 emballages (voir Figure 14).

- ceux du site de Zwilag (Suisse) dédié à l'entreposage de combustibles REP (y compris MOX) et aux colis de déchets vitrifiés dans des emballages TN®24 (Orano TN). Ce site peut accueillir jusqu'à 200 emballages, ce qui correspond à 50 années de production des 5 réacteurs suisses (voir Figure 15).

Figure 14 : Vue de l'intérieur de l'entreposage centralisé du site de Gorleben (Allemagne)

Figure 15 : Vue de l'intérieur de l'entreposage centralisé du site de Zwilag (Suisse)

2.3. Revue des différentes solutions d'entreposage des résidus de retraitement ⑤

❖ Entreposage des colis de déchets vitrifiés

À l'issue du processus de retraitement, les produits de fission et les actinides mineurs (Am, Cm, Np) issus des combustibles UNE et URE sont séparés de l'uranium et du plutonium, puis calcinés et incorporés dans une matrice de verre. Le mélange est conditionné dans un Conteneur Standard de Déchets Vitrifiés **(CSD-V)** en inox.

Figure 16 : Entreposage des colis de déchets vitrifiés de Marcoule

Figure 17 : Conteneur de déchets vitrifiés ► (CDS-V) et compactés (CDS-C)

Les conteneurs contenant ces déchets vitrifiés sont entreposés dans des ateliers dédiés en puits ventilés permettant leur refroidissement.

Ces déchets de produits de fission et d'actinides mineurs sont classés en catégorie haute activité (déchets HA).

Les déchets vitrifiés issus de la filière UNGG sont entreposés sur le site de Marcoule (Figure 16) de manière identique à ceux de La Hague.

Ces conteneurs sont destinés à être transférés à terme dans le centre de stockage profond de déchets radioactifs de CIGEO, à l'issue d'une période minimale d'entreposage estimée à 70 ans, délai nécessaire au refroidissement des colis. Les conteneurs CDS-V attribués aux clients étrangers leur sont expédiés en application de la réglementation française en vigueur, via des emballages d'entreposage à sec identiques à ceux utilisés pour les combustibles usés.

❖ Entreposage des colis de déchets de structures métalliques

Les déchets de structures métalliques activées concernent les coques (tronçons de gaines) et les embouts issus des assemblages combustibles. Ces déchets sont de « moyenne activité » à « à vie longue » (déchets MA-VL). Ils sont compactés sous forme de galettes puis placés dans des Conteneurs Standards de Déchets Compactés **(CSD-C)** en inox, identiques à ceux utilisés pour la vitrification (voir Figure 17). Ces colis sont entreposés sur le site de La Hague dans un entrepôt dédié, en attente d'être expédiés vers le stockage profond CIGEO, dans une échéance plus rapprochée que celle des colis vitrifiés.

Comme pour les colis précédents, les conteneurs CDS-C attribués aux clients étrangers leur sont expédiés en application de la réglementation française en vigueur, via des emballages appropriés prévus pour le transport et l'entreposage à sec.

3. CONCLUSION

Les deux concepts d'entreposage temporaire évoqués dans la présente fiche, à savoir l'entreposage en piscine et l'entreposage à sec avant stockage final en couches géologiques ont des atouts et des facteurs limitant qui leur sont propres.

- **L'entreposage en piscine** est particulièrement adapté aux combustibles présentant une forte puissance thermique unitaire et donc ne pouvant rester sous air sans dégradation des gaines de combustibles. L'eau a en effet un pouvoir caloporteur élevé et les systèmes actifs de refroidissement l'utilisant permettent de maintenir à des valeurs basses les températures des gaines des combustibles. De plus, une piscine offre une inertie thermique importante, facilitant la mise en œuvre de moyens de secours en cas de perte des systèmes de refroidissement.
- **L'entreposage à sec** est réservé aux combustibles suffisamment refroidis (environ 2 kW en moyenne par combustible pour les concepts actuels). Il présente, de ce fait, l'intérêt de faire généralement appel à des systèmes de refroidissement passifs, ce qui limite les contraintes d'exploitation. Il se prête particulièrement bien à une construction modulaire, s'adaptant aux besoins, voire permettant le remplacement de modules anciens au cours du temps.
  Ce type d'entreposage présente l'avantage d'une conception plus simple et robuste et limite les opérations d'exploitation. En revanche, il a pour limite sa capacité d'évacuation de la puissance thermique des combustibles usés.

Quelle que soit l'option retenue, il est impératif d'avoir à l'esprit que ces entreposages ne sont pas définitifs (ils ont une durée limitée dans le temps) et doivent de ce fait être complétés par un système de stockage final en couches géologiques profondes. Cette contrainte peut poser des problèmes d'acceptabilité de la population difficilement gérable par les décideurs (voir l'exemple allemand dans l'encadré ci-dessous).

Imbroglio allemand autour des 152 CASTOR® du site d'entreposage de Jülich

Depuis 2014, 152 emballages Castor contenant le combustible usé de la centrale HTR (arrêtée depuis 1988) du Centre de recherche de Jülich (Rhénanie-du-Nord-Westphalie) se trouvent en situation illégale d'entreposage, le site d'entreposage ayant perdu son agrément, en raison de non-conformités (sismiques notamment). Depuis, les autorités allemandes tergiversent pour choisir un site de stockage définitif des déchets radioactifs de forte activité.

Dans l'attente de ce site de stockage final, deux options temporaires pour sortir de l'impasse sont sur la table :

- Transport des 152 emballages Castor vers le centre d'entreposage temporaire voisin de Ahaus (autorisation valide jusqu'en 2036). À raison d'un transport par camion, le processus durerait environ deux ans et son coût est estimé à 200 M€.
- Construction d'un nouveau site d'entreposage temporaire à Jülich. Son coût est estimé à 450 M€ et le chantier durerait près de neuf ans.

4. RÉFÉRENCES

[Réf. 1] **Fiche argumentaire GAENA N° 3** : *Les déchets radioactifs*

[Réf. 2] **Fiche argumentaire GAENA N° 7** : *Le traitement par recyclage du combustible irradié*

[Réf. 3] **Fiche argumentaire GAENA N° 8** : *Le transport des matières radioactives*

[Réf. 4] **Fiche argumentaire GAENA N°64** : *Le projet CIGEO.*

[Réf. 5] **Livre VII de l'ANCCLI**. Entreposage du combustible nucléaire : Les piscines et leurs enjeux, Octobre 2021

[Réf. 6] **https://www.ccomptes.fr/fr/publications/ :** L'aval du cycle du combustible nucléaire : Les matières et les déchets radioactifs, de la sortie du réacteur au stockage

[Réf. 7] **https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_du_combustible_use**

[Réf. 8] **https://laradioactivite.com/dechets_radioactifs/entreposagestrategie**

[Réf. 9] **https://www.orano.group/fr** : *Traitement & recyclage des combustibles usés : Ce qu'il faut retenir*

[Réf. 10] **https://www.irsn.fr/** : *Entreposage du combustible nucléaire usé : Concepts et enjeux de sûreté – Rapport IRSN n°2018-00003*