

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE*Faire avancer la sûreté nucléaire*

Entreposage du combustible nucléaire usé : concepts et enjeux de sûreté

Rapport IRSN n° 2018-00003

Rapport établi en réponse à une saisine de la Commission d'enquête parlementaire sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires

Juin 2018

RÉSUMÉ DU RAPPORT

Le Président de la Commission d'enquête parlementaire sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires, créée par l'Assemblée nationale en 2018, a sollicité, par lettre du 26 mars 2018, l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les enjeux associés, en termes de sûreté nucléaire, à une stratégie de gestion du combustible nucléaire irradié (également appelé combustible usé) reposant sur un entreposage de celui-ci en piscine (ou sous eau) uniquement ou faisant appel à des entreposages à sec.

L'IRSN a examiné les concepts d'entreposage, sous eau et à sec, existant à l'international et en France, ainsi que les enjeux de sûreté associés aux différentes solutions d'entreposage des combustibles usés que ce soit à sec ou sous eau, mais également sur site ou de manière centralisée.

De cet examen, l'IRSN retient les principaux points ci-après.

Les combustibles usés issus des réacteurs électronucléaires doivent faire l'objet d'une phase intermédiaire d'entreposage à la suite de leur déchargement du réacteur. En effet, leur puissance thermique initiale est trop élevée et une décroissance des radioéléments contenus permettant une baisse graduelle de cette puissance est nécessaire pour pouvoir, d'abord les transporter, ensuite les mettre en œuvre dans la filière de gestion retenue. Ainsi, dans tous les cas, un premier entreposage a lieu dans la piscine de désactivation associée au réacteur. Ensuite, selon le choix de gestion effectué (traitement ou pas), deux pratiques sont mises en œuvre de par le monde.

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 avant traitement (généralement entre cinq et dix ans après déchargement du réacteur). L'utilisation d'un tel type d'entreposage est essentiellement liée aux procédés de ces usines, les piscines recevant les combustibles étant directement reliées aux ateliers de traitement. De plus, ces piscines sont généralement de capacité importante pour assurer un découplage entre l'usine et les réacteurs et un refroidissement complémentaire. Une fois séparés, l'uranium et le plutonium sont destinés à un recyclage sous forme de combustibles à base de plutonium (MOX) ou d'uranium de retraitement réenrichi en isotope 235 de l'uranium (URE). Le mode d'entreposage des combustibles MOX et URE usés dépend alors du devenir envisagé de ces combustibles dans les pays concernés.

En l'absence de traitement des combustibles usés (cas le plus fréquent dans le monde), les combustibles déchargés sont généralement, après un refroidissement suffisant en piscine, placés dans des entreposages à sec. Les concepts d'entreposage actuels sont basés sur une puissance thermique moyenne des combustibles voisine de 2 kW. Dans une certaine mesure, ces concepts devraient toutefois pouvoir être adaptés.

Ainsi, la puissance thermique unitaire des combustibles à entreposer est un élément déterminant pour définir les types d'entreposage envisageables. L'entreposage en piscine est impératif pour les combustibles peu refroidis et l'entreposage à sec convient bien aux combustibles très refroidis.

En tout état de cause, ces deux types d'entreposage sont complémentaires, mais le choix de l'un ou de l'autre après une phase initiale de refroidissement nécessairement en piscine, dépend largement des choix nationaux en termes de gestion des combustibles usés.

En France, le choix d'utiliser l'entreposage en piscine est tout d'abord lié à la décision de traiter les combustibles usés pour en recycler le plutonium et l'uranium.

Les combustibles à base d'oxyde d'uranium (UNE) usés sont traités et donc entreposés en attente dans les piscines des usines ORANO Cycle de La Hague. Les combustibles URE et MOX usés sont gérés de manière similaire, mais leur traitement est différé. En l'attente de décisions sur leur devenir, EDF prévoit la création d'une piscine d'entreposage centralisé des combustibles MOX et URE usés, pour une durée d'une centaine d'années.

Les combustibles URE usés présentent des caractéristiques comparables à celles des combustibles UNE usés. Les combustibles UNE actuellement utilisés par EDF pourraient, dans les concepts actuels, être entreposés à sec après environ cinq ans de refroidissement. Cependant, au regard du temps restant avant traitement, l'intérêt de l'utilisation de ce type d'entreposage paraît limité. En cas d'indisponibilité prolongée d'une usine de traitement des combustibles usés (conduisant à une saturation à terme des capacités d'entreposage existantes), le recours à de tels entreposages pourrait toutefois être une solution.

Les combustibles MOX chargés en réacteur ont une teneur élevée en plutonium pour obtenir un taux de combustion équivalent à celui des combustibles UNE auxquels ils sont associés en réacteur. Du fait de cette teneur en plutonium et de sa composition isotopique, les combustibles MOX usés ont une puissance thermique plus élevée. En raison d'une teneur en transuraniens plus élevée, cette puissance décroît aussi moins vite. Leur temps de refroidissement avant de pouvoir être placés en entreposage à sec est ainsi nettement plus long que pour les combustibles UNE usés, soit plusieurs dizaines d'années pour atteindre une puissance thermique par combustible de 2 kW. Un recours à des entreposages à sec pourrait donc être envisagé au-delà de cette période de temps.

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. 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.

Les exigences majeures de sûreté d'un entreposage en piscine sont le maintien d'un inventaire en eau suffisant dans la piscine et la disponibilité de systèmes de refroidissement en toutes circonstances plausibles. En effet, du fait de la forte puissance unitaire des combustibles usés contenus, une perte prolongée de refroidissement sans apport d'eau pourrait entraîner des conséquences très importantes pour l'environnement, avec une impossibilité d'accéder au proche voisinage de la piscine du fait du débit de dose induit par les combustibles, en l'absence d'atténuation des rayonnements par l'eau.

En conséquence, une piscine d'entreposage, notamment si elle reçoit des combustibles usés peu refroidis, doit faire l'objet d'une conception particulièrement robuste, avec des marges suffisantes pour faire face aux risques envisageables, et d'une exploitation permettant une surveillance adaptée, tant de l'installation que des combustibles présents.

Le retour d'expérience de l'accident de Fukushima a permis de renforcer encore les approches de sûreté pour maîtriser ces risques, en visant le maintien en eau des combustibles en situations extrêmes d'origine naturelle.

Les techniques industrielles actuelles permettent de réaliser des piscines assurant la maîtrise des risques de découverture des combustibles, les bâtiments abritant la piscine assurant la protection contre les agressions externes (coque « avion » notamment).

La durée caractéristique de réalisation d'une telle installation peut être estimée à une dizaine d'années, au vu du retour d'expérience actuel des installations nucléaires construites en France.

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, et se prête particulièrement bien à une construction modulaire, s'adaptant aux besoins, voire permettant le remplacement de modules anciens au cours du temps.

Les exigences de sûreté sont le maintien du refroidissement passif et la qualité des barrières de confinement entre les matières radioactives et l'environnement.

Ce type d'entreposage présente l'avantage d'une conception plus simple et robuste et limite les opérations d'exploitation. Selon la conception, la surveillance directe de l'état des gaines des combustibles (la première barrière de confinement), qui sont soumises à des conditions thermiques plus pénalisantes, n'est en général pas possible.

En tout état de cause, en cas d'accident, le nombre de combustibles concernés, moins important, et la puissance thermique de ces combustibles, plus faible, entraîneraient des conséquences plus limitées pour l'environnement.

La durée caractéristique de la réalisation d'une telle installation peut être estimée à environ cinq ans, en fonction notamment de la modularité de l'installation et du recours ou non à des concepts d'emballage existants.

Par ailleurs, quel que soit le type d'entreposage, la prise en compte d'une durée d'entreposage significativement plus longue que les durées usuellement retenues (quelques dizaines d'années) nécessitera la définition d'exigences adaptées (notamment en termes de conception des ouvrages de génie civil et de marges de sûreté).

Pour l'IRSN, un point particulièrement important pour la sûreté des opérations de gestion des combustibles usés est la maîtrise du vieillissement des gaines des combustibles à base de zirconium, qui dépend de la température d'entreposage. En effet, ces gaines constituent la première barrière de confinement des matières radioactives. En outre, leur tenue mécanique est importante pour les opérations intervenant après la phase d'entreposage (transport, traitement ou mise en stockage).

Sur ce point, les entreposages sous eau présentent des garanties, du fait des températures d'entreposage faibles et des possibilités d'examen direct des gaines. En outre, des parades (mise en surconteneur du combustible défaillant...) peuvent être mises en œuvre en cas de détection de phénomènes de vieillissement. Le retour d'expérience disponible en France et dans le monde sur le comportement des gaines sous eau est significatif, du moins sur une période de quelques dizaines d'années.

Dans les entreposages à sec, la capacité d'examen direct et aisé des gaines de combustibles est plus réduite. Les contrôles réalisés sont au mieux indirects (absence de relâchement de gaz dans la cavité de l'emballage...), voire impossibles (cas des conteneurs soudés étanches contenant les combustibles et constituant la seconde et ultime barrière de confinement) ; ils ne permettent pas une détection d'un mécanisme de vieillissement.

Dans ce cas, la garantie de la maîtrise du vieillissement des gaines repose tout particulièrement sur des études, qui ont notamment permis de définir la température maximale acceptable des gaines en entreposage. Les examens de combustibles réalisés jusqu'à présent et dont l'IRSN a eu connaissance n'ont pas mis en cause ces études. Toutefois, de nombreuses études se poursuivent. En outre, les éléments disponibles pour les combustibles présentant des taux de combustion élevés (supérieurs à 45 GWj/t), pour les combustibles MOX (notamment de teneur initiale en plutonium importante) et globalement pour de longues durées d'entreposage (plus de 40 ans) sont limités.

En conclusion, l'IRSN retient qu'un choix de type d'entreposage de combustibles usés doit être apprécié au regard des considérations suivantes.

Les deux types d'entreposage de combustibles usés envisageables (sous eau ou à sec) ne répondent pas totalement aux mêmes besoins, l'entreposage en piscine étant impératif pour les combustibles peu refroidis et l'entreposage à sec convenant bien aux combustibles très refroidis.

Le type de combustible usé (UNE, MOX, URE) influe sur le choix du type d'entreposage à retenir, au minimum durant une certaine période de temps, les combustibles MOX présentant une puissance thermique plus élevée pendant une durée plus longue.

Du point de vue de la sûreté, quel que soit le type d'entreposage, le paramètre déterminant est la puissance thermique des combustibles entreposés. À cet égard, les entreposages en piscine, qui contiennent en général des combustibles plus chauds, nécessitent des dispositions de sûreté plus importantes que les entreposages à sec plus passifs. Dans ces derniers, les gaines (première barrière de confinement) sont plus sollicitées thermiquement et moins aisément contrôlables.

Table des matières

TABLE DES ILLUSTRATIONS	7
1 PRÉSENTATION DE LA SAISINE ET DE LA DÉMARCHE DE L'IRSN	10
2 ÉLÉMENTS DE CONTEXTE.....	10
3 GÉNÉRALITÉS SUR LES INSTALLATIONS D'ENTREPOSAGE.....	14
4 ENTREPOSAGE SOUS EAU	17
4.1 Concepts d'entreposage sous eau	17
4.2 Fonctions de sûreté des installations d'entreposage sous eau.....	18
4.3 Entreposage sous eau sur site	21
4.4 Entreposage sous eau centralisé.....	25
4.5 Atouts et facteurs limitants de l'entreposage sous eau	27
4.5.1 Atouts de l'entreposage sous eau	27
4.5.2 Facteurs limitants de l'entreposage sous eau.....	28
5 ENTREPOSAGE À SEC	29
5.1 Concepts d'entreposage à sec	29
5.1.1 Entreposage à sec en casemates ou puits.....	29
5.1.2 Entreposage à sec en silos.....	30
5.1.3 Entreposage à sec en emballages	31
5.2 Fonctions de sûreté de l'entreposage à sec.....	32
5.3 Entreposage à sec sur site	33
5.3.1 Entreposage à sec sur site en casemates ou puits.....	33
5.3.2 Entreposage à sec sur site en silos	35
5.3.3 Entreposage à sec sur site en emballages	39
5.4 Entreposage à sec centralisé	43
5.4.1 Entreposage à sec centralisé en casemates ou puits.....	43
5.4.2 Entreposage à sec centralisé en silos.....	45
5.4.3 Entreposage à sec centralisé en emballages	45
5.5 Atouts et facteurs limitants de l'entreposage à sec.....	47

5.5.1	Atouts de l'entreposage à sec	47
5.5.2	Facteurs limitants de l'entreposage à sec	47
6	CONCLUSION	49
ANNEXE 1	SAISINE	53
ANNEXE 2	ÉTAT DES LIEUX DES PRATIQUES À L'INTERNATIONAL	55
ANNEXE 3	LE CYCLE DU COMBUSTIBLE FRANÇAIS.....	63
ANNEXE 4	PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES ENTREPOSAGES SOUS EAU ET À SEC	64

Table des illustrations

Figure 1 : Courbes de décroissance de la puissance thermique d'un combustible UOX et d'un combustible MOX, irradiés dans un REP en France.....	12
Figure 2 : Photo d'une piscine BK	13
Figure 3 : Photo de l'une des piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague	13
Figure 4 : Durée de refroidissement nécessaire avant entreposage à sec, pour des combustibles irradiés dans un REP en France.....	16
Figure 5 : Principe de déchargement des combustibles, sous eau ou à sec.....	19
Figure 6 : Vue de l'intérieur de la cellule de déchargement à sec de l'atelier T0 de l'établissement Orano Cycle de La Hague.....	19
Figure 7 : Vue en coupe des piscines du bâtiment du réacteur (BR) et du bâtiment du combustible (BK)	22
Figure 8 : Vue écorchée de la piscine d'entreposage dénommée TVO-KPA-STORE (site d'Olkiluoto - Finlande).....	24
Figure 9 : Photo de la piscine d'entreposage dénommée TVO-KPA-STORE (site d'Olkiluoto - Finlande).....	24
Figure 10 : Photo de la piscine du « bâtiment de stockage des combustibles » de la centrale de Gösgen (Suisse).....	24
Figure 11 : Photos des piscines du bâtiment centralisé d'entreposage intermédiaire sous eau de la centrale de Tihange (Belgique)	24
Figure 12 : Vue écorchée de l'installation CLAB à Oskarshamn (Suède).....	25
Figure 13 : Photo des piscines de l'installation CLAB à Oskarshamn (Suède).....	25
Figure 14 : Représentation schématique de l'implantation des piscines d'entreposage de l'établissement Orano Cycle de La Hague.....	26
Figure 15 : Vue conceptuelle d'un projet d'entreposage aux États-Unis.....	30
Figure 16 : Vue écorchée du concept MVDS (<i>Modular Vault Dry Store</i>)	34
Figure 17 : Photo de l'entreposage MVDS du site nucléaire de Paks (Hongrie).....	34
Figure 18 : Photo des puits de l'entreposage MVDS du site nucléaire de Paks (Hongrie)	34
Figure 19 : Photo de l'extérieur de l'entreposage de type MVDS sur le site de Fort St. Vrain (États-Unis)	34
Figure 20 : Photo de l'intérieur de l'entreposage de type MVDS sur le site de Fort St. Vrain (États-Unis)	34
Figure 21 : Schéma d'un module NUHOMS®	35
Figure 22 : Photo d'un entreposage de type modules NUHOMS® sur le site de San Onofre (États-Unis)	35
Figure 23 : Vue écorchée du concept d'entreposage MACSTOR®	36
Figure 24 : Photo d'un entreposage de type MACSTOR® à Gentilly (Canada).....	36
Figure 25 : Photo d'un entreposage de type MACSTOR® à Wolsong (Corée du Sud)	36
Figure 26 : Photo de l'entreposage DICA de type MACSTOR® à Cernavoda (Roumanie).....	36

Figure 27 : Vue écorchée du concept HI-STORM UMAX	37
Figure 28 : Vue écorchée d'un puits du concept HI-STORM UMAX.....	37
Figure 29 : Entreposage de type HI-STORM UMAX - Centrale de Callaway (États-Unis)	37
Figure 30 : Vue écorchée de l'installation WMA « B » à Chalk River (Canada)	37
Figure 31 : Vue écorchée du concept HI-STORM 100	38
Figure 32 : Photo d'un entreposage utilisant le concept HI STORM 100.....	38
Figure 33 : Entreposage sur le site de Point Lepreau (Canada) utilisant le silo béton de la société AECL.....	38
Figure 34 : Entreposage sur le site de Whiteshell (Canada) utilisant le silo béton de la société AECL.....	38
Figure 35 : Entreposage sur le site d'Embalse (Argentine) utilisant le silo béton de la société AECL	39
Figure 36 : Entreposage sur le site de Wolsong (Corée du Sud) utilisant le silo béton de la société AECL	39
Figure 37 : Vue écorchée de l'emballage TN [®] 24 DH en configuration Transport	39
Figure 38 : Vue écorchée de l'emballage TN [®] 24 DH en configuration Entreposage	39
Figure 39 : Photo extérieure du bâtiment d'entreposage à sec du site de Doel (Belgique).....	40
Figure 40 : Photo de TN [®] 24 DH entreposés dans le bâtiment d'entreposage à sec du site de Doel (Belgique).....	40
Figure 41 : Vue écorchée de l'emballage CASTOR [®] V/19	40
Figure 42 : Vue écorchée de l'emballage CASTOR [®] V/52	40
Figure 43 : Plan de masse du concept « WTI/GNS »	41
Figure 44 : Vue en coupe du concept « WTI/GNS »	41
Figure 45 : Photo extérieure d'un bâtiment d'entreposage de type « WTI/GNS »	41
Figure 46 : Photo intérieure d'un bâtiment d'entreposage de type « WTI/GNS »	41
Figure 47 : Plan de masse du concept « STEAG »	41
Figure 48 : Vue en coupe du concept « STEAG »	41
Figure 49 : Photos extérieure et intérieure d'un bâtiment d'entreposage de type « STEAG »	41
Figure 50 : Plan de masse de l'entreposage en tunnel de Neckarwestheim (Allemagne).....	42
Figure 51 : Vue en coupe de l'entreposage en tunnel de Neckarwestheim (Allemagne)	42
Figure 52 : Photos extérieure et intérieure de l'entreposage en tunnel de Neckarwestheim (Allemagne).....	42
Figure 53 : Entreposage en emballages CASTOR [®] sur le site de la centrale de Dukovany (Rép. Tchèque)	42
Figure 54 : Entreposage en emballages CASTOR [®] sur le site de la centrale d'Ignalina (Lituanie).....	42
Figure 55 : Vue écorchée de l'emballage béton développé par la société OPG.....	43
Figure 56 : Photo d'un entreposage en emballages béton développés par la société OPG.....	43
Figure 57 : Vues en élévation de l'installation CASCAD du CEA/Cadarache	44
Figure 58 : Photo de la cellule de déchargement et de manutention de l'installation CASCAD du CEA/Cadarache	44

Figure 59 : Photo du sommet des puits d'entreposage de l'installation CASCAD du CEA/Cadarache.....	44
Figure 60 : Photo extérieure de l'installation HABOG (Borsele - Pays-Bas)	44
Figure 61 : Photo du sommet des puits d'entreposage de l'installation HABOG (Borsele - Pays-Bas)	44
Figure 62 : Vue en coupe de l'installation HABOG (Borsele - Pays-Bas)	44
Figure 63 : Photos de la construction des puits et de l'installation centralisée d'entreposage du site de MCC (Zheleznogorsk – Russie)	45
Figure 64 : Vue conceptuelle du projet d'installation d'entreposage à sec centralisé de Lea County (États-Unis).....	45
Figure 65 : Vue aérienne du site de Gorleben (Allemagne)	46
Figure 66 : Photo de l'intérieur de l'entreposage centralisé du site de Gorleben (Allemagne)	46
Figure 67 : Vue aérienne du site d'Ahaus (Allemagne).....	46
Figure 68 : Photo de l'intérieur de l'entreposage centralisé du site d'Ahaus (Allemagne)	46
Figure 69 : Photo du bâtiment d'entreposage centralisé ZWILAG (Suisse).....	46
Figure 70 : Photo du hall d'entreposage de l'installation ZWILAG (Suisse)	46
Figure 71 : Vue écorchée de la future installation d'entreposage centralisé de Mutsu (Japon).....	47
Figure 72 : Durée de refroidissement nécessaire avant entreposage à sec, pour des combustibles irradiés dans un REP en France	48
Figure 73 : Adéquation des solutions d'entreposage en fonction de la puissance thermique du combustible utilisé	49

Crédits :

Page 12 : IRSN/DR - Page 13 : ©Stéphanie Jayet/Médiathèque IRSN - Page 13 : ©AREVA - Page 16 : IRSN/DR - Page 19 : ©AREVA NC 1998 - Page 19 : ©Sydney Jezequel/AREVA - Page 22 : IRSN/DR - Page 24 (Fig. 8/9) : ©TVO - Page 24 : ©KKG - Page 24 : ©SYNATOM - Page 25 : Riksdag - Page 25 : ©SKB - Page 26 : ©COGEMA 1992 - Page 30 : ©Waste Control Specialists LLC - Page 34 (Fig. 16/17) : © Radioaktív Hulladékokat Kezelő Nonprofit Kft. - Page 34 (Fig. 18/19/20) : DOE/DR - Page 35 : ©ORANO - Page 35 : ©Edison International - Page 36 : ©UNENE - Page 36 : ©Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) 2017 - Page 36 : ©Korad - Page 36 : ©CNCAN - Page 37 (Fig. 27/28/29) : ©HOLTEC International, Inc. - Page 37 : ©AECL - Page 38 (Fig. 31/32) : ©HOLTEC International, Inc. - Page 38 (Fig. 33/34) : ©Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) 2017 - Page 39 : AIEA/DR - Page 39 : ©KORAD - Page 39 (Fig. 37/38) : ©ORANO - Page 40 (Fig. 39/40) : AIEA/DR - Page 40 (Fig. 41/42) : ©GNS - Page 41 (Fig. 43/44) : ©WTI/GNS - Page 41 (Fig. 45/46) : AIEA/DR - Page 41 (Fig. 47/48) : ©STEAG - Page 41 : AIEA/DR - Page 42 : ©Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management - Page 42 (Fig. 51/52) : AIEA/DR - Page 42 : ©SUJB - Page 42 : ©AEI - Page 43 : ©Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) 2017 - Page 43 : ©2018 Nuclear Waste Management Organization - Page 44 (Fig. 57/58/59) : source CEA - Page 44 (Fig. 60/61) : ©COVRA N.V - Page 44 : ANVS/DR - Page 45 : Rosatom/DR - Page 45 : ©HOLTEC International, Inc. - Page 46 (Fig. 65/66/67/68) : BMU/DR - Page 46 : ENSI - Page 46 : ZWILAG - Page 47 : AEC/DR - Pages 48/49 : IRSN/DR

1 PRÉSENTATION DE LA SAISINE ET DE LA DÉMARCHE DE L'IRSN

Le Président de la Commission d'enquête parlementaire sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires, créée par l'Assemblée nationale en 2018, a sollicité, par lettre du 26 mars 2018 jointe en annexe 1 au présent rapport, l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les enjeux associés, en termes de sûreté nucléaire, à une stratégie de gestion du combustible nucléaire irradié (également appelé combustible usé) reposant sur un entreposage de celui-ci en piscine (ou sous eau) uniquement ou faisant appel à des entreposages à sec.

En effet, comme mis en lumière par les premiers travaux de cette commission, la gestion des combustibles usés présente des enjeux particuliers. L'exploitation des réacteurs nucléaires de puissance conduit à la production de combustibles usés, qui doivent être entreposés pendant une durée dépendant des choix nationaux en matière de gestion des matières et déchets nucléaires (traitement/recyclage, entreposage de longue durée...).

La Commission a, dans ce contexte, pris connaissance du projet d'EDF de création d'une piscine d'entreposage centralisé, dimensionnée pour entreposer des combustibles usés sur une période de cent ans. Elle a également relevé que l'entreposage en piscine n'est pas la seule option envisageable et qu'une part croissante de combustibles usés est, dans de nombreux pays, mise dans des entreposages, dits à sec, utilisant des conteneurs (ou « châteaux ») de grande taille. Aussi, elle a souhaité obtenir des éléments plus détaillés pour se prononcer sur le sujet des entreposages et, le cas échéant, formuler des conclusions et des recommandations.

Conformément à la saisine de la commission d'enquête parlementaire sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires en France, les objectifs de ce rapport de l'IRSN sont de présenter, d'une part les concepts existants d'entreposage sous eau et à sec, d'autre part les enjeux de sûreté associés, en tenant compte des caractéristiques des différents types de combustibles concernés.

Les exemples présentés dans le présent rapport ont uniquement vocation à illustrer la diversité des concepts d'entreposage de combustibles usés de par le monde, que ce soit sous eau ou à sec, sans promouvoir une technologie ou un fabricant ni rechercher un caractère d'exhaustivité.

2 ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

Combustibles utilisés dans le parc électronucléaire français

La majeure partie du combustible nucléaire usé produit en France est issue du fonctionnement du parc de 58 réacteurs électronucléaires à eau sous pression (REP) actuellement exploités par EDF. Les réacteurs de ce parc, répartis sur 19 centres nucléaires de production d'électricité (CNPE), comprennent 34 réacteurs de 900 MWe, 20 réacteurs de 1 300 MWe et quatre réacteurs de 1 450 MWe. Le réacteur EPR (1 650 MWe) implanté sur le site de Flamanville est, quant à lui, en cours de finalisation.

Le combustible neuf utilisé dans ces réacteurs est constitué d'oxyde d'uranium (UOX), légèrement enrichi en uranium 235 (dit combustible à uranium naturel enrichi ou UNE), ou d'oxydes mixtes d'uranium et de plutonium (combustible MOX). Le plutonium utilisé est issu du traitement des combustibles UNE usés dans les usines de l'établissement ORANO Cycle de La Hague. Le combustible MOX est actuellement utilisé dans 22 réacteurs de 900 MWe du palier CPY (24 étant autorisés à mettre en œuvre de tels combustibles).

Le combustible utilisé en France peut également être constitué d'oxyde d'uranium issu du traitement des combustibles UNE (uranium de recyclage ré-enrichi dit URE). Toutefois, ce type de combustible, mis en œuvre dans les quatre réacteurs du CNPE de Cruas, n'est plus utilisé depuis 2013 ; EDF prévoit de reprendre son utilisation dans les prochaines années.

Stratégie de gestion du combustible usé à l'international et en France

Pour la gestion du combustible usé, deux grandes politiques nationales sont développées 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 (cycle du combustible dit « ouvert »). Dans les deux cas, des entreposages intermédiaires des combustibles usés, dans l'attente de la mise en œuvre de l'option retenue, sont nécessaires (plusieurs entreposages éventuellement de type différent pouvant être utilisés successivement).

Pour ces entreposages, les solutions techniques auxquelles ont recours les différents pays sont :

- des entreposages sous eau dans la piscine associée aux réacteurs ;
- des entreposages sous eau dans une piscine de site ou centralisés (communs à plusieurs sites) ;
- des entreposages à sec sur site¹ ou centralisés (communs à plusieurs sites).

Un état des lieux des pratiques à l'international est présenté en Annexe 2 du rapport.

Le retour d'expérience international montre que, lorsque le combustible usé est destiné au stockage direct, l'entreposage sous eau et l'entreposage à sec sont pratiqués, avec un recours croissant aux entreposages à sec. La solution adoptée dans de nombreux pays est alors d'entreposer le combustible usé dans les piscines attenantes aux réacteurs nucléaires (utilisées notamment pour les opérations de chargement et déchargement du réacteur) puis dans des installations d'entreposage à sec, lorsque leur radioactivité et la chaleur qu'ils dégagent ont suffisamment diminué. Une telle stratégie est notamment déployée aux États-Unis d'Amérique. Dans ce pays, en 2015, environ 80 % des combustibles usés étaient entreposés sous eau et 20 % l'étaient à sec (ce dernier nombre étant en croissance régulière).

Lorsque le combustible usé est traité, l'entreposage est réalisé sous eau, le délai avant traitement des combustibles étant souvent de l'ordre de grandeur de celui du refroidissement nécessaire avant transfert dans un entreposage à sec. Lorsque le traitement est différé, des entreposages à sec peuvent être utilisés en complément. Ainsi, le Japon, au regard de son contexte actuel, prévoit de mettre en service, en 2018, une installation d'entreposage à sec de combustibles usés, à Mutsu, tout en maintenant une politique de traitement du combustible usé. Le ministère japonais de l'industrie prévoit la construction de trois à six installations de ce type d'ici 2050.

La France a opté pour un recyclage du plutonium et de l'uranium ; ces matières sont dès lors considérées comme des matières énergétiques valorisables faisant l'objet d'une intention d'utilisation future et non comme des déchets. En application de cette stratégie, les combustibles usés (UNE, MOX et URE) issus du parc électronucléaire ne sont pas destinés à un stockage direct. Le combustible usé UNE est traité dans les usines Orano Cycle de La Hague en vue de la fabrication de combustibles MOX dans l'usine Orano MELOX (ou de combustibles URE lorsque cette gestion est mise en œuvre, leur fabrication se faisant dans l'usine Framatome de Romans-sur-Isère). Pour les combustibles usés MOX et URE, comme indiqué dans le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR 2016-2018), « *la gestion industrielle de ces combustibles aujourd'hui privilégiée par EDF est le recyclage en réacteurs à neutrons rapides (RNR) de quatrième génération* ». Aussi, les combustibles usés MOX et URE sont actuellement entreposés en attente de recyclage. Le cycle du combustible nucléaire des réacteurs de puissance à eau sous pression français est présenté en Annexe 3 du rapport.

¹ Les installations d'entreposage sur site de combustibles usés sont à l'international souvent dénommées ISFSI (*Independent Spent Fuel Storage Installations*).

Ce choix a été confirmé par la loi de programme n°2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, qui établit l'article L542-1-2 du Code de l'environnement disposant notamment les orientations que doit respecter le PNGMDR, parmi lesquelles « la réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs est recherchée notamment par le traitement des combustibles usés et le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs ».

Pour rappel, le traitement des combustibles usés est une opération qui consiste à en extraire, par un procédé essentiellement chimique, l'uranium et le plutonium, tandis que les produits de fission² et les transuraniens³ autres que le plutonium (appelés « actinides mineurs ») sont conditionnés dans une matrice de verre et entreposés dans l'attente d'une solution de gestion à long terme (stockage définitif en couche géologique profonde, projet CIGEO), comme précisé dans le PNGMDR 2016-2018.

Étapes de gestion du combustible usé en France

Après leur déchargement des réacteurs, les combustibles usés présentent une puissance thermique très élevée (du fait de leur radioactivité), qui décroît très rapidement. À titre d'exemple, le cœur d'un réacteur de 900 MWe, constitué de 157 combustibles, présente une puissance thermique globale de l'ordre de 200 MW juste après l'arrêt du réacteur, qui décroît à environ 40 MW une heure après cet arrêt puis à environ 16 MW après un jour. Cette décroissance devient ensuite plus lente du fait de la disparition des éléments radioactifs à vie courte (c'est-à-dire qui présentent une période radioactive de faible durée).

Compte tenu de la radioactivité et de la puissance thermique élevée des combustibles usés dans les mois qui suivent leur déchargement, nécessitant un refroidissement important pour éviter la dégradation des gaines, une période dite de désactivation ou de refroidissement dans la piscine attenante à chaque réacteur de puissance est nécessaire avant de les transporter vers un entreposage⁴ (ou un stockage). La cinétique de décroissance de la puissance thermique dépend du type de combustible, comme le montre la figure 1 ci-après. En pratique, selon les agréments de transport en vigueur à ce jour en France, la puissance thermique maximale d'un combustible usé pouvant être transporté sur la voie publique est de 6 kW ; elle dépend du modèle d'emballage de transport utilisé.

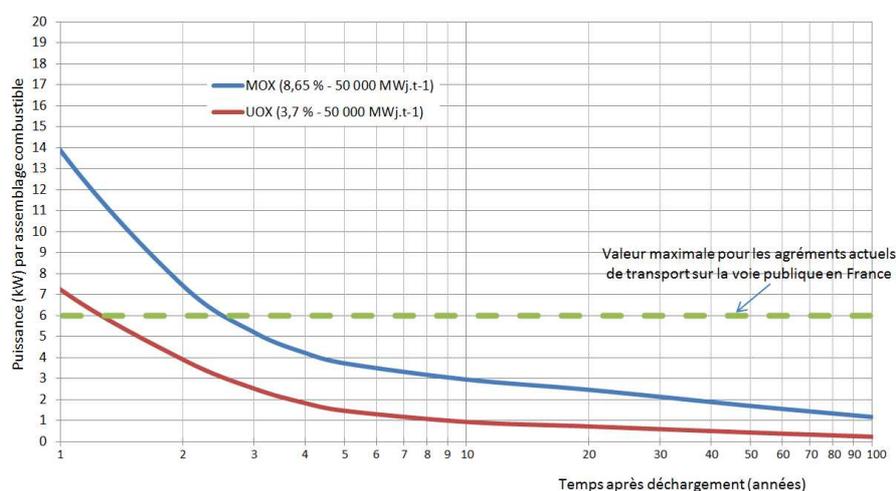


Figure 1 : Courbes de décroissance de la puissance thermique d'un combustible UOX et d'un combustible MOX, irradiés dans un REP en France

² Les produits de fission sont des éléments chimiques résultant de la fission d'un élément (un noyau) fissile. Ils sont issus de la fission des atomes d'uranium et de plutonium : césium, strontium, iode, xénon... Radioactifs pour la plupart, ils se transforment dans le temps en d'autres éléments.

³ Les transuraniens constituent la famille des éléments chimiques plus lourds que l'uranium (numéro atomique 92). Les principaux sont le neptunium (93), le plutonium (94), l'américium (95) et le curium (96).

⁴ La notion d'entreposage se différencie de celle de stockage car elle implique, d'une part à terme une reprise des objets entreposés (combustibles usés), d'autre part une surveillance et une maintenance active des installations.

En France, les combustibles usés sont entreposés, après déchargement des réacteurs, dans les piscines (cf. figure 2) des bâtiments « combustible » (BK), puis transportés vers l'établissement Orano Cycle de La Hague, où ils sont entreposés dans l'une des quatre piscines (cf. figure 3) actuellement en exploitation de cet établissement. Le temps de refroidissement minimal dans les piscines BK, avant de pouvoir transporter les combustibles, est de l'ordre de 18 mois pour les combustibles usés UNE et URE et de l'ordre de 30 mois pour les combustibles usés MOX actuellement en réacteur.



Figure 2 : Photo d'une piscine BK



Figure 3 : Photo de l'une des piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague

Les combustibles usés UNE sont entreposés en piscine jusqu'à leur traitement dans les usines de l'établissement Orano Cycle de La Hague (traitement intervenant généralement après de l'ordre de 10 ans de refroidissement).

Les combustibles URE et MOX, qui ne font pas l'objet d'un traitement, sont actuellement entreposés dans les piscines de l'établissement de La Hague. La stratégie actuelle d'EDF consistant à les entreposer sous eau et à les traiter le moment venu (après 2050) dans le but d'utiliser le plutonium dans de futures générations de réacteurs telles que les réacteurs à neutrons rapides (RNR), la durée d'entreposage de ces combustibles, leur devenir et donc leur destination finale dépendent des décisions sur le développement de ces nouvelles générations de réacteurs.

Le fonctionnement du cycle du combustible d'EDF (fabrication, utilisation en réacteur puis traitement) fait régulièrement l'objet d'une analyse spécifique, transmise par EDF à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et expertisée par l'IRSN. Cette analyse, élaborée par EDF en lien avec les autres exploitants, vise notamment à s'assurer de l'adéquation des capacités d'entreposage et de traitement des matières et déchets radioactifs. Les évaluations réalisées dans ce cadre par EDF en 2016 concluent à une saturation possible des capacités d'entreposage des combustibles usés dans les piscines existantes à l'horizon 2030.

À cet égard, l'article 10 de l'arrêté du 23 février 2017, pris pour application du décret n°2017-231 du 23 février 2017 (cf. article L. 542-1-2 du code de l'environnement) établissant les prescriptions du PNGMDR 2016-2018, dispose qu'EDF transmette, avant le 31 mars 2017, sa stratégie de gestion des capacités d'entreposage de combustibles usés issus des REP (UNE, URE et MOX usés) et le calendrier associé à la création de nouvelles capacités d'entreposage ainsi que, avant le 30 juin 2017, les options techniques et de sûreté relatives à la création de nouvelles capacités d'entreposage.

EDF a transmis à l'ASN, en 2017, le dossier d'options de sûreté (DOS) d'une nouvelle piscine d'entreposage centralisé destinée à augmenter les capacités d'entreposage des combustibles usés. Ce dossier est en cours d'examen par l'IRSN. EDF prévoit de transmettre en 2020 la demande d'autorisation de création de cette installation en vue de la mettre en service à l'horizon 2030.

EDF a retenu un entreposage de ces combustibles usés sous eau, et non à sec, estimant que ce mode d'entreposage présente de meilleures garanties en vue de leur reprise et de leur traitement ultérieur. La nouvelle piscine d'entreposage centralisé sera dédiée principalement aux combustibles usés URE et MOX, notamment ceux entreposés actuellement dans les piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague.

En France, actuellement, l'entreposage des combustibles usés issus des réacteurs d'EDF, en dehors des piscines BK des réacteurs, est centralisé dans les piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague. S'agissant des flux de transport, le choix effectué par EDF de créer une nouvelle piscine d'entreposage centralisé induira une augmentation des transports dans la phase transitoire au cours de laquelle les combustibles usés MOX et URE seront transférés du site de La Hague vers cette nouvelle piscine centralisée. Par contre, cela ne devrait pas, en fonctionnement stationnaire, augmenter le flux de transport de manière significative (environ 220 transports par an actuellement), les combustibles URE usés rejoignant les piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague, les combustibles MOX et URE usés rejoignant la piscine d'entreposage centralisé.

3 GÉNÉRALITÉS SUR LES INSTALLATIONS D'ENTREPOSAGE

En France, l'entreposage est défini comme suit par la loi du 28 juin 2006 : « *l'entreposage de matières ou de déchets radioactifs est l'opération consistant à placer ces substances à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, dans l'attente de les récupérer* ». Un entreposage (ou « installation » d'entreposage) de substances radioactives est une installation nucléaire ou une partie d'installation nucléaire dont la vocation est d'assurer, d'une part la mise en attente de substances radioactives dans des conditions sûres pour les personnes du public et l'environnement, d'autre part leur reprise ultérieure.

Les dispositions de sûreté des installations nucléaires sont définies selon le principe de défense en profondeur. Ce principe vise à obtenir, par un ensemble de dispositions diversifiées de différentes natures, représentant des niveaux de défense successifs et suffisamment indépendants, une protection robuste à l'égard des dangers induits par l'installation. Ces dispositions de maîtrise des risques sont définies pour tenir compte des situations d'accident pouvant résulter tant d'agressions, qu'elles soient externes (séisme...) ou internes (incendie...), que de défaillances d'équipements ou d'erreurs liées aux facteurs humains ou organisationnels. Elles concernent les fonctionnements normal, incidentel et accidentel de l'installation.

Le principe de défense en profondeur est représenté par cinq niveaux de défense : les trois premiers visent à la prévention et à la maîtrise des incidents et accidents. L'objet des deux derniers niveaux est de limiter les conséquences d'un accident grave pour les personnes et l'environnement.

Pour les installations d'entreposage, ces dispositions visent à l'atteinte des objectifs fondamentaux de sûreté suivants :

- assurer la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants, en minimisant les doses reçues au cours de l'ensemble du processus de gestion des objets radioactifs ;
- assurer le confinement des matières radioactives, en maîtrisant tout transfert de radioéléments vers l'environnement en situations normale et incidentelles et en limitant les rejets en cas d'accident. Pour ce faire, le confinement est assuré par l'interposition de barrières successives entre les substances radioactives et l'environnement ;

- assurer la prévention des accidents de criticité (correspondant à une réaction en chaîne de fission divergente incontrôlée)⁵ ;
- assurer l'évacuation de la puissance thermique issue des substances radioactives, en maintenant un refroidissement suffisant.

Par ailleurs, la conception d'un entreposage doit permettre, tout au long de la vie de l'installation, la reprise des objets radioactifs entreposés dans un délai approprié et de manière sûre. Ceci nécessite de :

- surveiller et gérer (traçabilité, inventaire radiologique, caractérisation...) les objets radioactifs entreposés ;
- disposer des équipements nécessaires à la reprise de ces objets.

Dans ce contexte, l'importance du rôle pour la sûreté des gaines (tube métallique à base de zirconium et fermé de manière étanche) dans lesquelles sont placées les pastilles de combustibles est à souligner. Ces gaines participent à la maîtrise du confinement des matières radioactives ; elles constituent la première barrière de confinement (au plus près de la matière).

Leur intégrité est importante pour permettre, dans des conditions de sûreté et d'exploitation optimales, la reprise des combustibles en vue de leur traitement ou de leur conditionnement pour le stockage. Aussi, il importe de surveiller dans le temps leurs caractéristiques mécaniques (étanchéité, intégrité...).

Au regard des mécanismes de vieillissement des gaines (corrosion, hydruration, fluage...), des exigences de sûreté sont définies pour les entreposages de combustibles usés (conditions de température, contrôle de la chimie du milieu environnant...).

Dans le cas des entreposages à sec, ces phénomènes étant activés thermiquement, une température maximale est notamment définie pour les gaines (de l'ordre de 400 °C dans la plupart des pays), conduisant de fait à limiter la puissance thermique des combustibles usés entreposés. Ainsi, pour les entreposages en emballages (cf. chapitre 5 du rapport), ces puissances sont de l'ordre de 1 à 2 kW par combustible. Comme le montre la figure 4 relative à la puissance thermique des combustibles usés, cela induit une période préalable nécessaire de refroidissement, sous eau, des combustibles usés (quelques années pour les combustibles usés UNE et quelques dizaines d'années pour les combustibles usés MOX).

Par ailleurs, il convient de souligner que la pression interne de la gaine, qui est susceptible d'influer sur les mécanismes de vieillissement, est plus importante dans les combustibles usés MOX que dans les combustibles usés UNE.

⁵ Les matières fissiles, dont les principales sont l'uranium 235 et le plutonium 239, présentent la propriété de pouvoir entretenir des réactions de fission en chaîne dès lors que certaines conditions sont réunies. Le risque de criticité est le risque de réunir les conditions d'amorçage et d'entretien de ces réactions de fission en chaîne. Les risques de criticité sont présents à toutes les étapes du cycle du combustible, dans les installations recevant des matières fissiles ainsi que lors des opérations de transport de ces matières. La prévention de ces risques consiste à déterminer les conditions qui permettent d'assurer la sous-criticité, c'est-à-dire le non-déclenchement de réactions en chaîne incontrôlées. Ces conditions se traduisent par des dimensionnements à respecter pour la conception des appareillages et par des règles d'exploitation à appliquer.

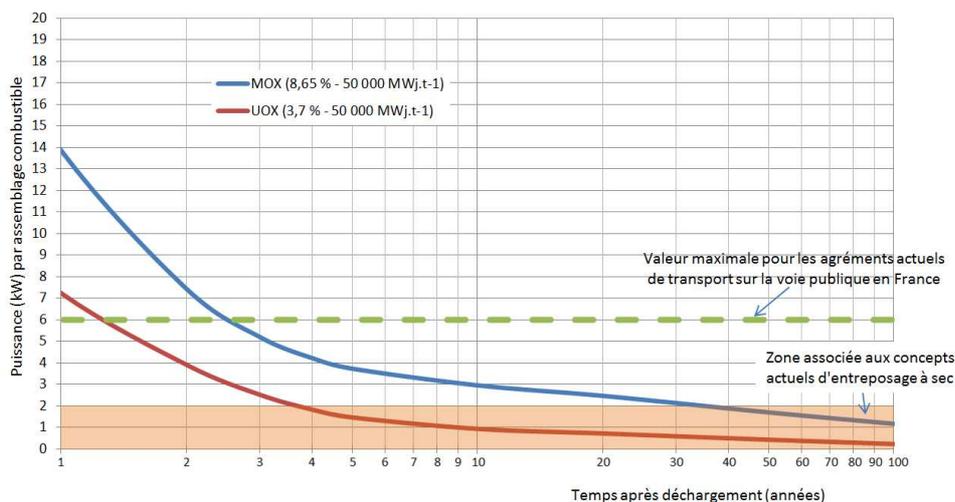


Figure 4 : Durée de refroidissement nécessaire avant entreposage à sec, pour des combustibles irradiés dans un REP en France

À haute température (au-delà de 600 °C), un phénomène d'oxydation vive du zirconium des gaines des combustibles usés peut intervenir en présence notamment de vapeur d'eau. Ce phénomène conduit à une détérioration rapide des gaines (perte d'intégrité) et à la production importante d'hydrogène gazeux (entraînant un risque d'explosion). De plus, un emballement de cette réaction est probable, du fait de son caractère fortement exothermique. Ceci conduit, par exemple, à prendre des dispositions particulières pour prévenir les risques de dénoyage des combustibles entreposés sous eau ou, dans une moindre mesure, à utiliser un gaz inerte pour constituer l'atmosphère interne des conteneurs utilisés pour l'entreposage à sec.

Les données de conception des systèmes d'entreposage des combustibles usés concernent principalement les caractéristiques des matières à entreposer (dimension, activité radiologique, débit de dose, résistance mécanique, puissance thermique...) ainsi que les dispositions d'exploitation (modalités d'entreposage et de manutention) et de sûreté (protection contre les rayonnements ionisants, confinement des matières, prévention des risques de criticité...). Pour les combustibles usés, l'enrichissement initial en uranium 235 (ou en plutonium), eu égard à la prévention des risques de criticité, et la puissance thermique (dépendant du taux de combustion⁶ et du temps de refroidissement après déchargement du réacteur), eu égard au besoin de refroidissement et à la radioprotection, sont des caractéristiques particulièrement importantes. Les combustibles MOX usés, du fait de leur teneur en plutonium, sont plus contraignants car ils émettent plus de rayonnements neutroniques et de chaleur.

Compte tenu des durées potentiellement longues d'entreposage des combustibles usés, la conception d'une installation d'entreposage doit retenir :

- l'utilisation de composants simples, éprouvés et aussi passifs que possible ;
- une évolution lente des conditions thermiques (inertie thermique) en situations incidentelles et accidentelles ;
- la prise en compte des processus de vieillissement sur la durée prévue d'exploitation (par exemple pour la définition d'exigences sur la chimie du milieu environnant...) ;
- l'élaboration de programmes de maintenance et de surveillance adaptés, en particulier afin de garantir la reprise des combustibles, incluant la tenue dans le temps de l'intégrité des combustibles ;
- la traçabilité et la conservation des informations sur les combustibles usés.

⁶ Le taux de combustion (également appelé « burn-up ») représente l'énergie thermique produite par les fissions nucléaires dans une unité de masse de combustible ; il représente le niveau d'irradiation d'un combustible et est mesuré en Gigawatts ou Mégawatts par jour par tonne de combustible (GWj/t ou MWj/t).

Enfin, cette conception doit traiter les risques d'agression d'origine interne (chute de charge, incendie, explosion...) et d'origine externe (séisme, inondation, environnement industriel, chute d'avion...).

S'agissant des durées caractéristiques de réalisation d'une installation d'entreposage de combustibles usés, l'IRSN ne dispose pas d'éléments suffisants pour apprécier le temps nécessaire à la réalisation de l'ensemble des étapes industrielles et réglementaires conduisant à la mise en service d'une telle installation. Toutefois, en l'état des procédures réglementaires françaises et sur la base du retour d'expérience de la construction d'installations nucléaires récentes, ces durées peuvent être estimées à de l'ordre de 10 ans, voire cinq ans pour des entreposages à sec modulaires.

4 ENTREPOSAGE SOUS EAU

Les entreposages sous eau de combustibles usés présentent généralement des inventaires radiologiques importants (plusieurs centaines, voire milliers de combustibles usés) et des puissances thermiques élevées. Aussi, les enjeux de sûreté associés sont majeurs.

4.1 Concepts d'entreposage sous eau

Compte tenu des puissances thermiques des combustibles usés les premières années après déchargement du réacteur et du choix de traiter les combustibles UNE environ 10 ans après leur déchargement, les piscines constituent la solution d'entreposage sur les sites des réacteurs électronucléaires français et dans les usines de traitement du combustible.

Les installations d'entreposage sous eau de combustibles usés, ou piscines d'entreposage, peuvent être construites au-dessus du niveau du sol ou semi-enterrées, voire plus rarement souterraines (installation CLAB en Suède). Dans le cas des réacteurs, elles sont implantées en hauteur du fait de leur connexion à la piscine du réacteur. Ce sont des structures monolithiques en béton armé, dont les parois participent à la protection contre les rayonnements ionisants. Elles peuvent être conçues de façon modulaire. Les entreposages peuvent ainsi être constitués d'un grand bassin ou de plusieurs « petits » bassins, connectés entre eux par des canaux de transfert. Enfin, des bassins annexes ou des fosses (plus profonds que les bassins d'entreposage), dans lesquels sont par exemple réalisées les opérations de chargement/déchargement des combustibles usés dans/depuis des emballages de transport, sont connectés aux bassins d'entreposage via des portes ou des batardeaux (de manière à pouvoir être isolables). Les faces internes des bassins sont revêtues d'une peau d'étanchéité métallique (ou « liner ») qui participe au confinement des substances radioactives (deuxième barrière de confinement).

L'eau des piscines assure deux fonctions essentielles pour la sûreté :

- le refroidissement des combustibles ;
- la protection radiologique des opérateurs (il y a environ trois à cinq mètres d'eau au-dessus des combustibles). Le niveau de l'eau doit être adapté à la hauteur maximale atteinte par les combustibles lors des différentes opérations de manutention. L'eau est également épurée en permanence.

L'entreposage sous eau se décline selon deux grands concepts :

- l'entreposage vertical des combustibles, dans des râteliers assemblés et posés au fond de la piscine. Dans ce cas, la hauteur d'eau doit prendre en compte la manutention des combustibles au-dessus des râteliers pour la protection radiologique des opérateurs. Cette conception est celle utilisée pour les piscines BK des réacteurs (voir figure 2) ;

- l'entreposage vertical des combustibles, dans des paniers. Le remplissage des paniers est effectué dans une fosse plus profonde que les bassins (pour assurer la radioprotection lors de la manutention des combustibles) ou à partir d'enceintes en béton dédiées de forte épaisseur ; les bassins d'entreposage sont de profondeur réduite car seuls les paniers y sont manutentionnés à faible hauteur au-dessus du fond de la piscine (pas de survol des paniers entreposés). Cette conception est celle utilisée pour les piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague (voir figure 3).

4.2 Fonctions de sûreté des installations d'entreposage sous eau

Comme indiqué précédemment, les objectifs fondamentaux de sûreté sont la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants (appelée par la suite protection radiologique), le confinement des substances radioactives, la maîtrise de la sous-criticité et l'évacuation de la puissance thermique issue des substances radioactives. En complément, l'installation doit permettre la reprise des combustibles.

Compte tenu de la puissance thermique des combustibles usés entreposés, la situation redoutée pour la sûreté des piscines est une mise à l'air des combustibles usés, du fait d'une baisse importante de l'inventaire en eau, conduisant à une réaction d'oxydation vive des gaines et à un relâchement important de radionucléides. Pour mémoire, le maintien de l'eau dans la piscine est assuré par un cuvelage étanche (le « liner »), complété par le génie civil du bassin d'entreposage.

Protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants

L'eau de la piscine agit comme écran de protection radiologique. Le maintien du niveau d'eau à une hauteur minimale, dans toutes les conditions (normale, incidentelles et accidentelles), permet d'assurer la protection des travailleurs contre les rayonnements ionisants aux abords de la piscine.

Par exemple, l'accès au bord de la piscine reste possible en situation accidentelle tant que l'épaisseur d'eau recouvrant les combustibles usés entreposés ou en cours de manutention est de l'ordre du mètre.

Confinement des substances radioactives

La première barrière de confinement est la gaine des combustibles. Cette première barrière est complétée par l'eau de la piscine et la ventilation du hall de la piscine pour constituer le premier système de confinement. En effet, l'eau capte une partie des radionucléides qui seraient relâchés en cas de perte d'intégrité d'une gaine. Le maintien de l'eau dans la piscine est assuré par un cuvelage étanche (le « liner »), complété par le génie civil du bassin et du bâtiment.

Un second système de confinement est assuré par le bâtiment et son système de ventilation (qui compense les inétanchéités du bâtiment). Le confinement dynamique (système de ventilation)⁷ du hall de la piscine permet de filtrer les effluents gazeux et les aérosols qui seraient relâchés en cas de rupture de gaines des combustibles en piscine. Par ailleurs, un système d'épuration de l'eau de la piscine est mis en œuvre (ex : filtration sur résines échangeuses d'ions). Il limite les quantités de substances radioactives transférées vers l'atmosphère du hall de la piscine par évaporation de l'eau.

Outre la filtration de l'air avant rejet dans l'environnement, la ventilation permet de contrôler la température et l'hygrométrie de l'air du hall de la piscine. Le bâtiment abritant la piscine doit être maintenu en dépression par rapport à l'extérieur (confinement dynamique).

⁷ La première fonction de la ventilation dans une installation nucléaire est d'instaurer un sens d'air depuis les zones les moins contaminées vers les zones les plus contaminées par la mise en dépression graduelle des différentes zones de l'installation (cascades de dépression).

Pour les situations accidentelles pouvant conduire à l'ébullition de l'eau de la piscine, l'ouverture d'un exutoire permettant d'évacuer la vapeur d'eau à l'extérieur est tolérée transitoirement pour éviter la montée en pression de l'atmosphère du bâtiment d'entreposage⁸. En tout état de cause, un système de refroidissement de l'eau de la piscine doit pouvoir être mis en service pour arrêter l'ébullition et rétablir le confinement assuré par le bâtiment.

Lorsque l'installation est équipée d'une unité de déchargement à sec des combustibles (soit en utilisant une enceinte en béton de forte épaisseur), une fois l'emballage de transport ouvert, les deux barrières de confinement sont constituées par la gaine des combustibles et les parois de l'enceinte de déchargement complétées par le système de ventilation du bâtiment (cf. figure 5 et figure 6).

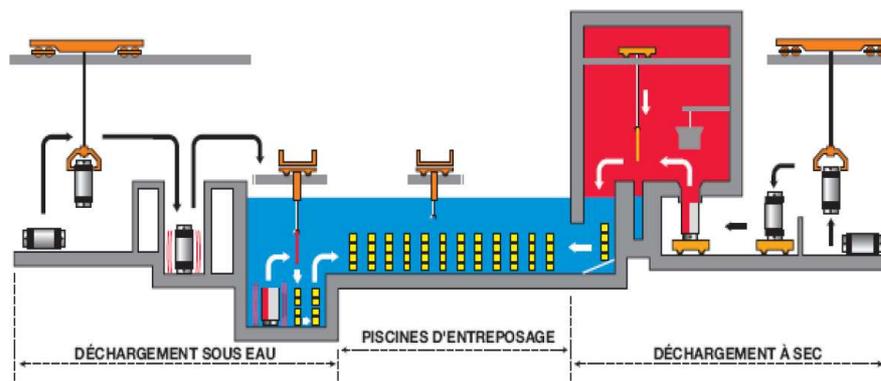


Figure 5 : Principe de déchargement des combustibles, sous eau ou à sec

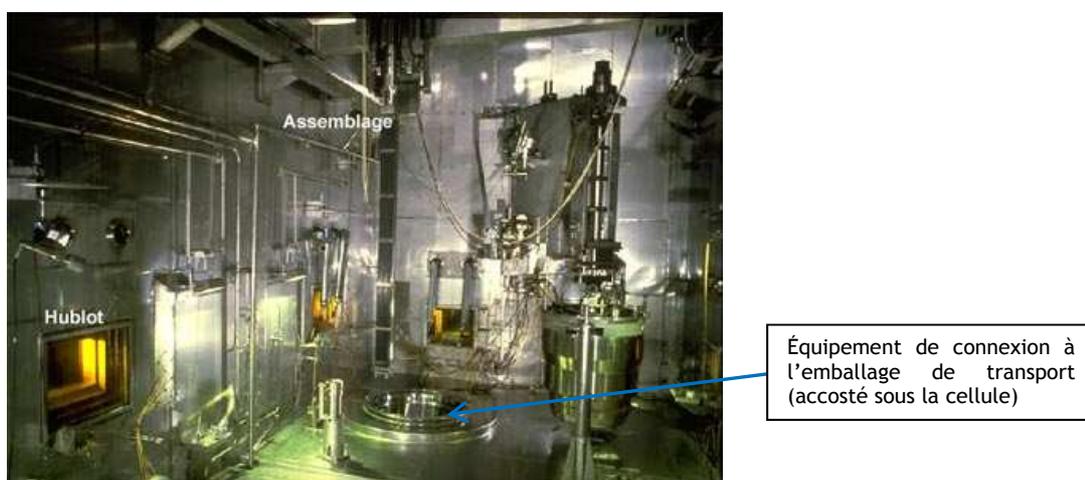


Figure 6 : Vue de l'intérieur de la cellule de déchargement à sec de l'atelier T0 de l'établissement Orano Cycle de La Hague

Maîtrise de la sous-criticité

La maîtrise de la sous-criticité d'un entreposage sous eau de combustibles usés est assurée par la géométrie des dispositifs d'entreposage (râteliers ou paniers) et l'eau présente (qui agit comme un absorbant de neutrons). Des matériaux neutrophages (absorbant neutronique) peuvent également être utilisés.

⁸ En cas de perte totale du refroidissement de l'eau de la piscine, les gaines des combustibles ne sont pas endommagées tant que ceux-ci ne sont pas découverts. Un appoint en eau à la piscine est donc mis en service en cas de perte prolongée du refroidissement pour compenser l'évaporation et stabiliser le niveau d'eau. La vapeur d'eau rejetée à l'extérieur lors de ce transitoire accidentelle n'est que très légèrement contaminée. Les conséquences radiologiques induites sont donc faibles.

Évacuation de la puissance thermique

L'évacuation de la puissance thermique des combustibles usés entreposés en piscine repose sur leur maintien sous eau et le refroidissement de cette eau à partir d'une source froide, pour exclure son ébullition. En effet, en cas de perte de l'inventaire en eau (fuite ou ébullition prolongée), un découverture des combustibles usés serait possible entraînant leur dégradation plus ou moins importante, selon leur puissance thermique, du fait notamment des phénomènes d'oxydation vive du zircaloy constituant les gaines de combustible.

Les dispositions de conception visent donc à rendre hautement improbable, avec un haut degré de confiance, une vidange accidentelle importante de la piscine du fait de la perte d'intégrité d'une structure. Une attention toute particulière est ainsi portée à la protection du bassin d'entreposage contre les agressions, d'origine interne ou externe, susceptibles de le dégrader (explosion, séisme, chute de charge, chute d'aéronefs...). À cet égard, les piscines de conception récente (EPR, projet de piscine d'entreposage centralisé d'EDF) sont équipées de coques de protection contre les chutes d'avion. Enfin, le dimensionnement des éléments structurels de ce bassin doit présenter des marges importantes au regard des chargements accidentels susceptibles d'être rencontrés sur la durée d'exploitation de l'installation.

Le système de refroidissement des piscines est dimensionné pour maintenir la température de l'eau en fonctionnement normal généralement en dessous d'une valeur de l'ordre de 50 °C. En l'absence d'évacuation suffisante de la puissance thermique, la température de l'eau pourrait augmenter significativement jusqu'à atteindre l'ébullition, ce qui pourrait conduire à un découverture des combustibles usés. De plus, une élévation importante de température de l'eau impliquerait un arrêt des systèmes de ventilation et mettrait en défaut le confinement du hall de la piscine. Elle entraînerait également des contraintes sur les structures telles que le liner de la piscine ou les râteliers d'entreposage, du fait des phénomènes de dilatation.

Les piscines d'entreposage étant le plus souvent conçues pour contenir des puissances thermiques très importantes, des moyens actifs de refroidissement doivent être utilisés. Le système de refroidissement doit être robuste et son opérabilité garantie dans tous les modes de fonctionnement normal, incidentels ou accidentels (par exemple, le redémarrage doit être possible après une perte de refroidissement prolongée ayant conduit à une ébullition de l'eau de la piscine et à une variation du niveau d'eau dans la piscine). Il est constitué de voies redondantes permettant de pallier la défaillance d'équipements.

En France, deux types de systèmes sont utilisés : un ensemble de circuits assurant la circulation de l'eau de la piscine dans des échangeurs externes à celle-ci (piscines BK) ou des échangeurs immergés dans la piscine refroidis à l'aide d'un circuit externe à la piscine connecté à des aéroréfrigérants (cas des piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague). Ce dernier système évite tout transfert d'eau, potentiellement contaminée, à l'extérieur de la piscine, et limite de façon significative les risques de vidange accidentelle d'une partie de la piscine (rupture d'une tuyauterie). Toutefois, ses capacités de refroidissement sont moins importantes.

Lorsque l'installation est équipée d'une unité de chargement ou de déchargement à sec des combustibles, des dispositions spécifiques sont mises en place pour assurer le refroidissement durant les phases de transfert entre l'emballage de transport et la piscine, tenant compte des situations normale, incidentelles et accidentelles (défaillance des moyens de manutention...). En l'absence de refroidissement par des moyens actifs (perte des systèmes de ventilation des enceintes en béton), la puissance thermique d'un combustible manutentionné isolément entre l'emballage et la piscine ne doit pas conduire à un échauffement des gaines dépassant une température critique (seuil d'oxydation violente du zirconium constituant ces gaines conduisant à un « feu de zircaloy »).

Reprise des combustibles

La possibilité de reprise des combustibles induit des exigences en termes de conception des matériels et d'organisation de l'exploitation.

Elle nécessite une conception de certains équipements pour un double usage (déchargement/chargement des combustibles depuis/dans les emballages de transport) et la prise en compte de la fonction de désentreposage à la conception.

Ceci implique :

- de pouvoir extraire les combustibles des paniers d'entreposage (ou des râteliers) y compris après par exemple un séisme ;
- de garantir, en fonctionnement normal, l'intégrité mécanique des combustibles.

En fonction de la durée d'entreposage des combustibles, l'exploitant doit prévoir, dès la conception, l'évolution dans le temps des matériels (par exemple les emballages de transport)

Les moyens nécessaires à la surveillance des combustibles entreposés, ainsi que l'évolution dans le temps de ces moyens, doivent également être prévus dès la conception.

4.3 Entreposage sous eau sur site

Quelle que soit l'option retenue pour la gestion des combustibles usés (traitement ou stockage direct), les exploitants de réacteurs électronucléaires à l'international et en France disposent de piscines d'entreposage de combustibles usés attenantes au réacteur (piscines BK en France), permettant d'assurer le refroidissement des combustibles durant une première période de temps suivant leur déchargement du réacteur, lorsque les puissances thermiques sont très élevées, et de faire face aux aléas d'évacuation des combustibles.

Plus la capacité d'entreposage en piscine est importante, plus les exploitants de réacteurs électronucléaires qui ont retenu l'entreposage à sec à l'issue de cette première phase d'entreposage sous eau ont la possibilité de refroidir longtemps leurs combustibles usés pour limiter la puissance thermique par unité d'entreposage à sec (optimisation).

Présentation des piscines BK

La piscine de désactivation est implantée en position haute (voir figure 7) dans le bâtiment combustible (BK), constitué d'une structure en béton armé depuis le niveau de fondation jusqu'au niveau de la toiture. Seul le BK de l'EPR de Flamanville est placé sous une coque avion qui le protège, pour tout angle et point de chute, de l'impact d'un avion de taille et de masse importante.

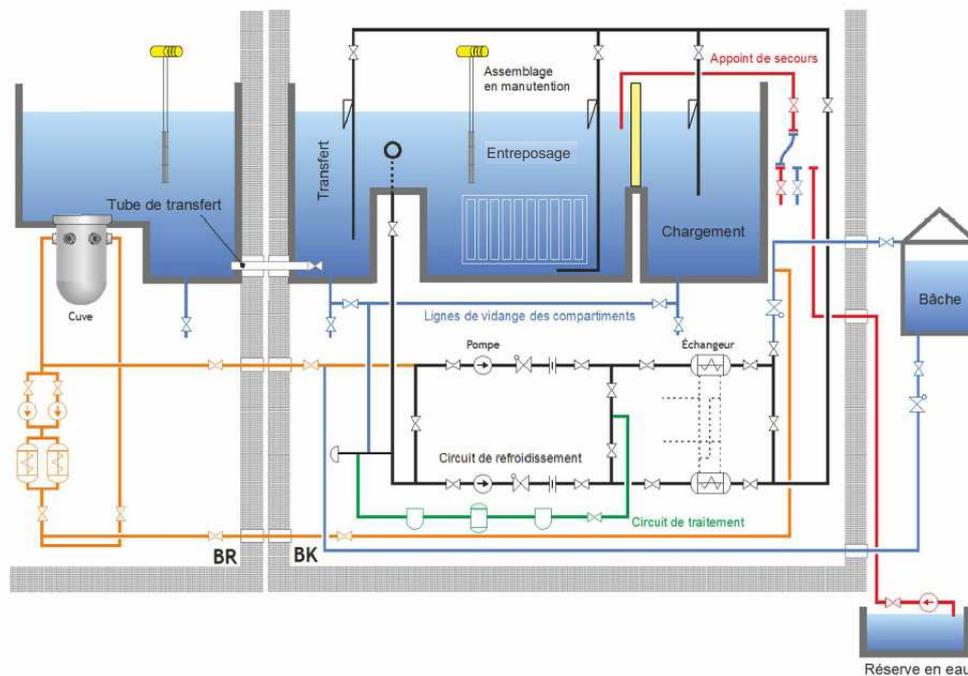


Figure 7 : Vue en coupe des piscines du bâtiment du réacteur (BR) et du bâtiment du combustible (BK)

La piscine BK comporte trois compartiments (entreposage principal, transfert et chargement) séparés par des portes ou des batardeaux dont l'étanchéité est assurée par des joints en élastomère. L'étanchéité de la piscine est assurée par une peau métallique en acier inoxydable (« liner ») soudée sur des profilés métalliques scellés dans le béton.

Le compartiment de transfert, qui possède une tuyauterie de vidange, communique avec la piscine du bâtiment du réacteur par un tube de transfert par lequel sont acheminés les combustibles vers ou en provenance du réacteur. Ceci explique la position en hauteur de la piscine dans le bâtiment BK.

Le combustible usé est évacué de la piscine BK dans des emballages de transport après une période d'entreposage permettant son transport vers l'établissement Orano Cycle de La Hague. Les emballages de transport sont chargés sous eau dans le compartiment de chargement (réacteurs de 900 MWe et de 1300 MWe de type P4) ou accostés sous le compartiment de chargement (réacteurs de 1300 MWe de type P'4, de 1450 MWe et EPR). Cette seconde disposition évite une manutention en hauteur de l'emballage de transport, d'une masse supérieure à 100 tonnes, et limite la contamination des emballages.

La hauteur d'eau dans le compartiment d'entreposage, utilisant des râteliers d'entreposage, est comprise entre 12 m et 14 m, selon les paliers de réacteurs, ce qui représente environ trois fois la hauteur des combustibles. Pour mémoire, une hauteur d'eau au-dessus des combustibles supérieure à environ 2,7 m permet de conserver le bord de la piscine et les postes de pilotage des appareils de manutention dans des conditions normales de radioprotection.

Le nombre d'emplacements d'entreposage (alvéoles) des râteliers présents dans le compartiment d'entreposage, dans lesquels sont placés les combustibles, est compris entre 382 (paliers 900 MWe) et 960 (EPR), ce qui correspond à une capacité totale comprise entre 145 (paliers 900 MWe) et 655 (EPR) tonnes de métal lourd initial (tml) de combustible.

Le refroidissement de l'eau de la piscine est assuré par un circuit externe à la piscine. Dans les réacteurs du parc EDF en exploitation, l'eau est aspirée par une canalisation située plusieurs mètres en dessous de la surface de la piscine. Le circuit de refroidissement comporte deux voies disposées en parallèle, composées chacune d'une pompe et d'un échangeur de chaleur. L'eau refroidie est refoulée par une canalisation plongeant en partie inférieure de la piscine. Cette tuyauterie est équipée d'un casse-siphon permettant d'arrêter une vidange accidentelle en cas de rupture ou d'erreur de lignage. Les systèmes nécessaires au fonctionnement des deux voies de refroidissement sont eux-mêmes redondants et secourus (alimentation électrique de chaque voie secourue par un groupe électrogène de secours à moteur Diesel). Cette conception du système de refroidissement, techniquement adaptée à la puissance thermique élevée des combustibles entreposés, induit des scénarios accidentels de fuite d'eau à l'extérieur de la piscine qui font l'objet d'analyses spécifiques. Il est à noter que la piscine du réacteur EPR de Flamanville est équipée de trois trains de refroidissement indépendants et que l'implantation des tuyauteries d'aspiration et de refoulement a été améliorée pour limiter les risques de dénoyage des combustibles entreposés.

La puissance thermique du combustible entreposé dans une piscine BK dépend principalement de l'état de fonctionnement du réacteur : cette puissance est maximale lors des arrêts de tranche, lorsque l'ensemble des combustibles sont déchargés de la cuve du réacteur. Elle varie également en fonction de la puissance du réacteur, du combustible utilisé et de la capacité d'entreposage de la piscine.

Les puissances thermiques maximales des combustibles entreposés dans les piscines BK des réacteurs de 900 MWe, de 1300 MWe, de 1450 MWe et du réacteur EPR de Flamanville sont respectivement d'environ 10 MW, 13 MW, 14 MW et 20 MW.

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 « rerackage », 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.

Il convient de rappeler qu'EDF a envisagé le « rerackage » des piscines BK et a, à cet égard, transmis à l'ASN en octobre 2010 un dossier relatif aux réacteurs de 900 MWe du palier CPY. Ce dossier a été examiné par l'IRSN qui a considéré que les éléments de justification apportés par EDF ne permettaient pas de considérer que les risques liés à cette modification étaient maîtrisés de manière satisfaisante.

Par la suite, dans le cadre de l'examen de l'extension de la durée de fonctionnement des réacteurs au-delà de leur quatrième visite décennale, l'IRSN a estimé que le projet de « rerackage » d'EDF apparaissait peu opportun sur le plan de la sûreté en comparaison de la conception et de la mise en service d'installations modernes spécifiquement destinées à cet usage. L'ASN a alors demandé à EDF, en septembre 2013, d'examiner d'autres solutions que le « rerackage » pour l'entreposage des combustibles usés.

L'autre alternative pour augmenter les capacités d'entreposage sous eau consiste à créer une piscine d'entreposage de site. Le recours à cette solution est peu développé à l'international, mais quelques exemples peuvent être cités.

Sur le site de la centrale nucléaire d'Olkiluoto en Finlande, la société TVO⁹ a mis en service en 1987 une piscine d'entreposage, dénommée TVO-KPA-STORE (voir figure 8 et figure 9), pour faire face à la saturation des piscines de désactivation des réacteurs. Cette installation, prévue pour être exploitée pendant 60 ans, constitue une installation d'entreposage indépendante des réacteurs du site, qui sera maintenue après le démantèlement du réacteur TVO 1. La capacité de l'installation est suffisante pour entreposer l'ensemble des combustibles usés issus de 30 années d'exploitation des réacteurs TVO 1 et 2, soit environ 1 400 tonnes d'uranium. En outre, la conception de l'installation est prévue pour pouvoir étendre si nécessaire la capacité d'entreposage.

Les combustibles usés sont transférés dans l'installation après au moins un an de refroidissement dans la piscine du réacteur et resteront dans l'installation pour plus de 40 ans d'entreposage. Le transfert se fait à l'aide d'un emballage de transfert dans lequel le combustible usé est maintenu sous eau (limitation de la température et des chocs thermiques).



Figure 8 : Vue écorchée de la piscine d'entreposage dénommée TVO-KPA-STORE (site d'Olkiluoto - Finlande)



Figure 9 : Photo de la piscine d'entreposage dénommée TVO-KPA-STORE (site d'Olkiluoto - Finlande)

Parmi les autres exemples à l'international figurent la piscine du « bâtiment de stockage des combustibles » de la centrale nucléaire de Gösgen en Suisse (voir figure 10), mis en service en 2008, et le bâtiment centralisé d'entreposage intermédiaire sous eau de la centrale de Tihange en Belgique (voir figure 11), mis en service en 1997. Ces installations peuvent accueillir les combustibles usés (y compris MOX) des sites sur lesquelles elles sont implantées. Le transfert des combustibles usés des piscines des réacteurs vers ces installations est réalisé à l'aide d'un emballage dans lequel le combustible usé est maintenu sous eau. Il est à noter que la piscine de la centrale de Gösgen a un système de refroidissement passif.



Figure 10 : Photo de la piscine du « bâtiment de stockage des combustibles » de la centrale de Gösgen (Suisse)

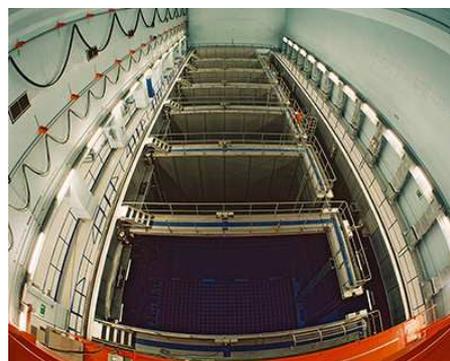


Figure 11 : Photos des piscines du bâtiment centralisé d'entreposage intermédiaire sous eau de la centrale de Tihange (Belgique)

⁹ TVO pour Teollisuuden Voima Oy.

L'implantation d'une piscine supplémentaire doit prendre en compte les contraintes techniques du site ainsi que des contraintes de sûreté. S'agissant du parc électronucléaire français, l'implantation d'une piscine supplémentaire accolée au BK est exclue pour des raisons d'emprise au sol et d'impact sur les ouvrages existants. Par ailleurs, la réalisation d'une liaison directe entre la piscine BK et la piscine supplémentaire est, elle aussi, exclue, compte tenu des risques de vidange de piscine et du fait de l'éloignement des deux bâtiments. Ainsi, le transfert des combustibles usés de la piscine BK vers une piscine supplémentaire sur le site devrait être effectué à l'aide d'emballages de transport remplis d'eau (opérations de transfert analogues aux transferts dit « inter-tranches » réalisés par EDF entre deux piscines BK d'un même site) avec une contrainte portant sur la durée de l'opération de transfert afin d'éviter un échauffement excessif du combustible transporté.

Compte tenu du retour d'expérience international, la faisabilité technique d'une piscine de site est avérée. Toutefois, la mise en œuvre de cette solution nécessiterait des moyens adaptés pour permettre le transfert des combustibles usés et, sur certains sites, une extension du périmètre de la centrale.

4.4 Entreposage sous eau centralisé

À l'international comme en France, plusieurs installations d'entreposage sous eau centralisé existent ou sont en projet. Parmi celles-ci, il convient de distinguer les piscines des usines de traitement des combustibles usés en attente de traitement et les piscines d'entreposage centralisé des combustibles usés dans l'attente d'un choix quant à leur devenir (futur traitement ou stockage direct).

Existant à l'étranger

Parmi les installations existant à l'international, il convient de citer l'installation CLAB¹⁰ 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 (voir figure 12). Les piscines d'entreposage (voir figure 13) sont situées à 30 mètres de profondeur et le combustible usé, placé dans des paniers, est recouvert par huit mètres d'eau. La capacité actuelle de l'installation est de 8 000 tonnes de métal lourd. SKB a déposé une demande pour étendre cette capacité à 11 000 tonnes (en généralisant l'utilisation de paniers compacts). Fin 2016, 6 266 tonnes de métal lourd (31 817 combustibles usés) étaient entreposés.



Figure 12 : Vue écorchée de l'installation CLAB à Oskarshamn (Suède)



Figure 13 : Photo des piscines de l'installation CLAB à Oskarshamn (Suède)

¹⁰ CLAB pour Centralt Lager för Använt Bränsle (Entreposage centralisé de combustible usé)

Existant en France

Les usines de traitement des combustibles usés de l'établissement Orano Cycle de La Hague disposent de quatre piscines d'entreposage des combustibles usés en exploitation (voir figure 14). La capacité totale d'entreposage est de 17 600 tmi, répartis entre les quatre piscines qui sont interconnectées : les piscines NPH (mise en service en 1981 et d'une capacité de 2 000 tmi) et C (mise en service en 1984 et d'une capacité de 4 800 tmi) pour l'INB n° 117 (usine UP2 800) et les piscines D (mise en service en 1986 et d'une capacité de 4 600 tmi) et E (mise en service en 1988 et d'une capacité de 6 200 tmi) pour l'INB n° 116 (usine UP3). Il est à noter que la capacité opérationnelle totale est limitée à environ 13 990 tmi, notamment du fait de la conception des paniers d'entreposage utilisés dans ces piscines et des contraintes d'exploitation (déchets entreposés et zones interdites d'entreposages pour réaliser les opérations de manutention). Pour mémoire, l'équivalent en masse par panier est de 4,4 tmi (les paniers contenant neuf combustibles).

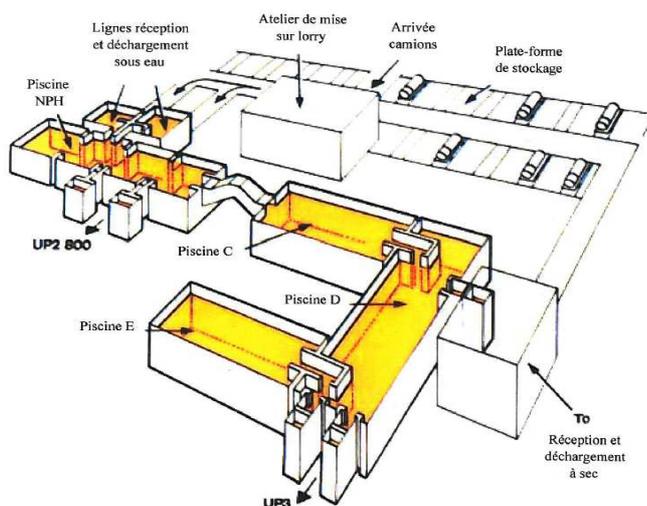


Figure 14 : Représentation schématique de l'implantation des piscines d'entreposage de l'établissement Orano Cycle de La Hague

Les principes de conception retenus pour chacune des piscines C, D et E sont :

- un bâtiment en béton armé couvert par une superstructure en charpente métallique recouverte d'un bardage ;
- un bassin d'entreposage, enterré, en béton armé avec un cuvelage interne constitué d'une peau en acier inoxydable (« liner ») assurant l'étanchéité du bassin ; ce bassin est découpé, notamment par des appuis en néoprène fretté, du bâtiment l'abritant.

Les combustibles usés sont entreposés dans des paniers d'entreposage. Environ quatre mètres d'eau recouvrent le sommet des combustibles usés. Les opérations de manutention des paniers sont réalisées à faible hauteur au-dessus du fond de la piscine.

La puissance thermique maximale dans les piscines d'entreposage est de 8 MW pour la piscine NPH, 8 MW pour la piscine C, 16 MW pour la piscine D et 10 MW pour la piscine E. Le refroidissement est réalisé au moyen d'une boucle d'eau de refroidissement fermée avec, côté source chaude, des groupes échangeurs thermiques « Nymphéa » immergés dans le bassin et, côté source froide, des aéroréfrigérants « secs » disposés à l'extérieur du bâtiment. L'eau des piscines reste donc toujours à l'intérieur des bassins.

Le déchargement des emballages de transport des combustibles usés est réalisé sous eau ou à sec. Le déchargement à sec présente l'avantage de minimiser les risques liés à la manutention des emballages et d'éviter le dépôt de contamination sur les surfaces externes des emballages (cf. figure 5).

Projet en France

EDF a transmis en 2017 un dossier d'options de sûreté relatif à son projet de mise en service à l'horizon 2030 d'une piscine d'entreposage centralisé qu'il destine à recevoir en particulier les combustibles usés MOX et URE (incluant ceux actuellement entreposés dans les piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague), dont le traitement n'est pas envisagé à court ou moyen terme. Ce dossier est en cours d'évaluation par l'IRSN.

Cette piscine aura une capacité de l'ordre de 10 000 tmlr répartie dans deux bassins. Les bâtiments hébergeant les bassins, enterrés (niveau d'eau voisin de celui du sol), seront équipés de parois renforcées résistant aux agressions externes (coque avion). La conception de la piscine sera *a priori* proche de celle des piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague, avec notamment l'utilisation de paniers d'entreposage et d'un système de refroidissement avec des échangeurs immergés en piscine.

4.5 Atouts et facteurs limitants de l'entreposage sous eau

Le tableau présenté en Annexe 4 synthétise les principales caractéristiques des entreposages sous eau et à sec.

4.5.1 Atouts de l'entreposage sous eau

L'entreposage sous eau des combustibles usés présente plusieurs atouts dont certains sont inhérents à l'eau dans laquelle sont immergés ces combustibles. Ces atouts sont tout particulièrement :

- la protection radiologique, efficace, des opérateurs contre les rayonnements gamma et neutroniques. En outre, l'eau n'est pas sujette à des dégradations liées aux rayonnements ionisants issus des combustibles ;
- la capacité de refroidissement des combustibles, importante (rendant ce type d'entreposage incontournable pour les combustibles peu refroidis), avec une température maintenue à un niveau faible ;
- l'inertie thermique de l'entreposage, importante, notamment pour les piscines centralisées, induite par les grands volumes d'eau contenus, qui facilite la mise en œuvre de dispositions en situation accidentelle ;
- la densité d'entreposage, également importante.

En particulier, les conditions d'entreposage sous eau, se traduisant par un maintien des gaines de combustible à des températures faibles (de l'ordre de 40 à 50 °C à l'extérieur de la gaine), limitent les phénomènes de vieillissement des combustibles usés, ce qui est un élément favorable. En outre, le contrôle de la chimie de l'eau permet en particulier la maîtrise des phénomènes de corrosion.

En outre, les manutentions en piscine des combustibles usés ne présentent pas de difficulté. À cet égard, les opérations d'entreposage et de désentreposage sont facilitées (pas de fermeture ou de soudage de conteneurs d'entreposage par exemple). L'eau permet de plus une surveillance visuelle des opérations et une confirmation à tout moment de la position du combustible usé.

Dans ce contexte, un entreposage sous eau permet une surveillance approfondie des combustibles usés avec la possibilité de réaliser des contrôles directs de ces combustibles ; la réalisation de certains de ces contrôles peut toutefois nécessiter une cellule d'expertise.

Le retour d'expérience disponible, au niveau national et international, est important pour l'ensemble des combustibles utilisés (UNE, MOX, URE).

4.5.2 Facteurs limitants de l'entreposage sous eau

Une des principales caractéristiques de l'entreposage sous eau réside dans l'inventaire radiologique élevé contenu dans une piscine et, en cas de découverte des combustibles usés entreposés, dans le risque de relâchement important de radioéléments (du fait notamment des phénomènes d'oxydation vive des gaines en zircaloy à température élevée) et de l'apparition d'un débit de dose très élevé autour de la piscine, empêchant toute intervention humaine directe.

Du point de vue de la sûreté, les conséquences potentielles d'un découvrment des combustibles étant très importantes (des contre-mesures seraient nécessaires sur de grandes distances), les événements pouvant conduire à cette situation doivent être rendus physiquement impossibles ou « hautement improbables avec un haut degré de confiance ». Ce point a fait notamment l'objet de travaux dans le cadre du retour d'expérience de l'accident de Fukushima, fondés sur la prise en compte d'aléas extrêmes (supérieurs à ceux de dimensionnement), sur l'examen déterministe d'un scénario de fuite importante d'un bassin d'entreposage et sur l'accroissement des moyens de réalimentation en eau des piscines, l'objectif étant de garantir le maintien d'un inventaire en eau suffisant dans la piscine. Pour mémoire, le comportement des piscines d'entreposage et le maintien sous eau des combustibles entreposés ont été une des préoccupations majeures lors de l'accident de Fukushima.

Un autre facteur limitant des entreposages sous eau provient du fait que le maintien des fonctions de sûreté est assuré, au moins partiellement, par des systèmes actifs (refroidissement, maintien de la pureté de l'eau de la piscine, appoint d'eau). Ceci induit des exigences particulières en termes d'exploitation (conduite, maintenance, surveillance...).

En raison du nombre de combustibles usés à entreposer et du volume des bassins associés, l'entreposage sous eau nécessite des bâtiments en béton armé de grande taille. Par ailleurs, la protection des fonctions de sûreté contre les agressions externes étant assurée par ces bâtiments, de fortes exigences de comportement et de tenue doivent leur être appliquées. La dimension de ces bâtiments et les exigences qui leur sont appliquées en rende la conception complexe.

Cette conception doit intégrer des marges significatives, dans la mesure où une évacuation, pour raison de sûreté, des combustibles usés entreposés requerrait un délai important (de l'ordre de plusieurs années) compte tenu du nombre de combustibles usés entreposés ; cela suppose également la disponibilité d'une installation pouvant recevoir ces combustibles.

S'agissant de la détection d'une perte d'étanchéité d'une gaine de combustible usé (première barrière de confinement), la difficulté à la détecter et à localiser précisément le combustible concerné parmi l'ensemble de ceux entreposés, notamment due à l'importance du volume d'eau contenu dans la piscine, constitue également un facteur limitant. Il en est de même pour une fissure qui affecterait le « liner » du bassin.

Enfin, il est à noter que, comparativement à l'entreposage en piscine BK, l'entreposage en piscine centralisé bénéficie d'une inertie thermique beaucoup plus importante du fait du volume de ses bassins et de la puissance thermique relativement réduite des combustibles¹¹. Par ailleurs, la plus faible élévation des bassins des piscines d'entreposage centralisé (le niveau d'eau dans les bassins d'entreposage de la piscine centralisée que prévoit de construire EDF correspond à celui du sol) et la conception de leurs systèmes de refroidissement et de manutention conduisent à une conception plus robuste.

¹¹ Pour la puissance thermique maximale envisageable, l'inertie thermique d'une piscine BK avant ébullition varie entre 4 h et 8 h selon les paliers et le délai avant le début de découvrment des combustibles en l'absence de tout appoint d'eau est compris entre 30 h et 60 h.

5 ENTREPOSAGE À SEC

5.1 Concepts d'entreposage à sec

Trois principaux concepts d'entreposage à sec des combustibles usés ont été développés dans le monde :

- l'entreposage en casemates ou puits¹² ;
- l'entreposage en silos ;
- l'entreposage en emballages.

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 entreposages à sec nécessitent un conditionnement préalable des combustibles usés réalisé, selon les cas, en les plaçant :

- dans un panier lui-même placé dans un emballage dont le système de fermeture est vissé (un ou plusieurs couvercles munis de joints d'étanchéité) ; avec ce mode de conditionnement, il est possible, moyennant une installation et des équipements adéquats, de réouvrir un emballage (pour inspection ou déchargement) ;
- dans un conteneur, le cas échéant préalablement équipé d'un panier, dont le couvercle sera ensuite soudé de manière étanche, le tout étant placé dans une unité d'entreposage (puits, structure en béton horizontale ou verticale) ; avec ce mode de conditionnement, le confinement est renforcé ; toutefois, la surveillance des combustibles ne peut alors s'effectuer que de manière indirecte (mesure depuis l'extérieur du conteneur, voire de la structure d'entreposage).

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). Par contre, la réalisation d'opérations nécessitant l'ouverture d'un emballage ou d'un conteneur, en cours d'entreposage (maintenance, réparation, contrôle, désentreposage...) ou après, pourrait nécessiter des installations spécifiques, notamment la disponibilité d'une « cellule chaude¹³ » si des dégradations de combustibles sont suspectées. Il faut toutefois noter que, dans le monde, la plupart des sites d'entreposage à sec ne disposent pas d'une telle installation.

Enfin, pour limiter les risques de corrosion et de dégradation des combustibles usés, en particulier des gaines de combustible, les conteneurs et emballages sont séchés (pour n'y laisser que des quantités d'eau résiduelles extrêmement faibles) et le plus souvent remplis avec un gaz neutre, principalement de l'hélium qui, par ailleurs, favorise l'évacuation de la chaleur. Dans ce contexte, la gestion des combustibles devenus inétanches lors de leur irradiation, qui potentiellement contiennent de l'eau, doit faire l'objet de dispositions particulières.

5.1.1 Entreposage à sec en casemates ou puits

L'entreposage en casemates ou 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.

¹² 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 ».

¹³ Enceinte en béton de forte épaisseur qui assure le confinement et la protection contre les rayonnements ionisants.

Il s'agit essentiellement de bâtiments dans lesquels les combustibles usés, introduits dans des conteneurs étanches, sont placés dans des puits. Ces puits sont des tubes généralement verticaux fermés par un bouchon. En partie haute des puits, une dalle en béton de forte épaisseur assure la tenue de la structure et des puits ainsi que la protection contre les rayonnements ionisants. Les puits peuvent reposer en partie basse sur le radier du bâtiment ou être uniquement suspendus à la dalle supérieure.

Les combustibles usés arrivent (à sec ou sous eau) dans l'installation en utilisant des conteneurs de transfert (sur site) ou des emballages de transport (cas des entreposages centralisés). Ils sont ensuite préparés (séchage...) puis placés dans des conteneurs en acier. Les conteneurs sont ensuite introduits verticalement à l'intérieur des puits de l'installation (en utilisant une hotte de transfert circulant sur la dalle supérieure des puits, assurant notamment la protection radiologique, ou un pont disposé au-dessus de celle-ci, la fonction de protection radiologique étant alors assurée par le bâtiment).

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. Cette circulation d'air peut être assurée par convection naturelle (en général en utilisant une cheminée de grande hauteur), faisant de l'entreposage un système entièrement passif, ou par convection forcée ; dans ce cas, le système de ventilation est redondant, de même que les utilités nécessaires à son fonctionnement.

Ce type d'installation peut être dédié à l'entreposage sur site de combustibles usés, mais peut également être centralisé. Des exemples d'installations sont présentés aux paragraphes 5.3.1 et 5.4.1 du présent rapport.

5.1.2 Entreposage à sec en silos

Les silos sont des structures en béton disposant de cavités (ou alvéoles) dans lesquels sont placés les conteneurs renfermant les combustibles usés. Ce sont des structures modulaires¹⁴ contenant généralement chacune un conteneur. Elles sont uniquement destinées à l'entreposage et indépendantes (moyens de manutention dédiés notamment) des installations nucléaires du site. Elles peuvent être :

- monolithiques à chargement horizontal ou vertical ;
- modulaires de type conteneur (vertical).

La figure 15 ci-après présente un site d'entreposage à sec comprenant des silos monolithiques à chargement horizontal et des silos de type conteneurs.



Figure 15 : Vue conceptuelle d'un projet d'entreposage aux États-Unis

¹⁴ Ces installations sont souvent dénommées ISFSI - *Independent Spent Fuel Storage Installations*.

Dans le concept de type silos, les combustibles usés sont placés dans des conteneurs métalliques remplis d'un gaz inerte, dont le couvercle est soudé de manière étanche. Chaque conteneur est introduit dans un alvéole d'une structure en béton à l'aide d'un emballage de transfert. Cette structure en béton standard ou de haute densité assure la fonction de protection radiologique et est conçue pour résister aux agressions externes (séisme notamment), comme une installation nucléaire classique. La taille réduite de ces structures conduit cependant à une conception simplifiée. En outre, une circulation d'air en convection naturelle dans la structure en béton assure le refroidissement des conteneurs d'entreposage. Compte tenu de ce mode de refroidissement (extérieur au conteneur), la température des combustibles usés peut être importante (plusieurs centaines de degrés Celsius), bien que leur puissance thermique soit limitée (de l'ordre de 1 à 2 kW en moyenne au chargement).

L'entreposage à sec en silos est principalement utilisé sur site de réacteurs, notamment aux États-Unis. Des exemples d'installations sont présentés aux paragraphes 5.3.2 et 5.4.2 du présent rapport.

5.1.3 Entreposage à sec en emballages

Ce concept concerne les emballages de transport et d'entreposage, dit 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. Ils limitent donc les opérations de reconditionnement des combustibles usés.

Deux types d'emballages sont utilisés : les emballages métalliques et les emballages en béton.

Emballages métalliques

Les emballages métalliques sont essentiellement constitués d'un corps cylindrique en acier forgé de forte épaisseur (plusieurs dizaines de centimètres), d'une épaisseur de matériau polymère neutrophage, traversée par des conducteurs thermiques pour assurer les échanges avec l'extérieur, et d'une virole externe en acier ; un ou deux couvercles munis de joints d'étanchéité ferment l'emballage. Ces emballages ont une masse en général comprise entre 100 et 150 t (chargés) pour un encombrement hors tout d'environ Ø3 m x 7 m en configuration de transport et Ø2,5 m x 5,5 m en configuration d'entreposage (les protections mécaniques permettant de satisfaire aux exigences des transports sur la voie publique étant remplacées par des protections d'encombrement moindre en entreposage). Ils peuvent contenir une puissance thermique totale comprise entre 20 et 40 kW, pour un nombre de combustibles usés (de type REP) de l'ordre de 30.

Emballages en béton

De manière analogue, les emballages en béton utilisent quasiment exclusivement ce matériau pour leur construction, avec des viroles plus ou moins fines en acier pour assurer leur stabilité mécanique ou leur résistance à certains aléas. Ils sont moins chers que les emballages métalliques, mais plus volumineux. De fait, le diamètre externe du corps de l'emballage peut être compris entre 3 et 3,5 m et sa masse entre 160 et 190 t en charge. Les puissances que peuvent contenir ces emballages sont similaires à celles des emballages métalliques.

Certains concepts de silos sont similaires au concept d'emballages en béton. La distinction concerne le fait que l'emballage en béton doit assurer le transport des combustibles usés.

Les emballages, chargés verticalement sous eau ou dans une « cellule chaude » à sec, sont conçus pour être vidangés de leur eau, séchés et clos de manière étanche à l'aide de couvercles boulonnés. Ils sont ensuite placés verticalement sur une aire extérieure ou dans un bâtiment d'entreposage, qui assure notamment la protection contre les intempéries, voire plus rarement en tunnel souterrain.

Le refroidissement des emballages, réalisé par convection naturelle d'air au contact de leur paroi, et les impératifs de manutention et de surveillance induisent des contraintes d'espacement des emballages.

Le système d'entreposage à sec en emballages est le système le plus flexible (du fait qu'ils peuvent être déplacés sans opération de reconditionnement). L'entreposage des combustibles usés avec ces emballages peut s'effectuer aussi bien sur site que de manière centralisée. Des exemples d'entreposage sont respectivement présentés aux paragraphes 5.3.1 et 5.4.1 du présent rapport.

5.2 Fonctions de sûreté de l'entreposage à sec

Les principales fonctions de sûreté à assurer dans ces entreposages sont :

- la protection contre les rayonnements ionisants ;
- le confinement ;
- la prévention des risques de criticité ;
- l'évacuation de la puissance thermique.

Par ailleurs, les combustibles entreposés doivent pouvoir être repris de manière sûre et leur vieillissement être maîtrisé, en cohérence avec la politique de gestion des déchets mise en œuvre.

Protection contre les rayonnements ionisants

Elle est assurée par les structures en béton des alvéoles dans lesquels sont placés les conteneurs d'entreposage ou par le corps des emballages d'entreposage. Lorsque ces derniers sont placés dans un bâtiment, celui-ci peut apporter une protection radiologique complémentaire. Dans le cas des entreposages en puits enterrés ou semi-enterrés, le sol, la structure en béton et le bouchon d'obturation du puits assurent la protection radiologique.

Confinement

Le confinement des matières radioactives est assuré, d'une part par la gaine des combustibles (première barrière), d'autre part par les puits, conteneurs ou emballages utilisés (deuxième barrière).

À cet égard, pour prévenir les risques de corrosion des gaines, mais aussi des conteneurs / emballages, les combustibles doivent être séchés et les conteneurs / emballages inertés.

Une surveillance de l'étanchéité des conteneurs ou emballages est généralement réalisée (mesure de pression interne...). Le cas des gaines est abordé ci-après.

Prévention des risques de criticité

La prévention des risques de criticité est assurée par la géométrie des dispositifs d'entreposage utilisés (par exemple le pas entre les puits ou les alvéoles des paniers), associée éventuellement à la présence de poisons neutroniques (bore dans les matériaux des paniers par exemple).

Évacuation de la puissance thermique

Le refroidissement des combustibles usés est assuré par la circulation naturelle d'air autour des structures d'entreposage. Ce système est passif, seule l'absence de bouchage des circuits de circulation d'air doit être surveillée. Sur ce point, le risque d'effondrement des structures abritant l'entreposage ou l'obstruction des entrées d'air en cas d'agression externe doit être écarté.

Dans le cas des entreposages en puits enterrés ou semi-enterrés, la distance entre les puits non ventilés doit être déterminée en fonction de la puissance du combustible usé à entreposer, la conductivité thermique du sol et le critère de température fixé pour le combustible.

Exigence de reprise et surveillance

Outre le confinement des matières radioactives, la maîtrise du vieillissement des gaines des combustibles est importante pour les opérations de reprise des combustibles usés et leur gestion ultérieure.

À cet égard, contrairement aux entreposages sous eau, le concept d'entreposage à sec ne permet pas une surveillance directe des gaines des combustibles usés. En effet, elles ne sont pas accessibles et seuls des moyens indirects sont facilement utilisables (mesures à partir de l'extérieur des dispositifs (profils thermiques...), contrôle de l'atmosphère des dispositifs d'entreposage...). En outre, le maintien à température élevée des gaines des combustibles peut favoriser les mécanismes de vieillissement. Enfin, il convient de souligner que la pression interne des gaines, et donc les contraintes internes générées, augmente avec la température. En raison de la puissance thermique qu'ils dégagent, les combustibles MOX présentent donc une pression interne nettement supérieure à celle des combustibles UNE.

La question du vieillissement des gaines dans les entreposages à sec fait, depuis plusieurs années, l'objet d'études et de quelques examens *in situ*, qui ont concerné d'anciens combustibles UNE. À la connaissance de l'IRSN à la date de rédaction du présent rapport, la maîtrise du vieillissement des gaines des combustibles UNE n'est pas mise en cause pour les périodes d'entreposage considérées (quelques dizaines d'années).

Des programmes de recherche se poursuivent concernant notamment les combustibles avec des taux de combustion élevés (supérieurs à 45 GWj/t) ou des durées d'entreposage importantes (supérieures à 40 ans). Pour le combustible MOX, peu d'études sont disponibles. À cet égard, il faut noter que ce type de combustibles n'a été mis que très récemment en entreposage à sec (en Allemagne notamment), et qu'il s'agit de combustibles ayant une teneur initiale en plutonium plus faible que les combustibles utilisés actuellement en France.

Sur le principe, le concept d'entreposage à sec en emballages métalliques, dont le système de fermeture est vissé, permet une inspection plus facile des combustibles usés pendant l'entreposage. Toutefois, il s'agit d'une opération lourde (extraction du conteneur, ouverture...) nécessitant des installations particulières (« cellule chaude » par exemple). Par ailleurs, pour le concept de type puits ou silos, le conteneur étant soudé, ce type de contrôle nécessiterait *in fine* de remplacer le conteneur.

5.3 Entreposage à sec sur site

5.3.1 Entreposage à sec sur site en casemates ou puits

Un exemple d'installation représentative du concept d'entreposage en puits est le MVDS (*Modular Vault Dry Store* - voir figure 16). Celui mis en œuvre sur le site nucléaire de Paks en Hongrie (voir figure 17) a été mis en exploitation en 1997 pour une durée de 50 ans. Il est dédié à l'entreposage à sec des combustibles usés dans les quatre tranches VVER-440/213 de ce site.

Il est découpé en trois zones principales : la zone de réception des emballages de transfert, la zone de transfert et la zone des puits d'entreposage (voir figure 18). Les combustibles usés sont transportés sur site depuis le bâtiment « piscine » du réacteur jusqu'à la zone de réception dans un emballage de transfert.

Le combustible passe dans un tube de séchage avant d'être chargé dans une machine de transfert. Cette dernière apporte le combustible dans la zone de puits avant de charger l'un d'entre eux de manière verticale.

L'installation peut accueillir jusqu'à 527 combustibles par module (bâtiment), les 16 premiers modules étant limités à 450 combustibles, avec un total maximal envisageable de 16 159 puits répartis dans 33 modules dans les conditions actuelles. Fin 2016, 8 707 combustibles étaient entreposés dans l'installation pour une capacité de 9 308 (20 modules). Chaque puits, d'environ 4,5 m, est constitué d'un tube en acier au carbone avec revêtement

en aluminium qui traverse une dalle en béton d'environ 1 m (habillée par de l'acier). Chaque tube reçoit un seul combustible VVER d'une puissance thermique maximale de 720 W et est inerté avec de l'azote sec. Un bouchon en béton instrumenté de plus d'un mètre d'épaisseur vient fermer le puits. Des ouvertures sont aménagées en pied de bâtiment pour apporter l'air extérieur destiné à refroidir les puits (via un système de labyrinthe pour des raisons de radioprotection), l'air chaud s'échappant par un système de cheminée.

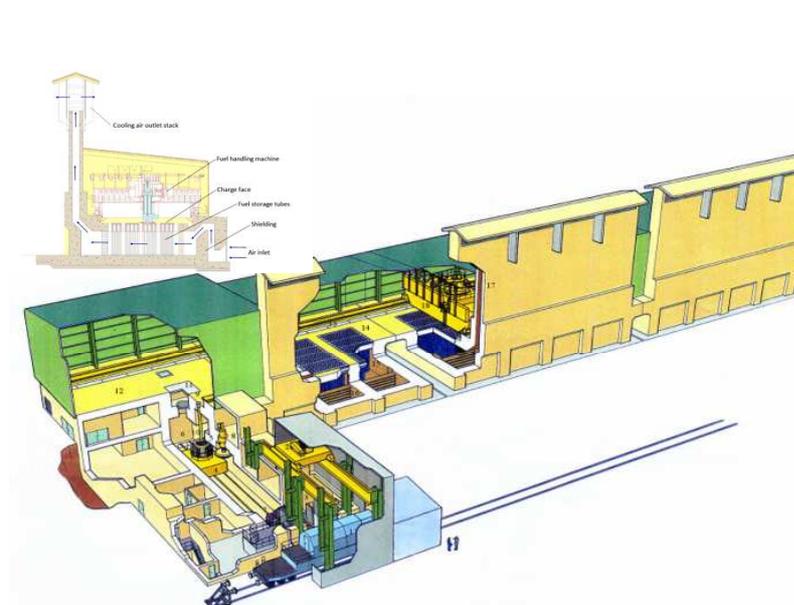


Figure 16 : Vue écorchée du concept MVDS (Modular Vault Dry Store)



Figure 17 : Photo de l'entreposage MVDS du site nucléaire de Paks (Hongrie)



Figure 18 : Photo des puits de l'entreposage MVDS du site nucléaire de Paks (Hongrie)

Ce concept « Modular Vault Dry Store » (MVDS) a également été mis en œuvre pour l'entreposage, depuis 1991, de combustibles usés issus du réacteur de puissance à haute température refroidi au gaz (*high temperature gas-cooled reactor* -HTGR) sur le site de Fort St. Vrain (États-Unis) ; ce réacteur a été arrêté en 1989 (voir figure 19 et figure 20).



Figure 19 : Photo de l'extérieur de l'entreposage de type MVDS sur le site de Fort St. Vrain (États-Unis)



Figure 20 : Photo de l'intérieur de l'entreposage de type MVDS sur le site de Fort St. Vrain (États-Unis)

5.3.2 Entreposage à sec sur site en silos

Concept de silo à chargement horizontal

L'un des systèmes caractéristiques de l'entreposage en silos à chargement horizontal est le NUHOMS[®] d'Orano TN (voir figure 21), dans lequel est placée une grande partie des combustibles usés entreposés à sec aux États-Unis (voir Figure 22). Le système NUHOMS[®] est composé, d'une part de casemates d'entreposage en béton armé, d'autre part de conteneurs métalliques. Le principe repose sur un emballage de transfert qui amène dans un alvéole en béton un conteneur soudé chargé de combustibles usés. L'emballage assure les fonctions de sûreté durant le transfert du conteneur, ce dernier étant déchargé horizontalement via un système de poussée après accostage de l'emballage contre l'alvéole. Les conteneurs soudés, qui pourraient éventuellement être réutilisés pour le stockage définitif¹⁵, assurent le confinement et la sûreté-criticité. Chaque alvéole assure la protection radiologique et la protection contre les agressions externes. Les alvéoles sont munis d'entrées d'air à la base du module et de sorties d'air en tête du module pour le refroidissement par convection naturelle. Le concept NUHOMS[®] a récemment évolué pour permettre de superposer les modules sur deux étages afin de limiter l'emprise au sol (modèle « MATRIX »).

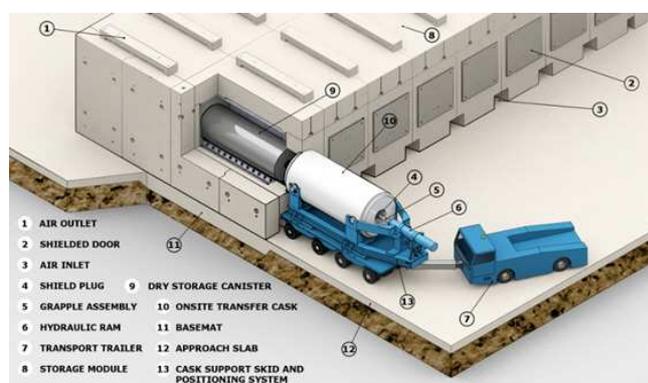


Figure 22 : Photo d'un entreposage de type modules NUHOMS[®] sur le site de San Onofre (États-Unis)

Ce concept est également utilisé dans d'autres pays, par exemple sur le site de la centrale VVER de Metzamor en Arménie.

Concept de silo de surface à chargement vertical

Un exemple représentatif du concept d'entreposage en silos de surface à chargement vertical est le MACSTOR[®] (Modular Air-Cooled STORage) d'AECL¹⁶ (voir figure 23), essentiellement développé au Canada, par exemple sur le site de Gentilly (voir figure 24). Ce concept est constitué de blocs, placés à ciel ouvert, de béton modulaire muni d'ouvertures et de chicane internes pour favoriser la circulation de l'air et les échanges thermiques. Les conteneurs contenant les grappes CANDU¹⁷ sont chargés verticalement dans des alvéoles. Ces conteneurs sont en acier au carbone avec un revêtement en zinc ; le couvercle est soudé au corps. Chaque conteneur reçoit 10 paniers en acier inoxydable fermés par soudure, chaque panier accueillant 60 grappes de combustible usé qui ont été séchées au préalable. Chaque alvéole est fermée par un bouchon en béton surmonté d'un couvercle en acier. Ainsi, les alvéoles sont étanches et leur atmosphère interne peut être contrôlée par prélèvement (surveillance de la première barrière constituée par le gainage des combustibles). De ce fait, le silo assure une fonction de confinement en plus de la protection radiologique.

¹⁵ Il s'agit du concept de « *Multi Purpose Canister - MPC* », c'est-à-dire un conteneur à usage multiple, à savoir transport, entreposage, stockage. Ce concept est très répandu aux États-Unis.

¹⁶ AECL pour Énergie atomique du Canada limitée

¹⁷ Les réacteurs CANDU (contraction de CANada Deutérium Uranium), qui ont été inventés au Canada, utilisent de l'oxyde de deutérium (aussi appelé « eau lourde ») comme modérateur et de l'uranium naturel (non enrichi) comme combustible.

Les puissances thermiques des combustibles usés de type CANDU sont bien plus faibles que celles des combustibles usés de type REP. Ainsi, un module MACSTOR 200, de dimensions 21,6 x 8,1 x 7,5 m³, peut contenir 73 kW de combustibles CANDU sous la forme de 12 000 grappes, soit environ 2 300 t d'uranium, ce qui représenterait 480 combustibles REP. La puissance résiduelle représente seulement 150 W par combustible. Une température maximale de 160 à 180 °C est spécifiée pour les gaines des combustibles CANDU en entreposage (à comparer aux 350 à 450 °C retenus pour les gaines des combustibles REP dans les autres concepts d'entreposage).

L'option d'entreposage à sec développée par l'AECL est utilisée dans d'autres pays utilisant des réacteurs CANDU. C'est le cas de la Corée du Sud à Wolsong (voir figure 25) et de la Roumanie à Cernavoda (voir figure 26).

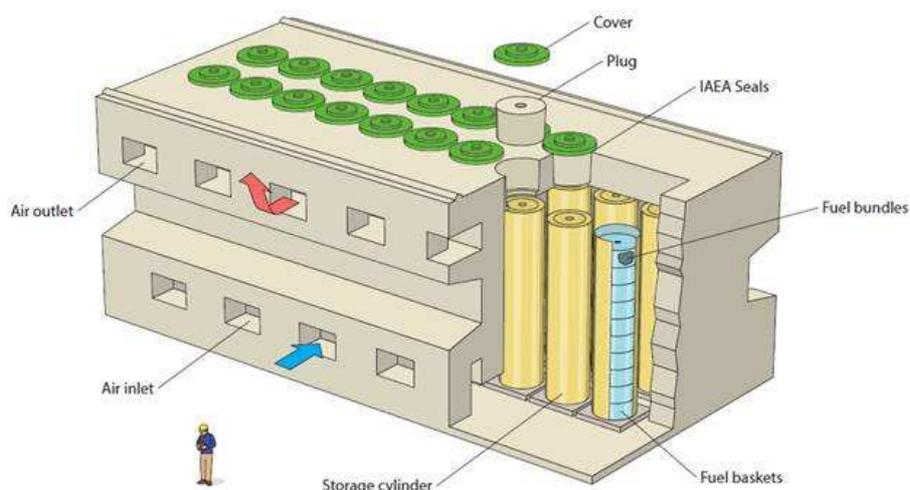


Figure 23 : Vue écorchée du concept d'entreposage MACSTOR®



Figure 24 : Photo d'un entreposage de type MACSTOR® à Gentilly (Canada)



Figure 25 : Photo d'un entreposage de type MACSTOR® à Wolsong (Corée du Sud)



Figure 26 : Photo de l'entreposage DICA de type MACSTOR® à Cernavoda (Roumanie)

Concept de silos semi-enterrés à chargement vertical

Parmi les concepts de silos semi-enterrés à chargement vertical, on peut citer ceux développés par la société HOLTEC International, à savoir les HI STORM 100U et UMAX. Ces derniers s'apparentent à des puits et sont dédiés à l'entreposage des combustibles usés des réacteurs à eau légère de types REP et REB pour une puissance de l'ordre de 35 kW par puits. Ce concept accueille des conteneurs soudés contenant 24 ou 32 combustibles REP, ou 68 combustibles REB. Plusieurs installations de ce type sont implantées sur des sites électronucléaires aux États-Unis comme par exemple sur les sites de San Onofre Nuclear Generating Station (SONGS), de Humbolt Bay Power Plant ou d'Ameren's Callaway nuclear power plant.

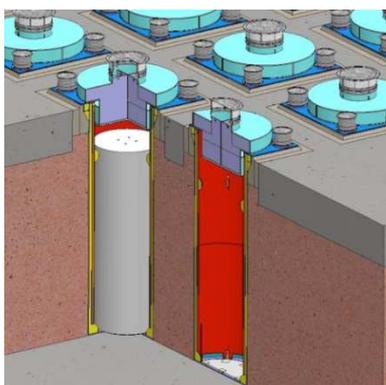


Figure 27 : Vue écorchée du concept HI-STORM UMAX

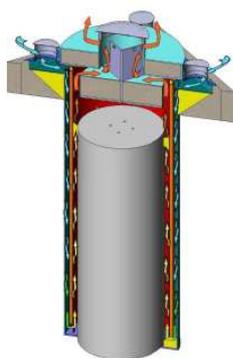


Figure 28 : Vue écorchée d'un puits du concept HI-STORM UMAX



Figure 29 : Entreposage de type HI-STORM UMAX - Centrale de Callaway (États-Unis)

Un concept d'entreposage à sec de ce type est également mis en œuvre depuis 1953 dans l'installation WMA « B » implantée sur le site de Chalk River au Canada pour l'entreposage de déchets et de combustibles de réacteurs expérimentaux. Cette installation consiste en un réseau de tubes en béton scellés sur une plaque également en béton située à environ 5 m de profondeur (voir figure 30). L'espace entre les tubes est comblé par du sable et une plaque en béton munie d'orifices au droit de chacun des tubes recouvre l'ensemble. Les tubes munis d'un « liner » en face intérieure accueille des paniers contenant des combustibles de réacteurs expérimentaux placés en conteneurs ; les puits sont fermés par des bouchons faisant office de protection radiologique. Compte tenu de la corrosion observée sur des conteneurs et sur certains combustibles, le combustible utilisé entreposé dans cette installation fait actuellement l'objet d'un programme de reprise et de reconditionnement.

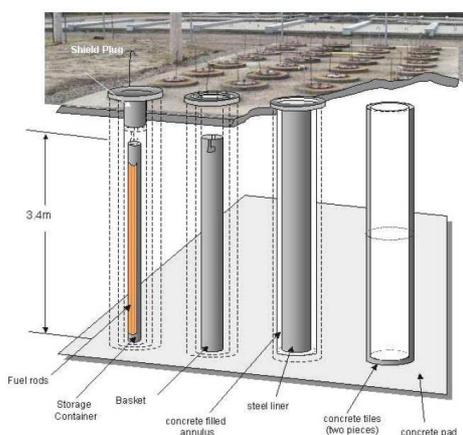


Figure 30 : Vue écorchée de l'installation WMA « B » à Chalk River (Canada)

Concept de silos de type « conteneurs »

Le concept de silos modulaires de type « conteneurs » est proche de celui des emballages, la différence étant que les « conteneurs » ne sont pas conçus pour permettre leur transport sur la voie publique.

Dans ce concept, la résistance mécanique et la protection radiologique sont assurées par la structure en béton standard ou de haute densité du conteneur d'entreposage.

On peut citer le HI-STORM 100 de la société HOLTEC International (voir figure 31 et figure 32) dédié à l'entreposage de combustibles usés issus des réacteurs de types REP et REB pour une puissance totale de 37 kW par conteneur. Ces conteneurs d'entreposage accueillent des conteneurs soudés de 24 ou 32 combustibles REP, ou de 68 combustibles REB.

Le corps du HI-STORM 100 est constitué de deux cylindres en acier (de 19 et 32 mm) entre lesquels est placée une épaisseur de 68 cm de béton. Une entrée d'air est située au pied du silo et la sortie d'air est située à l'extrémité supérieure. Le corps est refermé par un couvercle de 10 cm en acier vissé sous lequel se trouve un bloc en béton. Il a un diamètre de 3,4 m et une hauteur de 5,9 m pour une masse maximale en charge de 163 tonnes.

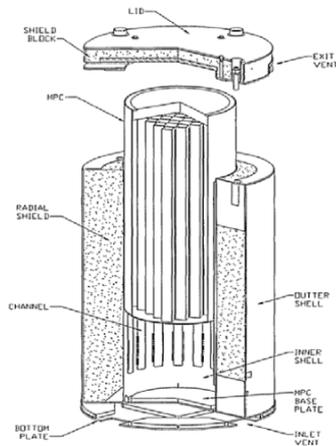


Figure 31 : Vue écorchée du concept HI-STORM 100



Figure 32 : Photo d'un entreposage utilisant le concept HI STORM 100

Des modèles similaires, comme par exemple le NAC-UMS, ont été développés par la société NAC, filiale d'Hitachi.

Par ailleurs, s'agissant de l'entreposage des combustibles usés de type CANDU, un conteneur en béton également appelé « silo » a été développé par la société AECL au Canada. Les sites de Point Lepreau (voir figure 33) et de Whiteshell (voir figure 34) mettent en œuvre ce silo en béton.

La capacité varie selon le site d'utilisation (de 1,9 à 10,3 tonnes de combustible). Les conteneurs sont placés verticalement sur un radier en béton. Ils sont chargés sur place, en ouvrant le bouchon situé en partie supérieure et en y descendant les combustibles regroupés en paniers en acier inoxydable. La dissipation de la chaleur (de l'ordre de 1 à 2 kW par conteneur) s'effectue par convection naturelle autour du conteneur.



Figure 33 : Entreposage sur le site de Point Lepreau (Canada) utilisant le silo béton de la société AECL



Figure 34 : Entreposage sur le site de Whiteshell (Canada) utilisant le silo béton de la société AECL

L'option d'entreposage à sec développée par la société AECL est utilisée dans d'autres pays utilisant des réacteurs CANDU. C'est le cas de l'Argentine (centrale nucléaire de Embalse) ou de la Corée du sud (site de Wolsong).



Figure 35 : Entreposage sur le site d'Embalse (Argentine) utilisant le silo béton de la société AECL



Figure 36 : Entreposage sur le site de Wolsong (Corée du Sud) utilisant le silo béton de la société AECL

5.3.3 Entreposage à sec sur site en emballages

De nombreux concepts d'emballages à double usage (transport et entreposage) ont été développés à partir des années 1990 (les CASTOR[®] et CONSTOR[®] de GNS, la famille des TN[®]24 de TN International, le HI-STAR 100 de HOLTEC International et les déclinaisons du NAC-STC aux États-Unis...).

Illustrations de l'entreposage sur site en emballages métalliques

En Suisse et en Belgique, les combustibles usés sont entreposés dans des emballages métalliques de transport et d'entreposage de la famille des TN[®]24 d'Orano TN, comme par exemple le TN[®]24 DH. Ce dernier est constitué d'un corps forgé d'environ 20 cm d'acier au carbone à revêtement en acier inoxydable contre lequel reposent une épaisseur de 13 cm de résine neutrophage et des plats externes en acier de 2 à 3 cm d'épaisseur. La résine est traversée par des conducteurs thermiques en cuivre. Le TN[®]24 DH est fermé par un premier couvercle en acier de plus de 30 cm d'épaisseur puis par un second couvercle de plus de 8 cm d'épaisseur, tous deux étant fixés par des vis à la bride du corps forgé. Il a un diamètre de 3 m sur une hauteur de 6,4 m pour une masse maximale en charge de 125 tonnes. Il peut accueillir jusqu'à 28 combustibles REP pour une puissance totale supérieure à 33 kW.

En phase de transport (voir figure 37), il est équipé de systèmes amortisseurs destinés à le protéger en cas d'accident. Ces équipements sont retirés en phase d'entreposage (voir figure 38), ce qui réduit son encombrement et sa masse.

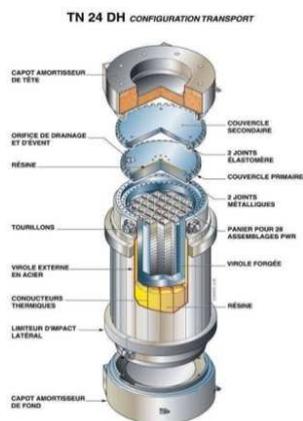


Figure 37 : Vue écorchée de l'emballage TN[®]24 DH en configuration Transport



Figure 38 : Vue écorchée de l'emballage TN[®]24 DH en configuration Entreposage

Ces TN[®]24 DH sont actuellement destinés à l'entreposage de combustibles usés sur le site de Doel en Belgique, dont le hall d'entreposage peut accueillir 165 emballages (voir figure 39 et figure 40).



Figure 39 : Photo extérieure du bâtiment d'entreposage à sec du site de Doel (Belgique)



Figure 40 : Photo de TN[®]24 DH entreposés dans le bâtiment d'entreposage à sec du site de Doel (Belgique)

La conception de l'ensemble des emballages de la famille TN[®]24, dédiée aux combustibles REP et REB, repose globalement sur les mêmes principes de dimensionnement, la puissance thermique totale par emballage pouvant aller jusqu'à 40 kW.

En Allemagne, les combustibles usés sont entreposés dans des emballages de transport et d'entreposage de la série CASTOR[®]. Le corps d'un emballage CASTOR[®] est constitué de fonte ductile d'épaisseur 30 à 40 cm. Sa longueur est d'environ 6 m, son diamètre de 2 m, et la masse en charge atteint 140 tonnes. Plusieurs modèles existent tels que le CASTOR[®] V/19 (voir figure 41), qui permet d'entreposer jusqu'à 19 combustibles REP pour une puissance thermique totale maximale de 39 kW, ou le CASTOR[®] V/52 (voir figure 42), qui permet d'entreposer jusqu'à 52 combustibles REB pour une puissance thermique totale maximale de 40 kW.



Figure 41 : Vue écorchée de l'emballage CASTOR[®] V/19



Figure 42 : Vue écorchée de l'emballage CASTOR[®] V/52

Deux options de conception d'entreposage se distinguent :

- Le concept « WTI/GNS » (voir figures ci-après), qui est ou sera utilisé sur les sites des centrales de Biblis, Grafenrheinfeld, Gundremmingen, Isar et Philippsburg ;

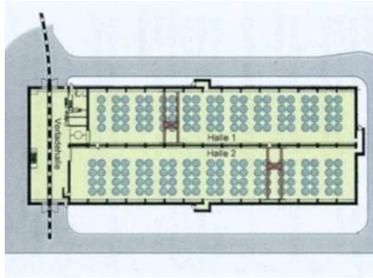


Figure 43 : Plan de masse du concept « WTI/GNS »

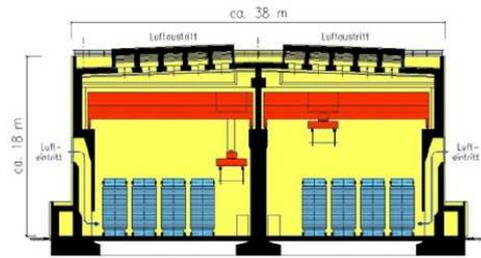


Figure 44 : Vue en coupe du concept « WTI/GNS »



Figure 45 : Photo extérieure d'un bâtiment d'entreposage de type « WTI/GNS »



Figure 46 : Photo intérieure d'un bâtiment d'entreposage de type « WTI/GNS »

- Le concept « STEAG » (voir figures ci-après), renforcé sur le plan de la radioprotection et de la résistance à la chute d'avion au moyen de voiles et d'une dalle de toit plus épais, qui est ou sera mis en œuvre sur les sites des centrales nucléaires de Brokdorf, Brunsbüttel, Grohnde, Krümmel, Lingen et Unterweser.



Figure 47 : Plan de masse du concept « STEAG »

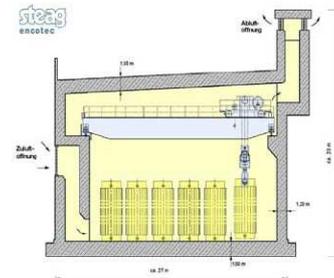


Figure 48 : Vue en coupe du concept « STEAG »



Figure 49 : Photos extérieure et intérieure d'un bâtiment d'entreposage de type « STEAG »

Pour ces deux concepts, la hauteur de levage des emballages est faible, minimisant la hauteur de chute en cas de lâcher de charge.

Sur le site de la centrale de Neckarwestheim, l'entrepôt accueillant depuis 2006 les emballages de combustibles usés est constitué de deux tunnels à faible profondeur (15 m), de longueurs respectives 84 et 90 m. L'architecture souterraine de l'entrepôt exploite la configuration particulière du site (voir figures ci-après).

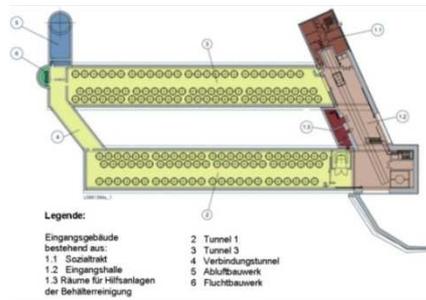


Figure 50 : Plan de masse de l'entreposage en tunnel de Neckarwestheim (Allemagne)

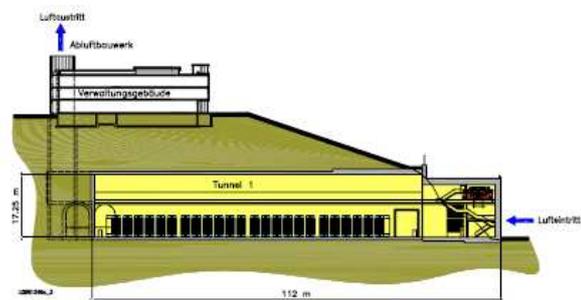


Figure 51 : Vue en coupe de l'entreposage en tunnel de Neckarwestheim (Allemagne)



Figure 52 : Photos extérieure et intérieure de l'entreposage en tunnel de Neckarwestheim (Allemagne)

Le procédé d'entreposage en emballages CASTOR® est également utilisé en République tchèque (centrale VVER de Dukovany - voir figure 53) et en Lituanie (centrale RBMK d'Ignalina) où, dans ce dernier cas, ils sont entreposés sur une aire extérieure bétonnée (voir figure 54).



Figure 53 : Entrepôt en emballages CASTOR® sur le site de la centrale de Dukovany (Rép. Tchèque)



Figure 54 : Entrepôt en emballages CASTOR® sur le site de la centrale d'Ignalina (Lituanie)

Illustrations de l'entreposage sur site en emballages en béton au Canada

Un conteneur développé par la société OPG (voir figure 55) présente une capacité unitaire de 384 combustibles CANDU pour une masse totale de 75 tonnes (dont 8,8 tonnes de combustibles d'une puissance thermique totale inférieure au kilowatt). Ce conteneur possède des parois en béton armé entre deux coquilles en acier. Le revêtement intérieur constitue l'enveloppe de confinement alors que le revêtement extérieur vise à accroître l'intégrité de la structure et à faciliter la décontamination de la surface du conteneur. Les conteneurs OPG sont placés dans un bâtiment métallique les protégeant des intempéries (voir figure 56).

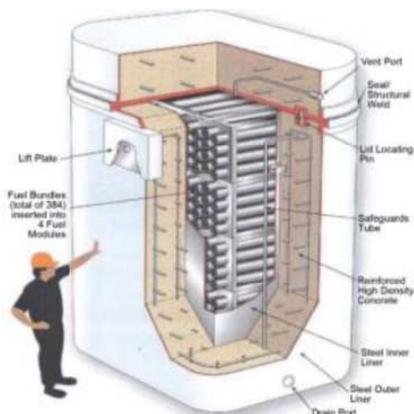


Figure 55 : Vue écorchée de l'emballage béton développé par la société OPG



Figure 56 : Photo d'un entreposage en emballages béton développés par la société OPG

5.4 Entreposage à sec centralisé

5.4.1 Entreposage à sec centralisé en casemates ou puits

Si l'entreposage à sec des combustibles usés des réacteurs REP d'EDF n'est pas mis en œuvre en France, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) exploite, depuis 1990, une casemate d'entreposage à sec de combustibles usés (« CASCAD ») sur le site de Cadarache (figure 57).

Cette installation accueille notamment des combustibles usés issus de l'exploitation du réacteur à eau lourde EL4 de Brennilis, en cours de démantèlement. Le principe de conception de cette installation repose sur une cellule d'entreposage en béton semi-enterrée comportant 319 puits verticaux en acier inoxydable suspendus à la dalle supérieure de cette cellule. Une cellule de déchargement et de manutention est située au-dessus de cette dalle (voir figure 58). Elle est également constituée de voiles épais en béton, pour assurer la protection radiologique. La puissance thermique maximale dans un puits est de 600 W.

L'emballage de transport est introduit dans la cellule de déchargement et de manutention, puis ouvert. La préhension d'un conteneur, son extraction de l'emballage, son déplacement au droit d'un puits d'entreposage puis son introduction dans le puits sont réalisés à l'aide d'un pont roulant télé-opéré.

Chaque puits d'entreposage est étanche (voir figure 59), constituant une double enveloppe de confinement avec les conteneurs. Le refroidissement des puits est assuré par une ventilation par convection naturelle de la cellule d'entreposage à laquelle peut être connecté un dispositif de ventilation forcée et filtrée en cas de détection de contamination.

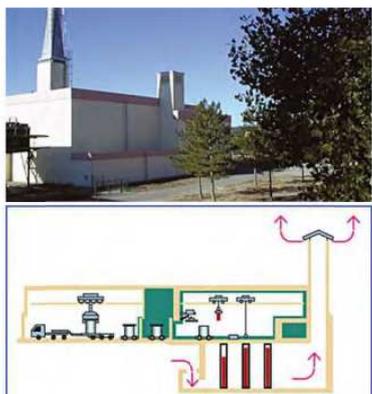


Figure 57 : Vues en élévation de l'installation CASCAD du CEA/Cadarache



Figure 58 : Photo de la cellule de déchargement et de manutention de l'installation CASCAD du CEA/Cadarache



Figure 59 : Photo du sommet des puits d'entreposage de l'installation CASCAD du CEA/Cadarache

Aux Pays-Bas, l'installation HABOG¹⁸, exploitée par COVRA¹⁹ sur le site de Borsele, entrepose la plus grande partie des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue ainsi que les combustibles usés issus des deux réacteurs de recherche néerlandais. Mise en service en 2003 pour une durée de cent ans, cette installation se divise en différents alvéoles d'entreposage et peut réceptionner huit types d'emballages de transport et accueillir douze types de colis de déchets. Les puits d'entreposage, qui sont étanches et remplis d'argon, renferment des colis de déchets vitrifiés et des combustibles usés placés en étuis inertés à l'hélium. Les puits sont refroidis par une ventilation par convection naturelle.



Figure 60 : Photo extérieure de l'installation HABOG (Borsele - Pays-Bas)



Figure 61 : Photo du sommet des puits d'entreposage de l'installation HABOG (Borsele - Pays-Bas)

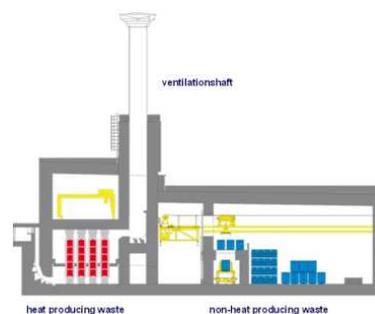


Figure 62 : Vue en coupe de l'installation HABOG (Borsele - Pays-Bas)

En Russie, le site de MCC²⁰ implanté à Zheleznogorsk accueille une installation centralisée destinée à entreposer à sec l'ensemble des combustibles usés issus de l'exploitation des réacteurs RBMK-1000 et VVER-1000 dans l'attente d'un éventuel traitement. Cette installation, mise en service en 2012 pour le premier bâtiment d'entreposage et en 2016 pour le second, utilise le concept d'entreposage en puits (voir figure 63). Sa durée d'exploitation prévue est de 50 ans.

¹⁸ HABOG pour Hoogradioactief Afval Behandelings- en OpslagGebouw - Bâtiment de traitement et d'entreposage des déchets radioactifs de haute activité.

¹⁹ COVRA pour Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval - Organisation centrale pour les déchets radioactifs.

²⁰ MCC pour Mining and Chemical Combine également dénommé Gorno-Kimichesky Kombinat (GKhK) ou Krasnoyarsk-26.



Figure 63 : Photos de la construction des puits et de l'installation centralisée d'entreposage du site de MCC (Zheleznogorsk – Russie)

5.4.2 Entreposage à sec centralisé en silos

Une installation d'entreposage à sec centralisé en silos utilisant le concept de la société Holtec International présenté au paragraphe 5.3.2 est en cours de construction en Ukraine afin d'y entreposer les combustibles usés issus des centrales de Rivne, Khmel'nitsky et South Ukraine. Il est ainsi prévu d'y entreposer 12 500 combustibles usés de type VVER-1000 et 4 000 combustibles usés de type VVER-400.

Par ailleurs, une demande d'autorisation de construction à Lea County (Nouveau-Mexique) d'une installation de ce type a été déposée aux États-Unis. Cette installation permettra à terme l'entreposage de 10 000 conteneurs de combustibles usés (voir figure 64).



Figure 64 : Vue conceptuelle du projet d'installation d'entreposage à sec centralisé de Lea County (États-Unis)

5.4.3 Entreposage à sec centralisé en emballages

Plusieurs pays européens disposent d'une ou plusieurs installations d'entreposage centralisé de combustibles usés en emballages comme, par exemple, l'Allemagne et la Suisse.

En Allemagne, les sites d'entreposage centralisé de Gorleben et Ahaus (voir figures ci-après), construits selon le concept « WTI/GNS » présenté au paragraphe 5.3.3, sont dédiés à l'entreposage des combustibles REP et REB ainsi qu'aux colis de déchets HA vitrifiés dans des emballages CASTOR®. Ces installations peuvent accueillir 420 emballages chacune.



Figure 65 : Vue aérienne du site de Gorleben (Allemagne)



Figure 66 : Photo de l'intérieur de l'entreposage centralisé du site de Gorleben (Allemagne)



Figure 67 : Vue aérienne du site d'Ahaus (Allemagne)



Figure 68 : Photo de l'intérieur de l'entreposage centralisé du site d'Ahaus (Allemagne)

En Suisse, un site d'entreposage centralisé de combustibles REP (y compris MOX) et de déchets HA vitrifiés, de conception comparable aux installations centralisées allemandes, est exploité par ZWILAG à Würenlingen depuis 2001 (voir figure 69). Le hall d'entreposage (voir figure 70) peut accueillir 200 emballages de transport et d'entreposage de la famille TN[®]24 (société Orano TN), ce qui correspond à 50 années de production des cinq réacteurs nucléaires suisses.



Figure 69 : Photo du bâtiment d'entreposage centralisé ZWILAG (Suisse)



Figure 70 : Photo du hall d'entreposage de l'installation ZWILAG (Suisse)

Enfin, comme indiqué au chapitre 2, le Japon prévoit de mettre en service en 2018 une installation d'entreposage à sec centralisé de combustibles usés, à Mutsu (voir figure 71), tout en maintenant une politique de traitement des combustibles usés. Cette installation accueillera des combustibles usés en emballages de transport et d'entreposage dans l'attente de leur futur traitement. La capacité totale de l'entreposage sera à terme de 5 000 t d'U.

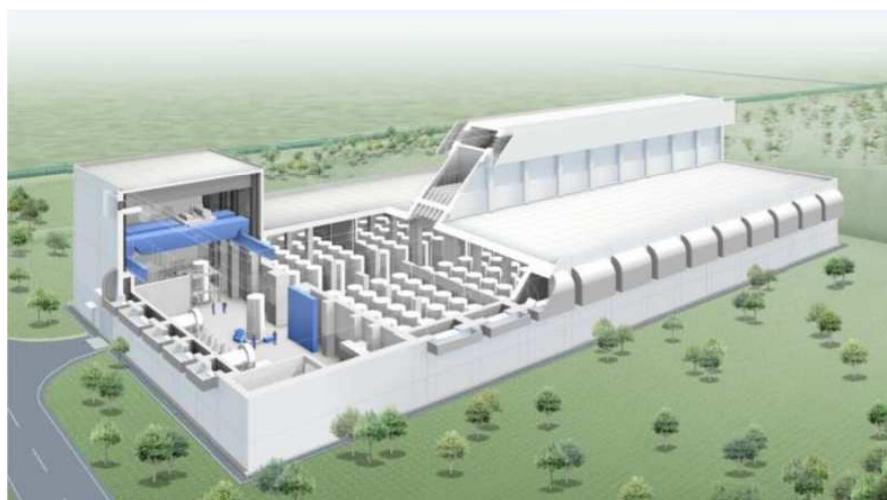


Figure 71 : Vue écorchée de la future installation d'entreposage centralisé de Mutsu (Japon)

5.5 Atouts et facteurs limitants de l'entreposage à sec

Le tableau présenté en Annexe 4 synthétise les principales caractéristiques des entreposages sous eau et à sec.

5.5.1 Atouts de l'entreposage à sec

La plupart des fonctions de sûreté est assurée par des dispositifs passifs et simples de mise en œuvre :

- la radioprotection est assurée par la structure de l'entreposage (module ou emballage) ;
- la seconde barrière de confinement est assurée par des barrières fermées et étanches. Elle est protégée mécaniquement et thermiquement par les structures (silos, dalles en béton pour les puits, épaisses viroles en acier ou en béton pour les emballages d'entreposage) ;
- l'évacuation de la chaleur se fait essentiellement de manière passive, par convection naturelle d'air. Dans les concepts fermés (hangar, puits), il peut toutefois être nécessaire de recourir à un système actif (convection forcée).

L'exploitation de ce type d'entreposages est donc en général simple : les actions de conduite sont quasi-inexistantes et les contrôles à réaliser limités. Ce type d'entreposages présente en outre une grande flexibilité et modularité des capacités d'entreposage, qui peuvent être créées au fur et à mesure des besoins.

Par ailleurs, pour les concepts de types silos et emballages, le terme source en cas d'accident majeur est potentiellement plus faible du fait de l'espacement entre les modules d'entreposage. Les contre-mesures à l'extérieur du site, qui s'avèreraient nécessaires, seraient également d'une étendue moindre que celles associées aux entreposages sous eau en pareille situation. Ceci est toutefois lié au fait que, par conception, les entreposages à sec ne peuvent recevoir que des combustibles suffisamment refroidis.

5.5.2 Facteurs limitants de l'entreposage à sec

L'utilisation des entreposages à sec est limitée par leur capacité d'évacuation de la puissance thermique des combustibles usés. À titre d'exemple, pour la famille des emballages TN[®]24, le contenu doit avoir une puissance thermique inférieure à 40 kW, correspondant à une puissance moyenne par combustible inférieure à 2 kW. Ceci

correspond, par exemple (voir figure 72), à un combustible UNE initialement enrichi à 3,7 % en ^{235}U , irradié à 50 GWj/tU et refroidi cinq ans.

Pour un combustible MOX à 8,65 % en plutonium irradié à 50 GWj/tU, cela correspond à un temps de refroidissement supérieur à 50 ans.

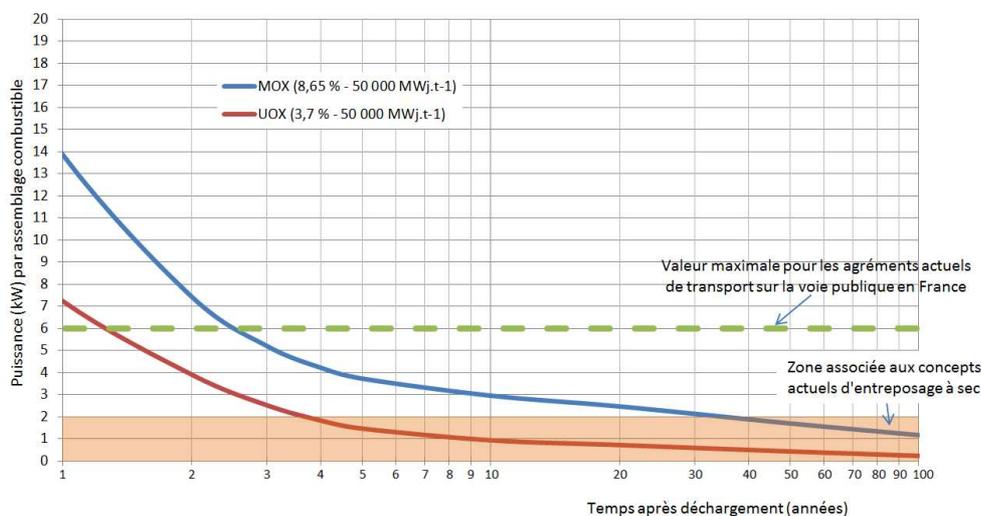


Figure 72 : Durée de refroidissement nécessaire avant entreposage à sec, pour des combustibles irradiés dans un REP en France

Cette limitation provient notamment du fait que la température maximale de la gaine des combustibles est limitée en général à des valeurs comprises entre 350 et 450 °C pour le zircaloy, pour limiter les phénomènes de vieillissement.

Ainsi, à moins de réduire le nombre de combustibles par emballage pour les combustibles de puissance thermique élevée (réduisant la capacité d'entreposage), il est nécessaire de maintenir plus longtemps ces combustibles usés en piscine pour refroidissement.

S'agissant de la surveillance, les combustibles usés entreposés à sec sont difficilement inspectables directement. Or, leur surveillance est nécessaire pour s'assurer de l'absence de dégradation des gaines qui constituent la première barrière de confinement de l'entreposage. Une telle dégradation serait également préjudiciable pour les opérations intervenant après la période d'entreposage. Selon le type d'entreposage, une « cellule chaude » sur le site pourrait ainsi s'avérer nécessaire pour assurer une surveillance suffisante des combustibles.

Sur ce point, de nombreuses études sont en cours concernant le vieillissement des gaines de combustibles, mais elles sont encore peu nombreuses pour les combustibles usés à haut taux de combustion et les combustible MOX.

Enfin, les entreposages à sec sont souvent moins denses que ceux sous eau, nécessitant une emprise au sol plus importante. À cet égard, de nouveaux concepts sont développés pour superposer les conteneurs afin de réduire l'emprise au sol.

6 CONCLUSION

Les combustibles usés issus des réacteurs électronucléaires doivent faire l'objet d'une phase intermédiaire d'entreposage à la suite de leur déchargement du réacteur. En effet, leur puissance thermique initiale est trop élevée et une décroissance des radioéléments contenus permettant une baisse graduelle de cette puissance est nécessaire pour pouvoir, d'abord les transporter, ensuite les mettre en œuvre dans la filière de gestion retenue. Ainsi, dans tous les cas, un premier entreposage a lieu dans la piscine de désactivation associée au réacteur. Ensuite, selon le choix de gestion effectué (traitement ou pas), deux pratiques sont mises en œuvre de par le monde.

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 avant traitement (généralement entre cinq et dix ans après déchargement du réacteur). L'utilisation d'un tel type d'entreposage est essentiellement liée aux procédés de ces usines, les piscines recevant les combustibles étant directement reliées aux ateliers de traitement. De plus, ces piscines sont généralement de capacité importante pour assurer un découplage entre l'usine et les réacteurs et un refroidissement complémentaire. Une fois séparés, l'uranium et le plutonium sont destinés à un recyclage sous forme de combustibles à base de plutonium (MOX) ou d'uranium de retraitement réenrichi en isotope 235 de l'uranium (URE). Le mode d'entreposage des combustibles MOX et URE usés dépend alors du devenir envisagé de ces combustibles dans les pays concernés.

En l'absence de traitement des combustibles usés (cas le plus fréquent dans le monde), les combustibles déchargés sont généralement, après un refroidissement suffisant en piscine, placés dans des entreposages à sec. Les concepts d'entreposage actuels sont basés sur une puissance thermique moyenne des combustibles voisine de 2 kW. Dans une certaine mesure, ces concepts devraient toutefois pouvoir être adaptés.

Ainsi, la puissance thermique unitaire des combustibles à entreposer est un élément déterminant pour définir les types d'entreposage envisageables (cf. figure 73).

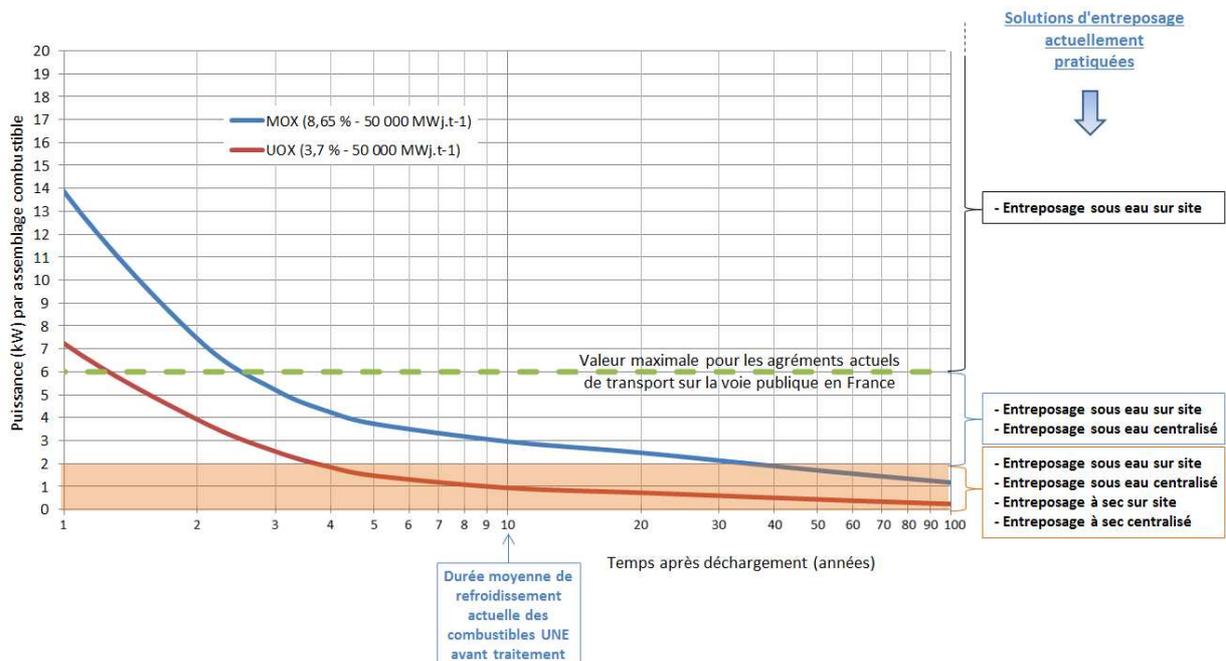


Figure 73 : Adéquation des solutions d'entreposage en fonction de la puissance thermique du combustible utilisé

En tout état de cause, ces deux types d'entreposage sont complémentaires, mais le choix de l'un ou de l'autre après une phase initiale de refroidissement nécessairement en piscine, dépend largement des choix

nationaux en termes de gestion des combustibles usés.

En France, le choix d'utiliser l'entreposage en piscine est tout d'abord lié à la décision de traiter les combustibles usés pour en recycler le plutonium (24 réacteurs de 900 MWe actuellement autorisés à mettre en œuvre des combustibles MOX) et l'uranium (quatre réacteurs de 900 MWe actuellement autorisés à mettre en œuvre des combustibles URE).

Après déchargement du réacteur, les combustibles URE usés font l'objet :

- d'un entreposage dans les piscines des réacteurs jusqu'à l'atteinte de caractéristiques compatibles avec leur transport vers l'établissement Orano Cycle de La Hague, notamment une puissance thermique maximale de l'ordre de 6 kW par combustible dans l'état actuel des emballages de transport et de leurs agréments ;
- d'un entreposage dans les piscines de l'établissement Orano Cycle de La Hague jusqu'à leur traitement intervenant actuellement environ 10 ans après la fin de l'irradiation en réacteur.

Les combustibles URE et MOX usés sont gérés de manière similaire, mais leur traitement est différé. En l'attente de décisions sur leur devenir, EDF prévoit la création d'une piscine d'entreposage centralisé des combustibles MOX et URE usés, pour une durée d'une centaine d'années.

Les combustibles URE usés présentent des caractéristiques comparables à celles des combustibles URE usés. Les combustibles URE actuellement utilisés par EDF pourraient, dans les concepts actuels, être entreposés à sec après environ cinq ans de refroidissement. Cependant, au regard du temps restant avant traitement, l'intérêt de l'utilisation de ce type d'entreposage paraît limité. En cas d'indisponibilité prolongée d'une usine de traitement des combustibles usés (conduisant à une saturation à terme des capacités d'entreposage existantes), le recours à de tels entreposages pourrait toutefois être une solution.

Les combustibles MOX chargés en réacteur ont une teneur élevée en plutonium pour obtenir un taux de combustion équivalent à celui des combustibles URE auxquels ils sont associés en réacteur. Du fait de cette teneur en plutonium et de sa composition isotopique, les combustibles MOX usés ont une puissance thermique plus élevée. En raison d'une teneur en transuraniens plus élevée, cette puissance décroît aussi moins vite. Leur temps de refroidissement avant de pouvoir être placés en entreposage à sec est ainsi nettement plus long que pour les combustibles URE usés, soit plusieurs dizaines d'années pour atteindre une puissance thermique par combustible de 2 kW. Un recours à des entreposages à sec pourrait donc être envisagé au-delà de cette période de temps.

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. 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.

Les exigences majeures de sûreté d'un entreposage en piscine sont le maintien d'un inventaire en eau suffisant dans la piscine et la disponibilité de systèmes de refroidissement en toutes circonstances plausibles. En effet, du fait de la forte puissance unitaire des combustibles usés contenus, une perte prolongée de refroidissement sans apport d'eau pourrait entraîner des conséquences très importantes pour l'environnement, avec une impossibilité d'accéder au proche voisinage de la piscine du fait du débit de dose induit par les combustibles, en l'absence d'atténuation des rayonnements par l'eau.

En conséquence, une piscine d'entreposage, notamment si elle reçoit des combustibles usés peu refroidis, doit faire l'objet d'une conception particulièrement robuste, avec des marges suffisantes pour faire face aux risques

envisageables, et d'une exploitation permettant une surveillance adaptée, tant de l'installation que des combustibles présents.

Le retour d'expérience de l'accident de Fukushima a permis de renforcer encore les approches de sûreté pour maîtriser ces risques, en visant le maintien en eau des combustibles en situations extrêmes d'origine naturelle.

Les techniques industrielles actuelles permettent de réaliser des piscines assurant la maîtrise des risques de découverte des combustibles, les bâtiments abritant la piscine assurant la protection contre les agressions externes (coque « avion » notamment).

La durée caractéristique de réalisation d'une telle installation peut être estimée à une dizaine d'années, au vu du retour d'expérience actuel des installations nucléaires construites en France.

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, et se prête particulièrement bien à une construction modulaire, s'adaptant aux besoins, voire permettant le remplacement de modules anciens au cours du temps.

Les exigences de sûreté sont le maintien du refroidissement passif et la qualité des barrières de confinement entre les matières radioactives et l'environnement.

Ce type d'entreposage présente l'avantage d'une conception plus simple et robuste et limite les opérations d'exploitation. Selon la conception, la surveillance directe de l'état des gaines des combustibles (la première barrière de confinement), qui sont soumises à des conditions thermiques plus pénalisantes, n'est en général pas possible.

En tout état de cause, en cas d'accident, le nombre de combustibles concernés, moins important, et la puissance thermique de ces combustibles, plus faible, entraîneraient des conséquences plus limitées pour l'environnement.

La durée caractéristique de la réalisation d'une telle installation peut être estimée à environ cinq ans, en fonction notamment de la modularité de l'installation et du recours ou non à des concepts d'emballage existants.

Par ailleurs, quel que soit le type d'entreposage, la prise en compte d'une durée d'entreposage significativement plus longue que les durées usuellement retenues (quelques dizaines d'années) nécessitera la définition d'exigences adaptées (notamment en termes de conception des ouvrages de génie civil et de marges de sûreté).

Pour l'IRSN, un point particulièrement important pour la sûreté des opérations de gestion des combustibles usés est la maîtrise du vieillissement des gaines des combustibles à base de zirconium, qui dépend de la température d'entreposage. En effet, ces gaines constituent la première barrière de confinement des matières radioactives. En outre, leur tenue mécanique est importante pour les opérations intervenant après la phase d'entreposage (transport, traitement ou mise en stockage).

Sur ce point, les entreposages sous eau présentent des garanties, du fait des températures d'entreposage faibles et des possibilités d'examen direct des gaines. En outre, des parades (mise en surconteneur du combustible défaillant...) peuvent être mises en œuvre en cas de détection de phénomènes de vieillissement. Le retour d'expérience disponible en France et dans le monde sur le comportement des gaines sous eau est significatif, du moins sur une période de quelques dizaines d'années.

Dans les entreposages à sec, la capacité d'examen direct et aisé des gaines de combustibles est plus réduite. Les contrôles réalisés sont au mieux indirects (absence de relâchement de gaz dans la cavité de l'emballage...), voire impossibles (cas des conteneurs soudés étanches contenant les combustibles et constituant la seconde et ultime barrière de confinement) ; ils ne permettent pas une détection d'un mécanisme de vieillissement.

Dans ce cas, la garantie de la maîtrise du vieillissement des gaines repose tout particulièrement sur des études, qui ont notamment permis de définir la température maximale acceptable des gaines en entreposage. Les examens de combustibles réalisés jusqu'à présent et dont l'IRSN a eu connaissance n'ont pas mis en cause ces études. Toutefois, de nombreuses études se poursuivent. En outre, les éléments disponibles pour les combustibles présentant des taux de combustion élevés (supérieurs à 45 GWj/t), pour les combustibles MOX (notamment de teneur initiale en plutonium importante) et globalement pour de longues durées d'entreposage (plus de 40 ans) sont limités.

En conclusion, l'IRSN retient qu'un choix de type d'entreposage de combustibles usés doit être apprécié au regard des considérations suivantes.

Les deux types d'entreposage de combustibles usés envisageables (sous eau ou à sec) ne répondent pas totalement aux mêmes besoins, l'entreposage en piscine étant impératif pour les combustibles peu refroidis et l'entreposage à sec convenant bien aux combustibles très refroidis.

Le type de combustible usé (UNE, MOX, URE) influe sur le type d'entreposage à retenir, au minimum durant une certaine période de temps, les combustibles MOX présentant une puissance thermique plus élevée pendant une durée plus longue.

Du point de vue de la sûreté, quel que soit le type d'entreposage, le paramètre déterminant est la puissance thermique des combustibles entreposés. À cet égard, les entreposages en piscine, qui contiennent en général des combustibles plus chauds, nécessitent des dispositions de sûreté plus importantes que les entreposages à sec plus passifs. Dans ces derniers, les gaines (première barrière de confinement) sont plus sollicitées thermiquement et moins aisément contrôlables.



**Commission d'enquête sur la sûreté
Et la sécurité des installations nucléaires**

Paris, le 26 mars 2018

Monsieur le Directeur général,

À la lumière des premiers travaux de notre commission d'enquête, l'enjeu de l'entreposage du combustible nucléaire irradié nous apparaît comme un point crucial pour la sûreté et de la sécurité nucléaire dans notre pays. En effet, les choix de gestion du combustible conduisent à ce qu'une partie ne soit pas retraitée. La saturation progressive des capacités disponibles dans les piscines de désactivation, adossées à chaque réacteur et dans les piscines des usines de retraitement de La Hague conduit à un phénomène d'accumulation progressive des quantités de combustibles usés et de manque de capacités d'entreposage.

Nous mesurons progressivement, à travers nos auditions, le potentiel de danger que présente ce combustible irradié et les enjeux importants que la maîtrise de son entreposage représente vis-à-vis de la sûreté et de la sécurité nucléaires. Nous avons dans ce contexte pris connaissance du projet d'EDF consistant à développer de nouvelles capacités d'entreposage sous la forme d'une piscine d'entreposage centralisée, dimensionnée pour entreposer le combustible usagé sur une période de cent ans, dont la mise en service ne semble toutefois pas prévue par l'exploitant avant un horizon 2030.

Nous avons parallèlement observé que l'entreposage en piscine n'est pas la seule option technique envisageable et appris qu'une part croissante du combustible usé fait l'objet dans un nombre important de pays d'un entreposage dit à sec, dans des « châteaux » eux mêmes conservés à l'air libre ou, de façon plus pérenne, dans des ouvrages d'entreposage en surface. Enfin, les experts que nous avons auditionnés jusqu'ici expriment des avis très contrastés quant aux bénéfices respectifs pour la sûreté et la sécurité de l'entreposage sous eau et de l'entreposage à sec du combustible usé.

Lors de votre audition, vous nous avez déclaré que l'Institut que vous dirigez n'avait pas engagé d'étude comparative des mérites de ces deux options mais qu'il serait sans doute en mesure de le faire. Nous sollicitons dès lors auprès de vous cet éclairage qui nous semble indispensable pour nous permettre de formuler des conclusions et, le cas échéant, des recommandations sur cette question essentielle.

Nous souhaiterions ainsi disposer avant la fin de nos travaux, et si possible début juin, d'un avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur les enjeux associés, en termes de sûreté nucléaire, à une stratégie de gestion du combustible reposant sur un entreposage en piscine uniquement ou faisant appel à un entreposage à sec. Au vu des

différents éléments d'appréciation que nous avons d'ores et déjà identifiés, nous aimerions en particulier que cet avis nous éclaire sur :

- les différentes solutions existantes et envisageables et leurs principales caractéristiques en matière d'entreposage sous eau (piscines décentralisées en réacteur ou centralisées comme à La Hague, avec ou sans densification...) et d'entreposage à sec (décentralisé sur les sites des réacteurs ou centralisé, à l'air libre ou en ouvrage dédié...), en intégrant dans un cas comme dans l'autre le degré possible de « bunkerisation » ;

- les avantages et inconvénients respectifs du point de vue de la minimisation des risques de ces deux types d'entreposage, en fonction de leurs caractéristiques et leur capacité à maintenir le confinement du combustible usé dans différentes conditions dégradées ;

- les délais nécessaires, en fonction notamment de la nature du combustible, avant son transfert éventuel de l'entreposage sous eau pour désactivation à l'entreposage à sec, et les durées maximales d'entreposage envisageables pour le combustible dans ces deux options ;

- les délais prévisibles de mise en œuvre de nouvelles options, qu'il s'agisse de conception, d'autorisation, de construction des conteneurs ou de nouvelles installations, de transfert d'un mode d'entreposage à un autre voire de transport d'un site à un autre ;

- les implications croisées entre les choix de gestion du combustible et les options d'entreposage, en particulier l'articulation des conditions d'entreposage avec les choix futurs de retraitement différé ou de stockage définitif des combustibles usés concernés ;

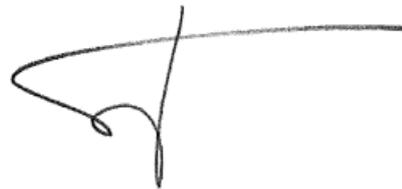
- et plus généralement, une appréciation générale de la capacité des différentes stratégies envisageables à réduire le potentiel de danger de l'entreposage et sa vulnérabilité.

Nous souhaitons enfin, si vous acceptez de mener cette analyse pour éclairer nos travaux, que l'Institut intègre dans cette démarche le panorama international du retour d'expérience et des options retenues dans d'autres pays disposant d'un important programme nucléaire.

Vous remerciant par avance, je vous prie d'agréer, monsieur le directeur général, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Le Président Paul CHRISTOPHE

Cordialement



Annexe 2 ÉTAT DES LIEUX DES PRATIQUES À L'INTERNATIONAL

Le tableau-ci-après recense les pratiques à l'international telles que présentées dans les rapports nationaux émis par les pays signataires de la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté des déchets radioactifs. Seuls les pays disposant de réacteurs électronucléaires de puissance sont mentionnés dans ce tableau.

Pays	Entreposage en piscine sur site	Entreposage en piscine centralisé	Entreposage à sec sur site	Entreposage à sec centralisé	Gestion des combustibles usés
Afrique du Sud	Dans les piscines attenantes aux réacteurs.	Sans objet (un seul site).	Un bâtiment d'entreposage à sec en emballages métalliques (CASTOR) permet l'entreposage sur le site de Koeberg d'anciens combustibles usés des réacteurs de ce site.	Sans objet (un seul site).	Stratégie de "Wait-and-See" : (décision non prise entre stockage direct ou traitement)
Allemagne	Dans piscines attenantes aux réacteurs (18 piscines en exploitation). Le site d'Obrigheim dispose d'une installation d'entreposage sous eau supplémentaire (en cours de désentreposage).	Non	12 sites disposent d'un entreposage à sec en emballages métalliques (de type CASTOR).	Deux installations d'entreposage centralisé en emballages métalliques (de type CASTOR) sont situées à Ahaus et Gorleben.	Traitement arrêté Stockage direct.
Argentine	Dans piscines attenantes : - sur site d'Atocha : dans trois piscines, dont une « densifiée » ; - sur le site d'Embalse : en piscine pendant au moins 6 ans.	Non	Sur site d'Atocha : projet de construction d'un entreposage en silos. Sur le site d'Embalse : installation ASECQ (entreposage en silos en béton).	Non	Décision sur le traitement reportée à 2030.

Pays	Entreposage en piscine sur site	Entreposage en piscine centralisé	Entreposage à sec sur site	Entreposage à sec centralisé	Gestion des combustibles usés
Arménie	Dans les piscines attenantes aux réacteurs.	Non	Oui dans deux installations d'entreposage de type silo horizontal (concept NUHOMS) ; le transfert est possible après une durée de refroidissement en piscine comprise entre cinq et 12 ans selon le type de combustible.	Non	Stratégie de "Wait-and-See".
Belgique	Dans les piscines attenantes : - deux sur le site de Doel ; - deux sur le site de Tihange. Un bâtiment héberge huit piscines supplémentaires sur le site de Tihange pour les combustibles usés des trois réacteurs du site.	Non	Un entreposage à sec sur le site de Doel (entreposage en emballages métalliques dans un bâtiment dédié). Un entreposage similaire en projet sur le site de Tihange.	Non	Traitement arrêté. Stratégie de "Wait-and-See".
Brésil	Dans piscines (densifiées) attenantes à chacun des réacteurs.	Non	Un entreposage à sec en silos horizontaux et verticaux est en projet.	Non	Stratégie de "Wait-and-See".
Bulgarie	Dans piscines attenantes pendant au moins trois ans. Le site de Kozloduy dispose également d'une installation d'entreposage sous eau comprenant quatre piscines.	Non	Un bâtiment d'entreposage à sec en emballages en béton (CONSTOR) permet l'entreposage de longue durée sur le site de Kozloduy des combustibles usés des réacteurs de ce site.	Non	Traitement à l'étranger (Fédération de Russie).

Pays	Entreposage en piscine sur site	Entreposage en piscine centralisé	Entreposage à sec sur site	Entreposage à sec centralisé	Gestion des combustibles usés
Canada	Dans piscines attenantes aux réacteurs (pendant six à 10 ans en fonction des besoins spécifiques des sites).	Non	Installations d'entreposage à sec sur les différents sites utilisant divers concepts tels que les silos de surface à chargement vertical (MACSTOR), les silos de type conteneurs en béton ou les emballages en béton.	Non	Étude en vue du stockage direct.
Chine	Dans piscines attenantes aux réacteurs.	Entreposage centralisé sous eau dans l'usine pilote de retraitement sur le site de JAEC (Jiuquan Atomic Energy Complex).	Existant à Qinshan : Entreposage à sec en silos de surface à chargement vertical (MACSTOR) pour les combustibles CANDU usés après au moins six ans de refroidissement. En construction : deux installations d'entreposage à sec en emballages métalliques sur les sites de Daya Bay et de Tianwan.	Non	Usine pilote de traitement sur le site de JAEC (Jiuquan Atomic Energy Complex). Projet d'usine de traitement industrielle en cours de négociation.
Corée du Sud	Dans piscines attenantes aux réacteurs. Pour les piscines des REP, saturation gérée par densification des entreposages ou répartition interpiscines).	non	Installations d'entreposage à sec des combustibles usés CANDU (en silo de surface à chargement vertical de type MACSTOR et en silos en béton) sur le site de Wolsong.	Projet d'installation d'entreposage à sec centralisé (site à définir).	Stockage direct.
Croatie	Dans la piscine attenante au réacteur.	Sans objet (un seul site).	Projet d'entreposage à sec en silos de type "conteneur" sur le site de Krsko.	Sans objet (un seul site).	Stockage direct.

Pays	Entreposage en piscine sur site	Entreposage en piscine centralisé	Entreposage à sec sur site	Entreposage à sec centralisé	Gestion des combustibles usés
Émirats Arabes Unis	Dans les piscines attenantes aux réacteurs (dimensionnées pour entreposer le combustible usé correspondant à 20 ans d'exploitation).	Sans objet (un seul site).	Une installation d'entreposage à sec est d'ores-et-déjà à l'étude.	Sans objet (un seul site).	Stockage direct.
Espagne	Dans piscines attenantes qui ont été densifiées.	Non	Installations d'entreposage à sec sur le site de Trillo en emballages métalliques (de type ENSA-DPT) et sur les sites de José Cabrera et d'Asco en silos de type conteneurs (concept HI-STORM 100). Installations similaires en projet pour les sites de Santa María de Garoña, Almaraz et Cofrentes.	Projet de regroupement des combustibles usés et des déchets sur le site de Vilar de Canas.	Traitement arrêté. Stockage direct.
États-Unis	Dans piscines attenantes aux réacteurs.	Non	71 installations d'entreposage à sec sur sites sont autorisées (34 États ont au moins une installation de ce type). Les types d'entreposages les plus utilisés sont les silos de surface à chargement horizontal (type Nuhoms) ou vertical (type HI-STORM 100), les silos semi-enterrés à chargement vertical (type HI-STORM UMAX) ou les silos de type conteneurs en béton.	Non (projet de Yucca Mountain en stand-by).	Traitement des combustibles usés des réacteurs de puissance arrêté à la fin des années 70. Stockage direct.

Pays	Entreposage en piscine sur site	Entreposage en piscine centralisé	Entreposage à sec sur site	Entreposage à sec centralisé	Gestion des combustibles usés
Fédération de Russie	Dans piscines attenantes aux réacteurs (pendant au moins trois ans).	Dans les piscines des usines de retraitement (PA-Mayak et MCC).	Plusieurs installations d'entreposage à sec sur site.	Installation centralisée d'entreposage à sec en puits sur le site de MCC (pour les combustibles usés issus de l'exploitation des réacteurs RBMK-1000 et VVER-1000).	Traitement dans plusieurs usines (dont PA-Mayak).
Finlande	Dans les piscines attenantes aux réacteurs (pendant un à cinq ans). Chaque site dispose d'une installation d'entreposage sous eau du combustible utilisé dans l'attente de la disponibilité du stockage en couche géologique profonde.	Non	Non	Non	Stockage direct.
France	Dans les piscines « BK » attenantes aux réacteurs.	Dans les quatre piscines en exploitation de l'établissement Orano Cycle de La Hague. + Projet EDF de création d'une piscine d'entreposage centralisé (principalement pour les combustibles MOX et URE).	Non	Non à l'exception de l'installation CASCAD (entreposage de combustibles EL4).	Traitement dans les Usines de l'établissement Orano Cycle de La Hague (combustible UNE).
Hongrie	Dans piscines attenantes aux réacteurs (pendant au moins environ quatre ans).	Non	Entreposage à sec sur site dans une installation d'entreposage en puits (concept "Modular Vault Dry Storage").	Non	Traitement à l'étranger (Fédération de Russie).

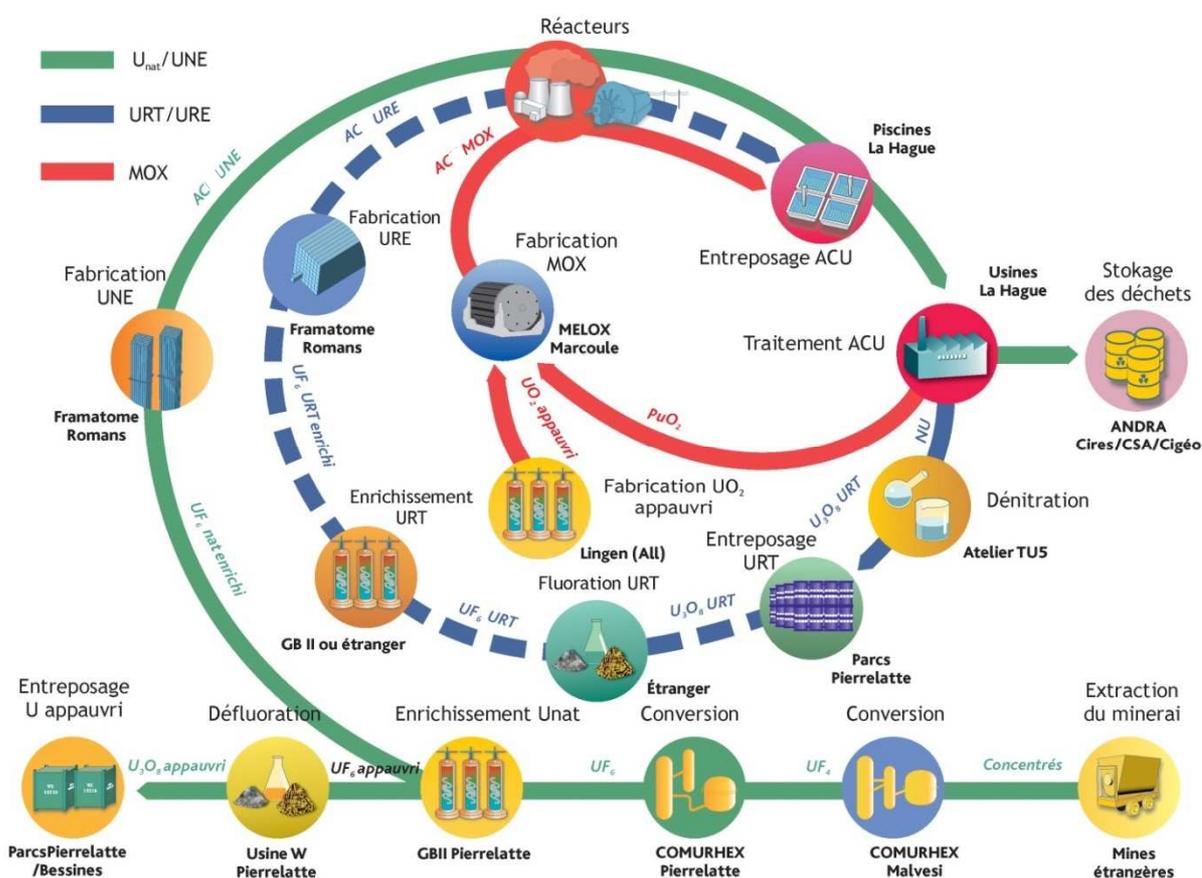
Pays	Entreposage en piscine sur site	Entreposage en piscine centralisé	Entreposage à sec sur site	Entreposage à sec centralisé	Gestion des combustibles usés
Italie	Non	Installation, dénommée AVOGADRO, d'entreposage sous eau centralisé sur le site de Saluggia.	Non	Non	Traitement à l'étranger (France).
Japon	Dans les piscines attenantes aux réacteurs (sur 17 sites). La centrale accidentée de Fukushima Dai-ichi dispose également d'une piscine de site.	Les piscines de l'usine de retraitement de Rokkasho constituent un entreposage centralisé dans l'attente du traitement des combustibles usés.	Deux sites (Fukushima Daiichi et Tokai n°2) disposent d'installations d'entreposage à sec sur site en emballages métalliques.	Une installation d'entreposage à sec centralisé en emballages métalliques est en cours de construction à Mutsu.	Traitement (usine en attente de redémarrage).
Kazakhstan	Non	Non	Non	Entreposage à sec (en emballages mixtes métal et béton) centralisé sur le site de Baikal-1 (Kurchatov).	Stratégie de "Wait-and-See".
Lituanie	Dans piscines attenantes (pendant au moins cinq ans) ; plusieurs compartiments peuvent contenir des assemblages entiers ou fragmentés (en cellule).	Sans objet (un seul site).	Deux installations sur le site d'Ignalina : - une aire d'entreposage (délimitée par des murs sans toiture) en emballages métalliques (de type CASTOR) et en béton (de type CONSTOR) ; - un bâtiment d'entreposage en emballages en béton (de type CONSTOR).	Sans objet (un seul site).	Stockage direct.
Pays-Bas	Dans piscines attenantes (avant envoi en France pour traitement).	Non	Non	Non	Traitement à l'étranger (en France).

Pays	Entreposage en piscine sur site	Entreposage en piscine centralisé	Entreposage à sec sur site	Entreposage à sec centralisé	Gestion des combustibles usés
République Tchèque	Dans piscines attenantes aux réacteurs (pendant au moins sept ans sur le site de Dukovany et au moins cinq ans sur le site de Temelin).	Non	Deux installations d'entreposage à sec en emballages métalliques (CASTOR) sur le site de Dukovany. Une installation d'entreposage à sec en emballages métalliques (CASTOR) sur le site de Temelin.	Non	La solution préférentielle est le stockage direct, mais les autres options ne sont pas exclues.
Roumanie	Dans piscines attenantes (pendant au moins six ans).	Sans objet (un seul site).	Installation, dénommée DICA, d'entreposage à sec en silos de surface à chargement vertical (de type MACSTOR) sur le site de Cernavoda.	Sans objet (un seul site).	Stockage direct.
Royaume-Uni	Dans piscines attenantes aux réacteurs.	Oui dans les piscines des usines de traitement à Sellafield et à Dounreay.	Installation d'entreposage à sec en silos de type conteneurs (concept HI-STORM MIC) sur le site de Sizewell B.	Non	Usines de traitement arrêtées.
Slovaquie	Dans piscines attenantes aux réacteurs (pendant trois à sept ans).	Oui à Jaslovské Bohunice (la piscine a été densifiée).	Non	Projet d'une installation d'entreposage (a priori en silos) centralisé à Jaslovské Bohunice.	Stockage direct.
Slovénie	Dans piscine attenante au réacteur.	Sans objet (un seul site).	Projet d'entreposage à sec en silos de type "conteneur" sur le site de Krsko.	Sans objet (un seul site).	Stockage direct.

Pays	Entreposage en piscine sur site	Entreposage en piscine centralisé	Entreposage à sec sur site	Entreposage à sec centralisé	Gestion des combustibles usés
Suède	Dans les piscines attenantes aux réacteurs (pendant au moins neuf mois).	Installation CLAB à Oskarshamn permettant l'entreposage dans des piscines souterraines de l'ensemble du combustible usé dans l'attente du stockage en couche géologique profonde.	Non	Non	Stockage direct.
Suisse	Dans piscines attenantes aux réacteurs. Le site de Gösgen dispose d'une installation d'entreposage sous eau supplémentaire.	Non	Installation, dénommée ZWIBEG, d'entreposage à sec en emballages métalliques (de type TN 24) sur le site de Beznau.	Installation, dénommée ZWILAG ou ZZL, d'entreposage à sec centralisé en emballages métalliques (de type TN 24) sur le site de Würenlingen.	Traitement arrêté. Stockage direct.
Ukraine	Dans les piscines attenantes aux réacteurs. Une installation dénommée ISF-1 permet l'entreposage sous eau du combustible usé des réacteurs du site de Tchernobyl.	Non	Entreposage, sur le site de Zaporozhye, en silos de type conteneur en béton (de type VSC24). Une installation, dénommée ISF-2 en cours de construction, permettra l'entreposage à sec du combustible usé des réacteurs du site de Tchernobyl actuellement entreposé dans l'installation ISF-1.	Projet d'entreposage complémentaire en silos de type conteneur en béton (concept HI-STORM 190), sur le site de Tchernobyl (dans la zone d'exclusion).	Traitement à l'étranger.

Annexe 3 LE CYCLE DU COMBUSTIBLE FRANÇAIS

L'exploitation des réacteurs nucléaires d'EDF nécessite des installations et des moyens logistiques assurant notamment la fourniture des combustibles neufs, l'entreposage et le traitement des combustibles usés déchargés des réacteurs, le recyclage de certaines matières ainsi que la gestion des déchets produits par les réacteurs et les installations associées. Le terme « cycle du combustible nucléaire des réacteurs de puissance à eau sous pression français » (également appelé « cycle du combustible français ») désigne l'ensemble de ces opérations. Dans sa partie « amont », il comprend en particulier les étapes de conversion et d'enrichissement de l'uranium en isotope fissile et celles de fabrication des combustibles, qu'ils soient à base d'oxyde d'uranium ou d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium. La partie « aval » du cycle regroupe les opérations d'entreposage et de traitement des combustibles usés ainsi que la gestion des matières valorisables issues de ce traitement (uranium et plutonium) et des déchets radioactifs. Les installations de l'amont et de l'aval du cycle du combustible sont présentées sur le schéma ci-après.



(ACU : assemblages combustibles usés)

Annexe 4 PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES ENTREPOSAGES SOUS EAU ET À SEC

	Entreposage sous eau (en piscine) sur site ou centralisé	Entreposage à sec
Type d'installation	Bâtiments en béton de grande taille, voire de très grande taille pour le cas des piscines d'entreposage centralisé. Construction non modulaire	Entreposage en puits : bâtiments en béton avec des structures métalliques généralement de taille intermédiaire. Entreposage non modulaire. Entreposage en silos : structure en béton (verticale ou horizontale) contenant un conteneur de combustibles usés. Construction modulaire. Entreposage en emballages : emballages métalliques, en béton ou mixtes, la plupart du temps entreposés dans des bâtiments dédiés. Construction modulaire.
Capacité de refroidissement / domaine de fonctionnement	<u>Piscines attenantes aux réacteurs (piscines BK)</u> : Très importante. Permet l'entreposage de combustible usé très peu refroidi (puissance thermique supérieur à 10 kW par combustible) <u>Piscine d'entreposage centralisé</u> : Importante. Permet l'entreposage de combustible usé de puissance thermique inférieure à 10 kW par combustible.	Limitée (en moyenne 1 à 2 kW par combustible pour les concepts actuels)
Conditions d'entreposage au regard du vieillissement notamment des gaines des combustibles usés	Températures faibles (de l'ordre de 40 ou 50 °C), limitant les phénomènes de vieillissement. Contrôle de la chimie de l'eau visant à la maîtrise notamment de la corrosion.	Températures élevées (plusieurs centaines de degrés au chargement). Séchage et inertage des conteneurs d'entreposage pour limiter les phénomènes de corrosion.
Protection radiologique	Assurée par l'eau. Débit de dose très faible en bordure de bassin.	Entreposage en puits : assurée par les structures des bâtiments. Entreposage en silos : assurée par les silos. Entreposage en emballages : assurée par les emballages et complétée par les bâtiments d'entreposage.

	Entreposage sous eau (en piscine) sur site ou centralisé	Entreposage à sec
Mode de fonctionnement / exploitation	<p>Système de refroidissement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pour le cas des piscines attenantes aux réacteurs (piscines BK), système actif avec généralement une inertie thermique limitée (ébullition de l'eau de la piscine en quelques heures) ; - pour le cas des piscines centralisées, système la plupart du temps actif avec généralement une inertie thermique importante (ébullition de l'eau de la piscine en quelques jours). <p>Système éprouvé pour tous les types de combustible</p> <p>Actions d'exploitation (conduite, surveillance, maintenance...) importantes</p>	<p>Refroidissement assuré par circulation d'air en convection naturelle</p> <p>Actions de conduite quasi-inexistantes.</p>
Surveillance des combustibles / condition de reprise	<p>Directe avec possibilité d'extraire des crayons pour analyse poussée.</p> <p>Possibilité d'intervention sur les combustibles (surcontenerage par exemple)</p>	<p>Indirecte. La maîtrise du vieillissement repose sur des études des mécanismes de dégradation des combustibles.</p> <p>Nécessité d'une « cellule chaude » pour réaliser la surveillance directe des combustibles.</p>
Reprise des combustibles / interface avec transport	<p>Fonction permanente, relevant de l'exploitation courante</p>	<p>Fonction non permanente qui dépendra de la possibilité de transporter les dispositifs d'entreposage et du maintien des caractéristiques mécaniques des gaines.</p>
Agressions externes	<p>Exigences affectées aux bâtiments, conduisant à une conception complexe compte tenu de leur taille</p>	<p>Exigences parfois affectées aux bâtiments pour le cas de l'entreposage en alvéoles ou puits, conduisant à une conception complexe compte tenu de leur taille.</p> <p>Dans les autres cas (concepts de taille plus réduites), les exigences sont affectées aux silos, conteneurs ou emballages.</p>

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS UTILISÉS DANS LE RAPPORT

ASN	Autorité de sûreté nucléaire
BK	Bâtiment combustible, pour un réacteur REP, dans lequel se trouve notamment les piscines de désactivation (piscines BK)
CNPE	Centre nucléaire de production d'électricité
DOS	Dossier d'options de sûreté
EDF	Electricité de France
EPR	Réacteur pressurisé européen
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
MOX	Oxyde mixte d'uranium et de plutonium
MWe	Megawatt électrique
PNGMDR	Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs
RBMK	Réacteurs à neutrons thermiques utilisant le graphite comme modérateur et l'eau légère bouillante comme fluide caloporteur (abréviation de Reactor Bolshoi Moshchnosti Kalani)
REB	Réacteur à eau bouillante
REP	Réacteur à eau pressurisée
RNR	Réacteur à neutrons rapides
Tmli	Tonne de métal lourd initial
UNE	Uranium naturel enrichi
UOX	Oxyde d'uranium
URE	Uranium de recyclage ré-enrichi
VVER	Type de réacteur à eau sous pression de conception soviétique, puis russe (abréviation de Vodo-Vodianoï Energuetitcheski Reaktor)