Stockage des déchets de faible et moyenne activité : expérience internationale

Rapport préparé pour la Société de gestion des déchets nucléaires par M. Garamszeghy, ingénieur.

Rév. 1 – février 2021

Tables matières

Sommaire ..... ***i***

1 Contexte ***1***

2 Classification et caractéristiques des déchets ***2***

2.1 Classification des déchets **2**

2.2 Déchets de faible activité **5**

2.3 Déchets de moyenne activité **6**

2.4 Critères d'acceptation des déchets **6**

3 Concepts fondamentaux de stockage ***7***

3.1 Tranchée **7**

3.2 Monticule en surface **9**

3.3 Enceinte de béton 12
3.3.1 Enceintes en surface 13
3.3.2 Enceintes peu profondes, près de la surface 14
3.3.3 Enceintes près de la surface à plus grande profondeur 16
3.4 Caverne rocheuse 17
3.4.1 Caverne rocheuse peu profonde 18
3.4.2 Caverne rocheuse profonde 23
3.5 Forages 27
3.6 Résumé des concepts de stockage 30
4 Modèles de mise en œuvre 34
5 Résumé de l'expérience internationale 35
Applicabilité au contexte canadien 36
Références 38
Annexes 43
ANNEXE A : Emplacement des déchets radioactifs au Canada 44
ANNEXE B : Résumé des inventaires actuels et prévus de déchets au Canada 45
ANNEXE C : Résumé des pratiques de gestion des déchets radioactifs dans le monde, par pays et par type de déchets 46
ANNEXE D : Résumé des responsabilités internationales en matière de gestion des déchets 59
ANNEXE E : Résumé des systèmes de classification des déchets 63
ANNEXE F : Résumé des dépôts existants pour les déchets de faible et moyenne activité 66

Sommaire

Les programmes de gestion des déchets radioactifs de plusieurs pays prévoient divers concepts de stockage (élimination), qui sont adaptés à différentes catégories de déchets. Certains centres de stockage sont exploités depuis plusieurs décennies. Ils varient de nouvelles installations spécialement construites à cette fin en surface, près de la surface ou en profondeur, à d'anciennes excavations minières reconverties (ou auxquelles de nouvelles galeries ont été ajoutées) et à d'autres types d'installations. Dans presque tous les cas, une stratégie nationale coordonnée a été établie pour encadrer le stockage à long terme de tous les types de déchets radioactifs.

Certains pays ont pris la décision de construire à des emplacements différents des dépôts distincts pour chaque type de déchets, alors que d'autres pays planifient de stocker deux ou trois types de déchets dans un dépôt mixte ou de construire plusieurs dépôts distincts sur un même site. Les différentes approches suivies ont été choisies pour plusieurs facteurs, dont le volume de déchets à stocker; les préférences de la société quant au nombre, à l'emplacement et aux types d'installations de stockage possibles; les questions liées au transport; la sûreté physique; les politiques nationales; le nombre limité de sites envisageables et la disponibilité de sites techniquement propices; la minimisation des coûts; et des questions sociétales générales telles que l'emploi régional, les infrastructures disponibles, etc.

En 2020, on recensait dans le monde plusieurs dépôts de conceptions diverses, construits à des profondeurs différentes et établis dans des géologies hôtes variées; ils sont destinés à tous les types de déchets, sauf le combustible nucléaire usé/irradié[1]. Plusieurs projets de dépôts de combustible usé proposés dans le monde prévoient le stockage de déchets de moyenne activité à vie longue et/ou de déchets de haute activité dans une section de l'installation ou dans une installation construite au même endroit (par exemple à une profondeur différente ou dans une formation rocheuse différente sur le même site).

La conception, l'emplacement et la profondeur d'un dépôt sont souvent basés sur le type de formation géologique ciblé (par exemple, des couches de roche hôte propice pour fournir des barrières naturelles) et sur le degré d'isolement physique nécessaire (un dépôt à plus grande profondeur est associé à une période d'isolement plus longue, à une moins grande dépendance à des mesures de contrôle institutionnelles et à une plus grande résistance aux intrusions humaines accidentelles).

Le type d'installation choisi pour un type de déchet est étroitement lié à la façon dont le pays classifie ses déchets radioactifs. Dans les pays qui ont pris la décision de construire une installation distincte pour chaque type de déchets, le système de classification ainsi que les méthodes de traitement et d'emballage des déchets trient les déchets selon le type de stockage qui leur convient (par exemple, les déchets à vie courte sont destinés à un stockage en surface ou près de la surface et les déchets à vie longue sont destinés à un stockage à plus grande profondeur). Dans les pays qui ont opté pour une installation de stockage à grande profondeur mixte, il est généralement moins nécessaire de distinguer les différents types de déchets, et leurs systèmes de classification reflètent cette orientation. Le stockage mixte de plusieurs catégories de déchets dans une même installation est un concept important

[1] Au Canada, les expressions « combustible usé » et « combustible irradié » sont souvent utilisées pour désigner le combustible qui est extrait des réacteurs au terme de sa vie utile actuelle. Ce document emploiera ci-après la désignation « combustible usé » pour suivre la terminologie adoptée dans la documentation liée à la modernisation de la Politique canadienne en matière de déchets radioactifs. La SGDN utilise normalement l'expression « combustible irradié ». Les deux expressions sont interchangeables au Canada.

qui peut réduire le coût total de gestion des déchets en réduisant le nombre d'installations de stockage nécessaires et en simplifiant la gestion des déchets radioactifs avant leur stockage.

Les dépôts de déchets de faible et moyenne activité (DFMA) en surface et près de la surface (ainsi que certains dépôts construits à plus grande profondeur dans une roche hôte fracturée) misent généralement sur de multiples barrières ouvragées pour confiner les radionucléides, comme la forme particulière des déchets, les matériaux de remblayage, les systèmes de fermeture et de recouvrement, etc. Les dépôts de DFMA construits plus profondément dans des formations rocheuses non fracturées tendent à miser davantage sur des barrières naturelles comme la roche hôte et la géosphère environnante (par exemple les couches de roche de couverture) que sur des barrières ouvragées supplémentaires. Les dépôts planifiés de déchets de haute activité (DHA) et de combustible nucléaire usé emploient une combinaison de barrières naturelles et ouvragées. Dans tous les cas, les barrières doivent convenir aux déchets et au site, et sont déterminées par le dossier de sûreté du dépôt.

Plusieurs pays s'orientent aussi actuellement vers le choix d'un milieu géologique plus simple, relativement uniforme et facile à caractériser, tel qu'une formation sédimentaire, lorsqu'une telle formation est disponible. Ces milieux géologiques plus simples ajoutent un degré supplémentaire de confiance dans la modélisation réalisée pour les évaluations de la sûreté à long terme.

Dans certains cas, les pratiques antérieures de stockage ne répondent plus aux normes actuelles et une remise en état des sites a été réalisée ou est envisagée, y compris la récupération des déchets pour les traiter et/ou pour les stocker dans une différente installation.

Dans le cas des pays qui possèdent un programme d'énergie nucléaire important, les principales tendances sont les suivantes :

- Une politique nationale coordonnée de gestion des déchets radioactifs, souvent mise en œuvre par une seule organisation.

- Les dépôts en surface et près de la surface sont souvent utilisés pour les déchets de très faible activité et les DFMA à vie courte. Dans certains pays, de multiples sites peuvent exister pour ces déchets, alors que d'autres pays ont opté pour l'établissement d'un seul site national de stockage.

- Les dépôts en profondeur sont reconnus internationalement comme la meilleure option pour les DFMA à vie longue. Dans certains cas, ces déchets peuvent être combinés à des déchets à vie courte, ce qui facilite les choses en réunissant sur un seul site tous les DFMA et en réduisant au minimum les exigences en matière de manutention et de séparation des déchets avant leur stockage. Dans d'autres cas, on prévoit les combiner aux DHA et/ou au combustible usé, parce que ces pays disposent déjà d'installations de déchets à vie courte, et que combiner les DFMA et les DHA ou le combustible usé fournit un cas de référence raisonnable pour les besoins de la planification financière. Toutefois, ces combinaisons peuvent imposer certaines exigences techniques supplémentaires qui doivent être prises en compte dans la conception du dépôt, du fait des diverses propriétés des différents types de déchets et de leurs interactions à long terme.

1 Contexte

Il est communément admis que le cycle du combustible nucléaire entraîne la production de déchets radioactifs de diverses formes, caractéristiques et niveaux de danger. Ces déchets résultent de l'exploitation et du déclassement à terme des installations du cycle du combustible nucléaire, des réacteurs, des installations de recherche et d'autres installations de soutien où des matières radioactives sont utilisées ou produites. En outre, des déchets radioactifs sont également produits par d'autres activités et installations telles que les universités et les centres de recherche, les procédures de diagnostic médical dans les hôpitaux et les laboratoires, ainsi que la production et l'utilisation industrielles de radioisotopes et de sources de rayonnement scellées. Les déchets radioactifs peuvent également provenir de l'assainissement de terrains et d'installations contaminés, par exemple de zones touchées par des accidents ou de pratiques passées qui ne répondent plus aux normes de sécurité actuelles.

Les déchets peuvent être divisés en différentes catégories, en fonction du niveau de danger et de la durée de ce danger. Au fil du temps, la radioactivité diminue naturellement à mesure que les radionucléides se désintègrent et finissent par se convertir en une forme stable (c'est-à-dire non radioactive). Le temps nécessaire pour atteindre cet état varie considérablement en fonction de la demi-vie du radionucléide en question, laquelle peut aller de quelques fractions de seconde à des millions d'années ou plus, ainsi que de la longueur de sa chaîne de désintégration (c'est-à-dire le nombre d'étapes de désintégration qu'il doit subir avant d'atteindre un état stable).

Les différentes catégories de déchets doivent être gérées de manière appropriée afin de protéger la santé humaine et l'environnement dans son ensemble de la radioactivité et de tout autre élément dangereux qu'ils peuvent contenir. Il existe de nombreuses options pour la gestion à long terme sûre des différentes catégories de déchets radioactifs. Celles-diffèrent entre elles selon le niveau de danger des déchets à traiter et la durée d'isolement requise. Le stockage mixte de plusieurs catégories de déchets dans la même installation est un concept important qui peut réduire les coûts globaux de gestion des déchets en diminuant le nombre d'installations de stockage nécessaires et en simplifiant la gestion préalable des déchets radioactifs. Dans ce cas, le dépôt doit être conçu pour confiner en toute sûreté la catégorie la plus dangereuse de déchets qui y seront stockés. Si possible, des déchets de catégorie moins dangereuse peuvent également être stockés en toute sûreté dans l'installation.

Comme nous l'avons vu dans ce document, de nombreux pays ont mis en œuvre diverses approches pour gérer leurs déchets ou prévoient le faire.

Certains déchets (appelés « déchets radioactifs à vie longue ») devront être confinés et isolés de la biosphère pendant des millénaires. De nombreux pays définissent les déchets « à vie longue » comme les déchets ayant une demi-vie supérieure à celle du Cs137 (le Cs-137 est un produit de fission important dont la demi-vie est d'approximativement 30 ans). Ce type de déchet nécessite normalement une installation en profondeur (couches géologiques profondes), où la formation rocheuse hôte procure une des principales barrières qui inhibera la migration des radionucléides, assurera l'isolement physique des déchets et les protégera contre les intrusions humaines involontaires pendant une très longue période, soit jusqu'à ce que la radioactivité ait diminué à un niveau suffisamment faible. D'autres barrières ouvragées, telles que la forme et l'emballage des déchets, peuvent être ajoutées au besoin pour renforcer les barrières naturelles.

Une installation de stockage en surface ou « près de la surface[12] » est généralement conçue pour des déchets ayant une durée de dangerosité d'approximativement 300 ans (l'équivalent d'environ dix demi-vies de Cs 137). Cela peut sembler long, mais 10 demi-vies ne représentent approximativement qu'un facteur de réduction de 1000 (2^{10} = 1024). Si ce facteur de réduction est généralement suffisant pour ramener les déchets de faible activité à un niveau inoffensif, il ne l'est pas pour les déchets de moyenne ou haute activité, dont la teneur en Cs-137 peut être supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle des déchets de faible activité. Par conséquent, des temps de protection beaucoup plus longs sont nécessaires pour les DMA et les DHA, même lorsqu'ils ne contiennent que des radionucléides à « à vie courte », parce que la concentration initiale de ces radionucléides est élevée.

Le Canada dispose d'un régime réglementaire et d'un cadre stratégique solides pour la gestion et le stockage à long terme des déchets radioactifs, qui comprennent notamment la *Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires*, *Loi sur les déchets de combustible nucléaire* et la *Politique-cadre en matière de déchets radioactifs* de 1996. Cette politique-cadre stipule un ensemble de principes qui régissent la gestion et le stockage à long terme des déchets radioactifs et établit clairement les rôles et les responsabilités du gouvernement fédéral et des propriétaires de déchets [BDP 2020]. Au Canada, les producteurs de déchets radioactifs (souvent appelés « propriétaires de déchets ») sont responsables de la gestion de l'ensemble du cycle de vie de leurs déchets, y compris de leur stockage. Pour les déchets de faible et moyenne activité, chaque propriétaire de déchets élabore ses propres plans conformément à la politique fédérale susmentionnée.

Le présent document porte principalement sur le stockage des déchets de faible et moyenne activité. D'autres catégories de déchets seront mentionnées au besoin pour situer les options de gestion dans le contexte de la gestion globale des déchets des divers pays.

2 Classification et caractéristiques des déchets

2.1 Classification des déchets

L'un des aspects essentiels d'une gestion sûre et économique des déchets radioactifs est la classification systématique des différents déchets en fonction des propriétés qui sont importantes pour la conception, l'exploitation et la sûreté des installations de gestion des déchets. Une grande variété de systèmes de classification des déchets sont utilisés dans le monde. Il est important de noter le lien qui existe entre le stockage des déchets (existant ou prévu) et le système de classification utilisé. Chaque pays a élaboré un système de classification basé sur ses stratégies de gestion des déchets et sur ses infrastructures existantes ou prévues. Si la plupart des systèmes de classification sont en apparence similaires sur les plans de la terminologie et de la structure, ils diffèrent généralement dans les détails, par exemple sur le plan des limites numériques en vertu desquels les différentes catégories de déchets sont distinguées.

Au Canada, les catégories de déchets radioactifs sont définies dans la norme N292.0 de la CSA [CSA 2019] et ont également été incluses dans la version récente du document d'application de la réglementation REGDOC-2.11.1 de la CCSN [CCSN 2021]. Ce système de classification, qui couvre les déchets de faible activité (DFA), les déchets de moyenne activité (DMA), les déchets de haute activité

[2] Il convient de noter qu'il n'existe pas de définition universelle du terme « près de la surface ». Toutefois, dans le domaine du stockage des déchets radioactifs, on entend généralement par là une profondeur inférieure à quelques dizaines de mètres sous la surface du sol [AIEA 2020b].

(DHA) et les déchets des mines et des usines de concentration d'uranium (MUCU)[3], est décrit plus en détail à l'annexe E. Le présent document se concentre sur les DFA et les DMA.

La norme de la CSA ne prévoit pas de seuil numérique définitif pour distinguer les diverses catégories de déchets radioactifs (principalement les DFA et les DMA), étant donné que les limites d'activité diffèrent selon chaque radionucléide ou groupe de radionucléides et dépendront de considérations liées à la gestion de la sûreté à court et à long terme. Un débit de dose de contact d'approximativement 2 mSv/h a été utilisé, dans certains cas, pour distinguer les déchets faiblement et moyennement radioactifs.

Malgré le système de classification de la CSA, la plupart des déchets existants au Canada ont été classés selon une variété de systèmes plus anciens qui avaient été établis avant la création de la norme CSA par chacun des propriétaires de déchets. Les principaux propriétaires de déchets au Canada (OPG, EACL, Énergie NB et Hydro-Québec) ont tous leur propre système de classification historique comportant des seuils numériques légèrement différents pour chaque catégorie, lesquels ont été établis en fonction des capacités de leurs systèmes de gestion et de stockage des déchets.

La plupart des systèmes de classification utilisés dans le monde reconnaissent de grandes catégories de déchets radioactifs, comme les déchets de faible et moyenne activité (DFMA) (parfois subdivisés en déchets de faible activité (DFA) et déchets de moyenne activité (DMA)), les déchets de haute activité (DHA) et le combustible nucléaire usé/irradié (CNU/CNI)[4]. (Il convient de noter que certains pays ne considèrent pas le combustible nucléaire usé comme un déchet et ont pour politique de retraiter et de recycler le contenu fissile du combustible usé pour en faire un autre type de combustible de réacteur. Le retraitement entraîne la production de DHA ainsi que de DFA et de DMA supplémentaires).

Certains pays subdivisent encore les DFMA en déchets à vie longue (VL) et à vie courte (VC). Bien que les définitions exactes varient, l'approche générale est que les déchets à vie longue contiennent des quantités importantes de radionucléides dont la demi-vie est supérieure à approximativement 30 ans (c'est-à-dire supérieure à la demi-vie du Cs-137 ou du Sr-90, deux des produits de fission les plus abondants dans les déchets de réacteurs nucléaires). Le seuil pour déterminer qu'il y a une « quantité importante » est établi en fonction de chaque radionucléide et concept de dépôt et est généralement dérivé d'une évaluation de la sûreté d'un dépôt près de la surface dans lequel la radioactivité totale des déchets se désintègre jusqu'à un niveau suffisamment faible au cours d'une période de contrôle institutionnel (généralement 300 ans ≈10 demi-vies du Cs-137 ou du Sr-90) pour que le scénario n'entraîne pas de dose de rayonnements excessive (par exemple, en raison de la dégradation des barrières ouvragées au fil du temps), telle que définie par la réglementation ou les critères de sûreté du pays. Les radionucléides à vie longue (par exemple, le C-14, dont la demi-vie est d'approximativement

---

[3] La norme et le document d'application utilisent plutôt les désignations « déchets radioactifs de faible activité (DRFA) », « déchets radioactifs de moyenne activité (DRMA) », « déchets radioactifs de haute activité », « à courte durée de vie (CDV) », « déchets radioactifs à très courte durée de vie (DFATCDV), etc. Le traducteur emploie des désignations plus courtes, qui sont également utilisées dans d'autres textes de la réglementation canadienne ainsi que dans les textes de la SGDN et ceux utilisés dans le cadre du processus de consultation sur la modernisation de la Politique-cadre en matière de déchets radioactifs : DFA, DMA, DHA, DFA-VC (déchets de faible activité à vie courte), VL (vie longue), etc.

[4] Au Canada, les termes « combustible nucléaire irradié » ou « combustible nucléaire usé » sont des termes plus justes pour désigner le combustible épuisé, étant donné que le combustible déchargé est considéré comme un déchet même s'il n'est pas entièrement épuisé. « Combustible nucléaire usé » sera désormais utilisé dans ce document.

5 700 ans) doivent être isolés pendant des périodes beaucoup plus longues pour se désintégrer à un niveau suffisamment bas. C'est pourquoi les quantités de ces radionucléides doivent être limitées dans certains concepts de dépôt, en particulier les dépôts près de la surface.

Certains pays ont des catégories supplémentaires, comme les matières radioactives naturelles (MRN), les déchets des mines et des usines de concentration d'uranium (MUCU), les déchets de très faible activité (DTFA), les déchets à vie très courte (VTC) et les déchets transuraniens (TRU). Les MUCU sont généralement gérés dans des installations techniques en surface en raison de leur grand volume et de leur dangerosité relativement faible. Les MUCU ne sont pas abordés plus avant dans le présent document. Les DTFA sont souvent gérés dans des installations en surface très simples, en raison de leur faible dangerosité. Les déchets VTC sont normalement stockés pendant une courte période pour permettre aux radionucléides de se désintégrer, puis ils sont traités comme des déchets industriels normaux. Les déchets TRU, qui contiennent de fortes concentrations d'actinides, sont généralement traités comme des déchets à vie longue (par exemple, dans un dépôt en profondeur). De plus amples détails sur les différents systèmes de classification des déchets utilisés dans le monde sont fournis dans [AIEA 2018].

L'AIEA a tenté de généraliser les définitions pour simplifier le système international de déclaration et a proposé un système de classification normalisé dans sa norme GSG-1 [AIEA 2009], basé sur six catégories de déchets :

- déchets exemptés (DE)
- déchets à très courte période (DTCP)
- déchets de très faible activité (DTFA)
- déchets de faible activité (DFA)
- déchets de moyenne activité (DMA)
- déchets de haute activité (DHA)

Le système de classification de l'AIEA repose sur des exigences minimales de stockage fondées sur des considérations de radioprotection, un degré croissant d'isolement de la biosphère par l'utilisation de barrières naturelles et/ou ouvragées étant requis pour les déchets plus radioactifs et à vie plus longue. De plus amples détails sont fournis à l'annexe E.

Il convient de noter que dans les cas où il est prévu de stocker tous les DFA et les DMA dans le même dépôt (normalement une installation en profondeur), il n'est généralement pas nécessaire sur le plan opérationnel de faire la distinction entre les déchets à vie longue (VL) et les déchets à vie courte (VC), et les systèmes de classification des déchets utilisés pour ces installations reflètent normalement ce point.

Pour les pays qui utilisent des dépôts près de la surface, il est nécessaire de faire cette distinction afin de pouvoir exclure les déchets à vie longue de ces installations. Cela nécessite également des efforts de caractérisation plus poussés pour chaque colis de déchets afin de s'assurer que les déchets répondent aux restrictions imposées par le dépôt près de la surface.

Afin d'assurer une présentation cohérente dans le présent document des concepts de stockage et de leur utilisation par les divers pays, les déchets ont été classés en déchets de très faible activité (DTFA), déchets de faible activité (DFA), déchets de moyenne activité (DMA), déchets de haute activité (DHA) et

combustible nucléaire usé (CNU), comme le fait la norme GSG-1 de l'AIEA, même si chaque pays classe ses déchets différemment.

Un autre aspect important qui n'est pas pris en compte dans le système de classification de base des déchets radioactifs est la toxicité chimique des déchets [AIEA 2002]. En plus du risque radioactif, de nombreux types de déchets radioactifs contiennent également des éléments chimiques dangereux, tels que des métaux lourds et des produits chimiques organiques. Alors que la radioactivité se désintègre naturellement avec le temps et que la plupart des produits chimiques organiques se dégradent aussi au fil de réactions microbiennes et autres, de nombreux éléments chimiques (tels que les métaux lourds) resteront dangereux pendant une durée essentiellement indéfinie. Dans certains cas, ce sont ces dangers chimiques qui dicteront la durée et le degré requis d'isolement des déchets plutôt que les considérations liées à la radioactivité. Il convient de noter que si de nombreux métaux lourds sont présents dans la nature, ils peuvent être présents dans les déchets à des niveaux élevés ou concentrés.

2.2 Déchets de faible activité

Les DFA au Canada sont en majorité des sols contaminés et des déchets connexes provenant des premières activités de l'industrie du radium (dans d'autres pays, une grande partie de ces déchets seraient considérés comme des déchets de très faible activité (DTFA) ou des matières radioactives naturelles (MRN)). Le reste des DFA au Canada sont les matériaux, outils, équipements, chiffons, vêtements de protection, etc. contaminés pendant l'exploitation, la maintenance ou le déclassement d'installations nucléaires ou d'autres installations où des matières radioactives sont utilisées. (Ces déchets sont semblables à ceux produits par toute autre industrie, sauf qu'ils sont contaminés par de petites quantités de radioactivité [AEN 2010]).

À la fin de 2016, approximativement 2,4 millions de m^3 de DFA étaient entreposés au Canada, dont approximativement 1,7 million de m^3 de sols historiques et de déchets connexes (~73 % du total), les 27 % restants étant des déchets provenant d'activités nucléaires en cours [RNCan 2018[5]], dont ~526 000 m^3 sont entreposés dans des installations appartenant à EACL (principalement à Chalk River[6]); 83 000 m^3 à l'Installation de gestion des déchets Western d'OPG et le reste dans diverses autres installations nucléaires au Canada. Voir l'annexe B pour plus de détails sur les quantités de déchets inventoriées.

Des informations supplémentaires concernant les caractéristiques des DFA généralement produits par les centrales nucléaires CANDU sont fournies dans [OPG 2010].

À l'heure actuelle, les DFA sont gérés en toute sûreté partout au Canada, soit sur place, soit dans des installations de stockage provisoire ou de gestion à long terme (voir l'annexe A pour une carte des emplacements). Les déchets sont emballés dans une variété de conteneurs et stockés dans des

[5] Il convient de noter que tous les volumes de déchets indiqués dans le présent rapport sont généralement basés sur le rapport fourni pour la 6e réunion d'examen (2018) de la Convention commune de l'AIEA. Il s'agissait des données les plus récentes en la matière au moment de la préparation du présent rapport. Les examens de la Convention commune sont effectués sur un cycle de 3 ans, le 7e examen ayant lieu plus tard en 2021. Les données d'inventaire seront mises à jour après que les rapports du 7e examen auront été rendus publics.

[6] Les installations d'EACL sont gérées par les Laboratoires nucléaires canadiens (LNC) selon le modèle GoCo (installations appartenant au gouvernement et exploitées par un entrepreneur).

installations en surface et souterraines. Les contenants généralement utilisés au Canada pour les déchets des centrales nucléaires sont décrits dans [OPG 2010].

2.3 Déchets de moyenne activité

Les DMA au Canada comprennent les filtres et les résines échangeuses d'ions utilisés dans les circuits de purification de l'eau des centrales nucléaires, ainsi que des composants du cœur des réacteurs qui ont été remplacés et de certaines sources radioactives de haute activité utilisées en radiothérapie. Les DMA nécessitent généralement un blindage en raison de leurs niveaux de rayonnement élevés, mais peu ou pas de dispositions pour la dissipation de la chaleur pendant leur manipulation, leur transport et leur gestion à long terme.

À la fin de 2016, approximativement 33 000 m^3 de DMA étaient stockés au Canada, dont approximativement 20 000 m^3 sur le site de Chalk River appartenant à EACL, approximativement 12 000 m^3 sur les sites d'OPG (principalement à l'Installation de gestion des déchets Western). Le reste des DMA, soit approximativement 1 000 m^3 de déchets, étaient stockés sur les autres sites nucléaires au Canada [RNCan 2018]. Voir l'annexe B pour plus de détails sur les inventaires de déchets. Des informations supplémentaires concernant les caractéristiques des DMA types des centrales nucléaires CANDU sont fournies dans [OPG 2010].

À l'heure actuelle, les DMA sont gérés de façon sûre partout au Canada dans des installations d'entreposage provisoire (voir l'annexe A pour une carte des emplacements). Les déchets sont emballés dans une variété de conteneurs et entreposés dans des installations en surface et souterraines. Les contenants généralement utilisés au Canada pour les déchets des centrales nucléaires sont décrits dans [OPG 2010].

2.4 Critères d'acceptation des déchets

Les critères d'acceptation des déchets (CAD) sont des critères quantitatifs ou qualitatifs auxquels les déchets radioactifs doivent satisfaire pour être acceptés par l'exploitant d'un dépôt en vue de leur stockage. Les critères d'acceptation des déchets peuvent comprendre, par exemple, des restrictions concernant l'état physique des déchets (par exemple, état physique, dimensions, masse, etc.); la concentration d'activité ou l'activité totale de radionucléides particuliers (ou des types de radionucléides présents) dans les déchets; des restrictions ou des exclusions relatives à certaines espèces chimiques présentes dans les colis de déchets (par exemple, agents chélateurs, produits chimiques toxiques, etc.) et/ou des exigences relatives à la forme ou à l'emballage des déchets (par exemple la matrice de conditionnement, l'utilisation de conteneurs standard, la résistance à la compression, la résistance à la lixiviation, etc.)

Les CAD sont normalement particuliers à chaque installation. Ils sont utilisés pour garantir que tout déchet accepté par l'installation sera conforme à son dossier de sûreté et à ses conditions de permis. L'élaboration des critères d'acceptation des déchets doit se faire parallèlement à l'élaboration de la filière de stockage. Les critères d'acceptation des déchets doivent être établis en tenant compte des exigences opérationnelles (par exemple, la manutention) ainsi que des exigences liées à l'évaluation de la sûreté particulière du site pour un dépôt. Ces critères doivent être fondés sur des critères qualitatifs ou quantitatifs, de sorte que la conformité puisse être évaluée par des mesures directes et/ou assurée

au moyen de méthodes d'assurance de la qualité et d'inspections appropriées au cours du processus de gestion des déchets.

Il convient de noter que, comme les CAD sont particuliers chaque installation, les CAD établis pour une installation ne sont pas nécessairement utilisables par une autre installation, même de conception similaire. Cependant, bien que les limites et les restrictions précises varient d'une installation à l'autre, les catégories et les types d'exigences associés à un ensemble de CAD sont très semblables dans la plupart des cas. Une compréhension de ces exigences génériques peut être très utile pour guider un programme de caractérisation des déchets et, par la suite, pour élaborer un ensemble de CAD pour une installation donnée.

Les CAD sont généralement établis de manière itérative, en même temps que la conception et l'évaluation de la sûreté de l'installation de stockage. Une fois que l'installation est en service, les CAD doivent être révisés régulièrement pour s'assurer qu'ils restent valides ou pour tenir compte de toute modification du dossier de sûreté, des conditions de permis ou des nouvelles formes de déchets qui peuvent être envisagées.

3 Concepts fondamentaux de stockage

Un large éventail de concepts de stockage ont été élaborés dans le monde pour différents types de déchets radioactifs, en fonction des besoins et des infrastructures disponibles dans chaque pays [AEN 2010, AIEA 2020b]. Ces concepts sont décrits ci-dessous. Ils sont regroupés en fonction de leurs caractéristiques de base. De plus amples détails sur les installations types liés aux différents concepts sont fournis à l'annexe F.

3.1 Tranchée

Les tranchées peuvent être de conception simple, sans revêtement, creusées dans divers sols, ou dotées de systèmes de barrières et de couverture hautement ouvragés. Historiquement, de simples tranchées ont été utilisées pour le stockage des déchets radioactifs dans la plupart des pays au cours des premières années de l'ère nucléaire. Elles étaient peu coûteuses et faciles à construire et à exploiter. Elles étaient généralement situées sur le site de l'installation nucléaire qui produisait les déchets ou à proximité. Malheureusement, très peu de registres (voire aucun) ont été conservés concernant les types, les caractéristiques et les quantités de déchets éliminés dans ces premières installations [AIEA 2007].

Les tranchées sont considérées comme des installations « près de la surface » et sont encore couramment utilisées dans de nombreux pays pour les déchets de grand volume et à faible risque [AIEA 2017]. Elles sont d'ordinaire seulement considérées comme appropriées pour les déchets qui se décomposeront suffisamment au cours d'une période anticipée de contrôle institutionnel (généralement de 100 à 300 ans) pour ne représenter aucun risque pour le public, selon ce qui a été déterminé par les évaluations de sûreté.

Des toits temporaires contre les intempéries peuvent être utilisés pendant la phase de chargement pour protéger les déchets et la structure de la tranchée et pour minimiser les infiltrations d'eau dues aux

précipitations. Les espaces entre les colis de déchets peuvent être remblayés avec de la terre, du sable, du gravier ou du béton avant le recouvrement.

Les anciennes conceptions ne comportaient généralement aucune forme de barrière ouvragée, comme des systèmes de drainage, des revêtements ou des systèmes de recouvrement multicouches. Les conceptions modernes comprennent généralement toutes ces caractéristiques, comme l'installation française du CIRES près de Morvilliers, illustrée à la figure 1. L'exploitation de l'installation a débuté en 2003 et comprend une série d'alvéoles de stockage revêtues du type tranchée, chacune pouvant atteindre 124 m de long, 26 m de large et 8,5 m de profondeur et ayant une capacité nette pouvant atteindre 25 000 m^3 par alvéole et 650 000 m3 pour l'installation actuellement autorisée [ANDRA 2014]. Jusqu'à la fin de 2016, approximativement 330 000 m3 de DTFA avaient été stockés au CIRES [ANDRA 2018].

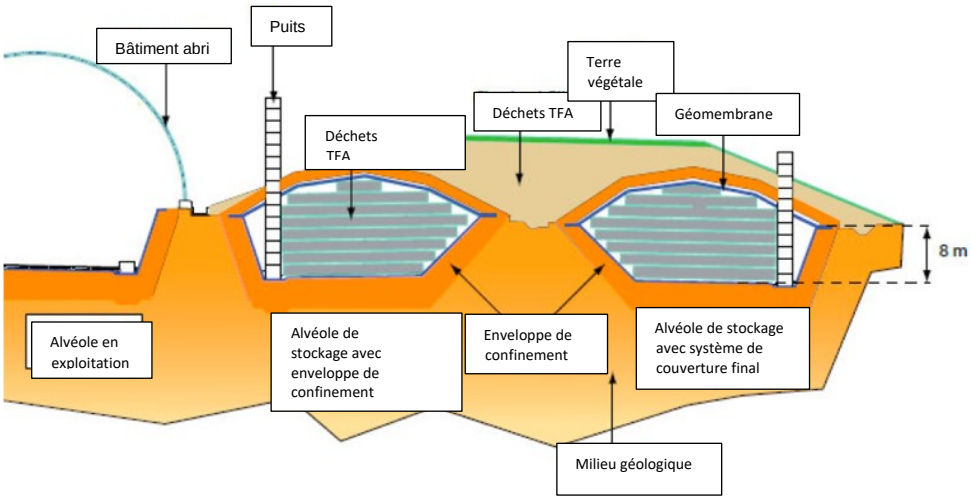

FIGURE 1 : Schéma de l'installation de stockage de DTFA du CIRES près de Morvilliers, en France [USDOE 2011] Une conception similaire est également utilisée en Espagne sur le site d'El Cabril pour le stockage des DTFA.

D'autres conceptions de tranchées sont utilisées aux États-Unis pour les DFA dans les installations commerciales de stockage de Barnwell (Caroline du Sud), Clive (Utah), Andrews County (Texas) et Hanford (Washington), ainsi que sur plusieurs sites du Département de l'Énergie et, historiquement, dans plusieurs autres installations commerciales de stockage (aujourd'hui fermées). Au total, approximativement 26 millions de m^3 de DFA ont été éliminés dans diverses installations en tranchée aux États-Unis [USDOE 2017].

Le dépôt le plus récent pour les déchets commerciaux de faible activité aux États-Unis est l'installation de Waste Control Specialists (WCS) dans le comté d'Andrews, au Texas, dont l'exploitation a débuté au printemps de 2012. Cette installation consiste en des tranchées revêtues de béton creusées dans un endroit aride, dans un lit d'argile rouge imperméable de 150 m d'épaisseur. Elle comprend deux dépôts adjacents de conception similaire : l'un pour les déchets commerciaux et l'autre pour les déchets du gouvernement fédéral américain. La figure 2 présente un modèle typique de tranchée et de couverture. Les dimensions globales du dépôt commercial sont d'approximativement 275 m de long, 275 m de large

et 25 m de profondeur. Il sera construit en quatre phases et aura une capacité d'approximativement 76 000 m^3 par phase. Les déchets sont placés dans des colis de béton cubiques ou cylindriques avant leur mise en place. Ces colis de déchets sont scellés et empilés à une hauteur d'approximativement 15 m du fond de la tranchée (4 couches de colis de béton en principe). L'espace entre les colis est remblayé avec du sable. Une fois remplie, la tranchée de chaque phase sera recouverte d'un couvercle en béton, puis d'un système de couverture ouvragé multicouche. La profondeur des tranchées de l'installation de WCS permet de stocker toutes les catégories américaines de déchets de faible activité, y compris la catégorie la plus radioactive (classe C). En décembre 2016, l'installation de WCS contenait approximativement 195 000 m^3 de déchets [USDOE 2017].

Le concept des tranchées a également été utilisé au Royaume-Uni (à Drigg), où quelque 800 000 m^3 de DFA ont été stockés dans des tranchées à revêtement en argile entre 1959 et 1995 (plus récemment, de grandes enceintes de béton ont été construites à Drigg depuis 1988). D'autres pays ont eu recours au le stockage en tranchées pour les DTFA ou les DFA, notamment l'Argentine, la Chine, la France, l'Inde, le Japon, la Norvège, la Russie, la Slovaquie et l'Afrique du Sud [AIEA 2007; AIEA 2018; USDOE 2011]. Certaines des installations les plus anciennes ne répondaient pas à la fin à des normes de sûreté adéquates et ont nécessité des mesures correctives (par exemple, CEA Cadarache, France; Institut Kurchatov, Russie; Kjeller, Norvège) [AIEA 2007].

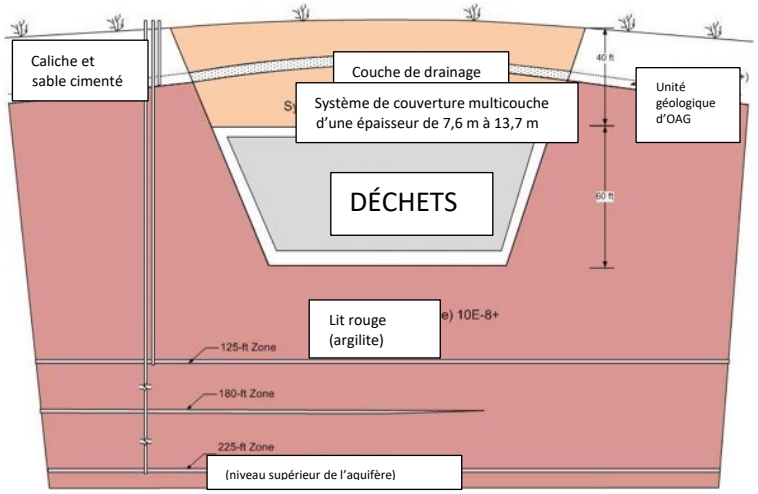

FIGURE 2 : Modèle type de tranchée de WCS pour les DFA, Texas [WCS 2020]

3.2 Monticule en surface

Un monticule en surface est à certains égards très similaire à une tranchée, sauf qu'il est construit à la surface du sol, puis recouvert d'un système de scellement et de couverture. Les monticules hors sol sont généralement considérés comme des installations de surface, bien qu'ils soient parfois inclus dans la catégorie « près de la surface ».

Des couvertures temporaires contre les intempéries peuvent être utilisées pendant la phase de chargement pour protéger les déchets et minimiser les infiltrations d'eau dues aux précipitations. Les espaces entre les colis de déchets peuvent être remblayés avec de la terre, du sable, du gravier ou du béton avant l'installation d'un système de scellement et d'un recouvrement.

À quelques endroits dans le monde, le monticule en surface est utilisé pour le stockage des DTFA (par exemple, sur la plupart des sites de réacteurs nucléaires en Suède) et des DFA (par exemple à Clive, Utah, États-Unis; à Fernald, Ohio, États-Unis; et au CSM, La Manche, France). Il est actuellement utilisé au Canada pour les DFA historiques (par exemple, à Port Hope, en Ontario [PHAI 2018]) et a été proposé par les Laboratoires nucléaires canadiens pour le stockage d'approximativement 1 million de m^3 de DFA sur le site de Chalk River.

La figure 3 [USDOE 2011] montre l'installation en monticule de stockage des DTFA à vie courte (qui se désintègrent en 50 ans approximativement) de la centrale nucléaire d'Oskarshamn en Suède. Les alvéoles de stockage d'Oskarshamn sont construites sur une base d'approximativement 3000 m^2. Une plate-forme en béton avec une canalisation de drainage est installée au fond du monticule de stockage. Les déchets sont empilés sur la plateforme dans divers contenants allant de grands sacs à des conteneurs de fret ISO. Lorsqu'une zone de stockage est pleine, un système de scellement et un recouvrement sont placés au-dessus de l'amoncellement de déchets. Ce système est composé de plusieurs couches de membranes, de bentonite et de couches de drainage, le tout recouvert d'une couverture d'un mètre d'épaisseur de gravats et de terre. De gros blocs de béton sont utilisés autour du périmètre du monticule pour ancrer les couches de couverture et pour fournir une stabilité structurelle supplémentaire.

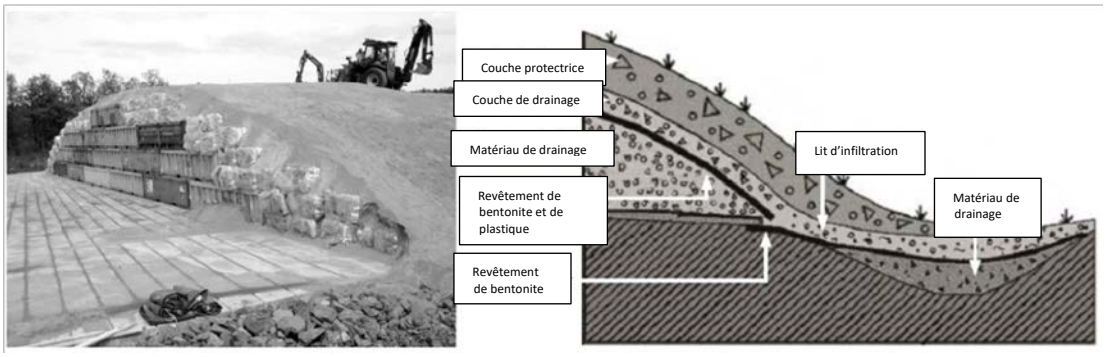

FIGURE 3 : Installation de stockage de DTFA à la centrale nucléaire d'Oskarshamn [USDOE 2011]

En France, un premier dépôt de déchets de faible et moyenne activité à vie courte (DFMA-VC) a été construit au Centre de stockage de la Manche (CSM), à côté de l'usine de retraitement de combustible usé de La Hague, dans le nord de la France. Il est en phase de fermeture et de surveillance depuis 1994. L'exploitation du CSM a débuté en 1969 et contient approximativement 527 000 m^3 de déchets. Les conteneurs de déchets y ont été empilés directement sur des dalles de béton, comme le montre la figure 4 [USDOE 2011]. Les déchets plus radioactifs ont été placés dans des bunkers en béton construits sur ces dalles. Les espaces entre les conteneurs sont remblayés avec du sable, du gravier ou du béton. Le dépôt occupe un site d'approximativement 15 ha et a été recouvert en 1997 d'un système multicouche comprenant une membrane de bitume et une combinaison de couches drainantes et imperméables conçues pour empêcher l'infiltration d'eau dans le dépôt. La couche supérieure de couverture a été plantée d'herbe afin de favoriser l'évaporation de l'eau de pluie et d'empêcher l'altération et l'érosion des couches supérieures du système de recouvrement ouvragé.

FIGURE 4 : Mise en place des déchets au centre de stockage de la Manche (CSM), France [USDOE 2011].

Des monticules en surface ont également été utilisés à plusieurs endroits aux États-Unis, comme à Fernald, dans l'Ohio. L'ancien Feed Material Production Center du Département américain de l'énergie à Fernald (Ohio) a été exploité de 1951 à 1989 comme installation de traitement de l'uranium. Il a été déclassé et le site a fait l'objet d'une restauration environnementale dans les années 1990 et au début des années 2000, et plusieurs installations de stockage de déchets radioactifs ont été construites sur le site. La plus grande d'entre elles est un monticule en surface contenant approximativement 2,3 millions de m^3 de DFA. Les matériaux stockés dans l'installation se composent approximativement de 85 % de terre et de matériaux semblables, et de 15 % de débris de démolition de bâtiments, d'équipements déclassés et de divers autres DFA. L'exigence conceptuelle de base de l'installation était d'isoler les déchets de l'environnement « pour une période allant jusqu'à 1 000 ans, dans la mesure du possible, et certainement de 200 ans » [ICCHGE 2008]. Le monticule est constitué d'une rangée de 8 cellules et ses dimensions totales sont d'approximativement 240 m de large, 1130 m de long et 20 m de haut. Il repose sur un revêtement de fond technique multicouche (d'approximativement 1,8 m d'épaisseur) composé d'une alternance de couches d'isolement et de drainage, comme le montre la figure 5. Le système de couverture ouvragé est d'une épaisseur d'environ 3 m. Il comporte également des couches d'isolement et de drainage, comme le montre la figure 6. L'installation a été achevée (recouverte) en 2006 et est maintenant en mode de surveillance à long terme.

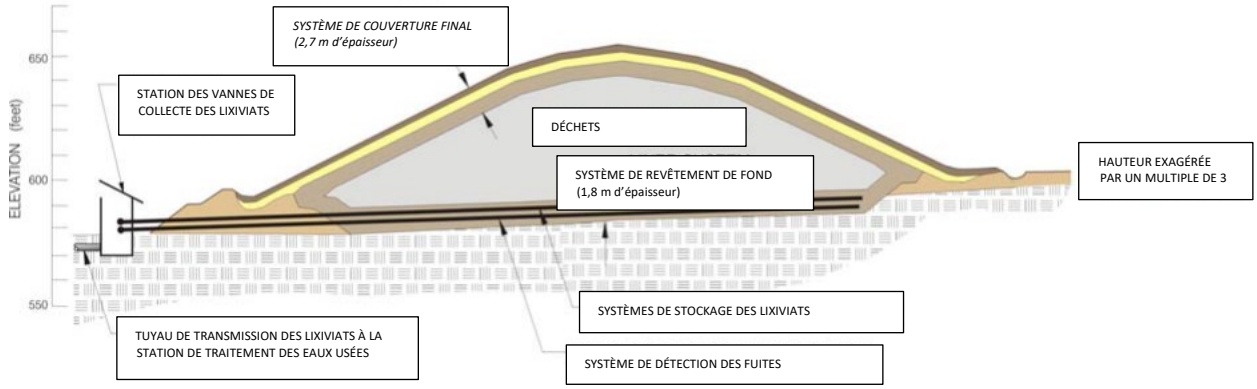

FIGURE 5 : Coupe transversale du monticule de l'installation de stockage sur place de Fernald [CIPSH 2008].

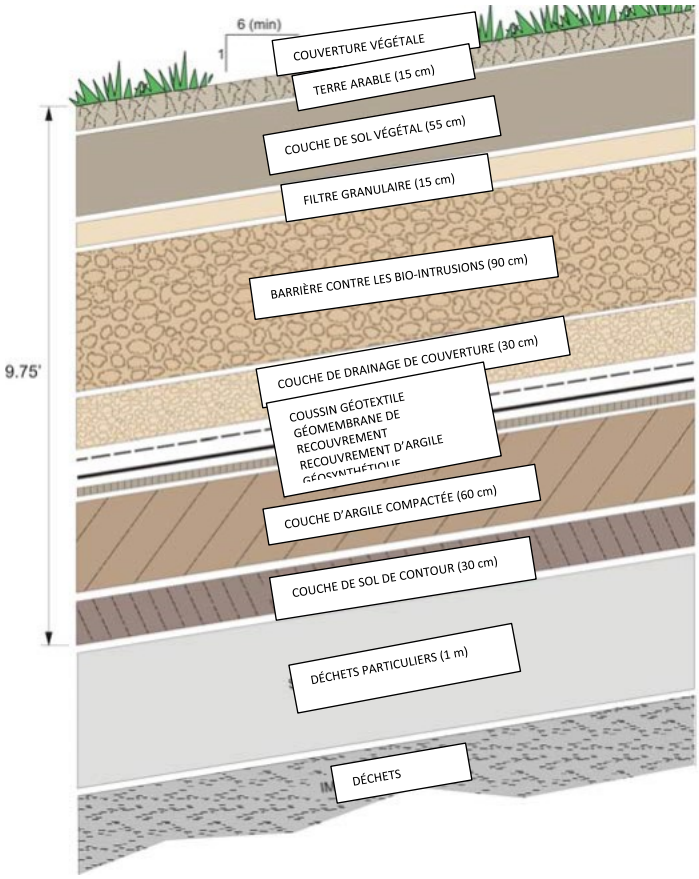

FIGURE 6 : Détail de la couverture ouvragée du monticule de l'installation de stockage sur place de Fernald [CIPSH 2008].

3.3 Enceinte de béton

Les enceintes de béton sont l'une des méthodes les plus couramment utilisées aujourd'hui dans le monde pour stocker les DFA [AIEA 2018]. Elles sont de nature modulaire. Elles peuvent donc être adaptées à une gamme de capacités allant de petite à très grande et offrent la flexibilité nécessaire pour accepter une grande variété de tailles de colis de déchets, y compris des objets très grands et lourds tels que des générateurs de vapeur et des cuves de réacteurs. Elles peuvent également être construites dans divers milieux géologiques, en surface ou près de la surface, à des profondeurs pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres. L'enceinte de base est composée d'une structure en béton à parois épaisses de diverses dimensions, souvent dotée d'un système intégré de drainage et/ou de surveillance des eaux.

Les enceintes sont généralement remplies de colis de déchets par le haut (à l'aide d'une grue fixe ou mobile) ou par le côté (à l'aide d'un chariot élévateur ou d'un véhicule semblable), puis recouvertes d'un couvercle en béton et d'un système de couverture multicouche une fois le remplissage terminé. Des abris temporaires contre les intempéries peuvent être utilisés pendant la phase de chargement pour protéger les déchets et la structure et pour minimiser les infiltrations d'eau de précipitation. Les espaces

entre les colis de déchets sont généralement remblayés avec du sable, du gravier ou du béton pour former une structure monolithique avant le recouvrement.

3.3.1 Enceintes en surface

L'exemple classique d'une installation de stockage du type enceinte de béton située à la surface du sol est le Centre de stockage de l'Aube en France (anciennement désigné par l'acronyme CSFMA, pour Centre de stockage des déchets de faible et moyenne activité), qui comprend une série d'enceintes de béton construites en surface, comme le montre la figure 7. La capacité totale autorisée est de 1 000 000 m^3 au sein de 400 enceintes de stockage (25 m de large, 25 m de long et 8 m de haut). Les enceintes sont conçues pour une durée de vie de 300 ans et seront recouvertes d'un système de couverture ouvragé une fois remplies. À la fin de 2016, l'installation contenait approximativement 325 000 m^3 de déchets.

FIGURE 7 : Vue aérienne du CSFMA pour DFMA à vie courte, France [SKB 2011].

Les conteneurs de DFA (principalement des fûts) sont empilés dans les enceintes à l'aide d'un pont roulant. Un abri mobile est utilisé pour protéger les enceintes ouvertes pendant la phase de remplissage. Les enceintes sont ensuite remplies de béton, couche par couche, comme le montre la figure 8, à gauche. Une fois l'enceinte remplie, un couvercle en béton armé est coulé sur le dessus pour fermer le tout.

FIGURE 8 : Remblayage d'une enceinte de DFA du CSFMA avec du béton (à gauche) et d'une enceinte de DMA avec du gravier (à droite) [NOS 2014].

Dans le cas des DMA à vie courte, la plupart sont placés dans des conteneurs cylindriques ou cubiques en béton fibré et les enceintes sont remblayées avec du gravier, comme le montre la figure 8, à droite.

Le dépôt d'El Cabril pour DFMA à vie courte, en Espagne, a été mis en service en 1992 et est de conception similaire au dépôt français du Centre de l'Aube. Contrairement à l'installation française, les fûts de déchets sont d'abord placés dans des caissons en béton de 1,2 m x 1,2 m x 1,2 m (contenant généralement 4 fûts de 200 L) ou de 2,25 m x 2,25 m x 2,20 m (contenant généralement 18 fûts de 200 L). Certains fûts peuvent être d'abord supercompactés, ce qui permet de placer jusqu'à 40 rondelles supercompactées dans le plus grand caisson en béton. Lorsqu'un conteneur est plein, son contenu est immobilisé à l'aide d'un coulis de béton et le bloc solidifié est placé dans l'alvéole de stockage. Les fûts de déchets de moindre activité peuvent également être placés dans des structures en acier de taille similaire, contenant généralement 6 fûts, au lieu du caisson en béton. Les alvéoles de stockage font 24 m de long, 19 m de large et 9 m de haut. Elles sont optimisées pour les dimensions des caissons de stockage. Les murs et la base des alvéoles sont en béton et d'une épaisseur d'approximativement 0,5 m.

Une fois l'alvéole de stockage remplie de caissons, elle est fermée par une dalle de couverture en béton armé, elle-même revêtue d'une protection contre les intempéries. Une fois toutes les alvéoles de stockage remplies, elles seront recouvertes d'un système de couverture ouvragé multicouche, puis végétalisées.

Actuellement, le centre compte 28 alvéoles de stockage pouvant contenir approximativement 37 000 m^3 de déchets. Sa capacité totale prévue est d'approximativement 90 000 m^3, ce qui suppose qu'il faudra remplir approximativement 50 autres alvéoles de stockage. Celles-ci seront construites en blocs conformément aux exigences. En décembre 2016, approximativement 32 000 m^3 avaient été stockés dans l'installation.

3.3.2 Enceintes peu profondes, près de la surface

Des enceintes de stockage en béton ont également été construites sous terre à diverses profondeurs. Elles sont le plus souvent construites à une faible profondeur (jusqu'à quelques mètres sous la surface du sol). À certains égards, elles ressemblent à des tranchées, mais sont composées d'une série d'enceintes de béton distinctes construites dans une excavation. On y accède par le haut, et les colis de déchets sont chargés à l'aide d'une grue fixe ou mobile. Comme pour les enceintes en surface, les enceintes souterraines près de la surface sont généralement conçues pour une durée de vie de 300 ans et sont recouvertes d'un système de couverture ouvragé une fois remplies.

Un exemple de dépôt à enceintes à faible profondeur se trouve en Slovaquie. Le dépôt national pour DFMA à vie courte RU RAO est situé près de Mochovce, à côté de la centrale nucléaire. Il est conçu pour le stockage des déchets solides et solidifiés à vie courte issus de l'exploitation des installations nucléaires, notamment des réacteurs de Mochovce et de Jaslovské Bohunice. Il est construit sur une formation géologique à faible perméabilité et à forte capacité de sorption. Une couche d'argile compactée sous les enceintes de stockage fournit une barrière supplémentaire contre la migration des radionucléides. Un système de drainage surveillé recueille les éventuelles infiltrations d'eau dans chaque enceinte de stockage.

La figure 9 montre que le dépôt est constitué d'enceintes de stockage en béton disposées en double rangée de 40 chambres (2 x 20). Un toit mobile est utilisé pendant les opérations de chargement. Chaque enceinte mesure 6 m x 5,5 m x 18 m. Les murs sont d'une épaisseur de 0,6 m. La capacité de stockage est de 90 caissons de béton fibré (dimensions à l'extérieur de 1,7 m x 1,7 m x 1,7 m, 3,1 m^3 de volume intérieur), soit une capacité totale de 7 200 caissons (22 320 m^3 de déchets) par double rangée couvrant une superficie totale de 11,2 ha. Le site du dépôt permet une expansion à jusqu'à 7,5 rangées

doubles de caissons de stockage. Cette capacité devrait être suffisante pour tous les déchets d'exploitation et de démantèlement des réacteurs existants [JAVYS 2019].

Les fûts de déchets compactés et bitumés sont injectés dans les caissons en béton avec un mélange de ciment, dont une partie peut être constituée de déchets radioactifs liquides. Un abri contre les intempéries recouvre l'ensemble de la double rangée d'enceintes ouvertes pendant leur remplissage. Une fois remplies, les enceintes sont remblayées et recouvertes de béton. À la fermeture, le dépôt sera surmonté d'un système de recouvrement ouvragé multicouche.

L'exploitation de la première double rangée a débuté en 2001. À la fin de 2016, le dépôt contenait 4 804 caissons de stockage en béton, ce qui représentait un volume total d'approximativement 14 900 m^3 de déchets. La deuxième double rangée est en exploitation depuis 2016 et la construction d'une troisième double rangée a été lancée en 2019.

FIGURE 9 : Dépôt de Mochovce pour DFMA à vie courte, Slovaquie [JAVYS 2019].

Un dépôt semblable est exploité en République tchèque depuis 1995. Ce dépôt en surface pour DFMA à vie courte de centrales nucléaires, situé à côté du site de la centrale de Dukovany, se compose de 112 enceintes en béton armé disposées en quatre rangées de 28 enceintes. La capacité totale de l'installation est de 55 000 m^3. Les enceintes mesurent 5,3 m x 5,4 m x 17,3 m. Le dépôt de Dukovany repose sur des sédiments argileux imperméables du Quaternaire. Il est situé au-dessus de la nappe phréatique et dispose d'un double système de drainage qui permet de contrôler l'accumulation d'eau dans les enceintes du dépôt et autour de celles-ci. Les déchets, principalement placés dans des fûts en acier galvanisé de 200 L, sont mis en place à l'aide d'un pont roulant muni d'une cabine d'opérateur blindée. Le volume stocké s'élevait à approximativement 11 520 m^3 à la fin de 2016. Une fois chaque enceinte remplie, l'espace entre les fûts est remblayé avec du béton et l'enceinte est recouverte d'une épaisse membrane de polyéthylène qui empêche l'eau de pluie de s'infiltrer dans l'enceinte. Chaque enceinte est ensuite recouverte d'une épaisse dalle de béton. Une période de surveillance institutionnelle de 300 ans est prévue après la fermeture.

3.3.3 Enceintes près de la surface à plus grande profondeur

Le dépôt japonais de déchets faiblement radioactifs à vie courte, situé sur complexe de Japan Nuclear Fuels Ltd. (JNFL) à Rokkasho-mura, est un exemple de dépôt à enceintes près de la surface à plus grande profondeur. Son exploitation a débuté en 1992 et il se compose de deux installations de stockage définitif, chacune comportant plusieurs structures en béton construites dans une grande fosse creusée dans le substratum rocheux. Dans l'« Installation de stockage n° 1 », pour les déchets solidifiés homogènes (par exemple les résines échangeuses d'ions et les concentrés des évaporateurs), chaque structure mesure approximativement 24 m x 24 m x 6 m de haut et est creusée à une profondeur d'approximativement 15 m sous la surface. Les structures sont divisées en alvéoles d'approximativement 6 m x 6 m et peuvent contenir chacune jusqu'à 320 fûts standard de 200 L (8 étages de 8x5 fûts dans chaque alvéole). Dans l'« Installation de stockage permanent n° 2 », dont l'exploitation a commencé en 2000 pour les déchets compactés et solidifiés (métaux et béton, par exemple), les structures mesurent 36 m x 37 m x 7 m de haut, sont excavées jusqu'à une profondeur d'approximativement 20 m sous la surface et contiennent 36 alvéoles de 6 m x 6 m, chacune pouvant contenir jusqu'à 360 fûts (9 étages de 8x5 fûts). La capacité actuelle de chaque installation est de 40 000 m^3 de déchets. Les installations sont agrandies par étapes, selon les besoins. Leur capacité finale totale sera d'approximativement 600 000 m^3 (3 millions de fûts).

Les déchets sont généralement cimentés dans des fûts de 200 L. Les fûts sont placés en couches à l'aide d'un dispositif automatique de manutention des fûts et l'espace entre les fûts est cimenté. Lorsqu'une cellule est remplie, elle est surmontée d'un couvercle en béton armé, comme le montre la figure 10. Une fois remplie, toute la zone sera recouverte d'une couche de bentonite et de terre de 4 m d'épaisseur. À la fin de 2016, l'installation n° 1 contenait approximativement 147 000 fûts (~29 000 m^3) et l'installation n° 2 contenait approximativement 113 000 fûts (~22 600 m^3).

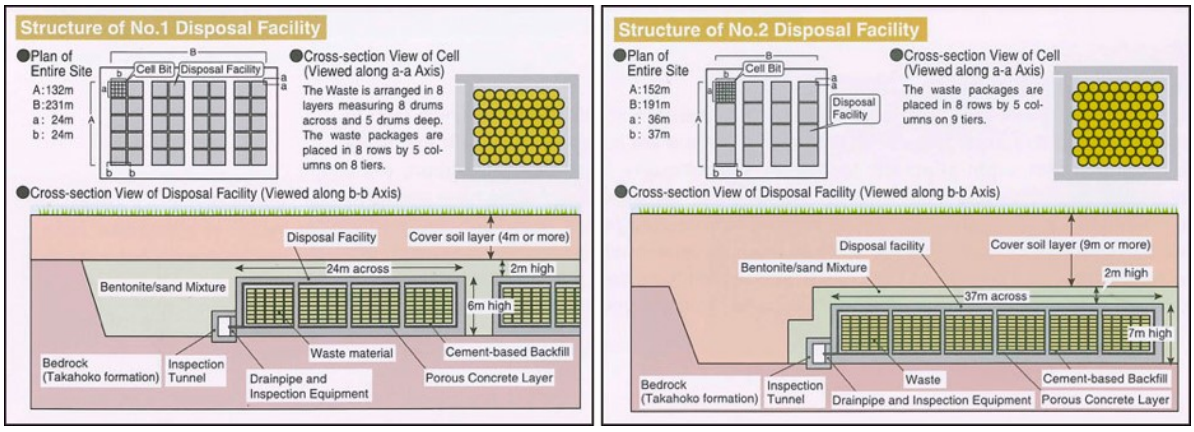

FIGURE 10 : Dépôt de DFA de Rokkasho-mura, Japon [USDOE 2011].

Structure of No. 1 Disposal Facility	Structure de l'installation de stockage n° 1
Plan of Entire Site	Plan de l'ensemble du site
Cell bit	Alvéole
Disposal Facility	Installation de stockage
Cross-section View of Cell (Viewed along a-a Axis)	Vue en coupe d'une alvéole (selon l'axe a-a)
The Waste is arranged in 8 layers measuring 8 drums across and 5 drums deep. The waste packages are placed in 8 rows by 5 columns on 8 tiers.	Les déchets sont disposés en 8 étages de 8 fûts par 5 fûts. Les colis de déchets sont empilés selon une disposition en 8 rangées et 5 colonnes sur 8 étages.
Cross-section View of Disposal Facility (Viewed along b-b Axis)	Vue en coupe de l'installation de stockage (selon l'axe b-b)
Disposal Facility	Installation de stockage
Cover soil layer (4 m or more)	Couche de sol de couverture (4 m ou plus)
Bentonite/sand Mixture	Mélange bentonite/sable
24m across	24 m de large

2 m high	2 m de haut
6 m high	6 m de haut
Bedrock (Takahoko formation)	Roche (formation de Takahoko)
Inspection Tunnel	Tunnel d'inspection
Waste material	Déchets
Drainpipe and Inspection Equipment	Tuyau d'évacuation et équipement d'inspection
Cement-based backfill	Remblai à base de ciment
Porous concrete layer	Couche de béton poreux
Structure of No. 2 Disposal Facility	Structure de l'installation de stockage n° 2
Plan of Entire Site	Plan de l'ensemble du site
Cell Bit	Alvéole
Disposal Facility	Installation de stockage
Cross-section View of Cell (Viewed along a-a Axis)	Vue en coupe de la cellule (selon l'axe a-a)
The waste packages are placed in 8 rows by 5 columns on 9 tiers.	Les colis de déchets sont disposés en 9 étages de 8 rangées et 5 colonnes.
Cross-section View of Disposal Facility (Viewed along b-b Axis)	Vue en coupe de l'installation de stockage (selon l'axe b-b)
Disposal Facility	Installation de stockage
Cover soil layer (9 m or more)	Couche de sol de couverture (9 m ou plus)
Bentonite/sand Mixture	Mélange bentonite/sable
2 m high	2 m de haut
37m across	37 m de large
7 m high	7 m de haut
Bedrock (Takahoko formation)	Roche (formation de Takahoko)
Inspection Tunnel	Tunnel d'inspection
Waste	Déchets
Drainpipe and Inspection Equipment	Tuyau d'évacuation et équipement d'inspection
Cement-based backfill	Remblai à base de ciment
Porous concrete layer	Couche de béton poreux

Un autre exemple de dépôt à enceintes de béton près de la surface à plus grande profondeur est celui de Dounreay, en Écosse, dont l'exploitation a débuté en 2015. La première phase de l'installation se compose d'une enceinte en béton de 92 m de long, 46 m de large et 12,5 m de haut pour les DFA et d'une enceinte en béton de 66 m x 46 m x 12,5 m de haut pour les DFA de grand volume (DFA-GV, ou HVLA au Royaume-Uni), dont la base se trouve à approximativement 16 m sous la surface du sol, mais au-dessus de la nappe phréatique. Comme à l'installation de Drigg en Angleterre, les déchets sont pour la plupart placés dans des conteneurs de fret ISO mi-hauteur (HHISO) empilés par chariot élévateur, pour une capacité totale de 38 100 m^3 pour les DFA et de 26 900 m^3 pour les DFA-GV. Les conteneurs de DFA sont scellés avant leur mise en place. Des enceintes supplémentaires seront ajoutées au cours des phases 2 et 3 pour accueillir au total approximativement 130 000 m^3 de DFA et 46 000 m^3 de DFA-GV tels qu'emballés dans les HHISO.

La conception des enceintes comprend un système de collecte des eaux de drainage. À la différence de l'installation de Drigg, un abri contre les intempéries est utilisé pendant la phase de remplissage pour minimiser les infiltrations d'eau. Les conteneurs sont empilés en rangs serrés jusqu'à une hauteur de 8 étages. Seules la face avant et les parties supérieures seront accessibles pour les inspections. Cependant, un espace étroit est prévu le long d'un côté de l'enceinte pour permettre l'inspection à distance de toute la longueur.

3.4 Caverne rocheuse

Un dépôt en caverne rocheuse consiste en une ou plusieurs excavations souterraines réalisées dans une formation rocheuse appropriée. On accède aux cavernes de dépôt par un puits, une rampe ou un tunnel. Il peut s'agir d'une construction neuve (par exemple, en Finlande, en Hongrie, en Corée, en Norvège, en Suède et aux États-Unis) ou d'une conversion d'une excavation minière existante (par exemple, en Allemagne, en République tchèque, en Roumanie et en Slovaquie). Ces dépôts ont été construits dans

divers milieux géologiques, tels que des formations salines, sédimentaires et cristallines, et à diverses profondeurs[7].

Certaines conceptions comprennent des enceintes en béton aménagées dans l'espace excavé, tandis que d'autres ne misent que sur la formation rocheuse. Comme dans une mine, elles nécessitent un système de ventilation forcée pour fournir de l'air aux travailleurs et aux appareils. Le dépôt en caverne rocheuse compte généralement sur le mouvement lent des eaux souterraines, la profondeur et les propriétés de la roche pour isoler les déchets de la biosphère.

Une fois les salles de stockage remplies, elles sont généralement scellées et l'ensemble du dépôt est fermé lorsqu'il est plein en bouchant les rampes/puits d'accès ainsi que les puits de ventilation. Certaines conceptions prévoient le remblayage des salles de stockage, tandis que d'autres ne scellent que l'entrée ou les entrées des salles de stockage. Les matériaux d'étanchéité varient selon la conception et peuvent comprendre du béton, des matériaux argileux, du sable, du bitume, etc.

Les cavernes rocheuses ne sont généralement utilisées que pour les DFA et les DMA. Les déchets de grand volume, tels que les DFA-GV, ne sont généralement pas placés dans des cavernes rocheuses en raison du coût élevé de l'excavation et de la vitesse limitée à laquelle les déchets peuvent être acheminés sous terre dans la majorité des installations (en particulier lorsque l'accès par un puits est assuré par un treuil).

3.4.1 Caverne rocheuse peu profonde

Les exemples classiques de dépôts en cavernes rocheuses peu profondes construites spécialement pour le stockage sont ceux de la Suède et de la Finlande.

En Suède, les DFMA à vie courte sont stockés dans le dépôt SFR, qui est en service depuis 1988. Il est adjacent à la centrale nucléaire de Forsmark. Cette installation dessert toutes les installations nucléaires de Suède. Elle est exploitée par SKB, une société de gestion des déchets appartenant aux compagnies d'électricité d'origine nucléaire. Comme le montre la figure 11, le dépôt consiste en quatre cavernes rocheuses de différentes conceptions et dimensions et en un silo, tous creusés dans le substratum rocheux cristallin sous la mer Baltique, à une profondeur d'approximativement 50 m sous le fond marin et à 1 km du rivage. On y accède par une rampe et sa capacité totale est d'approximativement 63 000 m^3. La partie gauche de la figure montre également un agrandissement prévu, qui comprendra six nouvelles enceintes pouvant stocker 117 000 m^3 supplémentaires de déchets (principalement des déchets de démantèlement d'installations nucléaires) à une profondeur d'approximativement 120 à 140 m sous le fond marin. Si les autorisations réglementaires nécessaires sont obtenues, la construction de la nouvelle partie du SFR devrait durer approximativement six ans.

[7] Notons que certaines cavernes rocheuses peu profondes sont parfois incluses dans la catégorie générale des dépôts « près de la surface".

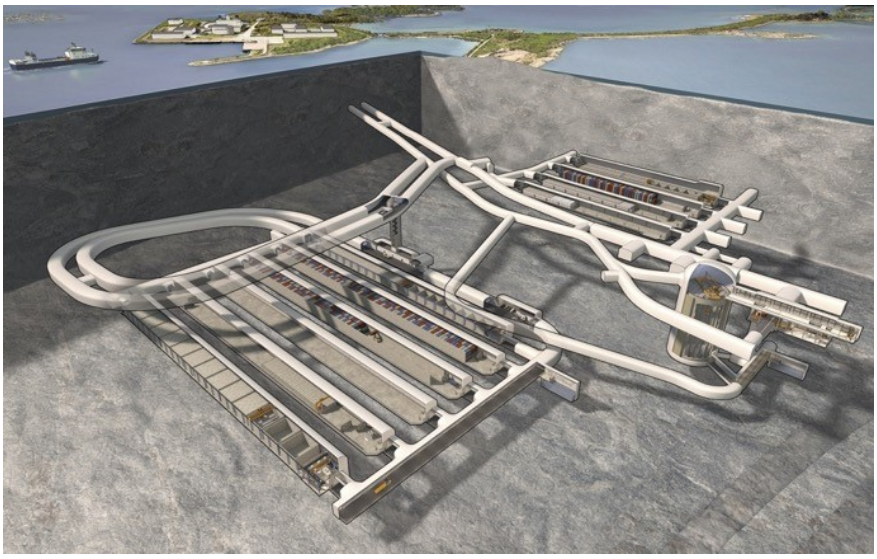

FIGURE 11 : Dépôt SFR, Suède [SKB 2018].

Les déchets les plus actifs, dont le débit de dose maximal est de 500 mSv/h, sont placés dans le silo. Ce sont principalement des filtres, des résines échangeuses d'ions et des composants de cœur activés. Le silo est une construction cylindrique en béton de 30 m de diamètre x 50 m de haut, divisée en puits de différentes tailles pour des colis de déchets dont la taille peut atteindre au maximum 2,5 m x 2,5 m. Les parois du silo sont en béton armé de 0,8 m d'épaisseur. L'espace entre les parois extérieures du silo et la roche environnante est remblayé avec de la bentonite, ce qui fournit une barrière d'une épaisseur moyenne de 1,2 mètre. Le plancher de béton de 1 m d'épaisseur au fond du silo repose sur une couche de mélange sable/bentonite dans une proportion 90:10. Les colis de déchets sont placés par étages dans les puits à l'aide d'un pont roulant. Les espaces entre les colis de déchets sont progressivement remblayés avec du béton poreux. Une fois le silo rempli, un couvercle en béton de 1 m d'épaisseur le recouvrira. Ce couvercle sera lui-même recouvert d'une fine couche de sable, d'une couche de 1,5 m d'épaisseur de mélange sable/bentonite (90:10) et l'espace restant sera rempli de sable, de gravier ou de sable stabilisé au ciment.

L'enceinte « BMA », représentée sur la figure 12, est utilisée pour les déchets dont le débit de dose peut atteindre 100 mSv/h. Il s'agit principalement de filtres, de résines échangeuses d'ions et de composants métalliques. L'enceinte en pierre mesure approximativement 160 m de long, 19,5 m de large et 16,5 m de haut. Une tranchée en béton a été construite à l'intérieur de l'enceinte. Elle est divisée en 15 compartiments. Les déchets sont placés dans les compartiments à l'aide d'un équipement télécommandé. Les déchets sont empilés sur le sol de béton de telle sorte que les colis de déchets servent de support à des dalles de couverture préfabriquées en béton qui servent de couvercles pour chaque compartiment et qui sont mises en place dès que les compartiments sont remplis. Il est également possible de remblayer les espaces entre les colis de déchets d'un compartiment. Enfin, une couche de béton sera coulée sur le couvercle. Entre la structure de béton et la paroi rocheuse, il y a un espace de 2 m de large, qui sera rempli de sable avant la fermeture. L'espace au-dessus de la structure de béton peut ne pas être rempli, mais il peut aussi être remblayé. Des bouchons seront placés dans les deux entrées de l'enceinte lors de la fermeture de l'installation de stockage. Approximativement 39 000 m^3 de déchets avaient été stockés dans le SFR en décembre 2016.

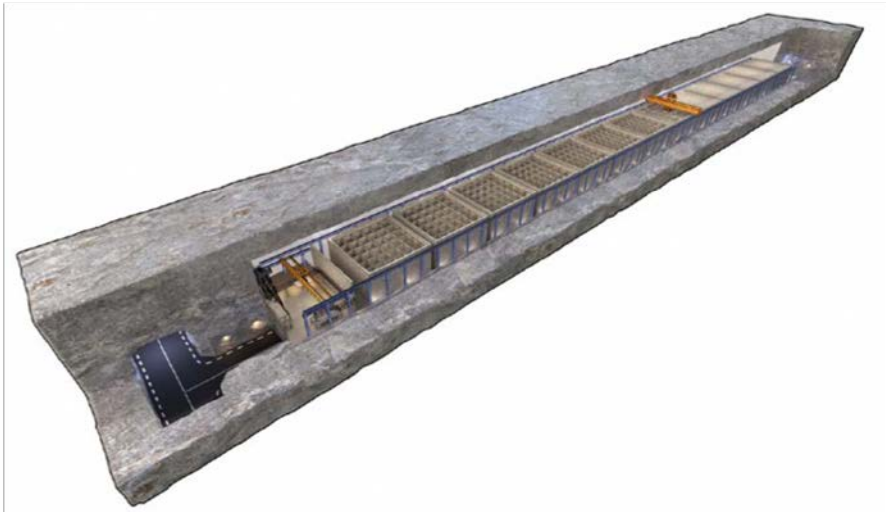

FIGURE 12 : Enceinte BMA du dépôt SFR [SKB 2020]

Il y a aussi deux enceintes « BTF » conçues pour des réservoirs en béton contenant des résines échangeuses d'ions et des filtres dont le débit de dose peut atteindre au maximum 10 mSv/h. Ces enceintes mesurent approximativement 160 m de long x 15 m de large x 9,5 m de haut. Les déchets sont emballés dans des réservoirs de béton standard d'un volume de 10 m^3 qui sont empilés sur deux étages en rangées de quatre. Cela donne une capacité totale d'approximativement 800 réservoirs de béton dans les deux enceintes. Un couvercle de radioprotection en béton est placé sur le dessus de la pile. L'espace entre les différents réservoirs est remblayé avec du béton, et l'espace entre les réservoirs et la paroi rocheuse sera rempli, par exemple, avec un mélange de sable et de ciment. En outre, certains composants métalliques de grande taille (tels que les séparateurs de vapeur ou les couvercles de cuves de réacteurs) peuvent également être stockés dans ces enceintes.

La caverne « BLA » mesure approximativement 160 m de long x 15 m de large x 12,5 m de haut. Elle est de conception très simple : seulement un plancher en béton sur lequel les conteneurs sont placés à l'aide d'un chariot élévateur. Pendant la phase d'exploitation, un toit de protection a été placé au-dessus des déchets afin de réduire le plus possible l'égouttement de l'eau sur les déchets. Ce toit interne sera démantelé avant la fermeture de l'installation de stockage.

Les déchets de la caverne BLA sont principalement de la ferraille faiblement radioactive (fer, acier, aluminium), de la cellulose (bois, textile, papier), d'autres matières organiques (plastiques, câbles) et d'autres déchets tels que des isolants (laine de roche) emballés dans des conteneurs d'acier standard. La plupart de ces déchets se trouvent dans des conteneurs de fret ISO qui sont empilés à trois de hauteur (jusqu'à six de pour les conteneurs mi-hauteur), par rangées de deux. Dans cette configuration, l'enceinte peut accueillir 310 conteneurs ISO de 20 pieds de haut. Certains déchets contenus dans les conteneurs ISO sont également insérés dans des fûts en acier ou d'autres conteneurs.

Le débit de dose maximal autorisé à la surface des colis de déchets est de 2 mSv/h. Aucun remblayage n'est prévu pour la fermeture de l'enceinte BLA.

La Finlande dispose actuellement de deux dépôts en caverne rocheuse pour les DFMA à vie courte, un sur chaque site nucléaire. Ces dépôts sont détenus et exploités par les sociétés nucléaires pour leurs propres déchets, un petit espace étant réservé aux déchets de sociétés autres que des entreprises de services publics. Chacun de ces deux dépôts est creusé dans le substratum rocheux cristallin du site de la centrale nucléaire associée et les déchets y sont descendus par rampe une rampe d'accès (d'approximativement 1 km de long). Un puits d'accès par ascenseur est prévu pour le personnel uniquement.

À Loviisa, la construction du dépôt a commencé en 1993 et l'exploitation de la première phase de l'installation de stockage a débuté en 1998. Comme le montre la figure 13, le dépôt de Loviisa a été aménagé à une profondeur d'approximativement 110 m dans un substratum granitique. Le dépôt est composé de tunnels pour les déchets solides de faible activité (« déchets de maintenance ») et d'une caverne pour les déchets de faible activité solidifiés. Les tunnels de déchets de maintenance sont 6 m de large x 5 m de haut x 110 m de long et peuvent accueillir 1 200 m^3 (ou 6 000 fûts) de déchets. Le sol des tunnels est en béton et les murs sont en béton projeté. Ils sont aménagés pour assurer le drainage de l'eau. Les fûts de déchets sont empilés à hauteur de cinq dans le tunnel. Les tunnels de DFA ne sont pas remblayés. L'inventaire déclaré à Loviisa à la fin de 2016 était de 1 886 m^3 de DFA [FINLANDE 2017].

À l'intérieur de la caverne de DMA (figure 14), les colis de déchets sont placés dans une structure de type tranchée en béton armé (approximativement 70 m de long x 14 m de large x 11 m de haut). L'enceinte pourra accueillir approximativement 5 000 conteneurs de DMA cylindriques en béton (chacun d'un volume interne de 1 m^3 et d'un volume externe de 1,7 m^3) empilés à 5 de hauteur. L'espace entre les conteneurs sera remblayé avec du béton au fur et à mesure du remplissage de chaque étage, et le tout sera recouvert de béton une fois rempli. L'espace au-dessus de la tranchée fermée sera rempli de pierre concassée.

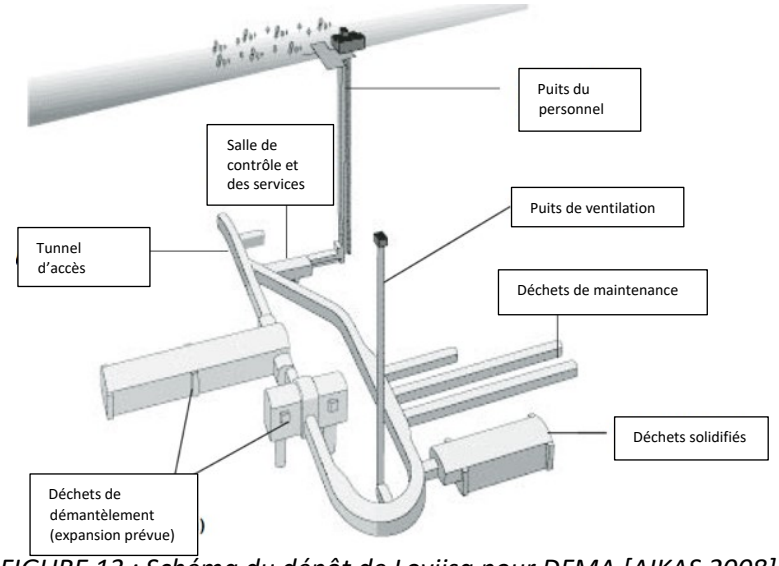

FIGURE 13 : Schéma du dépôt de Loviisa pour DFMA [AIKAS 2008].

FIGURE 14 : Caverne de DMA de Loviisa [NUMMI 2019]

Le dépôt de VLJ sur le site d'Olkiluoto est d'une conception différente. Sa construction a commencé en 1988 et son exploitation a débuté en 1992. Le dépôt est composé de deux grands silos (d'approximativement 24 m de diamètre interne x 34 m de haut) situés à une profondeur de 60 à 95 m dans un substratum rocheux de tonalite, l'un pour des DFA solides et l'autre pour des DFA bitumés. Le silo pour déchets solides de faible activité est un silo de roche recouverte de béton projeté, tandis que le silo pour déchets bitumés est un silo de béton à parois épaisses à l'intérieur d'un silo rocheux où sont empilés des caissons de béton contenant des fûts de déchets bitumés. Le dépôt est représenté schématiquement sur la figure 15. À la fermeture, l'espace vide au-dessus des silos sera remblayé avec de la roche concassée locale. L'inventaire déclaré au VLJ était de 5 681 m^3 de DFMA à la fin de 2016 [FINLANDE 2017].

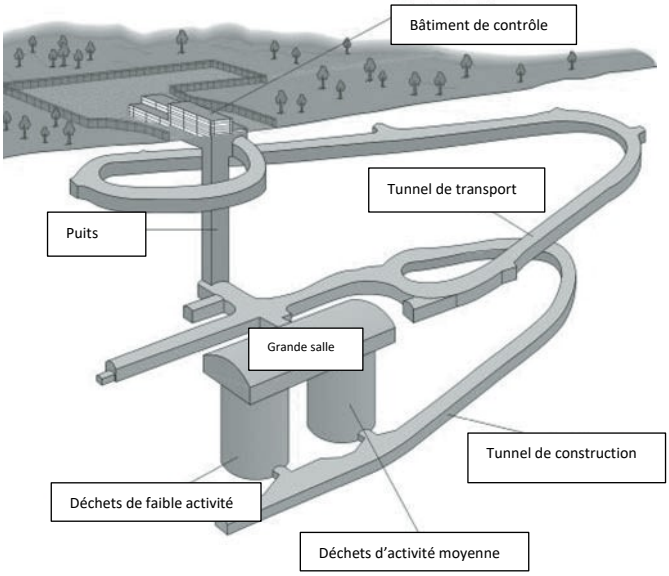

FIGURE 15 : Schéma du dépôt VLJ d'Olkiluoto pour DFMA [AIKAS 2008].

Les DFMA du nouveau réacteur d'Olkiluoto 3 seront stockés dans le même dépôt. Le dépôt sera agrandi dans le futur par l'ajout de silos de conception similaire afin de pouvoir stocker tous les déchets des

réacteurs Olkiluoto 1, 2 et 3 pendant les 60 ans d'exploitation prévus des tranches, ainsi que les déchets issus du déclassement du site.

Un dépôt en caverne rocheuse peu profonde est également utilisé en Norvège, à Himdalen. Une caractéristique unique de l'installation est qu'il s'agit d'un site combiné de stockage (DFA) et d'entreposage (DMA). L'installation, qui appartient à l'État norvégien et est exploitée par IFE, a été mise en service en 1999 et est composée de quatre cavernes rocheuses construites à flanc de colline dans un substratum rocheux cristallin (gneiss). Chaque caverne renferme deux enceintes de béton. La capacité totale de l'installation est de 2000 m^3 (approximativement 10 000 fûts de 210 L). Elle comprend un tunnel d'accès légèrement incliné de 150 mètres de long pour les véhicules et le personnel. Toutes les cavernes et le tunnel d'accès sont munis d'un système de surveillance et de drainage de l'eau. Une salle des services et de contrôle pour le personnel et une salle des visiteurs ont été aménagées le long du tunnel. À la fin de 2016, l'installation contenait approximativement 36 m^3 de déchets (166 fûts).

Les cavernes rocheuses d'Himdalen sont excavées de manière à ce qu'il reste au moins 40 mètres de couverture rocheuse au-dessus des cavernes. Cette couverture géologique naturelle vise à protéger physiquement le site contre les intrusions, les chutes d'avion et autres événements similaires. Elle n'est pas considérée comme une barrière principale dans les calculs de sûreté à long terme. La sécurité à long terme repose sur les barrières ouvragées. Dans chaque caverne, des enceintes (sarcophages) à sol et à murs de béton ont été construites. Lorsqu'une section de l'enceinte est pleine, un toit en béton est construit, façonné de manière à évacuer les eaux souterraines qui peuvent s'infiltrer et une membrane étanche est apposée au toit de béton. Trois cavernes seront utilisées pour le stockage des déchets dans des fûts et des conteneurs empilés en quatre étages. Lorsqu'un étage d'une section de caverne aura été rempli de colis de déchets, elle sera remblayée avec du béton.

L'installation comprend également une zone d'entreposage pour les fûts contenant de petites quantités de plutonium. La partie d'entreposage de l'installation est de même conception que la partie de stockage et se trouve dans l'une des enceintes de la caverne numéro 1. Tout ce qui est placé dans la partie entreposage sera emballé de manière à pouvoir être stocké. Une fois que la décision finale concernant le stockage ou non de ces fûts aura été prise, les colis de déchets seront soit retirés, soit encastrés dans du béton à l'intérieur des enceintes.

3.4.2 Caverne rocheuse profonde

Des dépôts à cavernes rocheuses profondes spécialement conçus pour les DFMA sont actuellement exploités en Hongrie, en Corée du Sud et aux États-Unis. D'autres sont également prévus en France et en Suisse. L'Allemagne dispose de plusieurs dépôts à cavernes rocheuses profondes réaménagés à partie de mines (aujourd'hui fermés) et en construit un nouveau à Konrad. Des mines reconverties ont également été utilisées en République tchèque et en Roumanie, entre autres.

Le Waste Isolation Pilot Plan (WIPP), près de Carlsbad, au Nouveau-Mexique, est actuellement le seul dépôt géologique en profondeur en exploitation dans le monde pour les déchets à vie longue. Le Département de l'énergie (DOE) exploite cette installation pour stocker les déchets transuraniens (TRU) générés par les activités liées à la défense. La figure 16 montre le WIPP, exploité depuis 1999. Il contient actuellement approximativement 88 000 m^3 de déchets à manipulation par contact direct (appelés « CH » au WIPP, pour contact-handled) et 2 400 m^3 de déchets à manipulation télécommandée (appelés « RH », pour remote-handled). L'installation est construite à une profondeur d'approximativement 655 m dans une formation de sel et a une capacité nominale totale d'approximativement 175 000 m^3

(168 000 m^3 de CH et 7 000 m^3 RH). Elle compte huit rangées de 7 salles de stockage, chacune de 91 m de long x 10 m de large x 4 m de haut. Les piliers entre les salles sont d'une épaisseur approximative de 30 m et les piliers entre les rangées sont d'une épaisseur d'environ 61 m. En plus des huit rangées, les principales galeries d'accès nord-sud et est-ouest dans les zones des rangées sont disponibles pour le stockage de déchets et sont prises en considération dans l'évaluation de la sûreté en tant que rangées 9 et 10. Il y a de l'espace pour ajouter d'autres rangées au besoin.

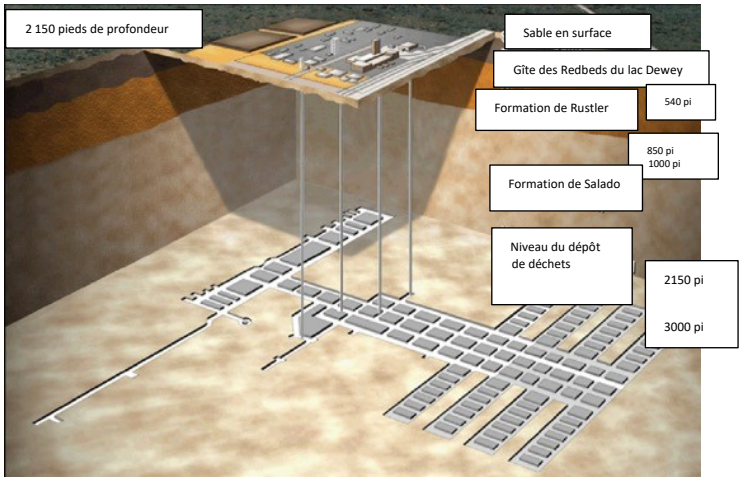

FIGURE 16 : Schéma de la Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) [SANDIA 2016].

Les TRU de faible activité (« CH ») sont empilés dans les salles de stockage. Les déchets de plus haute activité (« RH ») sont placés dans des forages horizontaux percés dans les parois des salles de stockage avant la mise en place des déchets à manipulation par contact direct.

Comme la formation de sel s'affaisse naturellement (fluage), les salles de stockage sont excavées « juste à temps ». Elles ne restent ouvertes que quelques années. Des sacs d'oxyde de magnésium (MgO) sont placés au-dessus des piles de conteneurs de déchets pour absorber tout dioxyde de carbone potentiel issu de la dégradation des matériaux cellulosiques, plastiques et en caoutchouc contenus dans les déchets. Une fois que les salles sont remplies de déchets, elles sont fermées. Elles ne sont pas remblayées. Avec le temps, le sel comblera les espaces vides et enveloppera les déchets.

L'installation de la WIPP a été fermée pendant plusieurs années, de février 2014 au début de 2017, à la suite d'un incendie souterrain survenu dans un camion de transport de sel, suivi quelques jours plus tard d'un incident de contamination dans une salle de stockage résultant de l'éclatement d'un colis de déchets qui avait subi une réaction chimique exothermique. Après de vastes travaux de décontamination, l'installation a repris ses activités au début 2017. Plusieurs rangées de stockage ont été fermées en raison de problèmes de contamination ou de stabilité et un nouveau système de ventilation est en cours de conception et de construction. Par manque d'entretien de la roche pendant la période d'arrêt, le plafond de plusieurs enceintes de stockage s'est effondré. Ces rangées ne sont plus utilisées et sont en cours de fermeture.

Un nouveau dépôt souterrain pour DFMA à vie courte a été ouvert en décembre 2012 dans le centre-sud de la Hongrie, sur le site de Bátaapáti. Ce dépôt est composé de salles de stockage horizontales à accès

par rampe, qui ont été excavées dans une roche hôte granitique à une profondeur approximative de 250 m sous la surface. Deux tunnels d'accès sont utilisés pour assurer une ventilation à flux continu dans le tunnel principal. Deux salles de stockage ont été construites par forage et dynamitage contrôlé, et d'autres salles de stockage seront ajoutées selon les besoins futurs. Les salles de stockage sont d'une dimension nominale de 10,6 m de large x 8,7 m de haut x 100 m de long. Au total, 17 salles de stockage sont envisagées, ce qui permettra d'accueillir jusqu'à 125 000 fûts (volume de 25 000 m^3 de déchets avant emballage). La fermeture de l'installation est prévue vers 2084.

Les déchets, contenus pour la plupart dans des fûts en acier de 200 L, sont ensuite placés dans des conteneurs en béton de 2,25 m x 2,25 m x 1,55 m de haut. Comme le montre la figure 17, ces conteneurs sont empilés dans les salles de stockage, généralement à 4 conteneurs de largeur et 4 de hauteur. Un étage de 2 à 3 conteneurs de large vient coiffer le tout pour épouser le profil arqué des salles de stockage, pour un total de 817 conteneurs de stockage (7353 fûts de 200 L, soit 1470 m^3 de déchets). Les salles de stockage seront remblayées avec du mortier. Les tunnels d'accès seront fermés avec une série de bouchons en béton placés à intervalles réguliers sur toute leur longueur et un matériau de remblayage granulaire sera inséré entre chaque bouchon. L'inventaire de déchets déclaré du dépôt était d'approximativement 900 m^3 à la fin de 2016.

FIGURE 17 : Enceinte de stockage du dépôt de Bátaapáti, Hongrie [NOS 2014].

Un dépôt à cavernes rocheuses profondes en silos pour DFMA a été construit dans une formation de roche plutonique granodiorite de la région de Wolsung en Corée du Sud, à une profondeur de 150 à 200 m sous la surface du sol. L'installation est exploitée depuis 2014. La première phase du dépôt, représentée schématiquement sur la figure 18, est composée de six silos, chacun ayant une capacité de 16 000 fûts, pour un volume total d'approximativement 20 000 m^3. L'installation est conçue pour les DFMA. Le système de classification coréen ne fait pas de distinction entre les radionucléides émetteurs bêta gamma à vie courte et à vie longue. Cependant, il existe une restriction sur la production de chaleur, qui ne peut être de plus de 2 kW/m^3. Tous les déchets (principalement dans des fûts de 200 L) sont placés dans des conteneurs de stockage en béton avant d'être empilés dans les silos. Les silos sont remblayés avec du coulis au fur et à mesure de la mise en place de chaque étage de colis. En décembre 2016, l'installation contenait approximativement 1400 m^3 de déchets.

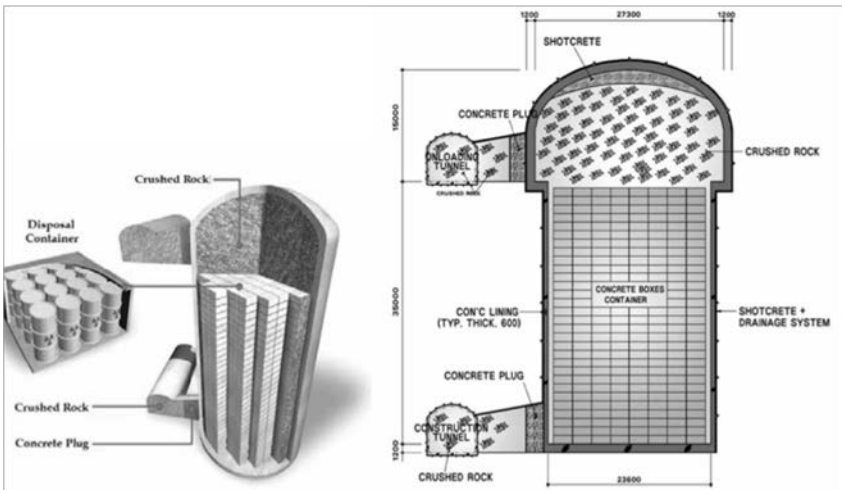

FIGURE 18 : Schéma de la phase 1 du centre de stockage de DFMA de Wolsung [PARK 2009].

Crushed Rock	Roche concassée
Disposal Container	Conteneur de stockage
Crushed Rock	Roche concassée
Concrete Plug	Bouchon en béton
SHOTCRETE	Béton projeté
CONCRETE PLUG	BOUCHON EN BÉTON
UNLOADING TUNNEL	TUNNEL DE DÉCHARGEMENT
CRUSHED ROCK	ROCHE CONCASSÉE
CRUSHED ROCK	ROCHE CONCASSÉE
CONCRETE BOXES CONTAINER	CAISSONS DE BÉTON
CON'C LINING (TYP. THICK. 600)	REVÊTEMENT DE BÉTON (ÉPAISSEUR TYP. 600)
SHOTCRETE + DRAINAGE SYSTEM	BÉTON PROJETÉ + SYSTÈME DE DRAINAGE
CONCRETE PLUG	BOUCHON EN BÉTON
CONSTRUCTION TUNNEL	TUNNEL DE CONSTRUCTION
CRUSHED ROCK	ROCHE CONCASSÉE

Il existe plusieurs exemples d'installations de stockage du type mine reconvertie à cavernes rocheuses profondes. Par exemple, le dépôt de Morsleben (ERAM) a été construit dans une ancienne mine de sel en Allemagne. Il a été exploité de 1971 à 1998 et contient actuellement approximativement 37 000 m^3 de déchets, principalement dans des fûts en acier de 200 L à 570 L et des conteneurs cylindriques de béton empilés dans de grandes enceintes, comme le montre la figure 19. Le plan de référence actuel pour le dépôt de Morsleben prévoit le remblayage de l'installation avec un béton dit « de sel » spécialement formulé pour la stabiliser. Une partie des espaces vides ne sera pas remblayée afin de laisser de l'espace pour les gaz qui seront générés par la décomposition des déchets.

FIGURE 19 : Disposition des déchets au dépôt de Morsleben (ERAM) [KERND 2020].

L'un des problèmes liés à l'utilisation d'anciens sites miniers comme dépôts est que les tunnels ne sont souvent pas très bien cartographiés. En outre, certaines parties d'une mine peuvent être en mauvais état physique, ce qui peut entraîner des défaillances structurelles dans la zone de dépôt. L'ancienne mine de sel ASSE II, en Allemagne, en est un bon exemple. Asse II a été exploitée comme dépôt de 1967 à 1978 et contient approximativement 47 000 m^3 de DFMA. Les déchets sont répartis dans onze salles de stockage situées à 750 m sous la surface, dans une salle à 725 m sous la surface et dans une salle à 511 m de profondeur. La plupart des DFA sont empilés de manière ordonnée dans des fûts disposés horizontalement en plusieurs couches. Certains des déchets de haute activité ont été placés en piles « désorganisées » à l'aide d'un équipement télécommandé. Cela a été fait intentionnellement pour permettre un placement rapide et limiter l'exposition des travailleurs aux rayonnements.

En raison de l'instabilité structurelle causée par des fuites d'eau dans certaines des zones périphériques de la mine (qui ne contiennent pas de déchets), le plan de référence actuel pour Asse II est de récupérer tous les déchets et à les remballer pour les stocker dans une autre installation. L'eau s'infiltre actuellement à un débit d'approximativement 11 m^3/jour. Elle est hautement saline, mais n'est pas contaminée par la radioactivité. Après un contrôle pour confirmer l'absence de radioactivité, elle est rejetée dans une autre mine locale pour être éliminée *in situ*.

3.5 Forages

Des forages sont utilisés pour le stockage des déchets radioactifs dans quelques pays. Dans sa forme la plus simple, un forage est un puits vertical percé à un diamètre et une profondeur appropriés, rempli de déchets, puis remblayé avec un coulis de ciment ou un autre matériau. Le principal avantage des forages est qu'ils sont faciles à réaliser et à exploiter, en particulier les puits peu profonds près de la surface. Le principal inconvénient des forages profonds est qu'ils sont limités à des diamètres relativement petits (quelques dizaines de centimètres de diamètre), en raison des limites des technologies actuelles de forage en profondeur. La nécessité, dans certains cas, de revêtir les puits forés (par exemple, avec un tubage en acier) entraîne une réduction supplémentaire du diamètre utilisable. Les forages peu profonds (moins de 30 m de profondeur) peuvent être construits à un diamètre allant jusqu'à plusieurs mètres avec les technologies actuelles de forage.

Les forages peu profonds près de la surface sont généralement utilisés pour le stockage des sources scellées usées, tandis que les forages plus profonds n'ont été utilisés jusqu'à présent que pour l'élimination des déchets liquides (en Russie [AIEA 2020a] et aux États-Unis [STOW 1986]). Des forages peu profonds ont également été utilisés aux États-Unis pour le stockage d'une petite quantité de déchets TRU (~200 m^3) dans une installation du DOE au Nevada [USDOE 2017]. Ces forages, appelés « Greater Confinement Disposal Boreholes (forages de stockage à confinement supérieur) », sont généralement d'un diamètre d'approximativement 3 m et d'une profondeur d'approximativement 36 m, les 15 m inférieurs contenant les déchets et les 21 m supérieurs étant remplis d'alluvions tamisées, un matériau semblable à la composition du milieu géologique environnant.

Le stockage des déchets radioactifs liquides dans des forages profonds consiste à injecter des déchets liquides sous pression dans des couches rocheuses poreuses situées en profondeur, sous forme liquide ou mélangés à un coulis de ciment. Les couches poreuses sont généralement entourées de couches de faible perméabilité. Quelques sites en Russie ont utilisé ou utilisent actuellement la méthode de l'injection, comme ceux de Seversk et de Zheleznogorsk [AIEA 2020a]. Ces types de forages sont généralement d'une profondeur de 150 à 500 m, quelques-uns pouvant être encore plus profonds (plusieurs kilomètres). Le stockage est permanent et il n'est pas prévu de traiter les déchets ou de les retirer à l'avenir. L'inconvénient général de cette méthode est que les couches perméables accueillant le liquide injecté peuvent ne pas être entièrement cartographiées ou ne pas être entourées de zones de faible perméabilité. Par conséquent, il est possible que le liquide radioactif migre du site d'injection vers des aquifères utilisés pour l'approvisionnement en eau agricole, résidentielle ou industrielle [USDOE 2011].

L'injection en puits profond a également été utilisée au Oak Ridge National Laboratory pour stocker les déchets liquides de faible activité. Le procédé consiste à mélanger des déchets liquides avec du ciment et d'autres additifs. Le mélange est ensuite injecté sous pression à travers un puits tubé foré dans un schiste peu perméable à une profondeur de 300 m. Le mélange de coulis se répand à partir du puits d'injection le long des fractures du plan de litage et se solidifie sur place. Chaque campagne d'injection de deux jours a permis de stocker approximativement 750 m^3 de coulis. La cavité dans laquelle les déchets ont été injectés est créée en fracturant hydrauliquement la formation hôte le long des plans de litage sous l'effet de la pression du coulis [STOW 1986].

Dans le monde, il existe très peu d'exemples d'utilisation à grande échelle de forages pour le stockage de déchets radioactifs solides, en particulier de forages profonds. Cependant, l'AIEA encourage l'utilisation de forages près de la surface et de profondeur moyenne, comme l'illustre la figure 20 [NOS 2014], pour le stockage des sources scellées usées dans les pays qui n'ont pas accès à d'autres méthodes de stockage appropriées [AIEA 2011].

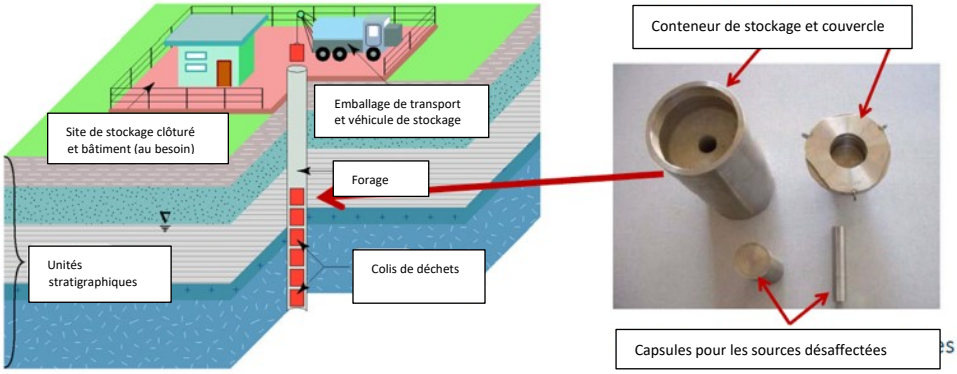

FIGURE 20 : Concept de stockage par forage BOSS de l'AIEA [NOS 2014]b

Des forages plus profonds ont été proposés et étudiés pour le stockage des DHA et des DMA solides aux États-Unis, mais ils n'ont pas encore été utilisés à cette fin.

La figure 21 montre un modèle de forage type qui a été envisagé pour le stockage des DMA (appelés GTCC, pour Greater than Class C, dans le système de classification américain) aux États-Unis. Un réseau de 930 forages de 2,4 m de diamètre et de 40 m de profondeur couvrant une superficie de 44 ha serait nécessaire pour éliminer approximativement 12 000 m^3 de déchets GTCC (approximativement 13 m^3 par forage). Les matériaux propres issus de la construction des puits seraient utilisés pour les remblayer au-dessus de la couche de béton. Chaque puits pourrait être surmonté d'un système de couverture composé d'une membrane géotextile recouverte de couches de gravier, de sable et de terre végétale [USDOE 2016]. La méthode de stockage par forage fut l'une des nombreuses options étudiées pour cette catégorie de déchets.

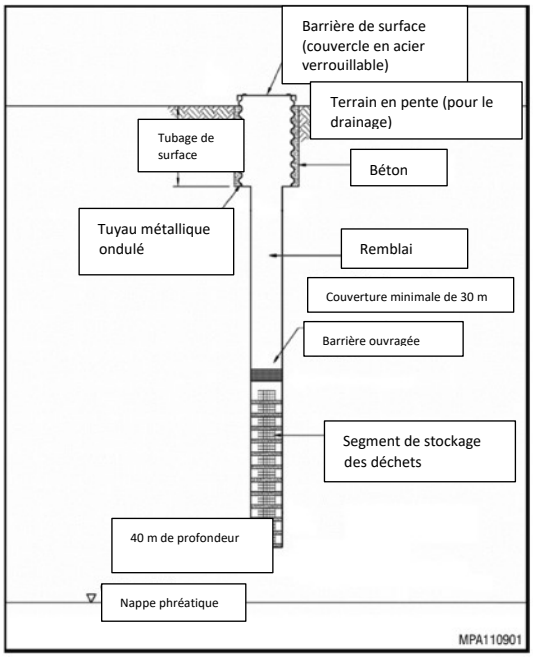

*FIGURE 21 : Concept américain de stockage de DMA en forage [USDOE 2016]*Résumé des concepts de stockage

Les principales caractéristiques des différents concepts de stockage discutés ci-dessus sont résumées dans le tableau 1. De plus amples détails sur certains des exemples sont fournis à l'annexe F.

TABLEAU 1 : Résumé des concepts de stockage

Concept	**Types de déchets**	**Exemples dans le monde**	**Caractéristiques principales**
Tranchée (près de la surface)	DTFA, DFA	CIRES, France (DTFA) El Cabril, Espagne (DTFA) Japon (divers sites, DTFA) Ezeiza, Argentine (DFA) Valpuuts, Afrique du Sud (DFA) Drigg, Royaume-Uni (DFA) États-Unis (divers sites, DFA)	- Facile à construire et à exploiter, peu coûteuse, extensible, modulaire - Peut être revêtue ou non - Possibilité de stocker des colis de déchets d'une large gamme de tailles et de masses, même des déchets non emballés - Les colis de déchets peuvent se dégrader rapidement, en fonction du milieu - Susceptible de s'affaisser à long terme - Ne convient généralement pas aux DMA
Monticule en surface	DTFA, DFA	Suède (la plupart des sites nucléaires, DTFA) CSM, France (DFA) Fernald, Ohio, USA	- Facile à construire et à exploiter, peu coûteux - Possibilité de stocker des déchets d'une large gamme de tailles et de masses, y compris des déchets non emballés - Généralement adapté aux grands volumes de déchets - Les colis de déchets peuvent se dégrader rapidement, selon le milieu - Maintient généralement les déchets au-dessus du niveau de la nappe phréatique - Susceptible de s'affaisser à long terme - Ne convient généralement pas aux DMA
Enceinte en béton en surface	DFA	CSA, France El Cabril, Espagne Drigg, Royaume-Uni	- Facile à construire et à exploiter, modulaire et extensible - Possibilité de stocker des déchets d'une large gamme de tailles et de masses - Maintient généralement les déchets au-dessus du niveau de la mer - Vaste expérience internationale - Ne convient généralement pas aux DMA

Concept	Types de déchets	Exemples dans le monde	Caractéristiques principales
Enceinte de béton peu profonde, près de la surface	DFA	NRWR, Mochovce, Slovaquie Dukovany, République tchèque	- Facile à construire et à exploiter, modulaire et extensible - Possibilité de stocker des déchets d'une large gamme de tailles et de masses - Vaste expérience internationale - Peut être conçue pour des quantités limitées de DMA
Enceinte de béton près de la surface, plus profonde	DFA, DMA	Rokkasho-mura, Japon Dounreay, Écosse	- Facile à utiliser, modulaire et extensible - Possibilité de stocker des déchets d'une large gamme de tailles et de masses - Plus résistante aux intrusions que les enceintes de surface ou peu profondes - Peut être conçue pour certains DMA
Caverne rocheuse peu profonde	DFA	SFR, Suède VLJ, Finlande Loviisa, Finlande Himdalen, Norvège	- Nécessite un investissement initial important pour établir l'infrastructure de surface (par exemple : rampes d'accès, treuils, puits, ventilation, etc.) - Peut être construite dans un large éventail de milieux géologiques - La construction et l'exploitation peuvent être compliquées par la nécessité de tenir compte de la réglementation minière - La taille et la masse des colis de déchets sont limitées par les capacités d'accès (par exemple la dimension du tunnel d'accès, la capacité du treuil, etc.) - Plus résistante aux intrusions que les enceintes de surface ou peu profondes - Expérience internationale - Peut être conçue pour certains DMA

Concept	Types de déchets	Exemples dans le monde	Caractéristiques principales
Caverne rocheuse profonde	DFA, DMA	*Nouvelle construction :* WIPP, États-Unis Püspökszilágy, Hungrie Wolsung, Corée du Sud *Mine reconvertie :* Asse II, Allemagne Morsleben (ERAM), Allemagne Konrad, Allemagne (en construction) Richard, République tchèque Baita Bihor, Roumanie	- Peut être construite dans un large éventail de milieux géologiques - La construction et l'exploitation peuvent être compliquées par la nécessité de tenir compte de la réglementation minière - La taille et la masse des colis de déchets sont limitées par les capacités d'accès (par exemple, la dimension du tunnel, la capacité du treuil, etc.) - Plus résistante aux intrusions que les enceintes de surface ou peu profondes - Expérience internationale - Peut être conçue pour les DMA - Les mines reconverties peuvent présenter des problèmes cachés de stabilité
Forage peu profond près de la surface	Sources scellées, faibles volumes de DFA	Concept BOSS de l'AIEA Installation du DOE, Nevada États-Unis	- Facile à construire et à exploiter, modulaire et extensible. - La taille des colis de déchets est limitée par le diamètre du puits de forage - Plus résistant aux intrusions que les enceintes de surface ou peu profondes - Expérience internationale limitée - Peut être conçu pour certains DFA
Forage profond	DFA et DMA liquides	Seversk et Zheleznogorsk, Russie Oak Ridge, États-Unis	- Modulaire et extensible - La taille des colis de déchets est fortement limitée par le faible diamètre utilisable du puits - La géosphère est difficile à caractériser en profondeur en raison de l'accessibilité limitée - Plus résistant aux intrusions que les forages peu profonds - Expérience d'exploitation internationale pour les déchets liquides, aucune expérience pour les déchets solides - Peut être conçu pour les DMA et les DHA

4 Modèles de mise en œuvre

Il existe plusieurs façons de planifier et de mettre en œuvre la gestion à long terme des déchets radioactifs dans un pays. Il n'existe pas de modèle universel qui puisse être appliqué à tous les pays [AIEA 2018]. Le choix d'un modèle de mise en œuvre particulier est influencé par le régime réglementaire, les politiques gouvernementales, l'infrastructure disponible, les pratiques historiques et les préférences sociétales du pays en question.

Comme le résume l'annexe C, plusieurs pays ont opté pour une approche centralisée ou de « dépôt national » pour le stockage des DFA et des DMA. Il s'agit de certains des principaux pays producteurs d'énergie nucléaire, comme la France, le Japon, l'Allemagne, l'Espagne, la Suisse et le Royaume-Uni, ainsi que de pays ayant des programmes nucléaires de moindre envergure, comme l'Argentine, la Belgique, la République tchèque, la Hongrie et la Roumanie. Au sein de ce groupe, certains pays (par exemple, la France, le Japon, l'Espagne et le Royaume-Uni) ont opté pour des installations de stockage distinctes pour différentes catégories de déchets, tandis que d'autres (par exemple, l'Allemagne et la Suisse) ont opté pour le stockage de plusieurs catégories de déchets dans la même installation (généralement une installation en couche géologique profonde). Le stockage mixte présente l'avantage de réduire le nombre d'installations de stockage et la nécessité de séparer artificiellement les déchets en catégories de DFA et de DMA. De nombreux autres pays (principalement ceux qui exploitent actuellement des installations de stockage à faible profondeur pour DFA) prévoient stocker les DMA à vie longue dans un futur dépôt pour DHA et/ou de combustible usé [AIEA 2018].

D'autres pays (par exemple, les États-Unis, la Russie, la Chine et la Finlande) ont adopté une approche régionale en vertu de laquelle il peut y avoir plusieurs installations situées dans différentes régions du pays pour une ou plusieurs catégories de déchets, ou une approche mixte où des dépôts régionaux sont prévus ou existent pour certaines catégories de déchets et un dépôt national pour d'autres (par exemple, la Suède, qui dispose d'un dépôt pour les DTFA sur la plupart de ses sites nucléaires et du dépôt centralisé SFR pour les DFMA).

Les différentes options décrites ci-dessus peuvent être choisies pour un certain nombre de raisons, telles que la taille de l'inventaire des déchets, les préférences sociétales quant au nombre d'installations de stockage, à emplacement et à leur type, les questions de transport, la sécurité physique, les politiques nationales, le nombre limité d'options d'emplacement et la disponibilité de sites techniquement adaptés, les coûts ainsi que les questions sociétales générales telles que l'emploi régional, la disponibilité des infrastructures, etc.

Dans plusieurs pays, une agence nationale a été créée dans le but précis d'organiser le stockage des déchets radioactifs. Les responsabilités de l'agence varient d'un pays à l'autre et peuvent inclure le stockage de différentes catégories de déchets, la gestion en amont du stockage et/ou le déclassement des réacteurs et autres installations nucléaires. L'annexe D présente un résumé des pratiques en vigueur dans un certain nombre de pays.

Plusieurs agences de gestion des déchets sont détenues ou contrôlées par le gouvernement, comme l'ONDRAF/NIRAS en Belgique, l'ANDRA en France, BGE en Allemagne, PURAM en Hongrie, ENRESA en Espagne et la NDA au Royaume-Uni. D'autres, comme SKB en Suède et la NAGRA en Suisse, sont principalement détenues par les propriétaires des déchets (en majorité les sociétés d'énergie nucléaire). Un autre modèle utilisé dans quelques pays consiste à ce que chaque propriétaire de déchets mette en œuvre son propre système de stockage des DFMA, par exemple les sociétés d'énergie nucléaire en Finlande. Dans certains pays, comme le Japon et les États-Unis, le stockage des DFA est assuré sur une base commerciale, tandis que les déchets de haute activité relèvent de la responsabilité d'une agence gouvernementale (par exemple, la NUMO au Japon et le DOE aux États-Unis).

5 Résumé de l'expérience internationale

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, une grande variété de concepts de stockage et de modèles de mise en œuvre sont actuellement utilisés dans le monde pour les DFA et les DMA. Certains faits marquants sont résumés ci-dessous.

- En **Finlande**, chaque exploitant de centrale nucléaire est responsable du stockage de ses propres déchets et il y a une installation de stockage des DFMA sur chacun des deux sites de centrales nucléaires. Les deux installations peuvent être classées dans la catégorie des dépôts à cavernes rocheuses peu profondes, bien que la conception de chacune soit quelque peu différente. Une organisation de gestion des déchets (POSIVA), détenue conjointement par les sociétés d'électricité, construit actuellement un DGP distinct pour les déchets de combustible usé de la Finlande. Il s'agit du premier dépôt de ce type en construction dans le monde.
- En **France**, l'organisme public national de gestion des déchets (ANDRA) dispose d'installations du type enceinte en surface, monticule et tranchée pour les DTRA et les DFMA à vie courte et prévoit construire un DGP pour les DFMA à vie longue et les DHA issus du retraitement du combustible, ainsi que d'autres installations de stockage pour d'autres types de déchets.
- L'**Allemagne** abandonne progressivement son programme d'énergie nucléaire et procédera au déclassement de ses installations au cours des prochaines décennies. Elle classe ses déchets radioactifs en deux grandes catégories : les « déchets calorigènes » (qui produisent de la chaleur) et les « déchets à production négligeable de chaleur ». La catégorie des « déchets à production négligeable de chaleur » comprend les DFA et les DMA. L'organisme national de gestion des déchets (BGE), qui est propriété de l'État, est en train de transformer une ancienne mine de fer à Konrad en un DGP pour tous ses déchets à production négligeable de chaleur. Sa capacité totale prévue est de 303 000 m^3. Son exploitation devrait débuter au milieu des années 2020.
- Le **Japon** a adopté un modèle commercial pour les DFA et prévoit des installations distinctes pour chaque type de déchets, y compris des dépôts géologiques pour les DHA et les déchets à vie longue. Il dispose d'installations à enceintes profondes en

béton pour certains types de DFA, ainsi que des installations de stockage en tranchée pour les DTFA. D'autres installations sont en cours de développement pour le stockage des grandes quantités de déchets liées à l'accident et au nettoyage de la centrale de Fukushima.

- La **Suède** dispose d'un dépôt centralisé du type caverne rocheuse peu profonde pour ses DFMA. Il est exploité par SKB, une société de gestion des déchets appartenant aux sociétés d'énergie nucléaire. En 2011, SKB a présenté une demande d'autorisation pour la construction d'un DGP distinct pour son combustible nucléaire usé.
- La NAGRA, l'organisme national de gestion des déchets appartenant aux sociétés d'électricité en **Suisse**, envisage de construire deux dépôts géologiques, l'un pour les DFMA et l'autre pour le combustible nucléaire usé (toutefois, la législation n'interdit pas de construire les deux dépôts sur un seul site).
- Le **Royaume-Uni** dispose d'installations à enceintes en surface et à tranchées pour les déchets à vie courte et prévoit construire un dépôt géologique en profondeur (DGP) pour les DMA à vie longue et les DHA issus du retraitement du combustible.
- Les **États-Unis** disposent de plusieurs installations de stockage en surface pour les DFA, lesquelles sont exploitées sur une base commerciale. Le gouvernement possède également un DGP pour les déchets TRU à vie longue (WIPP).

Applicabilité au contexte canadien

Au Canada, en vertu de la Politique-cadre en matière de déchets radioactifs, chaque propriétaire de déchets est responsable de la gestion de l'ensemble du cycle de vie de ses déchets, ce qui comprend leur élimination (stockage). Contrairement à de nombreux autres pays, il n'y a pas d'agence nationale qui gère le stockage des DFA et des DMA. (En vertu de la *Loi sur les déchets de combustible nucléaire*, la Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN) est chargée d'élaborer et de mettre en œuvre une solution pour tout le combustible nucléaire usé au Canada).

Toutes les installations de gestion des déchets radioactifs au Canada sont réglementées par la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN). La CCSN élabore actuellement un ensemble de guides d'application de la réglementation pour les différents types de déchets radioactifs et d'installations de gestion des déchets afin de clarifier les plans et les décisions en matière de gestion des déchets [CCSN 2018, CCSN 2021].

Comme le montrent les annexes A et B, le Canada dispose d'un large éventail de déchets radioactifs qui sont entreposés à divers endroits au pays. En réalité, n'importe lequel des concepts techniques de stockage décrits à la section 3 du présent document

pourrait être appliqué aux DFA au Canada, sous réserve d'une évaluation complète de la sûreté et de l'obtention d'un permis auprès de la CCSN. Pour les DMA, le consensus international est que le stockage en profondeur soit nécessaire [AIEA 2018, AIEA 2020b]. En pratique, cela limiterait les options de stockage aux concepts de la caverne rocheuse profonde et du forage en profondeur.

La plupart des modèles de mise en œuvre abordés à la section 4 pourraient également être appliqués au Canada en vertu de la politique actuelle. La seule exception serait la mise en œuvre d'un modèle d'agence nationale gouvernementale de gestion des déchets, qui nécessiterait une modification de la politique actuelle, en vertu de laquelle la responsabilité de la gestion des déchets radioactifs incombe aux propriétaires des déchets. Il faudrait aussi probablement une loi d'habilitation particulière pour créer l'agence fédérale.

Il existe déjà des exemples de coopération étroite entre les propriétaires de déchets pour la gestion des DFA et des DMA. Par exemple, OPG fournit des services de gestion des déchets à Bruce Power sur la base d'une rémunération à l'acte, et CNL fournit des services similaires à certains propriétaires de déchets qui ne sont pas des sociétés d'électricité. De nombreux propriétaires de déchets font également appel à des services commerciaux pour certaines activités de gestion des déchets, comme le traitement spécialisé (par exemple, l'incinération, le supercompactage et la fusion des métaux dans des installations aux États-Unis). Dans les cas où les déchets sont envoyés dans un pays étranger pour y être traités (par exemple, aux États-Unis), les déchets traités résultants sont renvoyés au Canada pour y être gérés à long terme par le propriétaire initial.

La mise en œuvre d'un système de gestion intégrée des déchets au Canada soulève un certain nombre de questions, dont les suivantes :

- Certains déchets devront peut-être être caractérisés et classés de nouveau dans le cadre d'un système de classification unifié. Cela pourrait être coûteux pour certains propriétaires de déchets.
- Certains déchets pourraient devoir être remballés afin de respecter les CAD pour le stockage, en particulier pour une installation près de la surface.
- Si le stockage mixte est envisagé, le dépôt devra être conçu pour que la catégorie la plus radioactive de déchets puisse y être placée. Cela pourrait augmenter les coûts pour les catégories de déchets moins radioactives. Cependant, une installation mixte pourrait permettre d'économiser des coûts d'infrastructure.
- Le transport des déchets vers une installation centrale ou une installation éloignée d'un site nucléaire actuel pourrait être un facteur limitant le rythme auquel les déchets peuvent être stockés et pourrait également être un facteur influençant les exigences en matière d'emballage des déchets (la réglementation sur le transport des matières radioactives pourrait imposer des contraintes supplémentaires relatives à la taille des colis de déchets, au blindage requis, etc.) Cela est

particulièrement vrai au Canada, où les distances entre les sites où les déchets sont actuellement entreposés sont plutôt grandes (par exemple, la distance de route entre Point Lepreau, au Nouveau-Brunswick, et Whiteshell, au Manitoba, est d'approximativement 3 000 km).

Toutefois, aucun de ces problèmes n'est insurmontable.

Références

AIKAS 2008. « Repositories for low- and intermediate-level radioactive wastes in Finland », Timo Äikäs in *Reviews in Engineering Geology Volume XIX: Deep Geologic Repositories,* volume 19. DOI 10.1130/2008.4119(07). URL : https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/893/chapter/4625184/Repositories-for-low-andintermediate-level

ANDRA 2014. « The surface disposal concept for VLL waste », Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), *Brochure 434VA* - DCOM/14-0172. URL : https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/VLLW_leaflet.pdf

ANDRA 2018. « Inventaire national des matières et déchets radioactifs – Rapport de synthèse », rapport de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA). URL : https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/Andra-Synthese2018_EN_relu_HD.pdf

CCSN 2017. « Rapport national du Canada pour la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible irradié et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs (sixième rapport) », Commission canadienne de sûreté nucléaire, rapport CC172-23F-PDF. URL : http://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads_fre/joint-convention-sixth-national-report-oct-2017-fra.pdf

CCSN 2018. « Surveillance du cadre canadien pour la gestion des déchets radioactifs », Commission canadienne de sûreté nucléaire, fiche de renseignements, avril 2018. URL : https://www.nuclearsafety.gc.ca/fra/resources/fact-sheets/oversight-canada-framework-radioactive-waste-management.cfm

CCSN 2021. « Gestion des déchets, tome I : Gestion des déchets radioactifs », Commission canadienne de sûreté nucléaire, document REGDOC-2.11.1, tome I, janvier 2021. URL : https://www.nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads_fre/REGDOC-2-11-1-tome-I-gestion-des-dechets-radioactifs.pdf

CSA 2019. « Principes généraux pour la gestion des déchets radioactifs et du combustible irradié », norme N292.0 du Groupe CSA (Canadian Standards Association). URL : https://www.csagroup.org/fr/store/product/CSA%20N292.0:19/

FINLANDE 2017. « Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management: 6th Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention ». STUK, rapport STUK-B 218, octobre 2017. URL : https://www.AIEA.org/sites/default/files/national_report_of_finland_for_the_6th_review_meetin g_-_english.pdf

Golder 2004. « Final Report on Independent Assessment of Long-Term Management Options for Low and Intermediate Level Wastes at OPG's Western Waste Management Facility », rapport de Golder Associates. URL : https://www.opg.com/document/independent-assessment-study/

AIEA 2002. « Management of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes with Regard to their Chemical Toxicity ». Agence internationale de l'énergie atomique, rapport TECDOC-1325, décembre 2002. URL : http://www-pub.AIEA.org/MTCD/Publications/PDF/te_1325_web.pdf

AIEA 2007. « Retrieval and Conditioning of Solid Radioactive Waste from Old Facilities ». Agence internationale de l'énergie atomique, rapport technique TRS-456. URL : https://www.AIEA.org/publications/7572/retrieval-and-conditioning-of-solid-radioactive-wastefrom-old-facilities

AIEA 2009. « Classification of Radioactive Waste General Safety Guide GSG-1 ». Agence internationale de l'énergie atomique, Guide de sûreté STI/PUB/1419, novembre 2009. URL : http://wwwpub.AIEA.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419_web.pdf

AEA 2011. « BOSS: Borehole Disposal of Disused Sealed Sources: A Technical Manual », Agence internationale de l'énergie atomique, rapport TECDOC TE-1644. URL : https://wwwpub.AIEA.org/MTCD/Publications/PDF/te_1644_web.pdf

AIEA 2017. « Selection of Technical Solutions for the Management of Radioactive Waste », Agence internationale de l'énergie atomique, rapport TECDOC TE-1817. URL : http://wwwpub.AIEA.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1817_web.pdf

AIEA 2018. « Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management », Agence internationale de l'énergie atomique, rapport sur l'énergie nucléaire NW-T-1.14. URL : https://www.AIEA.org/publications/11173/status-and-trends-in-spent-fuel-and-radioactive-wastemanagement

AIEA 2020a. « International Peer Review of the Deep Well Injection Practice for Liquid Radioactive Waste in the Russian Federation », rapport AIEA-WAS-RUS. URL :https://www-pub.AIEA.org/MTCD/publications/PDF/AIEA-WAS-RUSweb.pdf

AIEA 2020b. « Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories", Agence internationale de l'énergie atomique », Rapport sur l'énergie nucléaire NW-T-1.27. URL : https://www.AIEA.org/publications/13510/design-principles-and-approaches-for-radioactivewaste-repositories

ICCHGE 2008. « Design, Construction, and Performance of Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility », article présenté lors de l'International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering par R. Bonaparte et coll. URL : https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2972&context=icchge

JAVYS 2019. « National Radioactive Waste Repository ». URL : https://www.javys.sk/en/nuclearfacilities/national-radioactive-waste-repository/ru-rao

BDP 2020. « L'énergie nucléaire et la gestion des déchets radioactifs au Canada », Bibliothèque du Parlement, Étude générale 2019-41-E. URL : https://lop.parl.ca/staticfiles/PublicWebsite/Home/ResearchPublications/BackgroundPapers/PDF/2019-41-f.pdf

KERND 2020. « ERAM Morsleben ». Photothèque de Kerntechnik Deutschland e. V. (Technologie nucléaire allemande). URL : https://www.kernd.de/kernd-wAssets/img/themen/jb06-morsleben.jpg

AEN 2010. « Radioactive Waste in Perspective », Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE, rapport 6350. URL : https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14364

AEN 2016. « National Inventories and Management Strategies for Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste: Methodology for Common Presentation of Data », Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE, rapport 7323. URL : https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_15022

NOS 2014. « Disposal Solutions Implemented for Low Level Waste », présentation donnée par Bálint Nős dans le cadre de la conférence *Radioactive Waste: Meeting the Challenge* de l'AIEA, sept. 2014. URL : https://www-pub.AIEA.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2014/cn219/Presentations/15BalintNos.pdf

RNCan 2018. « Inventaire des déchets radioactifs au Canada – 2016 », Ressources naturelles Canada, rapport M134-48/2016E -PDF. URL : https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/uranium-nuclear/17-0467%20Canada%20Radioactive%20Waste%20Report_access_f.pdf

NUMMI 2019. « Safety case for Loviisa LILW repository 2018 », présentation donnée par Olli Nummi dans le cadre du Symposium 2019 sur les sciences et la technologie nucléaires de la Société nucléaire finnoise (SYP2019), Helsinki, octobre 2019. URL :https://www.ats-fns.fi/images/files/2019/syp2019/presentations/TSW2_ONummi_TheSafetyCaseForLoviisaLilwRe pository2018.pdf

OPG 2010. « Reference Low and Intermediate Level Waste Inventory for the Deep Geologic Repository », Ontario Power Generation, rapport 00216-REP-03902-00003-R003. URL :

https://archive.opg.com/pdf_archive/Deep%20Geologic%20Repository%20Documents/DGR%20Submission%20Documents/D169_21.Reference-L-ILW-Inventory.pdf

PARK 2009. « Wolsong Low- and Intermediate-level Radioactive Waste Disposal Center: Progress and Challenges », *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 41, p. 1-16, 10.5516/NET.2009.41.4.477. URL : https://www.researchgate.net/publication/262913627_Wolsong_Low-_and_Intermediate-level_Radioactive_Waste_Disposal_Center_Progress_and_Challenges

PHAI 2018. « Long-Term Waste Management Facility - Port Hope », Port Hope Area Initiative. URL : https://www.phai.ca/en/home/port-hope-project/new-long-term-waste-managementfacility.aspx

SANDIA 2016. « Anthropogenic influences on groundwater in the vicinity of the Waste Isolation Pilot Plant, southeastern New Mexico, USA ». Présentation des Sandia National Laboratories, SAND2016-9292C. URL : https://wipp.energy.gov/library/CRA/CRA%202019/T%20-%20W/Thomas%20etal%20%202017%20%20SAND2016-9292C.pdf

SKB 2011. « International perspective on repositories for low level waste ». SKB, rapport technique R-11-16. URL : http://www.skb.com/publication/2343713/R-11-16.pdf

SKB 2018. « Extending the SFR », SKB, fiche de renseignements. URL : https://skb.se/upload/publications/pdf/Fact-sheet_Extending_the_SFR.pdf

SKB 2020. « Concrete caissons for 2BMA ». SKB, rapport technique TR-20-09. URL : https://www.skb.com/publication/2495064/TR-20-09.pdf

STOW 1986. « Subsurface disposal of liquid low-level radioactive wastes at Oak Ridge, Tennessee ». Article présenté dans le cadre du 19e Congrès de l'Association internationale des hydrogéologues, Karlovy Vary, Tchécoslovaquie, 8 sept. 1986. URL : https://www.osti.gov/servlets/purl/5557794.

USDOE 2011. « International Low Level Waste Disposal Practices and Facilities ». Rapport préparé pour la campagne de stockage du combustible du Département de l'énergie des États-Unis, rapport ANL-FCT-324, octobre 2011. URL : https://publications.anl.gov/anlpubs/2011/12/71232.pdf

USDOE 2016. « Final Environmental Impact Statement for the Disposal of Greater-Than-Class C (GTCC) Low-Level Radioactive Waste », Département de l'énergie des États-Unis, rapport DOE-EIS-0375. URL : https://www.energy.gov/nepa/downloads/eis-0375-final-environmental-impactstatement

USDOE 2017. « Sixth National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management », rapport du Département de l'énergie des États-Unis. URL : https://www.AIEA.org/sites/default/files/10-20-176thusnationalreportfinal.pdf

WCS 2020. Photothèque de Waste Control Specialists. URL : http://www.wcstexas.com/news-and-media/photosnew/

Annexes

ANNEXE A : Emplacement des déchets radioactifs au Canada

Source : [RNCan 2018]

ANNEXE B : Résumé des inventaires actuels et prévus de déchets au Canada

Type de déchets	Catégorie/entité responsable	Déc. 2016	Inventaire : 2019	Prévision : 2050	Prévision : 2100
DFA	Exploitation/OPG	83 791	94 136	141 540	147 742
	Exploitation/Énergie NB	2 586	2 336	50	50
	Exploitation/Hydro-Québec	1 497	1 413	619	619
	Exploitation/autres	16 641	2 125	S.O.	S.O.
	R-D/EACL	526 318	529 514	546 899	561 573
	Historiques/EACL et ministère de l'Environnement de l'Ontario	1 717 424	1 717 424	1 717 424	1 717 424
	Déclassement/OPG	0	0	9 903	171 108
	Déclassement/Énergie NB	0	0	1	122
	Déclassement/Hydro-Québec	0	0	0	15 983
	Déclassement/Autres	6 000	1 000	140 000	140 000
	Déclassement/EACL	5 128	13 590	212 165	340 330
	Total de DFA	*2 359 385*	*2 361 538*	*2 626 392*	*2 946 540*
DMA	Exploitation/OPG	12 041	14 489	26 458	27 441
	Exploitation/Énergie NB	158	162	193	S.O.
	Exploitation/Hydro-Québec	347	350	350	350
	Exploitation/autres	13	S.O.	S.O.	S.O.
	R-D/AECL	20 331	20 375	20 472	20 537
	Déclassement/OPG	0	0	250	16 565
	Déclassement/Énergie NB	0	0	0	11
	Déclassement/Hydro-Québec	0	0	0	1 237
	Déclassement/Autres	0	0	0	0
	Déclassement/EACL	265	558	10 700	17 046

Total de DMA	*33 155*	*35 934*	*58 430*	*82 824*

Source : [RNCan 2018]

ANNEXE C : Résumé des pratiques de gestion des déchets radioactifs dans le monde, par pays et par type de déchets

Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**
Argentine*	Stockage prévu en surface, subséquemment combiné avec des DFA.	Le scénario de référence du plan stratégique est un « dépôt monolithique à proximité de la surface » pour les déchets nécessitant un confinement de moins de 300 ans. Ancien dépôt en tranchée à Ezeiza.	Le scénario de référence du plan stratégique est un « dépôt géologique en profondeur » pour les déchets nécessitant un confinement de plus de 300 ans.	Inclus dans la catégorie des DMA à vie longue.	Pas de décision. Pour le CU des centrales nucléaires, les possibilités comprennent le stockage profond (d'ici 2060) et le retraitement. Une décision doit être prise d'ici 2030. Pour le combustible des réacteurs de recherche, la politique est de le retourner dans le pays d'origine si possible, sinon de le stocker avec le combustible des centrales nucléaires.

Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**
Australie	Les déchets en deçà des limites d'exemption peuvent être libérés sans exigences particulières, sinon ils sont inclus dans les DFA.	Tous les déchets appartenant au gouvernement fédéral sont actuellement entreposés. Chaque État est responsable de ses propres déchets. Certains États disposent de dépôts en surface pour les petits volumes. Politique nationale de gestion à long terme en cours de révision.	Tous les déchets sont actuellement entreposés. Politique nationale de gestion à long terme en cours de révision.	Tous les déchets sont actuellement entreposés. Politique nationale de gestion à long terme en cours de révision.	Combustible pour réacteur de recherche uniquement. La politique est de renvoyer le combustible au pays d'origine.

Pays	DTFA	DFA (vie courte)	DMA (vie longue)	DHA	CU
Belgique	(Inclus dans la catégorie des DFA)	Actuellement entreposés dans une installation centrale. Stockage planifié dans une enceinte en surface en béton (à Dessel).	Actuellement entreposés dans une installation centrale. Aucune décision officielle encore pour le stockage définitif. Le scénario de référence est un stockage en profondeur dans une « formation argileuse faiblement indurée » (argile de Boom ou argile yprésienne), en combinaison avec les DHA et le CU.	Actuellement entreposés dans une installation centrale. Aucune décision officielle encore pour le stockage définitif. Le scénario de référence est un stockage en profondeur dans une « formation argileuse faiblement indurée » (argile de Boom ou argile yprésienne), en combinaison avec les DMA à vie longue et le CU.	Une partie retraitée, mais un moratoire sur le retraitement jusqu'à ce qu'une politique à long terme ait été élaborée. Le scénario de référence est un stockage en profondeur dans une « formation argileuse faiblement indurée » (argile de Boom ou argile yprésienne), en combinaison avec les DMA à vie longue et les DHA.
Canada*	Principalement gérés comme faisant partie des DFA. Certains dépôts en surface sont en cours de planification (par exemple aux Laboratoires de Chalk River).	Entreposage existant par chacun des principaux propriétaires de déchets. Stockage en surface dans un dépôt du type monticule conformément aux approbations	Entreposage existant par chacun des principaux propriétaires de déchets. Options de stockage en cours d'examen.	Le scénario de référence est le stockage en profondeur. Le site n'est pas encore déterminé.	Stockage en profondeur prévu dans une collectivité hôte consentante au sein d'une formation rocheuse cristalline ou sédimentaire. Plusieurs sites sont à l'étude.

		réglementaires pour les LCR.			
Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**
Chine*	La politique actuelle est l'entreposage pour la désintégration, puis la libération sans exigences.	Dépôts près de la surface régionaux existants et prévus (types en tranchées et enceintes de béton).	Pour les déchets émetteurs de particules alpha, le stockage en profondeur est prévu au même endroit que les déchets de haute activité.	Stockage en profondeur prévu dans une installation centralisée.	La politique prévoit le retraitement du CU des réacteurs à eau légère. CU des réacteurs de recherche et des réacteurs CANDU : stockage en profondeur prévu avec les DHA.
République tchèque	S.O.	Dépôt en surface existant (sur le site de la centrale de Dukovany). Stockage dans des cavernes souterraines existantes (à Bratrství pour les déchets MRN et à Richard pour les déchets institutionnels).	Le scénario de référence est le stockage en profondeur avec les DHA et le CU.	Le scénario de référence est le stockage en profondeur avec le CU et les DMA à vie longue.	Le scénario de référence est le stockage en profondeur (~2065) avec les DMA à vie longue et les DHA. Cependant, d'autres options (par exemple, le retraitement et un dépôt international régional) n'ont pas été exclues.

Finlande	Autorisation pour la réutilisation, le recyclage ou l'évacuation dans une décharge.	Stockage en cavernes souterraines existantes (sur chaque site de réacteur).	Stockage prévu avec les déchets de déclassement dans l'agrandissement des dépôts existants de DFMA.	S.O.	Dépôt en profondeur en construction. Son exploitation devrait débuter au cours des années 2020.
Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**
France	Dépôt en surface existant en tranchées ouvragées (à Morvilliers).	Dépôt en surface existant à enceintes de béton (au Centre de l'Aube). Ancien dépôt en surface à La Manche.	Pour les DMA à VL, quelques options sont à l'étude. L'hypothèse de référence est le stockage en profondeur, possiblement avec les DHA. Pour les DFA à VL (p. ex. le graphite), l'hypothèse de référence est un dépôt près de la surface réservé à cette fin.	Le plan de référence est le stockage en profondeur (demande de permis pour le dépôt Cigéo à Bure en cours d'évaluation).	La politique prévoit le retraitement du CU des centrales nucléaires et de la plupart des réacteurs de recherche. Le plan de référence pour le combustible des réacteurs de recherche restants est le stockage en profondeur, possiblement avec les DHA.

Allemagne	Autorisation pour la réutilisation, le recyclage ou l'élimination dans une décharge.	Dépôt en profondeur pour les « à production négligeable de chaleur » (à Konrad) en cours de construction. Anciens dépôts en profondeur à Asse et Morsleben.	Dépôt en profondeur prévu pour les « déchets à production négligeable de chaleur » (à Konrad). Anciens dépôts en profondeur à Asse et Morsleben.	Stockage en profondeur prévu pour les « déchets calorigènes » ~2064, sélection du site en cours.	Inclus dans le stockage en profondeur prévu pour les « déchets calorigènes ». Pour le combustible des réacteurs de recherche, retour au pays d'origine ou gestion avec le combustible des centrales nucléaires.
Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**
Hongrie	S.O.	Dépôt existant à enceintes de béton et à forage peu profond près de la surface pour les déchets institutionnels à Püspökszilágy (maintenant plein). Nouveau dépôt à cavernes rocheuses profondes à Bátaapáti, mis en service en 2012.	Actuellement entreposés sur le site d'origine. Plan de référence financier pour un dépôt national pour les DMA à VL, les DHA et le CU.	Plan de référence financier pour un dépôt national pour les DMA à VL, les DHA et le CU.	Plan de référence financier pour un dépôt national pour les DMA à VL, les DHA et le CU. Aucune décision sur le retraitement ou le stockage n'a encore été prise.

Japon	Dépôt existant de démonstration en surface (à Tokai). Installation à Tomioka pour les déchets de Fukushima. Autres installations en surface prévues.	Dépôt souterrain existant à enceintes de béton (à Rokkasho).	Stockage en profondeur prévu, possiblement avec les DHA (les effets des interactions avec les DHA sont en cours d'évaluation).	Stockage en profondeur prévu. Processus de sélection d'un site en cours.	La politique prévoit le retraitement du CU. La politique actuelle est en cours de révision à la lumière de l'accident de Fukushima.

Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**
Corée du Sud*	S.O.	Installation existante à caverne rocheuse à Wolsong. Une deuxième phase à enceintes près de la surface est prévue.	Stockage prévu en combinaison avec les DHA et le CU.	Stockage en profondeur prévu pour le CU et les DHA des centrales nucléaires. Le site n'a pas encore été choisi.	Stockage en profondeur prévu pour le CU et les DHA des centrales nucléaires. Le site n'a pas encore été choisi. L'option du retraitement reste ouverte.

Pays-Bas	Stockage (chez COVRA) suivi d'une future libération libre.	Dépôt existant pour une période de 100 ans (site de COVRA). Subséquemment, stockage en profondeur prévu pour tous les types de déchets dans une seule installation.	Dépôt existant pour une période de 100 ans (site de COVRA). Subséquemment, stockage en profondeur prévu pour tous les types de déchets dans une seule installation.	Dépôt existant pour une période de 100 ans (site de COVRA). Subséquemment, stockage en profondeur prévu pour tous les types de déchets dans une seule installation.	Retraitement jusqu'en 2015, puis décision future pour le combustible restant. Dépôt existant pour une période de 100 ans (site de COVRA). Subséquemment, stockage en profondeur prévu pour tous les types de déchets dans une seule installation.
Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**
Roumanie*	S.O.	Déchets institutionnels – caverne rocheuse existante (ancienne mine d'uranium à Baita-Bihor). Déchets des centrales nucléaires – le plan de référence prévoit un dépôt près de la surface à enceintes de béton à Saligny.	Stockage en profondeur prévu, possiblement avec les DHA et le CU.	Stockage en profondeur prévu, possiblement avec les DMA à VL et le CU.	Le scénario de référence est le stockage géologique en profondeur. Diverses formations géologiques à l'étude.

Slovaquie	S.O.	Dépôt en surface existant à enceintes de béton à Mochovce.	Stockage en profondeur prévu, avec les DHA.	Stockage en profondeur prévu, avec les DFA.	La politique prévoit un stockage provisoire pendant 40 à 50 ans, suivi d'un stockage en profondeur. D'autres options, comme un dépôt régional multinational, sont également envisagées.
Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**

Slovénie	S.O.	Projet de dépôt souterrain à silos de béton près de la centrale nucléaire de Krško.	Pas de décision.	Pas de décision.	Pour le CU des centrales nucléaires, le plan de référence prévoit un entreposage jusqu'à ~2065, suivi d'un stockage en profondeur en Slovénie ou en Croatie. D'autres options, comme un dépôt régional multinational, sont également envisagées. Pour le combustible des réacteurs de recherche, la politique est de le retourner dans le pays d'origine si possible, sinon de le gérer avec le combustible de la centrale nucléaire.

Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**

Afrique du Sud	Dépôt en surface existant, ou entreposage pendant la désintégration et libération sans exigences (p. ex. pour le recyclage).	Dépôt en tranchée existant à Vaalputs.	Aucune décision sur la technologie de stockage. Plan de référence d'un dépôt de profondeur moyenne à grande. Pourraient être combinés avec les DHA dans un seul dépôt en profondeur.	Aucune décision sur la technologie de stockage. Plan de référence d'un dépôt en profondeur. Pourraient être combinés avec les DMA à VL dans un seul dépôt en profondeur.	Aucune décision. La politique actuelle est le stockage sur le site nucléaire actuel en attendant le résultat de l'examen gouvernemental. Les options incluent le stockage à long terme en surface, la transmutation, le stockage en profondeur et le retraitement.
Espagne	Dépôt existant à tranchées ouvragées (à El Cabril).	Dépôt en surface existant à enceintes de béton (à El Cabril).	Le plan de référence à moyen terme est l'entreposage centralisé avec les DHA pour 50 à 100 ans. Aucune décision n'a été prise sur la technologie de stockage permanent. L'hypothèse de référence est le stockage en profondeur, possiblement avec les DHA et le CU.	Le plan de référence à moyen terme est l'entreposage centralisé avec le CU DHA pour 50 à 100 ans. Aucune décision n'a été prise sur la technologie de stockage permanent. L'hypothèse de référence est le stockage en profondeur, possiblement avec les DMA à VL et le CU.	Le plan de référence à moyen terme est l'entreposage centralisé pour 50 à 100 ans. Aucune décision n'a été prise sur la technologie de stockage permanent. L'hypothèse de référence est le stockage en profondeur, possiblement avec les DHA et les DMA à VL.
Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**

Suède	Dépôt existant du type monticule en surface (sur chaque site nucléaire).	Élimination dans une caverne souterraine existante (à SFR). Agrandissement du dépôt SFR pour les déchets de déclassement.	Entreposage provisoire sur le site BFA existant à Simpevarp. Le stockage en profondeur est prévu à partir de 2045 approximativement. Le site n'a pas encore été choisi.	S.O.	Stockage prévu en profondeur sur le site de Forsmark. Demande de permis de construire présentée en 2011. Début de l'exploitation prévu à la fin des années 2020.
Suisse	S.O.	Stockage en profondeur prévu, possiblement en combinaison avec le dépôt de déchets à vie longue et de DHA.	Stockage en profondeur prévu avec les DHA et le CU.	Stockage en profondeur prévu, avec les DMA et le CU.	Une partie retraitée, une partie prévue pour le stockage (les sociétés d'électricité pourraient choisir cette option, mais depuis 2006, il y a un moratoire sur le retraitement).
Royaume-Uni	Décharges classiques en surface.	Dépôts en surface existants (à Drigg et Dounreay). D'autres installations pourraient être développées au besoin.	La pratique actuelle est l'entreposage provisoire à « sûreté passive » sur les principaux sites nucléaires. Le plan de référence pour le futur est le stockage en profondeur avec les DHA.	La pratique actuelle est l'entreposage provisoire « sûreté passive » sur les principaux sites nucléaires. Le plan de référence pour le futur est le stockage en profondeur avec les DMA à VL. Consultations sur le processus de sélection d'un site lancé en 2018.	Majoritairement retraité. La décision de retraiter ou d'éliminer est laissée au propriétaire des déchets, en fonction de critères économiques. Si les déchets sont stockés, ils le seront dans une seule installation en profondeur centralisée.
Pays	**DTFA**	**DFA (vie courte)**	**DMA (vie longue)**	**DHA**	**CU**

États-Unis	Dépôt commercial en surface existant (à Clive, Utah). Installations gouvernementales existantes (telles que Fernald, Ohio, et divers sites appartenant au Département de l'énergie).	Dépôts commerciaux en surface existants (à Clive (UT), Hanford (WA), Barnwell (SC), Andrews (TX)).	Actuellement, les DMA-VL (appelés « supérieurs à la classe C » ou GTCC) sont orphelins et aucune voie de stockage n'est prévue pour eux (entreposés sur divers sites). Plusieurs options sont à l'étude. Elles incluent un dépôt géologique, des forages de profondeur intermédiaire et des installations près de la surface améliorées. Les déchets TRU liés à la Défense sont stockés dans une installation en profondeur (WIPP).	Stockage en profondeur prévu pour les DHA, avec le CU.	Stockage en profondeur prévu (site en cours d'examen).

*Note : ces pays exploitent un ou plusieurs réacteurs à eau lourde du type CANDU.

Source : informations publiées dans les rapports nationaux pour la Convention commune de l'AIEA et la directive de l'UE sur les déchets. (Voir [AIEA 2018].)

ANNEXE D : Résumé des responsabilités internationales en matière de gestion des déchets

Pays	Organisation de gestion des déchets (OGD)	Responsabilités	Propriété
Argentine	CNEA	Gestion des déchets radioactifs.	État
Australie	ANSTO	Gestion des déchets radioactifs.	État
Belgique	ONDRAF/NIRAS	Développement et exploitation des installations de stockage pour tous les types de déchets radioactifs et le combustible usé.	État
Canada	SGDN	Développement et exploitation des installations de stockage du combustible usé.	Sociétés d'électricité
	Bureau de gestion des déchets radioactifs de faible activité (BGDRFA)	Nettoyage et gestion des déchets historiques canadiens.	État/sociétés privées
	(Autres propriétaires de déchets)	Gestion et stockage de leurs propres déchets.	Sociétés d'électricité d'État/privées
Chine	AUCUNE OGD SPÉCIFIÉE		
République Tchèque	SÚRAO	Développement et exploitation des installations d'entreposage et de stockage des déchets radioactifs et du combustible usé.	État
Finlande	Posiva Oy	Développement et exploitation d'une installation de stockage du combustible usé. Le stockage des déchets de faible activité relève de la responsabilité directe des centrales nucléaires.	Sociétés d'électricité

Pays	Organisation de gestion des déchets (OGD)	Responsabilités	Propriété
France	ANDRA	Développement et exploitation des installations de stockage pour tous les types de déchets radioactifs.	État
Allemagne	BGE	Développement et exploitation des installations de stockage pour tous les types de déchets radioactifs et le combustible usé.	État
Hongrie	PURAM	Développement et exploitation des installations d'entreposage et de stockage pour tous les types de déchets radioactifs et le combustible usé, et déclassement des installations nucléaires.	État
Japon	NUMO	Développement et exploitation d'une installation de stockage des DHA. Les sociétés d'électricité font appel à un service commercial (JNFL) pour le stockage des DFA.	État Privé (sociétés d'électricité et autres entreprises nucléaires)
Corée, République de	KORAD	Développement et exploitation des installations d'entreposage et de stockage pour tous les types de déchets radioactifs et le combustible usé, et administration du fonds de gestion des déchets radioactifs.	État
Pays-Bas	COVRA	Gestion des déchets radioactifs.	État
Roumanie	ANDR	Développement et exploitation des installations de stockage pour tous les types de déchets radioactifs et le combustible usé.	État

Pays	Organisation de gestion des déchets (OGD)	Responsabilités	Propriété
Slovaquie	JAVYS	Développement et exploitation des installations d'entreposage et de stockage pour tous les types de déchets radioactifs et le combustible usé, exploitation des installations centralisées de traitement des déchets, et déclassement des installations nucléaires.	État
Slovénie	Agency for Radwaste Management	Développement et exploitation des installations d'entreposage et de stockage pour tous les types de déchets radioactifs et le combustible usé.	État
Afrique du Sud	NRDWI	Gestion des déchets radioactifs et du combustible usé.	État
Espagne	ENRESA	Développement et exploitation des installations d'entreposage et de stockage pour tous les types de déchets radioactifs et le combustible usé. Déclassement de réacteurs.	État
Suède	SKB	Développement et exploitation des installations d'entreposage et de stockage pour tous les types de déchets radioactifs et le combustible usé.	Sociétés d'électricité
Suisse	NAGRA	Développement et exploitation des installations de stockage et de stockage pour tous les types de déchets radioactifs et de combustible usé.	Utilities/State
Royaume-Uni	NDA	Supervision de la gestion stratégique des déchets radioactifs et du combustible usé, y compris des déchets provenant de l'exploitation historique d'installations.	État

Pays	Organisation de gestion des déchets (OGD)	Responsabilités	Propriété
États-Unis	DOE	Développement et exploitation des installations de stockage pour tout le combustible usé, certains déchets radioactifs légers (supérieurs aux déchets radioactifs de classe C) et les déchets radioactifs appartenant au DOE ou générés par celui-ci.	État
	États/association	Stockage des DFA (dans des installations exploitées commercialement).	Sociétés d'électricité

Source : [AIEA 2018]

ANNEXE E : Résumé des systèmes de classification des déchets

L'AIEA a tenté d'unifier les définitions des déchets aux fins de déclaration et a proposé un système de classification standard dans sa norme GSG-1 [AIEA 2009] :

Déchets exemptés (DE) : déchets qui répondent aux critères de libération, d'exemption ou d'exclusion du contrôle réglementaire aux fins de radioprotection (généralement sur la base d'une dose annuelle reçue par les membres du public inférieure à 0,01 mSv).

Déchets à vie très courte (DVTC) : déchets pouvant être entreposés pendant une période limitée de désintégration pouvant aller jusqu'à quelques années, puis libérés du contrôle réglementaire selon des modalités établies par l'organisme de réglementation en vue de leur élimination, utilisation ou rejet non contrôlés. Cette catégorie comprend les déchets contenant principalement des radionucléides à demi-vie très courte, souvent issus d'activités de recherche et médicales.

Déchets de très faible activité (DTFA) : déchets qui ne répondent pas nécessairement aux critères des DE, mais qui ne nécessitent pas un niveau élevé de confinement et d'isolement et qui, par conséquent, peuvent être éliminés dans des installations du type décharge à faible profondeur avec un contrôle réglementaire limité. Ces décharges peuvent également contenir d'autres déchets dangereux. Les déchets généralement associés à cette catégorie comprennent les sols et les gravats à faible concentration d'activité. La concentration de radionucléides à vie longue dans les DTFA est généralement très faible.

Déchets de faible activité (DFA) : déchets dont la concentration est supérieure aux seuils de libération, mais qui contiennent des quantités limitées de radionucléides à vie longue. Ces déchets nécessitent un isolement et un confinement robustes pour des périodes pouvant aller jusqu'à quelques centaines d'années et conviennent à un stockage dans des installations ouvragées près de la surface. Cette catégorie couvre un très large éventail de déchets. Les DFA peuvent contenir des radionucléides à vie courte à niveau de concentration d'activité plus élevé ainsi que des radionucléides à vie longue, mais uniquement à des niveaux de concentration d'activité relativement faibles. (Il convient de noter que cette définition est équivalente aux définitions précédentes des DFMA-VC).

Déchets de moyenne activité (DMA) : déchets qui, en raison de leur contenu, notamment en radionucléides à vie longue, nécessitent un plus grand degré de confinement et d'isolement que celui fourni par le stockage près de la surface. Cependant, les DMA ne nécessitent aucune disposition, ou seulement des dispositions limitées au regard de la dissipation de la chaleur pendant leur entreposage et leur stockage. Les DMA peuvent contenir des radionucléides à vie longue, en particulier des radionucléides émetteurs de particules alpha, qui ne se désintègrent pas jusqu'à un niveau de concentration d'activité acceptable pour le stockage près de la surface pendant la période où l'on peut compter sur les contrôles institutionnels. Par conséquent, les déchets de cette catégorie doivent être stockés à des profondeurs plus importantes, de l'ordre de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres. (Il convient de noter que cela équivaut aux définitions antérieures de la catégorie des DFMA-VL).

Déchets de haute activité (DHA) : déchets dont les niveaux de concentration d'activité sont suffisamment élevés pour générer d'importantes quantités de chaleur par le biais du processus de

désintégration radioactive (par exemple une puissance thermique > 2 kW/m^3) ou les déchets contenant de grandes quantités de radionucléides à vie longue dont il faut tenir compte dans la conception d'une installation de stockage de ces déchets. Le stockage en formation géologique profonde et stable, généralement à plusieurs centaines de mètres ou plus sous la surface, est l'option généralement retenue pour le stockage des DHA. Cette catégorie comprend le combustible nucléaire usé (irradié) lorsqu'il a été déclaré déchet.

Le système de classification de l'AIEA est basé sur des exigences minimales de stockage fondées sur des considérations de radioprotection, un degré croissant d'isolement de la biosphère par l'utilisation de barrières naturelles et/ou artificielles étant requis pour les niveaux plus élevés d'activité et les déchets à vie plus longue.

Au Canada, ce système de classification de base de l'AIEA a été intégré à la norme N292.0 de la CSA [CSA 2019] et a été approuvé par la CCSN [CCSN 2018] :

Les déchets radioactifs de faible activité (DRFA)[8] contiennent des matières renfermant des radionucléides en quantités supérieures aux seuils de libération et d'exemption établis, et sont caractérisés par une période d'activité de longue durée généralement limitée. Ces déchets requièrent isolement et confinement jusqu'à plusieurs centaines d'années. Les DRFA n'exigent généralement pas un blindage important pendant leur manutention et leur stockage provisoire. Dans le système de classification canadien, les DRFA comprennent également deux sous-catégories :

- *Les déchets faiblement radioactifs à très courte durée de vie* (DFRTCDV)[9] sont des déchets qui peuvent être entreposés pour désintégration pendant plusieurs années pour ensuite être autorisés aux fins d'évacuation. Cette classification englobe les déchets radioactifs ne contenant que des radionucléides à période courte, soit ceux qui sont typiquement issus d'activités biomédicales ou de recherche.

- *Les déchets très faiblement radioactifs* (DTFR)[10] présentent un risque faible, mais néanmoins supérieur aux critères d'exemption. Les installations de gestion à long terme de ces déchets ne requièrent en général pas un confinement ou un isolement poussé. Un dépôt à faible profondeur assorti de contrôles réglementaires restreints est en général suffisant. Seront typiquement considérés comme des DTFR les matériaux en vrac, comme la terre et les gravats de faible activité, les déchets de déclassement et certains déchets contaminés à l'uranium.

***Les déchets moyennement radioactifs* (DMR)**[11] sont des déchets qui émettent typiquement des rayonnements pénétrants suffisamment intenses pour nécessiter leur blindage pendant la manutention et le stockage provisoire. Ce type de déchets radioactifs exige généralement peu de dispositions, voire aucune, pour la dissipation de chaleur pendant sa manutention, son transport et sa gestion à long terme. Cependant, certains DMR peuvent, à court terme, donner lieu à un dégagement calorifique en raison de leur niveau de radioactivité globale. Les DMR renferment généralement des radionucléides à longue période radioactive dans des concentrations exigeant

[8] Dénommés « déchets de faible activité (DFA) ailleurs dans ce document.
[9] Dénommés « déchets de faible activité à vie très courte (DFA-VTC) ailleurs dans ce document.
[10] Dénommés « déchets de très faible activité (DTFA) ailleurs dans ce document.
[11] Dénommés « déchets de moyenne activité (DMA) ailleurs dans ce document.

l'isolement et le confinement pour des périodes dépassant plusieurs centaines d'années (plus de 300 à 500 ans). Les DMR contiennent également des déchets radioactifs « émetteurs alpha » (déchets contenant un ou plusieurs radionucléides émettant des rayons alpha, en règle générale des actinides) en quantités supérieures aux niveaux acceptables pour les dépôts à faible profondeur. Les DMR sont parfois sous-divisés en DMR à courte période radioactive (DMR-CPR)[12] et en DMR à longue période radioactive (DMR-LPR)[13], selon les quantités de radionucléides à longue durée de vie qui sont présents.

Les déchets hautement radioactifs* (DHR)[14] sont du combustible usé (irradié ou épuisé) qui a été déclaré déchet radioactif ou déchet produisant beaucoup de chaleur (typiquement plus de 2 kW/m^3) par désintégration radioactive. Au Canada, les termes « combustible nucléaire irradié » ou « combustible nucléaire usé » sont des termes plus justes pour désigner le combustible épuisé, étant donné que le combustible déchargé est considéré comme un déchet même s'il n'est pas entièrement épuisé.

Les déchets de mines et d'usines de concentration d'uranium* (MUCU) sont un type particulier de déchets radioactifs générés par l'extraction et la concentration du minerai d'uranium et la production de concentré d'uranium. En plus de résidus, les activités minières génèrent typiquement de grandes quantités de roches stériles minéralisées et de stériles propres lorsque les galeries sont creusées pour permettre l'accès au corps minéralisé. Les résidus et stériles minéralisés renferment d'importantes concentrations d'éléments radioactifs à longue durée de vie, notamment le thorium 230 et le radium 226.

** Note : les « déchets très faiblement radioactifs », les « déchets hautement radioactifs » et les « MUCU » ne sont pas abordés dans le présent document.*

La norme de la CSA ne prévoit pas de limites chiffrées définitives pour distinguer les diverses catégories de déchets radioactifs (principalement de faible et moyenne activité), car les limites d'activité diffèrent entre les radionucléides ou les groupes de radionucléides et dépendront de considérations de gestion liées à la sûreté à court et à long terme. Un débit de dose au contact d'approximativement 2 mSv/h a été utilisé, dans certains cas, pour distinguer les déchets faiblement et moyennement radioactifs.

Malgré le système de classification de la CSA, la plupart des DFA et des DMA existants au Canada ont été classés selon une variété d'anciens systèmes par chaque propriétaire de déchets, lesquels avaient été établis avant la création de la norme de la CSA. Les principaux propriétaires de déchets au Canada (OPG, EACL, Énergie NB et Hydro-Québec) ont tous leur propre système de classification historique avec ses propres limites numériques pour chaque catégorie, déterminées en fonction des capacités de leur système particulier de gestion et de stockage des déchets.

[12] Dénommés « déchets de moyenne activité à vie courte (DMA-VC) » ailleurs dans ce document.
[13] Dénommés « déchets de moyenne activité à vie longue (DMA-VL) ailleurs dans ce document.
[14] Dénommés « déchets de haute activité (DHA) ailleurs dans ce document.

ANNEXE F : Résumé des dépôts existants pour les déchets de faible et moyenne activité

Nom	Loviisa
Emplacement	Loviisa, Finlande
Description	Dépôt à cavernes rocheuses construit spécialement à cette fin, creusé à une profondeur de 110 m dans un substrat rocheux granitique.
Capacité	DFA : 3 600 m^3 (18 000 fûts de 200 L) lors de la première phase + approximativement 6 400 m^3 lors la récente expansion. DMA : 5 000 m^3 (5 000 colis de 1 m^3)
Historique	Début de la construction : 1993 Début de l'exploitation : 1998 (pour les DFA), prévue en 2013 pour les DMA. Expansion : commencée en 2010; terminée en 2012 Fermeture prévue : 2055 (fin du permis d'exploitation actuel)
Types de déchets	DFA et DMA à vie courte issus de l'exploitation de la centrale nucléaire de Loviisa (2 réacteurs REP VVER de 488 MWe net). DFA compactés et/ou emballés dans des fûts en acier de 200 L. Les DMA (résines échangeuses d'ions et boues) seront cimentés dans des conteneurs cylindriques en béton (1 m^3 de volume interne, 1,7 m^3 de volume externe). Subséquemment, déchets de déclassement des réacteurs de Loviisa.
Caractéristiques principales	Accès par un tunnel à rampe de 1,1 km. Accès du personnel par un puits de 120 m avec ascenseur et escalier. Cavernes distinctes pour les DFA et les DMA. Les cavernes de stockage sont desservies par une ventilation en « cul-de-sac ». Les cavernes de DFA font 6 m de large x 5 m de haut x 110 m de long. Fûts en acier au carbone de 200 L empilés sur 7 de largeur x 5 de hauteur. Les cavernes de DFA ne sont pas remblayées à la fermeture. Le toit interne anti-égouttement utilisé pendant le remplissage pour protéger les fûts contre les infiltrations d'eau sera enlevé avant la fermeture. Caverne de DMA avec structure interne en tranchée de béton (14 m L x 11 m H x 70 m L), desservie par un pont roulant. Les colis de déchets en béton sont empilés à 5 de hauteur. La caverne est remblayée avec un coulis de béton à mesure que chaque couche est remplie. Elle sera recouverte de béton une fois terminée. L'espace restant de l'enceinte est rempli de roche concassée.
Commentaires	L'inventaire déclaré à la fin de 2016 était de 1 886 m^3 de DFA. Peut également contenir de petites quantités de déchets de déclassement d'autres installations (par exemple, des réacteurs de recherche).
Référence	[FINLANDE 2017]

Nom	Dépôt VLJ (Voimalaitosjätteen loppusijoitustila)
Emplacement	Olkiluoto, Finlande
Description	Dépôt en caverne rocheuse à silos construit spécialement à cette fin. Creusé à une profondeur de 60 à 95 m dans un substratum rocheux de tonalite.
Capacité	Silo pour DFA : 5 000 m^3 Silo pour DMA : 3 500 m^3 4 silos supplémentaires peuvent être ajoutés au besoin.
Historique	Début de la construction : 1988 Début de l'exploitation : 1992 Expansion : (prévue pour les déchets du nouveau réacteur et les futurs déchets de déclassement) Fermeture prévue : (après le déclassement du dernier réacteur du site)
Types de déchets	DFA et DMA à vie courte provenant de l'exploitation de la centrale nucléaire d'Olkiluoto (2 REB de 880 MWe (net), 1 REP de 1600 MWe en construction, un éventuel 4e réacteur à l'étude). Les déchets de faible activité sont compactés et/ou emballés dans des fûts en acier de 200 L. DMA (résines échangeuses d'ions et boues) bitumés dans des fûts insérés dans des caissons en béton. Déchets du déclassement futur des réacteurs d'Olkiluoto.
Caractéristiques principales	Accès par un tunnel à rampe de 1,1 km. Accès du personnel par un puits avec ascenseur. Silo rocheux enduit de béton projeté pour les DFA, 24 m LL x 34 m H. Les déchets sont emballés dans des fûts de 200 L, des caissons en acier de 1,4 m^3, des caissons de béton de 3,9 m^3 (contenant 12 fûts) ou des caissons de béton de 5,2 m^3 (contenant 16 fûts). Silo en béton à parois épaisses à l'intérieur d'un silo rocheux pour les DMA. Caissons de béton de 5,2 m^3 contenant 16 fûts de déchets bitumés empilés dans un silo. Salle de pont roulant commune aux deux silos pour l'empilage des colis. Les silos comprennent 31 étages de caissons en béton. L'espace vide au-dessus des silos sera remblayé avec de la roche concassée d'origine locale lors de la fermeture.
Commentaires	L'inventaire déclaré à la fin de 2016 était de 5 681 m^3 de DFMA. Stocke également de petites quantités de DFMA appartenant à l'État dans une caverne réservée à cette fin (~55 m^3 de DFMA, 53 kg de Th, 1270 kg d'uranium appauvri).
Référence	[FINLANDE 2017]

Nom	CSM
Emplacement	La Manche, France
Description	Dépôt à monticules/enceintes de béton pour DFMA à vie courte.
Capacité	Volume total stocké : ~527 000 m^3
Historique	Début de la construction : 1967 Exploitation : 1969 à 1994 Fermeture : le recouvrement a été achevé en 1997. Actuellement sous surveillance à long terme. Contrôle institutionnel de jusqu'à 300 ans.
Types de déchets	DFMA à vie courte issus des centrales nucléaires et des installations du cycle du combustible; dans divers types de colis.
Caractéristiques principales	Conteneurs de déchets empilés directement sur des dalles en béton ou dans des bunkers en béton construits sur les dalles. Les espaces entre les conteneurs sont remblayés avec du sable, du gravier ou du béton. Système de recouvrement multicouche avec différentes membranes et couches de drainage. Drainage surveillé pour la radioactivité.
Commentaires	Occupe une superficie d'approximativement 15 ha à côté de l'installation de retraitement de La Hague. La documentation sur la conception et l'inventaire est conservée aux Archives nationales. Un certain tassement du système de couverture a été observé et des mesures correctives ont été prises en 2009-2010. Approximativement 300 m^3 d'eau par an recueillis par le système de drainage interne. Tritium détecté dans les eaux souterraines autour de l'installation.
Référence	[FRANCE 2017]

Nom	CSFMA (Centre de l'Aube)
Emplacement	Aube, France
Description	Dépôt à enceintes de béton construit spécialement pour le stockage des DFMA à vie courte.
Capacité	Capacité actuelle autorisée de 1 000 000 m^3 dans 400 enceintes de stockage.

Historique	Début de la construction : 1989 Début de l'exploitation : 1992 Fermeture : (prévue dans le futur)
Types de déchets	DFMA à vie courte provenant des centrales nucléaires et des installations du cycle du combustible; contenus dans divers types de colis.
Caractéristiques principales	Les déchets sont normalement compactés et/ou cimentés dans des conteneurs. Les conteneurs de déchets sont empilés directement dans des enceintes en béton de 25 m x 25 m x 8 m de haut à l'aide d'un pont roulant. Un abri mobile contre les intempéries protège les enceintes ouvertes pendant la mise en place des déchets. Les espaces entre les conteneurs sont remblayés avec du sable, du gravier ou du béton. Les enceintes sont fermées par une couche de béton à la fin du remplissage. Système de recouvrement multicouche prévu avec différentes membranes et couches de drainage. Les eaux de drainage sont recueillies et leur radioactivité est surveillée.
Commentaires	Volume total éliminé à la fin de 2016 : ~325 000 m^3. 106 enceintes remplies et fermées.
Référence	[FRANCE 2017]

Name	CIRES (CSTFA)
Emplacement	Morvilliers, France
Description	Installation en tranchée construite spécialement à cette fin dans un sol argileux. Pour déchets de très faible activité.
Capacité	650 000 m^3
Historique	Début de la construction : 2002 Début de l'exploitation : 2003 Fermeture prévue : 2033 (permis d'exploitation de 30 ans)
Types de déchets	Déchets de très faible activité provenant des centrales nucléaires et des installations du cycle du combustible (principalement des activités de déclassement) en vrac ou dans des conteneurs simples, tels que des sacs en plastique/tissu. Approximativement 50 % des déchets de très faible activité sont des « déchets industriels » (déchets métalliques et plastiques), 40 % des « déchets inertes » (béton, briques, terre, etc.) et 10 % des « déchets spéciaux », qui comprennent diverses substances telles que des boues et des cendres.

	Niveau radioactif moyen d'approximativement 10 (Bq/g), dans une fourchette allant de 1 à 100 Bq/g.
Caractéristiques principales	La superficie totale du site est de 45 ha, dont 28,5 ha sont disponibles pour le stockage. Les alvéoles de stockage sont creusées progressivement, selon les besoins, directement dans la formation argileuse jusqu'à une profondeur de 8 m, et sont remplies en séquence. Chacune des six premières alvéoles avait une capacité de 10 000 m^3. Depuis 2007, on y a construit des alvéoles « doubles », d'une capacité accrue pouvant atteindre 25 000 m^3 (26 m de large sur 174 m de long). Les cellules sont remplies par couches successives (approximativement 10 en moyenne) tandis que les espaces vides entre les colis de déchets sont remblayés progressivement avec du sable. Le conteneur à déchets n'a aucune fonction de confinement de la radioactivité et a pour seul but de faciliter les opérations de manutention et de stockage ainsi que de protéger les opérateurs. Le taux moyen de livraison de déchets à ce jour est d'approximativement 24 000 m^3/an. L'installation est conçue pour une durée d'exploitation de 30 ans. Elle sera recouverte par un système multicouche. Une période de surveillance subséquente de 30 ans est prévue.
Commentaires	L'inventaire déclaré à la fin de 2016 était d'environ 330 000 m^3 de déchets de DTFA. Le coût de construction déclaré est de 40 millions d'euros, et le coût d'exploitation est de 270 euros par tonne.
Référence	[FRANCE 2017]

Nom	Asse II
Emplacement	Wolfenbüttel, Basse-Saxe, Allemagne
Description	Ancienne mine de potasse et de sel transformée. Salles de stockage à 511 m, 725 m et 750 m sous la surface du sol, dans les excavations originales de la mine.
Capacité	Contient actuellement approximativement 47 000 m^3 de DFMA.
Historique	Mine de sel et de potasse exploitée de 1908 à 1964. La mine a été acquise pour en faire un dépôt en 1965. Le stockage des DFA commence en 1967, celle des DMA en 1972. Exploitée comme dépôt jusqu'en 1978.

Types de déchets	DFMA à production négligeable de chaleur issus principalement de l'exploitation du centre de recherche nucléaire de Karlsruhe et de son installation expérimentale de retraitement du combustible.
Caractéristiques principales	Accès par puits et treuils. DMA disposés dans une galerie à 511 m de profondeur. Les DFA sont stockés dans des galeries situées à 725 et 750 m sous terre. Les déchets sont pour la plupart dans des fûts de 200 L. Les DFA sont empilés de manière ordonnée, tandis que les DMA ont été déchargés en « piles désorganisées ». Le déchargement à partir d'un chargeur frontal était intentionnel pour les déchets à haut débit de dose afin de réduire le plus possible l'exposition des opérateurs pendant la manipulation, conformément aux procédures ALARA de l'époque. Les galeries de stockage n'ont pas été remblayées.
Commentaires	Approximativement 5 millions de m^3 de minéraux de sel gemme et de potasse ont été extraits de la mine au cours de son existence. La plus grande partie de cet espace a été laissée ouverte et n'a pas été remblayée à l'époque. Deux mines voisines (Asse I et Asse 3) ont été inondées au début du 20e siècle et ont été abandonnées. Le fluage du sel a occasionné une convergence et une redistribution des contraintes autour des galeries, créant des voies d'infiltration des eaux souterraines. Depuis 1988, il y a un afflux assez constant d'approximativement 11 m^3/jour (8 L/min) de saumure saturée en NaCl dans les zones périphériques de la mine. La saumure est pompée, contrôlée et libérée sans exigences vers une autre installation minière de sel. Le plan de référence actuel est de récupérer tous les déchets et de les remballer pour les stocker dans la nouvelle installation de Konrad actuellement en construction. Approximativement 1,75 million de m^3 de béton « salé » (salzbeton – généralement 16 % de ciment, 39 % d'halite, 16 % de poudre de calcaire, 14 % d'eau et 15 % de sable) ont été utilisés pour remplir certaines parties de la mine afin de les stabiliser et d'éviter qu'elles ne se détériorent davantage pendant l'extraction des déchets. Cependant, le sel continue de s'infiltrer (approximativement 130 mm par an) et de nouvelles voies d'accès des eaux souterraines s'ouvrent continuellement.
Référence	[ALLEMAGNE 2017]

Nom	ERAM (Endlager für Radioaktive Abfälle Morsleben)
Emplacement	Morsleben, Saxe-Anhalt, Allemagne

Description	Ancienne mine de potasse et de sel transformée. Salles de stockage à approximativement 400 m à 600 m sous la surface du sol, dans les excavations originales de la mine.
Capacité	Contient actuellement approximativement 37 000 m^3 de DFMA.
Historique	Exploitée comme mine de sel et de potasse de 1897 à 1969. La mine a été acquise pour en faire un dépôt en 1970. Exploitée comme dépôt de DFMA de 1971 à 1998.
Types de déchets	DFMA issus de l'exploitation et du déclassement des centrales nucléaires et déchets issus de la recherche et d'applications médicales et industrielles, principalement de l'ancienne Allemagne de l'Est.
Caractéristiques principales	Accès par puits et treuils. La plupart des déchets sont contenus dans des fûts en acier de 200, 280, 400 et 570 L et des conteneurs cylindriques en béton. Les déchets sont empilés de manière ordonnée. Grandes galeries de stockage, jusqu'à 30 m de large x 100 m de long. Faible débit d'entrée d'eau (~12 m^3/an). Les galeries de stockage n'ont pas été remblayées. Cependant, certaines parties des plafonds se sont partiellement effondrées.
Commentaires	Le plan de fermeture initial élaboré en 1989 prévoyait de laisser l'installation s'inonder. Le plan de fermeture de référence a été modifié lors de la réunification des anciennes Allemagne de l'Est et Allemagne de l'Ouest. Le plan de fermeture actuel est de remblayer les enceintes de stockage et les zones d'accès avec du béton salé (salzbeton – généralement composé à 16 % de ciment, 39 % d'halite, 16 % de poudre de calcaire, 14 % d'eau et 15 % de sable) pour les stabiliser. Le plan est en attente d'une approbation finale des autorités réglementaires. Certains ouvrages abandonnés ont été remblayés avec approximativement 935 000 m^3 de béton pour les stabiliser afin de protéger les travailleurs et la mine. Certaines cavités ont volontairement été laissées ouvertes afin de laisser un espace vide pour les gaz générés par la dégradation des matières organiques présentes dans les déchets et les conteneurs en acier.
Référence	[ALLEMAGNE 2017]

Nom	Konrad
Emplacement	Salzgitter, Basse-Saxe, Allemagne
Description	Dépôt du type caverne rocheuse en tunnel construit spécialement à cette fin en utilisant l'infrastructure d'une ancienne mine de fer (puits, tunnels d'accès, etc.) à une profondeur de ~800 m dans du calcaire oolithique.

Capacité	63 000 m3 de DFMA ne générant pas de chaleur au cours de la première phase, avec des expansions prévues permettant de stocker jusqu'à 303 000 m^3.
Historique	Mine de fer exploitée de 1965 à 1976. Le permis de construire final a été accordé en 2008. La conversion du dépôt est en cours et l'exploitation devrait commencer en 2022.
Types de déchets	DFMA non calorigènes issus de l'exploitation et du déclassement des centrales nucléaires et déchets issus de la recherche et d'applications médicales et industrielles.
Caractéristiques principales	Accès par puits et treuils. Deux puits : accès du personnel et ventilation d'entre dans l'un et manutention des colis de déchets et évacuation de la ventilation dans l'autre). Cinq grandes galeries de stockage nouvellement construites, 7 m de large x 6 m de haut x 800 m de long, dans la première phase. Les galeries de stockage et les tunnels d'accès sont dotés d'une ventilation continue (avec quelques conduits dans les salles de stockage). Les déchets sont emballés dans un petit nombre de types de conteneurs standard, notamment des caissons en acier (dont la taille varie de ~4 m^3 à 12 m^3), des fûts en fonte (~1 m^3 à 1,3 m^3) et des conteneurs en béton (~1,2 m^3). Le conteneur de stockage extérieur peut contenir plusieurs conteneurs plus petits (par exemple, des fûts de 200 L ou 400 L). L'espace vide à l'intérieur des conteneurs est normalement rempli avec du mortier. Certains conteneurs de DMA ont un blindage intégré. Les colis de déchets sont préparés hors site et conçus pour satisfaire à la réglementation de transport (nécessité de transporter tous les déchets depuis d'autres emplacements jusqu'à l'installation). Les déchets sont empilés de manière ordonnée. Taux d'infiltration d'eau négligeable.
Commentaires	Le plan de référence actuel est de remblayer les enceintes de stockage avec un mélange de roche concassée et de ciment (~70 % en poids de roche concassée, 10 % de ciment, 20 % d'eau) au fur et à mesure de leur remplissage (par exemple, après le remplissage d'approximativement 50 m de tunnel, un mur sera construit et le mélange de ciment sera pompé dans l'espace situé derrière le mur). À la fermeture, le reste (puits d'accès et de ventilation et galeries de l'infrastructure) sera remblayé avec de la roche concassée (provenant principalement de l'excavation de la mine).
Référence	[ALLEMAGNE 2017]

Nom	Dépôt national de déchets radioactifs
Emplacement	Bátaapáti, Hongrie
Description	Dépôt à cavernes rocheuses construit spécialement à cette fin. Creusé à une profondeur de 250 m dans un substratum rocheux granitique. Accès par rampe.
Capacité	Actuellement, deux salles de stockage peuvent contenir approximativement 3 000 m^3 de DFMA à vie courte (15 000 fûts). Les plans d'expansion prévoient 17 salles de stockage en tout pour un total de 25 000 m^3 de déchets (125 000 fûts).
Historique	Études géologiques achevées en 2003 Permis de construire accordé : 2008 Début de l'exploitation : 2012 Fermeture prévue : 2084
Types de déchets	DFMA issus de l'exploitation et du déclassement des centrales nucléaires.
Caractéristiques principales	Accès double par tunnel et rampe pour permettre une ventilation à flux continu dans les tunnels principaux. Les enceintes de stockage sont en cul-de-sac. La plupart des déchets sont emprisonnés dans du coulis à l'intérieur de fûts en acier de 200 L placés dans des conteneurs en béton de 2,25 m x 2,25 m x 1,55 m de haut, à raison de 9 fûts par conteneur. Conteneurs empilés dans des enceintes, généralement à 4 de large x 4 de haut. Salles de stockage, nominalement de 10,6 m de large x 8,7 m de haut x 100 m de long, profil arqué. Chacune peut contenir jusqu'à 817 conteneurs de stockage. Les salles de stockage seront remblayées au coulis. Une salle de stockage comprendra une enceinte interne en béton pour éviter d'avoir à remballer les conteneurs existants en entreposage. Les tunnels d'accès seront fermés par une série de bouchons en béton à intervalles réguliers sur toute leur longueur. Les espaces entre les bouchons seront remblayés avec un mélange technique de matériaux.
Commentaires	Dépôt construit à flanc de colline. L'exploitation de l'installation a débuté en décembre 2012. L'inventaire déclaré à la fin de 2016 était d'approximativement 900 m^3.
Référence	[HONGRIE 2017]

Nom	Centre de stockage pour DFA de Rokkasho-mura de JNFL
Emplacement	Rokkasho, Japon

Description	Dépôt du type enceinte de béton pour DFMA à vie courte construit spécialement à cette fin à approximativement 10 m sous la surface du sol (base des enceintes).
Capacité	Installation de stockage numéro 1 : 40 000 m^3 Installation de stockage numéro 2 : 40 000 m^3 Expansions prévues pour les deux installations pour atteindre un total de 600 000 m^3 (3 millions de fûts).
Historique	Début de la construction : 1990 Début de l'exploitation : 1992 (installation de stockage numéro 1); 2000 (installation de stockage n° 2) Fermeture : (prévue dans le futur)
Types de déchets	DFMA à vie courte, principalement issus de l'exploitation des centrales nucléaires. L'installation de stockage n° 1 est destinée aux déchets solidifiés homogènes (par exemple des résines échangeuses d'ions, concentrés, etc.). L'installation de stockage n° 2 est destinée aux déchets compactés et solidifiés (par exemple, métaux, béton, etc.).
Caractéristiques principales	Enceintes en béton construites dans de grandes fosses excavées de 15 à 20 m sous la surface jusqu'au substratum rocheux. Les enceintes de l'installation n° 1 mesurent 24 m x 24 m x 6 m de haut, et sont subdivisées en 16 alvéoles de 6 m x 6 m contenant chacune 320 fûts (8 étages de 8 x 5 fûts empilés horizontalement). Les enceintes de l'installation n° 2 mesurent 36 m x 36 m x 7 m de haut et sont subdivisées en 36 alvéoles, chacune contenant 360 fûts (9 couches de 8 x 5 fûts empilées horizontalement). La plupart des déchets sont placés dans des fûts de 200 L en acier au carbone. Un manipulateur de fûts automatisé place une rangée de 8 fûts à la fois. Les espaces entre les fûts sont remplis de béton. Les enceintes sont recouvertes de béton. Système de recouvrement multicouche prévu avec différentes couches imperméables et de drainage.
Commentaires	À la fin de 2016, l'installation n° 1 contenait approximativement 147 000 fûts (~29 000 m^3) et l'installation n° 2 approximativement 113 000 fûts (~22 600 m^3). Un stockage à profondeur intermédiaire (~100 m) pour DFA plus radioactifs est prévu sur le même site, à partir de 2023 approximativement.
Référence	[JAPON 2017]

Nom	Centre de stockage de DFMA de Wolsung

Emplacement	Wolsung, Gyeongju, Corée du Sud
Description	Dépôt à cavernes rocheuses en silo construit à cette fin. Creusé à une profondeur de 150 à 200 m sous la surface du sol dans un substratum rocheux de granodiorite.
Capacité	20 000 m^3 de déchets au total dans les six silos de la première phase. Expansion jusqu'à 160 000 m^3 prévue.
Historique	Site choisi : 2006 Début de la construction : 2008 Début de l'exploitation : 2014 Fermeture : (prévue dans le futur)
Types de déchets	DFMA à débit calorifique inférieur à 2 kW/m^3. Limites supérieures de concentration pour certains nucléides, notamment H-3, C-14, Co-60, Ni-59, Ni-63, Sr-90, Nb-94, Tc-99, I129, Cs-137, et pour les rayonnements alpha bruts.
Caractéristiques principales	Les silos mesurent approximativement 24 m de diamètre intérieur et 35 m de haut. Revêtement en béton de 0,6 m d'épaisseur avec système de drainage artificiel entre le revêtement et la roche. Silos distincts pour les différents types de déchets. Accès par deux tunnels à rampe – l'un allant au sommet des silos pour la manutention des déchets, l'autre au fond pour l'accès aux travaux de construction. Fûts placés dans des conteneurs de stockage en béton : conteneurs de 16 colis de stockage (4×4) pour les fûts de 200 L et conteneurs de 9 colis (3×3) pour les fûts de 320 L. Les conteneurs de stockage sont empilés dans les silos à l'aide d'un pont roulant. La partie supérieure des silos remplis sera remblayée avec de la roche concassée. Des bouchons en béton seront insérés dans les tunnels d'entrée en haut et en bas de chaque silo. Les tunnels d'accès interreliés seront remblayés avec de la roche concassée. Les tunnels de la rampe de transport principale seront fermés par des bouchons de béton à des endroits stratégiques, sans remblai systématique.
Commentaires	En décembre 2016, l'installation contenait approximativement 1400 m^3 de déchets. La restriction sur la concentration de C-14 (2,22 E+5 Bq/g) exclurait les résines échangeuses d'ions du système modérateur d'une centrale CANDU. Agrandissement avec un dépôt près de la surface de type français en cours de construction sur le site.
Référence	[CORÉE 2017]

Nom	El Cabril (Almacén Centralizado de Residuos Radiactivos de Baja y Media Actividad El Cabril)
Emplacement	Cordoba, Espagne
Description	Dépôt à enceintes de béton pour DFMA à vie courte construit spécialement à cette fin.
Capacité	Capacité actuelle : 37 000 m^3 Expansion envisagée jusqu'à 90 000 m^3.
Historique	Site choisi : 1986 Début de la construction : 1990 Début de l'exploitation : 1992 Fermeture : (prévue dans le futur)
Types de déchets	DFMA à vie courte
Caractéristiques principales	Déchets normalement compactés et/ou emprisonnés dans du coulis à l'intérieur de fûts de 200 L ou des caissons en acier de 1,3 m^3. Les fûts et les caissons sont encapsulés dans des colis de stockage en béton de 2,2 m x 2,2 m x 2,2 m (11 m^3), ce qui équivaut approximativement à 25 tonnes de poids brut par colis. Des structures d'empilage en acier sont également utilisées au lieu des caissons de béton pour certains fûts de moindre activité. Les conteneurs de stockage en béton sont empilés directement dans des enceintes en béton de 24 m x 19 m x 9 m de haut à l'aide d'un pont roulant. Un abri mobile contre les intempéries protège les enceintes ouvertes pendant la mise en place des déchets. Les espaces entre les conteneurs sont remblayés avec du gravier. Les enceintes sont recouvertes de béton. Système de recouvrement multicouche prévu avec différentes membranes et couches de drainage. Les eaux de drainage sont recueillies et leur radioactivité est surveillée.
Commentaires	À la fin de 2016, approximativement 32 000 m^3 de DMA avaient été stockés au dépôt d'El Cabril.
Référence	[ESPAGNE 2017]

Nom	SFR (Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall)
Emplacement	Forsmark, Suède
Description	Dépôt à cavernes rocheuses et silo construit spécialement à cette fin. Creusé à une profondeur de 50 m sous le fond de la mer dans un substratum rocheux granitique.

Capacité	63 000 m^3, expansion jusqu'à 200 000 m^3 prévue.
Historique	Début de la construction : 1983 Début de l'exploitation : 1988 Expansion : prévue pour les années 2020 Fermeture : (prévue dans le futur)
Types de déchets	DFMA à vie courte, débit de dose maximal de 500 mSv/h pour les colis de déchets.
Caractéristiques principales	Rampe d'accès, à approximativement 1 km du rivage, sous la mer Baltique. Quatre cavernes rocheuses pour différents types de déchets. Dimensions : 160 m de long x 15 à 19 m de large x 10 à 17 m de haut, ventilation continue. L'une des cavernes est divisée en 15 compartiments où les déchets sont placés par un pont roulant. D'autres cavernes sont à accès routier et les déchets y sont placés à l'aide d'un chariot élévateur. 1 silo en béton pour les déchets les plus radioactifs, 30 m de diamètre x 50 m de haut, divisé en puits d'approximativement 2,5 m x 2,5 m. Le silo et 3 des 4 cavernes seront remblayés avec du coulis et/ou un mélange de bentonite lorsqu'ils seront remplis de déchets. Aucun remblayage n'est prévu pour la caverne contenant les déchets les moins radioactifs. L'expansion prévue comprendra des cavernes supplémentaires de grande taille qui seront utilisées principalement pour les déchets de déclassement.
Commentaires	Approximativement 39 000 m^3 étaient stockés au SFR en décembre 2016.
Référence	[SUÈDE 2017]

Nom	Low Level Waste Repository
Emplacement	Drigg, Cumbria, Royaume-Uni
Description	Dépôt près de la surface pour DFMA à vie courte construit spécialement à cette fin à approximativement 5 m sous le niveau du sol à la base des enceintes.
Capacité	800 000 m^3 dans des tranchées revêtues d'argile 400 000 m^3 dans deux enceintes en béton Une expansion future de 600 000 m^3 supplémentaires dans des enceintes en béton est prévue (1,8 million m^3 au total pour le dépôt).
Historique	Début de l'exploitation : 1959 (stockage en tranchées peu profondes) L'exploitation des enceintes en béton a commencé en 1988 Fermeture : tranchées en argile – 1995. Enceintes en béton – (prévue dans le futur)
Types de déchets	DFMA à vie courte, rayonnements alpha < 4 000 Bq/g et bêta gamma < 12 000 Bq/g.

Caractéristiques principales	Les 7 tranchées d'argile mesuraient approximativement 750 m de long x 30 m de large x 5 à 8 m de profondeur. L'utilisation des tranchées en argile a été abandonnée en 1995 et elles sont maintenant fermées. Les deux nouvelles enceintes d'évacuation en béton mesurent approximativement 180 m de large x 200 m de long x 5 m de haut, et sont divisées en trois travées de 60 m de large chacune. Les enceintes sont construites sur une base en béton avec un système de drainage ouvragé, légèrement en dessous du niveau du sol. La plupart des déchets sont actuellement compactés et placés dans des conteneurs de fret ISO. Les conteneurs ISO sont empilés sur 4 étages pour les conteneurs à mi-hauteur ou sur 2 étages pour les conteneurs pleine hauteur, à l'aide d'un chariot élévateur de forte capacité. On n'utilise pas d'abri temporaire pendant la mise en place des déchets dans l'enceinte. L'eau de pluie pendant le chargement est recueillie et surveillée. Lors de la fermeture, les espaces vides autour des conteneurs seront remplis de coulis pour assurer la stabilité structurelle et le confinement, et les enceintes seront recouvertes d'un système multicouche. Une surveillance et un contrôle institutionnel sont prévus pendant une période de 100 ans après la fermeture.
Commentaires	L'inventaire total de déchets stockés était de 1 million de m^3 en avril 2016. Les précipitations moyennes dans la région sont d'environ 1200 mm.
Référence	[Royaume-Uni 2017]

Nom	WIPP (Waste Isolation Pilot Plant)
Emplacement	Carlsbad, NM USA
Description	Dépôt à cavernes rocheuses construit spécialement à cette fin. Creusé à 655 m de profondeur dans un lit de sel.
Capacité	175 000 m^3 (6,2 millions de pieds cubes)
Historique	Site choisi : 1974 Début de la construction : 1981 Prêt à l'exploitation : 1988 Début de l'exploitation : 1999 (retard dû à diverses contestations judiciaires) Expansion : nouvelles salles de stockage excavées « juste à temps » au besoin. Fermeture : (prévue dans le futur, vers 2035)
Types de déchets	Déchets liés à la Défense à manipulation directe et déchets TRU à manipulation télécommandée

Caractéristiques principales	Quatre puits verticaux : entrée d'air, sortie d'air, transport du sel et transport des déchets. L'accès du personnel se fait par le puits de transport du sel ou le puits de transport des déchets. L'évacuation d'urgence peut également se faire par le puits d'admission d'air. Le puits d'évacuation d'air n'est pas muni d'un treuil. Les salles de stockage sont excavées en sections de 7 salles à l'aide de fraiseuses. Chaque salle mesure approximativement 10 m de large x 92 m de long x 4 m de haut et est séparée par un pilier de sel non perturbé de 30 m de large. Les déchets à manipulation directe (débit de dose < 2 mSv/h) sont empilés sur des palettes dans les salles. Les déchets à manipulation télécommandée sont placés dans des trous de forage de 0,76 m de diamètre intérieur x 5 m de long, percés sur le côté des salles de stockage tous les 2,4 m avant le stockage des déchets à manipulation directe. Des déchets sont également placés dans les tunnels reliant les salles de stockage. Des sacs d'oxyde de magnésium (MgO) sont placés sur les piles de déchets. Ils sont utilisés pour constituer une barrière technique qui réduit la solubilité des éléments actinides dans les déchets TRU. Le MgO consomme essentiellement le dioxyde de carbone qui serait produit par la consommation microbienne de la cellulose, du plastique et du caoutchouc dans les déchets à manipulation directe mis en place. Les salles de stockage des déchets ne sont pas remblayées. On laisse les chambres se fermer par le fluage naturel de la formation de sel.
Commentaires	À la fin de 2016, le WIPP contenait approximativement 88 000 m^3 de déchets à manipulation directe et 2 400 m^3 de déchets TRU à manipulation télécommandée. L'exploitation de l'installation a été interrompue de février 2014 à janvier 2017 en raison d'un accident survenu en février 2014 qui a entraîné une contamination du sous-sol. Certaines sections de stockage sont désormais inutilisables.
Référence	[ÉTATS-UNIS 2017]

Références pour l'ANNEXE F :

FINLANDE 2017. « Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management: 6th Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention ». Rapport STUK-B 218 de la STUK, octobre 2017. URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_finland_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf

FRANCE 2017. « Sixième rapport national sur la mise en œuvre des obligations de la Convention commune ». Établi par l'Autorité de sûreté nucléaire, octobre 2017. URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/6rm-france.pdf

ALLEMAGNE 2017. « Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management Report of the Federal Republic of Germany for the Sixth Review Meeting ». Rapport préparé par le ministère fédéral de l'Environnement, de la conservation de la nature et de la sûreté nucléaire (BMU), août 2017. URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/jc6berichtdeutschlandenbf.pdf

HONGRIE 2017. « Republic of Hungary National Report - Sixth Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management ». Rapport préparé par l'Autorité hongroise de l'énergie atomique, octobre 2017. URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/jc6thnationalreporthungary.pdf

JAPON 2017. « Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management - National Report of Japan for the Sixth Review Meeting ». Octobre 2017. URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_japan_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf

CORÉE 2017. « Korean Sixth National Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management ». Rapport préparé par la Commission de sûreté et de sécurité nucléaires, octobre 2017. URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_republic_of_korea_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf

ESPAGNE 2017. « Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management Sixth Spanish National Report ». Octobre 2017. URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_spain_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf

SUÈDE 2017. « Sweden's sixth national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management ». Rapport préparé par le ministère de l'Environnement, report n° Ds 2017:51. URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/sweden-nr-6th-rm-jc.pdf

ROYAUME-UNI 2017. « The United Kingdom's Sixth National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management ». Rapport préparé par le ministère des Affaires, de l'Énergie et de la Stratégie industrielle, octobre 2017. URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_united_kingdom_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf

ÉTATS-UNIS 2017. « United States of America Sixth National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management ».

Rapport préparé par le Département de l'énergie, octobre 2017. URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/10-20-176thusnationalreportfinal.pdf