RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANDRA

PNGMDR 2022-2026

Schéma industriel pour la gestion des déchets tritiés

1ère partie : Définition des OPTIONS DE GESTION

(Articles 45 et 46 de l'arrêté du Ve PNGMDR)

DOCUMENT TECHNIQUE

Identification SFIRPASFP-24-0007
Date 25/04/2025 **Page** 1/48

SOMMAIRE

1. Introduction 6

1.1 Rappel historique 6
1.2 Objet du présent rapport 6
1.3 Périmètre de l'étude 7
1.4 Enjeux de la gestion des déchets tritiés 8
1.5 Références 9

2. Etat des lieux de la gestion des déchets tritiés 10

2.1 Déchets des Producteurs Non-Electronucléaires (PNE) 10
2.1.1 Inventaire 10
2.1.2 Gestion actuelle 12
2.2 Déchets produits par le CEA/DAM sur le site de VALDUC 13
2.2.1 Inventaire 13
2.2.2 Gestion actuelle 14
2.3 Déchets tritiés issus des activités historiques du CEA/DAM 14
2.3.1 Bruyères-le-Châtel 14
2.3.2 Marcoule 14
2.4 Déchets tritiés du CEA/Civil 15
2.4.1 Inventaire 15
2.4.2 Gestion actuelle 15
2.5 Déchets tritiés de l'Institut Laue Langevin (INB 67 - Grenoble) 16
2.5.1 Inventaire 16
2.5.2 Gestion actuelle 16
2.6 Déchets d'ITER 16
2.6.1 Inventaire 16
2.6.2 Gestion prévisionnelle 18

3. Synthèse des inventaires actuels et des inventaires à produire par nature et catégorie 19

4. Analyse des options de gestion 22

4.1 Traitement 22
4.1.1 Détritiation 22
4.1.2 Projets de valorisation de déchets métalliques 23
4.1.3 Projet de valorisation du tritium 24
4.1.4 Incinération dans l'installation Centraco 24
4.2 Conditionnement 25
4.3 Entreposage 27
4.4 Stockage 28
4.4.1 Le Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage (Cires) 28
4.4.2 Le Centre de Stockage de l'Aube (CSA) 30
4.4.3 Le projet de Centre industriel de stockage géologique (Cigéo) 33
4.4.4 De futurs centres de stockage de surface 34
4.4.5 Réflexions sur les options de stockage des déchets tritiés 34
4.4.6 Résumé des réflexions sur les options de stockage 37

5. Synthèse des options envisageables par nature physique 39

5.1 Déchets métalliques *40*
5.2 Déchets organiques solides *40*
5.3 Déchets inertes solides (minéraux / béton / …) *41*
5.4 Déchets de type zéolithe *41*
5.5 Déchets tritiés liquides *42*
5.6 Déchets tritiés gazeux *43*

6. Synthèse des enjeux et perspectives 44

LISTE DES FIGURES

Figure 3-1 Répartition des volumes équivalent conditionnés **actuels** de déchets tritiés (FMA-VC et TFA en m^3) en fonction des propriétaires de déchets 20
Figure 3-2 Répartition des volumes équivalent conditionnés de déchets tritiés (FMA-VC et TFA en m^3) **à l'horizon 2050-2060** en fonction des propriétaires de déchets 20
Figure 4-1 : Principe de conception du stockage au Cires 28
Figure 4-2 : Principe de conception du stockage au CSA 30
Figure 4-3 : Le projet de centre de stockage Cigéo 34
Figure 4-4 : Exemple d'architectures des alvéoles de stockage du programme FAVL 36
Figure 5-1 : Illustration des options de gestions envisageables pour les déchets métalliques 40
Figure 5-2 : Illustration des options de gestions envisageables pour les déchets organiques 40
Figure 5-3 : Illustration des options de gestions envisageables pour les déchets inertes 41
Figure 5-4 : Illustration des options de gestions envisageables pour les déchets liquides 42
Figure 5-5 : Illustration des options de gestions envisageables pour les déchets gazeux 43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Inventaire prévisionnel des déchets tritiés des producteurs non electro-nucléaires (PNE) à fin 2023 11
Tableau 2 : Synthèse des inventaires entreposés à fin 2022/2023 et à produire d'ici 2050-2060 21

1. Introduction

1.1 Rappel historique

Dans le cadre d'activités de recherche et développement, le CEA et des producteurs non électronucléaires ont produit et produisent toujours des déchets tritiés qui, du fait de leur activité en tritium, ne sont pas compatibles avec une prise en charge sur les centres de stockage de surface.

Les centres de stockage de surface de l'Andra n'étant pas conçus pour accueillir ces déchets, la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs [1] a prévu dans le cadre de la mise en place du premier Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) « la mise au point pour 2008 de solutions d'entreposage des déchets contenant du tritium permettant la réduction de leur radioactivité avant leur stockage en surface ou à faible profondeur », dont les prescriptions ont été fixées par le décret du 16 avril 2008. Ainsi, en décembre 2008, le CEA désigné comme pilote des études menées en collaboration avec l'Andra, a émis un dossier d'orientation dans lequel était proposé la mise au point de solutions d'entreposage pour les déchets contaminés par du tritium et non susceptibles d'être stockés directement dans les centres de stockage de l'Andra. Dans ce dossier d'orientation, la durée d'entreposage était fixée à 50 ans permettant d'attendre l'ouverture de futurs centres de stockages de l'Andra qui prendront en compte, dans leur dimensionnement, les caractéristiques des déchets tritiés en sortie d'entreposage. Cette proposition était assortie d'un échéancier des besoins d'entreposage et d'une évaluation des coûts associés.

Depuis 2009, en accord avec les orientations proposées par le CEA, le PNGMDR a établi la stratégie française de gestion des déchets tritiés basée sur les lignes directrices suivantes :

- traitement des déchets tritiés les plus actifs ;
- construction d'entreposages de décroissance radioactive du tritium sur des sites proches des sites de production ;
- prise en charge en stockage dans les centres de stockage (Andra) qui prendront en compte dans leur dimensionnement, les caractéristiques des déchets tritiés après un entreposage durant 50 ans ;
- prise en charge temporaire par le CEA sur son site de Valduc des déchets tritiés issus de la filière non électronucléaire (citée dans la suite du document sous l'acronyme « PNE » pour Producteurs Non Electronucléaire) sous réserve de l'accord de l'ASND.

Des solutions d'entreposage, par définition temporaire, ont été mises en œuvre par le CEA sur certains de ses centres en attente d'un envoi vers le stockage adéquat après décroissance du tritium.

Face aux prévisions actuelles de production de déchets tritiés du projet ITER, ainsi qu'aux difficultés récurrentes dans la gestion de ces déchets tritiés des producteurs non électronucléaires, il a été demandé dans le cadre de l'action DECPAR. 4 du PNGMDR 2022-2026 [2] relative aux déchets particuliers, que la stratégie d'entreposage mise en œuvre depuis 2008 ainsi que les options de gestion de ces déchets tritiés soient requestionnées.

1.2 Objet du présent rapport

Dans le cadre de l'action DECPAR. 4 du PNGMDR 2022-2026 relative aux déchets particuliers [2], l'arrêté du 9 décembre 2022 [3] pris en application du décret n°2022-1547 du 9 décembre 2022 établissant les prescriptions du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs prescrit les demandes relatives aux déchets tritiés suivantes :

« Art. 45. – Pour l'application de l'article D. 542-95 du code de l'environnement et de l'action nommée DECPAR.4 du PNGMDR, l'Andra poursuit les travaux engagés pour identifier les filières de gestion des déchets tritiés liquides et gazeux des producteurs non électronucléaires, dans l'objectif de définir des filières de gestion d'ici le 31 décembre 2025.

Art. 46. – Pour l'application de l'article D. 542-95-1 du code de l'environnement et de l'action nommée DECPAR.4 du PNGMDR, l'Andra propose, en lien avec le CEA et ITER Organization, avant le 30 juin 2023, des scénarios de gestion pour l'ensemble des déchets tritiés présents sur le territoire national, sur la base d'un inventaire consolidé. Ces scénarios prévoient la mise en œuvre de capacités d'entreposage suffisantes, en particulier pour les déchets fortement tritiés et les sources contenant du tritium des petits producteurs. Ces scénarios sont discutés devant la commission de gouvernance du PNGMDR. L'Autorité de sûreté nucléaire est saisie pour avis sur les enjeux de sûreté et de radioprotection de ces scénarios de gestion.

Art. 47. – Pour l'application de l'article D. 542-95-1 du code de l'environnement et de l'action nommée DECPAR.4 du PNGMDR, l'Andra, en lien avec le CEA et ITER Organization, élabore, avant le 30 juin 2026, un schéma de gestion de l'ensemble des déchets tritiés. L'Andra présente les flux prévisibles de déchets à gérer et le calendrier de mise en œuvre associé, en détaillant les dates de dépôt des dossiers correspondant à la création de nouvelles installations ou à la modification d'installations existantes. L'Andra présente une synthèse de ses travaux à la Commission de gouvernance du PNGMDR avant le 30 mars 2026 ».

Le présent document vise à répondre à l'article 45 et 46 du décret PNGMDR du 09/12/2022 portant sur l'identification des filières de gestion des déchets tritiés liquides et gazeux des producteurs non électronucléaires ainsi que sur la présentation des options de gestion des déchets tritiés solides. Il pourra être utilisé comme support et donnée d'entrée pour l'analyse multicritères qui sera réalisée pour la suite des développements en lien avec la gestion des déchets tritiés[1].

Ce rapport a pour objectif de présenter l'ensemble des options de gestion actuelles et envisageables pour les déchets tritiés compte-tenu des connaissances et de l'inventaire de ces déchets, afin de poser les bases de réflexion pour améliorer la gestion future des déchets tritiés en France.

Plus précisément, l'Andra, en lien avec les producteurs, a synthétisé les pratiques actuelles et identifié les options de gestion envisageables pour chaque famille de déchets en examinant les solutions de gestion existantes au regard de leur domaine de fonctionnement, ainsi que les solutions de gestion qui sont en projet, mais également d'autres options de gestion qu'il parait pertinent de prendre en considération à ce jour.

Notion d'« option de gestion »

Le terme « **option de gestion** » a été préféré dans le présent document au terme « scénarios de gestion », afin de lever toute ambiguïté avec d'autres utilisations du terme scénario, notamment dans le cadre de l'Inventaire National. Dans le présent exercice, les options étudiées sont les options de traitement, de conditionnement et d'entreposage ainsi que les options définitives de type stockage ou incinération.

Comme notifié par l'article 46 précité, l'ASN formulera un avis sur le présent rapport. Par la suite, le Plan prévoit l'élaboration d'un schéma de gestion de l'ensemble des déchets tritiés à horizon du 30/06/2026 selon l'article 47 de l'arrêté PNGMDR précité [3] .

Le présent document est composé des parties suivantes :

- *La <u>présentation des déchets étudiés</u> déclinés par producteur ;*
- *Une <u>vision synthétique des déchets et de leurs enjeux</u> au regard des options de gestion ;*
- *Les <u>divers traitements, conditionnements et entreposage</u> déjà industrialisés ou en développement qui pourront influencer les options de gestion long terme ;*
- *La <u>description des options de stockage</u> qui sont susceptibles d'accueillir les déchets tritiés.*

1.3 Périmètre de l'étude

Les **déchets radioactifs** sont définis par le Code de l'environnement (Art. L542-1) comme étant « *des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée. La gestion des déchets radioactifs comprend toutes les activités liées à la manipulation, au prétraitement, au traitement, au conditionnement, à l'entreposage et au stockage des déchets radioactifs, à l'exclusion du transport hors site.* »

Beaucoup de déchets radioactifs contiennent du tritium, en proportions très variables, et parfois à l'état de simples traces. Cependant, tous ne sont pas qualifiés de « déchets tritiés », car cette qualification dépend du spectre global des radionucléides contenus dans les déchets et de leur activité radiologique. De façon générale, les « déchets tritiés » sont des déchets pouvant contenir un ou plusieurs radionucléides, parmi lesquels le tritium est présent en quantité significative.

[1] l'ASN recommande, dans son avis n° 2021-AV-0373 du 26 janvier 2021 sur les études relatives à la gestion des stockages historiques [16] qu'une méthodologie d'analyse multicritères soit développée pour identifier les solutions de gestion les plus adaptées à certaines catégories particulières de déchets radioactifs, en veillant à mettre en œuvre une démarche proportionnée aux enjeux de chaque filière.

Dans le contexte de cette étude, il est important de définir précisément les « déchets tritiés » pris en considération. Pour ce faire, l'Andra définit dans l'Inventaire National (Synthèse IN2023 p211 [4]) les déchets tritiés comme étant des « déchets radioactifs, contenant du tritium, pouvant nécessiter une gestion spécifique compte tenu de la grande mobilité de cet élément ».

Pour définir ce qu'est un déchet tritié, l'Andra s'appuie également sur les activités générant des déchets tritiés qui sont :

- les activités de recherche et développement (R&D) réalisées par le CEA civil et associées avec une production ou utilisation de tritium ;
- les activités liées au maintien de la force de dissuasion réalisées par la Direction des Applications Militaires (DAM) du CEA ;
- les activités liées aux développements de la fusion thermonucléaire tel ITER (et basée sur des réactions de fusion deutérium-tritium (D-T)) ;
- les activités liées aux applications industrielles non électronucléaires (R&D, marquage radiochimique, surveillance, …) produisant des déchets tritiés en petites quantités et rassemblés sous le vocable de Producteurs Non Electronucléaire (PNE).

En synthèse, et conformément à l'orientation du PNGMDR (2022-2026), seront étudiés dans le cadre de ces options de gestion les déchets identifiés comme posant une difficulté ou une impossibilité de prise en charge sur les centres de stockage à un instant t du fait de leur activité, de leur dégazage en tritium ou encore de leur grand nombre.

1.4 Enjeux de la gestion des déchets tritiés

Le tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène dont la période radioactive est de 12,35 ans et qui est dès lors considéré selon la classification française de la gestion des déchets radioactifs comme un radionucléide à vie courte. Son activité spécifique est de 359 TBq/g. Selon le livre blanc de l'ASN [5], il est peu radiotoxique et présente à lui seul un impact sanitaire généralement négligeable.

Au niveau atomique, le tritium est un élément de très petite taille qui lui permet de traverser tous les matériaux usuels utilisés dans le cadre d'une installation de stockage de déchets radioactifs, tels que les matériaux cimentaires. Ses caractéristiques de diffusion et de perméation sous forme atomique en font un radionucléide difficile à contenir ou plus précisément à confiner.

Le tritium existe sous plusieurs formes chimiques, les plus communément rencontrées dans les centres de stockage étant l'hydrogène tritié ou tritium gazeux (HT) et l'eau tritiée (HTO). L'état liquide ou vapeur de l'eau tritiée ajoute encore un niveau de complexité supplémentaire puisque, en fonction des conditions de température et de pression, le tritium pourra se retrouver dans l'environnement sous forme liquide ou gazeuse et suivra naturellement le cycle de l'eau. On notera que le tritium peut également être lié à la matière organique (TOL) et va alors avoir des comportements très différents en fonction du type de liaison et de la matière organique à laquelle il est lié.

De par la difficulté à confiner durablement le tritium, la gestion à long terme des déchets tritiés pose donc la question de l'acceptabilité d'un marquage en tritium de l'environnement autour du(des) stockage(s) ou de l'entreposage, cela même sans qu'un effet sanitaire notable pour l'homme ne soit généré.

A cet égard, le retour d'expérience acquis en matière de conception et d'exploitation du stockage du centre de la Manche (CSM), actuellement en phase de démantèlement , et le risque de marquage de la nappe phréatique au niveau du CSA [5] ainsi que les contraintes radiologiques d'exploitation ont conduit l'Andra à limiter fortement les quantités de tritium susceptibles d'être acceptées au Centre de Stockage de l'Aube (CSA).

Les critères, règles et contraintes applicables au tritium sur les centres en exploitation et en projet de l'Andra sont décrites au paragraphe 4.4. Ces contraintes fortes sur les prises en charge en stockage au CSA sont à l'origine de l'établissement de la stratégie d'entreposage de 2008 décrite ci-avant et justifient que des options de gestion particulières pour les déchets tritiés soient (ré-)étudiées.

1.5 Références

[1] Loi 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs

[2] Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs 2022-2026 (Ve PNGMDR)

[3] Arrêté du 9 décembre 2022 pris en application du décret no 2022-1547 du 9 décembre 2022 prévu par l'article L. 542-1-2 du Code de l'environnement et établissant les prescriptions du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs

[4] Inventaire National de l'Andra

[5] Livre Blanc du Tritium – ASN, 2010, mis à jour en 2021 - https://www.asn.fr/sites/tritium/

[6] 8e rapport sur la mise en œuvre de la Convention commune sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs

[7] Décret n° 2022-174 du 14 février 2022 relatif à la mise en œuvre d'opérations de valorisation de substances faiblement radioactives

[8] Décret n° 2022-175 du 14 février 2022 relatif aux substances radioactives éligibles aux opérations de valorisation mentionnées à l'article R. 1333-6-1 du Code de la santé publique

[9] Schéma Industriel pour la gestion des déchets TFA 1ère partie : Définition des OPTIONS de gestion (Action TFA.4 et article 17 de l'arrêté du Ve PNGMDR), 2023

[10] Stratégie de gestion des déchets tritiés incinérables – CEA/DAM/DMNP/DO28 du 22/03/2018

[11] Manonne F. : "Immobilization of tritiated waste water by hydraulic cements : a survey of the state of the art", Nuclear Science and Technology, Commission of the European Communities, report n° EUR 11230 EN (1987)

[12] Manonne F. : « Management of tritium contaminated wastes : a survey of alternative options », Nuclear Science and Technology, Commission of the European Communities, report n° EUR 12526 EN (1990)

[13] Proposition de cadrage des démarches de création d'un nouveau centre de stockage pour les déchets TFA (Action TFA.2 - Article 15 de l'Arrêté du 9.12.22 d'application du Ve PNGMDR)

[14] Analyse comparative de l'impact sur l'Environnement de l'incinération de déchets de très faible activité par rapport au stockage direct de ces déchets – Actualisation de l'étude de 2018 (Article 23 de l'Arrêté du 9.12.22 d'application du Ve PNGMDR) - SFIRPASFP230007 de Juin 2023

[15] Évaluation de la faisabilité d'un stockage à faible profondeur de déchets de faible activité à vie longue dans la formation argileuse du site de la Communauté de Communes de Vendeuvre-Soulaines - Dossier d'options techniques et de sûreté - Article 33 de l'arrêté PNGMDR du 9 décembre 2022 - FRPASFP240001/A.

[16] Avis ASN N°2021-AV-0373 du 26 janvier 2021 (méthodologie d'analyse multi-critères - AMCMA)

2. Etat des lieux de la gestion des déchets tritiés

Un inventaire des déchets actuellement en stock ou à produire jusqu'en 2060 a été élaboré. En se fondant sur celui-ci, les déchets pris en compte dans ce dossier proviennent :

- pour l'essentiel, des activités militaires du CEA : déchets d'exploitation et futurs déchets de démantèlement des installations des INBS du CEA ;
- des activités civiles du CEA : déchets issus des recherches liées aux sciences du vivant et issus des réacteurs de recherche ;
- des déchets produits par les « producteurs non électronucléaires » (PNE) et la défense nationale, tels que décrit dans l'Inventaire National de l'Andra.

L'installation ITER deviendra à l'horizon 2040 le premier producteur de déchets tritiés en quantité, d'abord dans sa phase d'exploitation puis en phase de démantèlement.

Cette section présente d'une part les inventaires de déchets tritiés par producteur, d'autre part la gestion actuelle ou envisagée, pour les déchets tritiés qui ne sont pas encore produits. Les données présentées dans cette section ont été établies en lien avec les producteurs de déchets.

Selon l'état de production des déchets et/ou de leurs conditions d'entreposage, les volumes de déchets tritiés peuvent être des volumes bruts (non conditionnés), des volumes conditionnés pour l'entreposage ou encore des volumes conditionnés en vue du stockage.

Définition de « volume équivalent conditionné » [4]

L'unité adoptée pour effectuer les bilans est le « volume équivalent conditionné ». Cela permet d'utiliser une unité de compte homogène pour l'ensemble des déchets. Les volumes de déchets recensés correspondent aux volumes de déchets conditionnés, c'est-à-dire pour lesquels aucun traitement complémentaire n'est envisagé par leurs producteurs avant stockage. Les déchets ainsi conditionnés constituent des colis primaires.

Pour les déchets dont le conditionnement n'est pas connu à ce jour, des hypothèses de travail sont faites pour évaluer le volume équivalent conditionné correspondant au colis primaire envisagé selon les hypothèses à date.

Un colis primaire peut éventuellement être placé dans un conteneur de stockage afin d'assurer des fonctions de manutention, de confinement et potentiellement de récupérabilité. Ce volume n'est pas considéré dans le « volume équivalent conditionné ».

Pour rappel, le conditionnement est l'opération qui consiste à placer des déchets dans un contenant adapté à leur niveau de radioactivité et à leur durée de vie, et à les immobiliser le cas échéant avec un matériau de blocage ou d'enrobage.

2.1 Déchets des Producteurs Non-Electronucléaires (PNE)

2.1.1 Inventaire

Le vocable « producteurs non électronucléaires » (PNE), ou « nucléaire diffus », rassemble au total plus de 1000 producteurs de déchets répartis sur le territoire national français. Il s'agit :

- des organismes de recherche privée et publique ;
- des industries, des hôpitaux … ;
- des entreprises chargées du démontage de paratonnerres ou de détecteurs de fumée chez les particuliers ou les collectivités notamment ;
- des communes, des lycées … ;
- des propriétaires de sites pollués par de la radioactivité ;
- des exploitants de centres de stockage de déchets conventionnels ;
- des forces armées utilisant du matériel marqué au tritium.

Les caractéristiques des déchets tritiés des producteurs non électronucléaires sont telles qu'ils ne peuvent être pris en charge, à date, dans l'une des filières opérationnelles existantes, c'est à dire le stockage au Cires ou au CSA, l'entreposage sur le Cires ou l'incinération dans l'installation Centraco exploitée par Cyclife France. Il convient de noter que l'essentiel des déchets (très) faiblement tritiés des PNE est par ailleurs pris en charge dans ces filières opérationnelles lorsqu'ils en respectent les critères d'acceptation (voir §4.4). Aussi, conformément à la définition donnée ci-avant, seuls les déchets tritiés des PNE ne respectant pas les critères d'acceptation des différentes filières sont pris en compte pour le présent rapport ; Ils sont décrits dans l'inventaire présenté ci-après.

2.1.1.1 Nature et volumes des déchets tritiés produits (et à produire)

Les déchets tritiés des PNE peuvent se répartir en trois catégories, suivant la forme physique sous laquelle se trouve le tritium :

1) <u>Déchets tritiés solides</u>

Les déchets solides sont essentiellement des déchets contaminés par des peintures radioluminescentes au tritium utilisées pour permettre la vision nocturne (réveils, montres, plaques de signalisation, plaques et ampoules indiquant les sorties de secours). Ils représentent plus de 72 % du volume équivalent conditionné des déchets tritiés des PNE.

2) <u>Déchets tritiés liquides</u>

La principale source de déchets liquides tritiés présentant des difficultés de gestion provient de boussoles contenant du white spirit contaminé dont l'activité est conséquente. Le liquide des boussoles Silva, par exemple, contient environ 20 MBq de tritium par objet, soit un total d'environ 1 TBq et 500 L de liquide (solvant) pour les 50 000 boussoles estimées. Ces objets sont principalement détenus par les armées.

3) <u>Déchets tritiés gazeux</u>

Trois catégories de déchets tritiés gazeux sont à considérer :

- Les parafoudres (ou parasurtenseurs) : pour la très grande majorité des inventaires connus, le détenteur principal, Orange, a depuis plusieurs années entrepris leur dépose sur son réseau national. Après dépose, les parasurtenseurs repris font l'objet d'un entreposage tampon sur des installations internes avant d'être transférés vers un entreposage sécurisé dans des installations externes. A terme, environ 7 tonnes de parafoudres au tritium auront été collectés par Orange. Il convient de noter qu'Orange détient au total 11 tonnes de parafoudres tous radionucléides confondus (tritium, Pm147).
- Les ampoules de gaz issues d'utilisations des propriétés radio-luminescentes du tritium (ampoules dans les goniomètres, couteaux de survie, ...) : ces ampoules, dont le nombre est de quelques dizaines, étaient utilisées dans le domaine civil. Il s'agit principalement d'objets en verre de petites dimensions qui contiennent du gaz tritié (sources tritium gaz, ampoules radio-luminescentes).
- Les panneaux de sortie d'urgence : dans ces objets, le tritium était présent, soit sous forme solide, soit sous forme d'ampoules gazeuses serties, selon la date de production des panneaux. Ils ont été pour la plupart fabriqués outre-Atlantique (USA ou Canada) et font l'objet d'une reprise par plusieurs opérateurs nord-américains, licenciés par la Nuclear Regulatory Commission (NRC). Ils ne nécessitent donc pas la mise en place d'une filière dédiée en France.

2.1.1.2 Synthèse de l'inventaire des déchets tritiés PNE

A cause de la complexité de la caractérisation chimique et radiologique des déchets tritiés PNE et de son caractère souvent destructif, il s'avère difficile d'en réaliser un inventaire prospectif précis. Le tableau suivant est néanmoins représentatif de l'inventaire global de ces déchets à fin 2023.

Déchets tritiés PNE	Volume équivalent conditionné (m^3)	Activité (TBq)
Solide	39	101
Liquide / Gaz	15	20

Tableau 1 : Inventaire prévisionnel des déchets tritiés des producteurs non électro-nucléaires (PNE) à fin 2023

Les déchets tritiés des PNE sont essentiellement des déchets historiques, c'est-à-dire déjà produits. L'inventaire correspondant ne sera donc pas amené à évoluer significativement, compte tenu de l'arrêt d'utilisation du tritium pour ce type d'activités. Le gisement se tarira au fur et à mesure de la reprise.

2.1.2 Gestion actuelle

Filière de gestion des déchets solides tritiés des producteurs non électronucléaires

Pour les déchets solides tritiés PNE ne pouvant être pris en charge dans les filières opérationnelles, ceux-ci sont entreposés pour décroissance dans des installations dédiées du CEA sur son site de Valduc. Depuis 2011, cette prise en charge en entreposage et les conditions opérationnelles associées sont conjointement définies entre l'Andra et le CEA dans des conventions et soumises à validation de l'ASND.

Filière de gestion pour les déchets tritiés liquides PNE

Ces déchets liquides sont principalement entreposés dans des installations dédiées des armées. Dès que jugés compatibles avec les critères d'admission, les déchets tritiés liquides PNE entrent dans une filière opérationnelle dont l'Andra est la porte d'entrée[2], et sont préparés puis traités dans l'installation Centraco. Les règles d'assemblages appliquées dans cette filière ont pour objectif de lisser des caractéristiques radiologiques et/ou physico-chimiques (pH, …) afin de satisfaire aux spécifications d'entrée de l'incinérateur.

Filières de gestion pour les déchets gazeux PNE

Concernant les parasurtenseurs d'Orange, une étude de l'Andra a été lancée sur leurs filières d'élimination début 2019. Dans l'attente de l'obtention des caractérisations des déchets demandées, ceux-ci ont été déposés et orientés vers un site d'entreposage externe en l'attente des solutions de gestion définitive. A noter, que l'étude concerne plus globalement les parafoudres d'Orange (dont la masse totale tous radionucléides est estimée à 11 tonnes), elle est donc plus large que la seule étude des parasurtenseurs tritiés.

Les filières étudiées par l'Andra sont les suivantes :

- pour un peu moins de la moitié (en volume) des parasurtenseurs tritiés, une orientation en stockage TFA est envisagée et une demande sera réalisée auprès de la DREAL dans ce sens par l'Andra. La problématique des gaz occlus pour ces déchets est réduite selon des investigations menées par Orange, aboutissant à la conclusion que le gaz vecteur contenu dans les parasurtenseurs est de l'Argon. Des investigations complémentaires demandées par l'Andra en 2019 et menées par Orange pour un panel plus important de parafoudres permettront de vérifier l'absence de gaz non inerte.
- pour la seconde partie des parasurtenseurs tritiés d'Orange, dont les activités en tritium par objet sont plus élevées mais toujours relativement faibles, l'inventaire total en tritium (environ 120 GBq) apparaît compatible avec les capacités de l'entreposage de l'Andra sur le Cires (2 TBq max.) en attente d'une décroissance suffisante du tritium pour permettre d'envisager des solutions de gestion dans les filières opérationnelles de stockage, sous réserve de la compatibilité des niveaux de dégazage des colis de parasurtenseurs avec le référentiel du bâtiment. A cette fin, l'Andra a demandé fin 2019 à Orange de réaliser des mesures de dégazage sur les fûts de déchets afin de vérifier la compatibilité avec la spécification d'acceptation en entreposage.

Il est à noter que d'autres organismes détiennent des parasurtenseurs. A ce stade, les processus d'inventaire viennent d'être engagés par leurs détenteurs afin de déterminer les volumes en jeu.

Concernant les autres déchets gazeux (ampoules de gaz issus d'utilisations diverses), les quantités détenues par les propriétaires sont en règle générale très faibles (quelques objets) et la problématique se situe davantage au niveau des activités individuelles élevées de ces objets (pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de GBq par objet).

[2] Pour cette raison, cette filière est souvent appelée filière Andral/PNE

2.2 Déchets produits par le CEA/DAM sur le site de VALDUC

La Direction des Applications Militaires (DAM) du CEA met en œuvre du tritium au sein notamment d'installations du Centre de Valduc. La mise en œuvre du tritium étant réalisée dans des installations dédiées, les déchets générés par ces activités sont des déchets tritiés purs. Cependant, il existe de petites quantités de déchets particuliers, tels que par exemple :

- des déchets avec présence d'uranium, anciennement utilisé pour ses propriétés adsorbantes de l'hydrogène ;
- des déchets avec présence de certains autres radionucléides d'activation ou de produits de fission à vie longue ou courte en faibles quantités.

2.2.1 Inventaire

L'inventaire des déchets tritiés produits et à produire par le site CEA de Valduc[3] est trié et organisé selon la provenance, le niveau de dégazage et la nature physique des déchets et comporte les typologies de déchets suivantes :

- 10 catégories de déchets FMA-VC
  - ✓ Déchets tritiés solides peu dégazants en fûts de 100 L et 200 L
  - ✓ Déchets tritiés solides dégazants en fûts de 100 L et 200 L
  - ✓ Déchets alpha tritiés solides dégazants en fûts de 100 L et 200 L
  - ✓ Déchets tritiés Liquides scintillants (> 16 MBq/L) en bidons
  - ✓ Huiles tritiées (> 16 MBq/L) entreposées en cuves pour décroissance T
  - ✓ Zéolithe tritiée entreposée en fût de 223 L *****
  - ✓ Déchets tritiés historiques conditionnés en caissons 5 m^3 en provenance du Centre de la Manche (Andra - CSM)
  - ✓ Déchets tritiés solides CEA Civil & PNE (Andra) en fûts de 100 L et 200 L entreposés *****
  - ✓ À venir (futur) : déchets tritiés Irradiants conditionnés en CBF-C2K *****
  - ✓ À venir (futur) : déchets tritiés mixtes (beta/gamma) en fût de 200 L *****
- 4 catégories de déchets TFA
  - ✓ Des déchets technologiques TFA tritiés (surchaussures en fûts de 200 L compactables *évacuables actuellement)*
  - ✓ Déchets tritiés métal & plastiques rigides (non compactables) en casiers C1 *évacuables actuellement*
  - ✓ Déchets tritiés divers (compactable ou non) en GRVS *évacuables actuellement*
  - ✓ Lingots métalliques issus de la fusion des métaux très dégazants
- 1 catégorie de déchets TFA (déchets tritiés liquides scintillants et huiles < 16 MBq/L) évacuables vers l'installation Centraco via la filière PNE décrite précédemment ;
- 1 catégorie de déchets TFA évacuables vers l'installation Centraco (peintures/solvants <<16 MBq/L) *****[4]
- 1 catégorie (mercure tritié) de déchets sans filière identifiée (déchets mercuriels tritiés entreposés en armoires ventilées pour décroissance)

Le CEA Valduc indique qu'à date du 31/12/2022, 19 434 colis de déchets solides tritiés sont entreposés sur site, ainsi que 5 932 litres de déchets liquides tritiés (en bidons ou en cuves). Ces déchets représentent une masse de 2 069 t pour un volume équivalent conditionné de 4 215 m^3.

[3] données actualisées d'inventaire de déchets tritiés de 2022 à 2050
[4] * catégorie de déchets mentionnée en supplément aux télédéclarations de l'Inventaire National (donné pour cohérence et exhaustivité)

En moyenne, selon les hypothèses de production retenues pour la période 2023-2050, le CEA Valduc estime qu'il produira annuellement environ 162 t de déchets toutes catégories confondues. Cela représente un volume de production de déchets tritiés d'environ 300 m^3 (équivalent conditionné) en moyenne par an. Ce volume correspond à une production annuelle de 1 316 colis de déchets solides et 1016 L de déchets liquides toutes catégories confondues, pour un inventaire estimé à horizon 2050 de 56 284 colis de déchets solides et 34,4 m^3 de déchets liquides au total. Cet inventaire représentera une masse de déchets solides et liquides confondus de 6 583 t pour un volume de 12 534 m^3 équivalent conditionné. L'inventaire prévisionnel de déchets liquides s'élève à 34,4 m^3 équivalent conditionné.

2.2.2 Gestion actuelle

L'ensemble des déchets tritiés produits par le CEA DAM est entreposé sur le site de Valduc, dans des bâtiments dédiés à chaque catégorie de déchets, dans l'attente du respect des critères d'acceptation des filières existantes ou d'une filière définitive d'élimination (à l'Andra pour stockage ou à Centraco pour incinération), ou encore pour valorisation. A ce stade, seul un petit pourcentage de déchets très faiblement tritiés est pris en charge sur le Cires.

Selon le niveau de dégazage des colis, les modalités de gestion actuelles sur le CEA Valduc sont les suivantes :

- Les déchets de première barrière sont composés exclusivement de métaux très dégazants (> 55,5 MBq/j/colis) : ils sont conditionnés temporairement en fûts étanches FE200 pour entreposage avant traitement et sont systématiquement traités par un procédé de détritiation par fusion. Leur fusion produit des lingots de métal présentant une teneur en tritium et un dégazage réduit. Les lingots sont ensuite entreposés dans un bâtiment en attente de statuer sur leur devenir (stockage TFA ou voire valorisation).
- Les déchets organiques (plastiques) très dégazants (> 55,5 MBq/j/colis) sont traités par un procédé intégrant déchiquetage, étuvage et compactage avant conditionnement en fût puis entreposage de décroissance.
- Les déchets dégazants (gants et structures de boites à gants (BAG) (< 55,5 MBq/j/colis) et les déchets peu dégazants (< 3,56 MBq/j/colis) tels que les équipements supports sans contact avec le fluide tritié, ne sont pas détritiés mais directement conditionnés en fût puis entreposés pour décroissance.
- Les déchets tritiés TFA composés de support de boites à gants (BAG), béton des cellules sont entreposés puis évacués au Cires en fonction des acceptations TFA obtenues.

2.3 Déchets tritiés issus des activités historiques du CEA/DAM

2.3.1 Bruyères-le-Châtel

Les déchets tritiés associés aux opérations de démantèlement des installations du site CEA de Bruyères-le-Châtel ont des caractéristiques radiologiques compatibles avec les critères d'acceptation du Cires et pour la grande majorité y ont été évacués directement entre 2010 et 2018.

Les déchets ne répondant pas aux spécifications du Cires ont été transférés sur le CEA de Valduc pour traitement et/ou entreposage.

2.3.2 Marcoule

Le site CEA de Marcoule a mis en œuvre des quantités significatives de tritium au sein de deux installations :

- les deux réacteurs Célestin, mis en service en 1967 et 1968 et actuellement en cours de démantèlement, dont la fonction était de produire du tritium pour les applications militaires,
- l'Atelier Tritium de Marcoule (ATM), arrêté depuis 2012, qui assurait l'extraction du tritium par fusion des éléments générés par les réacteurs Célestin.

Tout au long de l'exploitation de ces installations, des déchets contenant du tritium ont été entreposés en zone nord du site CEA de Marcoule et dans une cellule blindée de l'ATM. Ces déchets ne peuvent pas être pris en charge au CSA selon les critères d'acceptation en vigueur (décrits au paragraphe 4.4).

2.3.2.1 Inventaire

Un inventaire prévisionnel des déchets tritiés produits lors de l'exploitation des installations ATM et réacteurs Célestins a été établi par le CEA ; celui-ci sera consolidé et affiné au fur et à mesure des opérations de démantèlement des réacteurs Célestins et de l'ATM. Les déchets issus de ces opérations sont principalement :

- Les déchets tritiés entreposés sur l'installation Célestin. Ils représentent actuellement 2,21 m^3 de déchets solides non conditionnés et 0,6 m^3 de déchets liquides conditionnés en fûts de 120 L. A l'horizon 2060, les déchets solides seront conditionnés en conteneur à paroi plane (CPP) et représenteront alors un volume de 26,36 m^3.
- Les déchets tritiés entreposés sur l'installation ATM. Ces déchets représentent actuellement un volume de 13.91 m^3 non conditionnés. A l'horizon 2060, ces déchets seront conditionnés en fûts 223 L et conteneur à paroi plane (CPP) pour un volume total de 768,52 m^3.
- Les déchets tritiés entreposés sur l'Installation Zone Entreposage Nord (IZEN). Ces déchets représentent actuellement un volume de 32,59 m^3 non conditionnés. A l'horizon 2060, ces déchets seront conditionnés en conteneur à paroi plane (CPP) pour un volume total de 1 654 m^3.

  Les déchets tritiés futurs dont l'entreposage n'est pas encore défini. A l'horizon 2060, les déchets solides représenteront un volume de 111 m^3 et les déchets liquides un volume de 3 m^3 (fûts + bidons).

Selon le CEA, les déchets issus du démantèlement des réacteurs Célestins ne devraient pas produire de déchets fortement tritiés à entreposer pour décroissance. Aux déchets d'exploitation, s'ajouteront donc seulement les déchets issus du démantèlement de l'installation ATM.

2.3.2.2 Gestion actuelle

Les déchets tritiés du Centre de Marcoule sont actuellement entreposés pour décroissance sur le site CEA de Marcoule (en zone Nord ou en cellule blindée).

2.4 Déchets tritiés du CEA/Civil

La majeure partie de l'inventaire des déchets tritiés du CEA Civil est entreposée dans l'INB n°72 du site CEA de Saclay et sur le site CEA de Valduc.

2.4.1 Inventaire

Le CEA fait état de :

- 187 fûts 200 L entreposés à Saclay, pour un volume de 37 m^3 (incinérables et compactables : 2,2m^3 ; résines: 0,04m^3 ; compactables: 33,8m^3 ; divers: 1 ,4m^3) ;
- 524 fûts 200 L entreposés à Valduc, pour un volume de 99,72 m^3 (compactables et incinérables confondus) ;
- Un volume de 0,92 m^3 de déchets tritiés liquides entreposés en bidons.

Sur la période 2023-2060, le CEA prévoit la production de :

- 10 fûts par an destinés à l'entreposage sur Saclay.
- 4 fûts par an destinés à l'entreposage sur Valduc.

Cela conduira à un total cumulé de 1 242 fûts de 200 L produits en 2060, pour un volume de 249 m^3 de déchets tritiés conditionnés produits par le CEA Saclay pour un inventaire tritium de 19 TBq.

2.4.2 Gestion actuelle

Les déchets solides tritiés du CEA Civil sont entreposés sur le site CEA de Saclay ou sur le site CEA de Valduc.

Ils seront conditionnés en fonction de leur nature physique et de leur exutoire. A l'instar de déchets tritiés du CEA DAM, les déchets tritiés solides du CEA Civil pourront être pris en charge après une période de décroissance suffisante :

- A l'incinération à Centraco pour les déchets incinérables (cf. § 4.1.4.) ;
- En stockage au Cires pour les déchets très faiblement actifs (cf. § 4.4.1) ;
- En stockage au CSA pour les déchets faiblement ou moyennement actifs (cf. § 4.4.2).

Les déchets liquides tritiés du CEA civil sont également entreposés dans des installations du site CEA de Marcoule pour décroissance, dans l'attente du respect des critères d'acceptation pour incinération dans l'installation Centraco.

2.5 Déchets tritiés de l'Institut Laue Langevin (INB 67 - Grenoble)

Le Réacteur à Haut Flux de l'ILL (Institut Laue Langevin) à Grenoble est destiné à produire des faisceaux de neutrons thermiques très intenses pour réaliser des expérimentations de physique. L'eau lourde utilisée comme modérateur dans ce réacteur se charge progressivement en tritium. Pour maintenir une concentration en tritium dans le circuit d'eau lourde inférieure à 0,4 TBq/litre, l'eau tritiée est transférée dans une installation de détritiation au Canada.

2.5.1 Inventaire

Les déchets tritiés ne pouvant pas être pris en charge sur les centres Andra, dans l'installation à Centraco ou par l'installation au Canada pour le moment, représentent :

- des déchets solides : 0,500 m^3 – 100 TBq ;
- des huiles et solvants : 0,120 m^3 – 2,92 TBq ;

2.5.2 Gestion actuelle

La plupart des déchets solides générés par l'exploitation de l'installation ILL sont à ce jour pris en charge par les centres de stockage de l'Andra et dans l'installation Centraco. Cependant, au cours des opérations de maintenance ou en prévision des phases de démantèlement (horizon 2030), de faibles volumes de déchets issus de la première barrière de confinement du tritium gaz seront générés (quelques m^3 de déchets : il s'agit de déchets en acier inoxydable fortement tritiés (inventaire tritium - 100 TBq)). Ces déchets nécessiteront un traitement pour en réduire l'inventaire tritium et le dégazage associé avant entreposage.

Le démantèlement à venir de ce réacteur génèrera aussi des déchets TFA légèrement tritiés qui devraient être directement acceptables au Cires.

2.6 Déchets d'ITER

2.6.1 Inventaire

Située sur le site de Cadarache, ITER (INB n°174) est une installation expérimentale dont l'objectif est la démonstration scientifique et technique de la maîtrise de l'énergie de fusion thermonucléaire obtenue par confinement magnétique d'un plasma deutérium-tritium lors d'expériences de longue durée avec une puissance significative (500 MWth pendant quelques centaines de secondes). Cette installation est en cours de construction. Une restructuration de son programme expérimental est en cours de définition. Les objectifs visés par le projet ITER lors de cette restructuration sont de réduire d'un facteur 100 environ la fluence neutronique pendant la première phase de production des plasmas Deutérium (D) - Tritium (T), phase appelée DT-1. La fluence nominale initialement prévue serait atteinte dans une seconde phase appelée DT-2. Il a été aussi acté de substituer les tuiles de couverture en béryllium par des tuiles en tungstène modifiant la nature des déchets.

Consolidation de l'Inventaire ITER

En raison de la redéfinition en cours du programme expérimental, les inventaires de déchets qui seront générés en phase d'exploitation et de démantèlement sont en cours de remise à jour ainsi que la définition des solutions de gestion associées, en particulier les moyens de réduction des teneurs en tritium et entreposages temporaires de décroissance tritium sur site et hors site éventuellement nécessaires." [6]

D'après les inventaires prévisionnels transmis par ITER Organization (IO) en 2022 (en amont de la révision du programme expérimental en cours) :

- L'exploitation prévue initialement sur une période de déchets de 14 ans à compter de 2035, générera une masse totale d'environ 6 000 tonnes (incluant au maximum 1 071 tonnes de déchets MAVL) pour un volume total d'environ 15 000 m^3 équivalent conditionné.
- Le démantèlement, considéré sur une période de plusieurs décennies, générera une masse totale de déchets de 63 800 tonnes (dont 2 496 tonnes de déchets MAVL) pour un volume équivalent conditionné de 143 000 m3.

L'installation ITER deviendra après quelques années de fonctionnement en plasmas D-T (prévus à horizon 2040), un important contributeur à l'inventaire des déchets tritiés, d'abord dans sa phase d'exploitation puis en phase de démantèlement (dates encore à définir).

L'inventaire de déchets tritiés d'exploitation d'ITER se composera notamment

- de déchets technologiques, plastiques et organiques ;
- de déchets métalliques tritiés, activés et/ou contaminés par des poussières de la chambre à vide dans toutes les catégories (TFA, FMA, MAVL) générés lors d'opérations de maintenance préventive ou corrective (première paroi et corps de divertor ; premières parois de module de couverture endommagées, …) ;
- de déchets métalliques tritiés purs issus de la maintenance de l'usine Tritium ;
- de poussières d'aspiration ;
- de filtres de ventilation ;
- de résines échangeuses d'ions ;
- de boues d'évaporation.

Au niveau du démantèlement, l'inventaire des déchets se composera notamment

- de modules de couvertures ;
- de modules de divertor (première parois et corps de divertor) ;
- de blocs de protection des modules de couverture ;
- de systèmes de chauffage et diagnostics ;
- de tous les équipements et supports associés au fonctionnement de la machine ;
- de déchets technologiques, plastiques et organiques ;
- de poussières d'aspiration ;
- de filtres de ventilation ;
- de résines échangeuses d'ions ;
- de boues d'évaporation ;
- de gravats de béton contaminés et/ou activés.

Selon les évaluations prévisionnelles d'ITER, les teneurs en tritium d'une majorité de ces déchets seront compatibles avec les limites actuelles des centres de stockage existants.

Il est à noter que les déchets présentant une teneur en tritium au-dessus des limites tritium actuelles concernent principalement les équipements de la chambre à vide (dont certains deviendraient MAVL au cours de la seconde phase de DT-2) et les déchets de l'usine tritium en contact direct avec le tritium gazeux (représentant moins de 10% de la masse totale).

2.6.2 Gestion prévisionnelle

Pour la gestion des déchets ITER, différentes voies de gestion sont prévues en fonction de la nature et de la catégorie des déchets. A ce stade, ITER Organization (IO) prévoit les modes de gestions suivants :

pour les déchets MA-VL tritiés (prévus lors de la seconde phase d'exploitation DT-2), IO prévoit de pouvoir les traiter par un procédé thermique pour les détritier (objectif : réduction de l'inventaire d'un facteur 10), avant de les pré-conditionner pour entreposage de décroissance. Après cette étape d'entreposage, une étape de reprise et de conditionnement pour stockage est prévue. Cette étape de reconditionnement final après entreposage permettra de prendre en compte les exigences pour le transport et les spécifications d'acceptation des colis pour le stockage dans l'installation Cigéo. Concernant les poussières générées dans la chambre à vide d'ITER, IO prévoit de les aspirer et collecter en pots décanteurs.

- pour les déchets tritiés solides faiblement ou moyennement actifs, IO prévoit de pouvoir éventuellement traiter les déchets métalliques et plastiques, puis, s'ils ne peuvent pas être pris en charge en stockage, qu'ils soient conditionnés pour entreposage de décroissance dans l'attente du respect des critères d'acceptation en stockage au CSA. Une étape de reprise et de reconditionnement est prévue pour les colis non conformes ou pour mise en œuvre du conditionnement final avant stockage au CSA.
- pour les déchets solides purement tritiés[5] métalliques et plastiques, IO prévoit de pouvoir éventuellement les traiter, puis, s'ils ne peuvent pas être pris en charge en stockage, qu'ils soient conditionnés pour entreposage de décroissance dans l'attente du respect des critères d'acceptation en stockage. Une reprise et un reconditionnement sont également prévus pour les colis non conformes ou pour mise en œuvre du conditionnement final avant stockage soit au Cires soit au CSA.
- pour les déchets solides de très faible activité, IO prévoit de pouvoir éventuellement traiter les déchets métalliques et plastiques, puis de les conditionner pour prise en charge en stockage soit au Cires et CSA (sans entreposage). Une reprise et un reconditionnement sont également prévus pour mise en œuvre du conditionnement final avant stockage soit au Cires soit au CSA ou le cas échéant, pour les colis non conformes suite à un événement en entreposage. D'autres voies prospectives de gestion pourront toutefois être étudiées pour les déchets TFA d'ITER dans le futur (incinération des déchets technologiques, recyclage hors nucléaire pour déchets métalliques et câbles électriques, …).

Cette gestion prévisionnelle des déchets tritiés par ITER est en cours de réexamen dans le cadre des activités liées à la redéfinition du programme expérimental. Par ailleurs, il convient de noter que les déchets selon la temporalité de leur production pourront être gérés dans les successeurs des stockages Cires et CSA.

[5] Déchets qui ne contiennent que du tritium

3. Synthèse des inventaires actuels et des inventaires à produire par nature et catégorie

L'inventaire des déchets tritiés déjà produits, dont le volume équivalent conditionné s'élève à près de 4 605 m^3, résulte principalement des activités passées et en cours liées à la défense (*i.e.* Applications militaires). Cette part représente environ 94 % des déchets tritiés en volume. L'autre part provient des différentes activités de recherche (*i.e.* Applications civiles) et de producteurs hors électronucléaire, comme des industriels ou des laboratoires de recherche médicale ou pharmaceutique.

A l'horizon 2050-2060, l'inventaire en déchets tritiés aura principalement pour origine les activités du réacteur expérimental international de fusion nucléaire ITER avec un volume envisagé à ce stade qui pourrait représenter près des trois quarts de tout l'inventaire (le dernier quart restant serait issu des activités liées aux applications militaires du CEA).

Par ailleurs, bien que recouvrant une très grande diversité de natures (plastiques et celluloses, métaux ferreux ou non ferreux, bois, minéraux, verres, effluents, produits chimiques, huiles…), l'essentiel des déchets tritiés, à plus de 99 % en volume, se présente sous une forme solide. Les teneurs en tritium de ces déchets sont variables.

Ainsi, le volume équivalent conditionné de déchets tritiés solides issus des applications militaires du CEA s'élève aujourd'hui à plus de 4 278 m^3 dont 98,5 % est entreposé sur le site CEA de Valduc et les 1,5 % restants sur le site du CEA Marcoule. La production des colis de déchets est en cours. Plus de deux tiers (82%) de ces déchets est composé de déchets tritiés solides dits « peu dégazants » issus du démantèlement de la 2nde barrière des installations du CEA de production de tritium. L'activité totale en tritium de l'ensemble des déchets tritiés solides issus des applications militaires du CEA est de 9 041 TBq au 31/12/2022 dont 86 % provient uniquement de la zéolithe[6] qui représente un volume total de 22 m^3 (*i.e.* seulement 0,5 % du volume total) et 1,2 % de cette activité provient des déchets solides dits « peu dégazants ». En 2050, la quantité de zéolithe sera multipliée par 5 tandis que la quantité totale en déchets tritiés solides issus des applications militaires du CEA sera multipliée par 3 et l'activité en tritium de la zéolithe sera à cette date supérieure d'un ordre de grandeur à l'activité de l'ensemble des autres familles. Enfin, à fin 2022, près de 86 % de l'activité de ces déchets tritiés solides relèveraient de la catégorie FMA-VC tandis que les 14% autres déchets relèvent de la catégorie TFA. Aussi, à fin 2022, de l'ordre de 92.5 % en volume équivalent conditionné de ces déchets sont des déchets purement tritiés. Les autres déchets comportent d'autres radionucléides comme du ^{55}Fe, du ^{60}Co, du ^{63}Ni, du ^{65}Zn ou du ^{137}Cs selon les déchets mais aussi des émetteurs alpha tels que de l'^{235}U, de l'^{238}U ou du ^{239}Pu (251 m^3 en volume de déchets).

Concernant les applications civiles du CEA, l'inventaire actuel en volume de colis de déchets tritiés solides s'élèvent à 145 m^3 dont la production, pour la grande majorité, est considérée comme terminée. A ces colis, s'ajouteront à l'horizon 2050-2060 un volume de 100 m^3 dont la production est principalement à venir. L'activité en tritium actuelle est légèrement inférieure à 17 TBq et celle des colis à venir sera de valeur équivalente. Ces déchets relèvent tous de la catégorie FMA-VC et comportent, pour la grande majorité des déchets dont la production est terminée, d'autres RN en plus du tritium. Les déchets à venir seront, quant à eux, des déchets purement tritiés.

En quantité nettement plus faible, l'Institut Laue-Langevin (ILL), centre de recherche international spécialisé en sciences et technologies neutroniques[7], dispose à ce jour de 0,5 m^3 de déchets tritiés solides d'une activité tritium de 100 TBq, et de 120 L d'effluents liquides organiques tritiés avec une activité d'environ 3 TBq.

Enfin, les 39 m^3 équivalent conditionné de déchets tritiés solides restants résultent des activités PNE ou « nucléaire diffus » dont l'activité en tritium s'élève à 101 TBq (à fin 2023). A l'horizon 2050-2060, la production en déchets tritiés en provenance de ces PNE représentera un inventaire négligeable au regard de celui des autres producteurs de déchets tritiés, notamment en ce qui concerne le CEA DAM et ITER. En effet, pour les déchets tritiés solides d'ITER, les prévisions actuelles conduisent à considérer un volume total de 168 000 m^3 généré sur plusieurs décennies à compter de 2040 environ, considérant l'ensemble de leur inventaire de déchets tritiés, avec une activité en tritium qui s'élèvera à 30 000 TBq (à horizon 2050-2060) tandis que les environ 12 500 m^3 de déchets tritiés solides issus des applications militaires du CEA estimés à ce jour pour cette période présenteront une activité en tritium de 25 000 TBq.

[6] La zéolithe est un matériau microporeux d'aluminosilicate utilisée pour piéger le tritium présente dans l'eau tritiée.
[7] L'ILL exploite un Réacteur à Haut Flux dont le cœur est constitué d'un élément combustible unique d'Uranium très enrichi refroidi à l'eau lourde et dont l'objectif est de produire un flux continu de neutrons.

Concernant les déchets tritiés liquides, le CEA (activités civiles et militaires) en possède actuellement un peu moins de 6 m³, pour une activité totale en tritium de 172 TBq, tandis que les PNE en disposent à ce jour de 15 m³ (déchets tritiés liquides et gazeux) pour une activité totale en tritium de 19,8 TBq. L'ILL, quant à lui, possède 0,12 m³ de déchets liquides pour une activité de 3 TBq. L'essentiel de ces déchets, tous producteurs confondus, contiennent principalement du tritium. Les liquides scintillants, huiles et peintures/solvants du CEA DAM, qui représentent la majorité de l'inventaire en déchets tritiés liquides du CEA (le volume s'élève à 5,3 m³), sont destinés à être évacués à CENTRACO. Le mercure tritié du CEA DAM classé DSFI (i.e. Déchets Sans Filière Immédiate) représente un volume de 0,05 m³ pour une activité en tritium de 45,6 TBq. A l'horizon 2050-2060, seul l'inventaire en déchets tritiés liquides du CEA DAM devrait augmenter d'environ cinq à six fois son volume actuel mais avec une activité en tritium trois fois inférieure.

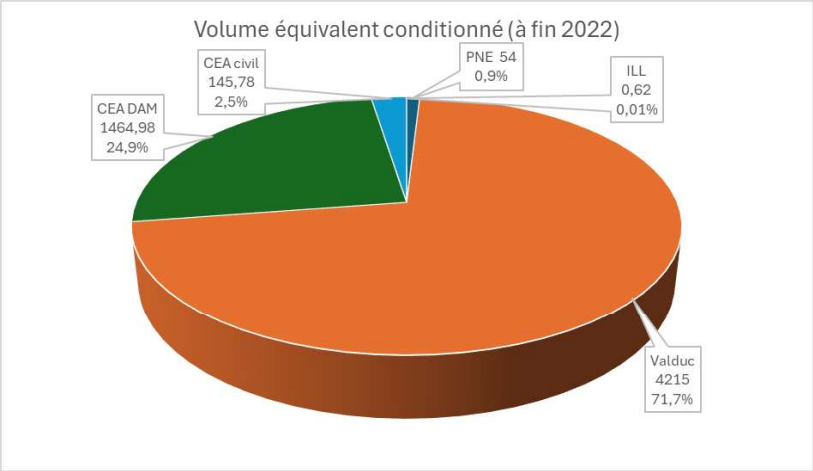

*Figure 3-1 Répartition des volumes équivalent conditionnés **actuels** de déchets tritiés (FMA-VC et TFA en m³) en fonction des propriétaires de déchets*

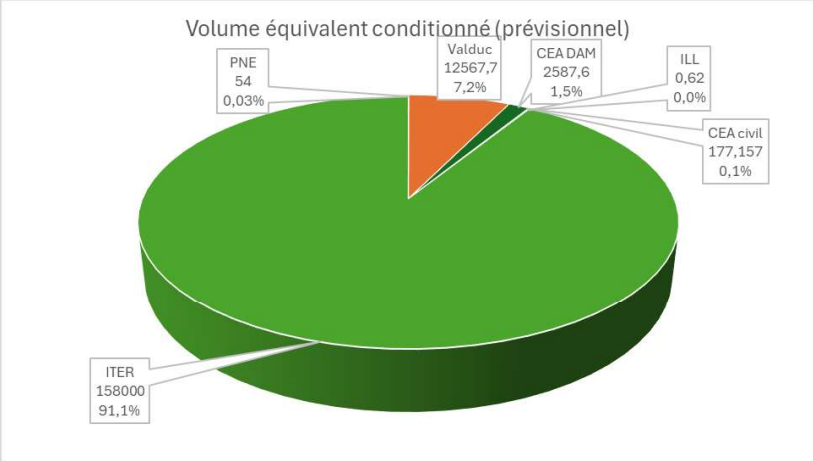

*Figure 3-2 Répartition des volumes équivalent conditionnés de déchets tritiés (FMA-VC et TFA en m³) **à l'horizon 2050-2060** en fonction des propriétaires de déchets*

Les déchets tritiés se répartissent selon trois natures physiques principales : organiques (*i.e.* plastiques et cellulose, bois, cartons…), métalliques et autres (*i.e.* gravats minéraux, verres…). Les teneurs en tritium de ces déchets sont également variables.

Un peu plus de 1 700 m³ des déchets tritiés du CEA (applications militaires et civiles) sont des déchets organiques dont plus de 90 % relèveraient de la catégorie FMA-VC. Un peu moins de 10 % relèveraient de la catégorie TFA et un peu plus de 5 m³ sont destinés à CENTRACO. 75 % de l'ensemble de ces déchets tritiés organiques proviennent d'une seule famille du CEA DAM dite « peu dégazants » et entreposés en fûts de 100 L et 200 L pour décroissance.

Environ 1 300 m^3 de déchets tritiés du CEA (applications militaires et civiles) sont des déchets métalliques dont plus de 86 % relèveraient de la catégorie FMA-VC. Le reste de ces déchets tritiés métalliques relèverait de la catégorie TFA. 65% de l'ensemble de ces déchets tritiés métallique provient d'une seule famille du CEA DAM dite « peu dégazants » et entreposés en fûts de 100 L et 200 L pour décroissance.

Enfin, l'ensemble des déchets tritiés qui n'entrent pas dans ces deux premières catégories s'élève à environ 800 m^3 dont 200 m^3 de gravats minéraux, 373 m^3 de connectiques et 34 m^3 de verre.

L'inventaire des déchets solides et liquides pris en compte pour établir les scénarios de gestion est présenté dans le tableau 2 :

Producteurs	Etat des stocks (à fin 2022)		Production cumulée prévisionnelle jusqu'à 2050-60	
	Volume équivalent conditionné (m^3)	Activité$_{tritium}$ (TBq)	Volume équivalent conditionné (m^3)	Activité$_{tritium}$ (TBq)
CEA Applications militaires – Valduc Solide Liquide	4 209 5,9	8 869 171,6	12 534 34	24 800 50,3
CEA Applications militaires – Marcoule Solide Liquide	1 464 0,7	1,3 2233	2 584 3,6	53,3 0,2
CEA Applications civiles – Saclay Solide Liquide	145 0,9	16,7 0,1	176 0,9	54,9 0,01
Nucléaire diffus (PNE) Solide Liquide / Gaz	39 15	101 19,8	---	---
ILL Solide Liquide	0,5 0,12	100 2,9	---	---
ITER	---	---	15 000 (opération) + 143 000 (démantèlement) *En cours de redéfinition*	90 000
TOTAL Solide Liquide	5 857 22,6	9 088 2428	173 300 38,3	115 000 50,5

Tableau 2 : Synthèse des inventaires entreposés à fin 2022/2023 et à produire d'ici 2050-2060

Nota : Les déchets liquides et gazeux, dont les quantités sont très faibles, seront traités et stabilisés avant de rejoindre les entreposages ou les filières de gestion.

Enfin rappelons que l'inventaire d'ITER présenté ci-dessus fera l'objet d'une mise à jour après consolidation du programme expérimental du projet.

4. Analyse des options de gestion

Sur la base des connaissances disponibles des déchets et des enjeux qu'ils présentent, un recensement de l'ensemble des options de gestion envisageables a été réalisé. Ce recensement, basé sur une analyse préliminaire, pourra servir de base pour l'analyse multi-critères à venir puis l'élaboration du schéma industriel. Dans celui-ci seront alors identifiées les demandes réglementaires qui seraient nécessaires ainsi que les études à réaliser.

Ces options couvrent la gestion des déchets depuis leur traitement jusqu'à leur exutoire final.

Echelle TRL (Technology Readiness Level)

L'échelle TRL (Technology Readiness Level) représente un outil d'évaluation du niveau de maturité d'une technologie (ou d'un projet par transposition) jusqu'à son industrialisation. Conçue initialement par la Nasa et l'Esa pour les projets spatiaux et partagée internationalement, elle compte neuf niveaux de 1 à 9 résumés comme suit :

Niveaux 1 à 3 : principe de base et faisabilité d'une idée

Niveaux 4 à 6 : recherche avancée et démonstration technologique

Niveaux 7 à 9 : qualification opérationnelle, industrialisation

Cette échelle TRL sera utilisée dans ce document afin d'indiquer et clarifier le niveau d'effort nécessaire pour développer et industrialiser une technologie de traitement ou de conditionnement applicable aux déchets tritiés.

4.1 Traitement

4.1.1 Détritiation

Un des traitements possibles pour rendre compatibles les déchets tritiés avec les spécifications des exutoires est de mettre en œuvre des procédés de détritiation. Une des méthodes les plus efficaces pour réaliser l'extraction du tritium des déchets dans lesquels il est piégé consiste en un traitement thermique de dégazage sous vide. En fonction de la nature des déchets, la température du traitement peut varier : à moins de 100°C pour les déchets organiques et jusqu'à plus de 1600°C pour les déchets métalliques.

Aujourd'hui, des procédés de traitement thermique sont déjà mis en œuvre sur le CEA/Valduc et concernent tous les déchets métalliques et les déchets plastiques ou organiques les plus actifs et dégazants. Ces procédés de détritiation par chauffage ou fusion des déchets métalliques et par étuvage des plastiques sont décrits en détail dans le Livre blanc de l'ASN [9]. Les résidus de ces traitements, c'est-à-dire les lingots de fusion et les déchets organiques étuvés et compactés sont conditionnés puis entreposés en attente d'un exutoire définitif.

Ces procédés thermiques permettent de récupérer la majorité du tritium contenu dans les déchets traités soit sous forme de gaz (HT), soit sous forme d'eau tritiée (HTO). Le HT est transformé en HTO et l'eau tritiée produite est alors entreposée sous forme liquide, ou fixée (adsorbée) sur zéolithe (pour entreposage également). A noter que de l'eau tritiée peut aussi provenir de la détritiation d'atmosphères de boites à gants.

D'après [5], les facteurs de détritiation observés industriellement sont très significatifs :

- Pour le traitement thermique des déchets métalliques, le facteur de décontamination (ou DF) peut atteindre plus de 1000 (cas de la fusion des métalliques) ce qui est équivalent à une décroissance du tritium durant une période proche de 120 ans ;
- Pour l'étuvage vapeur des matières plastiques, le DF est moindre entre 10 et 40 mais le procédé change la spéciation du tritium de HT en HTO grâce à ses propriétés oxydatives et réduit aussi notablement le dégazage des résidus compactés (d'un facteur 40 environ).

Le recours à ce type de traitement va dépendre des spectres radiologiques, du dégazage (en lien avec les activités massiques), de la nature des matériaux ainsi que des contraintes opératoires.

D'autres projets de traitement et de récupération du tritium sont à un stade de maturité moins élevé et nécessiteront encore des efforts de R&D avant de pouvoir prétendre à une utilisation industrielle. Ainsi, le projet Valofusion porté par le CEA dans le cadre du PIA4[8] vise le traitement par fusion des déchets métalliques fortement tritiés et intègre un creuset froid et un système de bullage gazeux (Ar, He) pour améliorer l'extraction ainsi qu'un système de récupération du tritium sous une forme réduite compatible avec une utilisation ultérieure[9] (évitant ainsi le passage à la forme HTO, non directement réutilisable).

Par ailleurs, IO explore le développement des procédés téléopérés de détritiation thermique de copeaux de découpe des déchets métalliques ou de grands équipements métalliques fortement tritiés. Ils sont étudiés en collaboration avec les industriels développant ou fournissant des fours industriels et nucléarisés de grande capacité. Le TRL reste faible.

Enfin, on notera d'autres projets de R&D de TRL faible visant par exemple la décontamination de surfaces contaminées par du tritium par laser (Projet FR2030 appelé « PADAWAN »).

Dans une approche technico-économique, la capacité de traitement de ces procédés reste à adapter à la typologie et à l'inventaire des déchets à traiter. La gestion des déchets secondaires liés à ces procédés reste aussi à étudier.

4.1.2 Projets de valorisation de déchets métalliques

Suite au débat public portant sur l'élaboration du 5ème PNGMDR, le gouvernement a fait évoluer en février 2022 le cadre réglementaire français applicable à la gestion des déchets TFA, en y introduisant une nouvelle possibilité de dérogations ciblées au Code de la santé publique permettant une opération de valorisation au cas par cas de déchets radioactifs (Décret n° 2022-174 du 14 février 2022 [7] relatif à la mise en œuvre d'opérations de valorisation de substances faiblement radioactives).

Par décret n°2022-175 [8], cette évolution est actuellement applicable aux déchets métalliques et ouvre la possibilité, sur dérogation, à une valorisation d'une partie des métaux (les moins tritiés uniquement à ce stade) après passage dans un procédé de fusion–décontamination. Il est ainsi désormais possible d'envisager de procéder à des opérations de valorisation de certains déchets radioactifs métalliques faiblement actifs dans des installations spécifiques dûment autorisées. Les produits de sortie peuvent faire l'objet de dérogations aux interdictions d'utilisation de « substances provenant d'une activité nucléaire » telles que définies aux articles R.1333-2 et R1333-3 du Code de la santé publique, après un processus de contrôle rigoureux.

Lorsque la dérogation est accordée, les produits résultant de l'opération de valorisation et ayant fait la preuve d'un niveau de radioactivité inférieur au seuil de référence ne sont plus des substances radioactives. De plus, cette évolution règlementaire récente répond à des enjeux d'économie circulaire.

Cette perspective constitue une évolution majeure dans les options envisageables de gestion des déchets métalliques de faible activité qu'ils soient tritiés ou non.

Trois projets de valorisation de déchets radioactifs métalliques ont été identifiés dans le rapport décrivant les options de gestion des déchets TFA [9] . Il s'agit :

- du projet Technocentre développé par EDF et visant la valorisation des déchets métalliques ;
- du projet Orcade visant le recyclage du cuivre et de l'aluminium des câbles électriques ;
- du projet RPN2 visant la valorisation du plomb.

Les fiches descriptives de ces projets soutenus par le programme d'investissements d'avenir (PIA4) sont disponibles à la référence [9].

Concernant le projet Technocentre, les spécifications d'acceptation applicables aux déchets métalliques à traiter par fusion ne sont pas connues à ce stade et seront définies par l'opérateur de l'installation de fusion-décontaminante.

A ce stade, aucun de ces projets n'a considéré les déchets métalliques tritiés dans leurs inventaires.

[8] Programme d'investissements d'avenir pour l'innovation et la relance économique
[9] Après purification, le HT gaz extrait peut être fixé sur des hydrures métalliques pour entreposage et réutilisation

Notons d'ores et déjà que le traitement appliqué aux déchets tritiés métalliques de première barrière à Valduc permet d'obtenir un niveau résiduel en tritium relativement faible. Il pourra donc être utile de vérifier si une deuxième étape de fusion décontaminante est nécessaire pour ces lingots sachant que son efficacité serait bien moindre. Sur la base des données fournies, ces lingots seraient aptes au recyclage après un entreposage d'environ 105 ans en moyenne (alors que sans traitement 235 ans seraient nécessaires pour réduire le niveau tritium de ces déchets à un niveau compatible avec la valeur seuil de 100 Bq/g (valeur de référence pour le tritium dans le décret n° 2022-174 du 14 février 2022 [7] permettant la demande et l'obtention éventuelle d'une dérogation en vue de les valoriser).

Le projet Orcade [9] vise à récupérer l'âme métallique des câbles électrique en évitant tout transfert de contamination en provenance de la gaine, en vue de son déclassement en déchet conventionnel et de son recyclage. Les métaux utilisés dans ces câbles électriques (cuivre, aluminium) présentent un intérêt économique, et leur recyclage serait donc particulièrement intéressant à cet égard. De plus, il permettrait également de réduire les volumes de déchets radioactifs à stocker, et donc de réduire les coûts de stockage associés et d'optimiser l'utilisation des capacités de stockage.

4.1.3 Projet de valorisation du tritium

Lorsque les quantités de tritium mises en jeu dans le procédé et/ou dans les déchets sont significatives (de l'ordre du gramme ou du dixième de gramme de tritium) comme dans le cas d'ITER, d'autres pistes de réflexions visent aussi une détritiation en vue de la récupération du tritium pour sa réutilisation ultérieure dans le procédé de l'installation.

Différents projets sont en cours pour récupérer le tritium des effluents gazeux ou liquides ainsi que des solides :

- actuellement en construction, l'usine Tritium d'ITER vise à traiter les gaz extraits de la chambre à vide pour pouvoir récupérer le tritium pour les expériences ultérieures. Les procédés envisagés sont très perfectionnés et en cours d'optimisation technique.
- le projet Valofusion (supporté par le PIA4) vise le développement d'un traitement thermique par fusion des déchets métalliques purement tritiés avec un retraitement du tritium extrait via un réacteur catalytique à membrane dont l'objectif est la séparation et la mise en forme du tritium sous sa forme réduite propice à une utilisation ultérieure. Ce projet vise à atteindre un TRL de l'ordre de 5 et, si cette phase de développement est concluante, nécessitera des développements conséquents pour atteindre une maturité industrielle suffisante (TRL 8 à 9).

4.1.4 Incinération dans l'installation Centraco

Située à Codolet dans le Gard, l'usine de Centraco est une installation industrielle exploitée par Cyclife, filiale d'EDF, dédiée au traitement des déchets radioactifs afin d'en réduire les volumes, de les recycler lorsque cela est possible, et de caractériser et conditionner les résidus sous forme de colis ultimes confiés à l'Andra pour stockage.

L'usine de Centraco (INB N°160) est dotée d'une unité de fusion des déchets métalliques et d'une unité d'incinération qui permet de traiter les solides et liquides incinérables.

Comme indiqué dans le rapport PNGMDR CEA-CYCLIFE de 2018 sur l'incinération établi en réponse à l'Article 25 de l'Arrêté du 23/02/2017 établissant les prescriptions du PNGMDR 2016-2018 [10], l'incinération permet de réduire efficacement le volume des déchets traités et notamment des plastiques et autres produits organiques.

L'incinération de déchets tritiés à Centraco est une option autorisée pour les déchets répondant aux spécifications de cette filière.

Les déchets solides (DSI) et liquides incinérables (DLI), pouvant prétendre à être traités par incinération, doivent répondre aux critères radiologiques suivants :

- Activité massique β/γ + tritium < 20 000 Bq/g (acceptation directe) ;
- Activité massique tritium < 20 000 Bq/g (acceptation sur dossier) ;
- Activité massique β/γ + tritium entre 20 et 40 000 Bq/g (acceptation sur dossier).

Note : Les résidus solides de l'incinération (cendres et mâchefers) sont conditionnés et orientés vers les filières de stockage de l'Andra.

La question de l'augmentation des critères d'acceptation en tritium pour certains déchets organiques ou liquides tritiés à incinérer pourrait donc représenter une solution pour limiter l'entreposage de déchets. Même si cette option engendrerait un impact sanitaire faible, l'augmentation des critères conduirait à augmenter en proportion les rejets de l'incinérateur. L'acceptabilité d'un marquage additionnel serait à questionner.

A cet égard, concernant les rejets associés à l'incinération des déchets tritiés, il convient de noter que dans son avis du 02/02/2016 (2016-AV-0253), ensuite rappelé dans un avis ultérieur (ASN-AV-0379 du 21/05/2021), l'ASN considère que, dans son principe, une solution qui conduirait à rejeter dans l'environnement le tritium contenu dans les déchets tritiés sous ses différentes formes n'est pas acceptable du point de vue environnemental et ne peut constituer une solution de gestion de référence, en particulier pour les déchets « tritiés purs ».

4.2 Conditionnement

D'une manière générale, le conditionnement des déchets radioactifs permet de pouvoir manipuler, confiner et transporter les déchets, et aussi de réduire l'impact environnemental de l'installation et l'impact dosimétrique des opérateurs.

L'objectif recherché par le conditionnement des déchets tritiés est l'obtention d'un faible niveau de relâchement ou de dégazage du tritium du colis, ce qui revient à piéger le plus efficacement possible, et à ralentir et limiter son transfert à l'extérieur du colis, les différentes formes du tritium, le temps que la décroissance radioactive rende ce dégazage compatible avec les rejets de l'installation et/ou avec les critères d'acceptation du stockage.

Pour obtenir un faible dégazage tritium du colis, les bétons et mortiers utilisés et agréés classiquement pour les conditionnements des déchets radioactifs ne sont pas suffisamment efficaces. Par le passé, plusieurs stratégies visant à piéger ou réduire la vitesse de diffusion du tritium dans un colis de déchets ont été testées [11] [12] :

- L'imprégnation du ciment par des polymères (polystyrène, polyéthylène). L'objectif de ce polymère est de venir remplir les cavités présentes dans la matrice cimentaire. La polymérisation se fait in situ par chauffage léger du bloc cimentaire. Le composé final est un composite peu sujet aux fissures. Les résultats obtenus par différents laboratoires sur cette méthode sont très hétérogènes et ne permettent pas de conclure sur un effet positif de l'imprégnation par polymères.
- L'ajout d'additifs de type adsorbant d'eau (diatomées, vermiculite) dans les ciments. Les adsorbants testés n'ont pas permis de montrer une quelconque réduction du taux de dégazage par cette technique. L'ajout de tamis moléculaire n'a pas été expérimenté.
- Des revêtements de surface (paraffine, graisse, résine époxy, cire d'abeille, bitume, émail, goudron). Ces traitements doivent être applicables à basse température pour minimiser le relâchement de tritium. La tenue mécanique de ces revêtements dans le temps et la résistance à la lixiviation sont des paramètres primordiaux pour leur utilisation pour le stockage des fûts. Parmi les revêtements envisagés, la paraffine et l'asphalte semblent les plus efficaces et permettent de réduire le dégazage d'un facteur 6 environ.
- Des liners externes (polyéthylène haute densité). Ces liners ont montré une bonne efficacité en tant que barrière physique, surtout lorsque les colis sont fortement tritiés. Cependant, le comportement à long terme n'a pas été étudié.

En conclusion, les études antérieures ont montré que le confinement du tritium au sein d'un colis de déchets nécessite la mise en place de barrières multiples permettant d'agir à la fois sur le confinement du tritium sous toutes ses formes au sein de la matrice cimentaire mais aussi sur la diffusion du tritium dans la structure du colis. En plus des liners externes et/ou conteneurs à parois multicouches, d'autres solutions pourraient donc être envisagées et investiguées, seules ou en combinaison permettant de limiter les transferts à la fois du tritium gazeux (HT) et de l'eau tritiée (HTO) :

- un conteneur métallique étanche (soudé ou avec joint métallique) ;
- des adsorbants solides type zéolithe ;
- des ciments hydrauliques particuliers ;
- des hydrures métalliques.

A ce jour, considérant les diverses conditions hydriques possibles au niveau du stockage et la difficulté de garantir la tenue de l'étanchéité dans le temps (tenant compte des phénomènes de radiolyse, de production de ^3He, de fragilisation des aciers, et de la nécessité d'un confinement et conteneur supplémentaire), aucune de ces options n'a abouti à l'obtention d'un conditionnement efficace et démontrable pour le stockage des déchets fortement tritiés. Des développements supplémentaires sur le thème du conditionnement sont attendus dans cet objectif.

Notons que certaines de ces solutions sont par contre utilisées comme mode de conditionnement temporaire à des fins d'entreposage et/ou de transport des déchets tritiés ou du tritium.

Dans l'objectif de limiter le dégazage des colis de déchets tritiés, une solution développée par le projet MACH^3 (*i.e.* MAtrices Cimentaires pour le piégeage du tritium (H^3)) et poursuivie dans le projet PACH^3 (*i.e.* PACkage for tritium (H^3) waste) soutenus par des programmes d'Investissement (respectivement le Programme d'Investissements d'Avenir (PIA[10] et France 2030), consiste à intégrer dans le mortier cimentaire coulé dans les conteneurs de stockage un mélange d'oxyde d'argent et d'oxyde de manganèse sous forme de poudre. Ce mélange, développé dans les années 80 pour piéger l'hydrogène et résistant aux rayonnements, est capable de capter le tritium gazeux sous sa forme isotope de l'hydrogène, tel un piège physique dans la structure du matériau, et de le fixer dans le colis, sachant que le caractère irréversible du piégeage est en cours d'étude.

L'objectif du projet MACH^3 était de développer des matrices cimentaires destinées au conditionnement de déchets nucléaires de faible ou moyenne activité contenant des quantités importantes de tritium. Ces matrices sont spécifiquement formulées pour garantir un très faible taux de dégazage en tritium tout en restant compatibles avec les exigences en entreposage et stockage (propriétés mécaniques, chimiques…).

Les développements ont visé à :

- définir le mode de fabrication du piégeur (granulométrie, homogénéité, distribution dans la matrice, caractéristiques de mise en œuvre, …),
- définir des formulations de matrices cimentaires en y intégrant un piégeur de HT apte à réduire le dégazage des colis,
- évaluer les performances mécaniques pour matrices avec piégeurs ainsi que les performances du piégeage.

Les essais de piégeage réalisés dans le cadre du projet MACH^3 ont été effectués sur un analogue du tritium (H_2). Les progrès réalisés lors du projet MACH^3 ont justifié la poursuite des développements maintenant portés par le projet appelé PACH^3 dont les objectifs techniques sont :

- de qualifier une matrice cimentaire composite contenant un piégeur ;
- de développer un joint à haut taux d'étanchéité pour des conteneurs métalliques.

Plusieurs verrous seront levés par des études sur le tritium gazeux et des études de durabilité des matériaux (piégeur et joint).

La présence d'humidité dans la matrice cimentaire, inévitable dans le cas des ouvrages de stockage, pouvant exercer une influence sur les performances attendues, un des axes d'étude majoritaire sera d'étudier l'influence de l'humidité relative ainsi que celui de l'évolution chimique de la matrice cimentaire sur les performances de piégeage.

Il est à noter que le projet PACH^3 vise le passage d'un TRL 3 à 5 entre 2024 et 2027 avec la réalisation de prototypes de colis à l'échelle de 50 L et reste donc encore loin d'une possible industrialisation.

Enfin, une alternative aux éléments chimiques pris en compte dans les projets MACH^3 et PACH^3 pourrait être l'utilisation d'hydrures de titane, de zirconium ou de zirconium/cobalt par exemple qui présentent également des propriétés d'adsorption de l'hydrogène. La faisabilité du mécanisme d'adsorption du tritium sur ces hydrures sans mise en contact forcé dans un circuit fermé, tel qu'utilisé dans l'industrie pour le transport et l'entreposage du tritium, n'est pas démontrée à ce stade. Le comportement de l'hydrure dans des conditions d'humidité relative représentative du stockage reste également un thème de R&D.

[10] Le Programme d'investissements d'avenir (PIA), piloté par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI), a été mis en place par l'État dès 2010, et décomposé en 4 vagues successives (PIA1 en 2010, PIA2 en 2014, PIA3 en 2017 et PIA4 en 2019), pour financer des investissements innovants et prometteurs sur le territoire, afin de permettre à la France d'augmenter son potentiel de croissance et d'emplois.

Des recherches complémentaires sont donc nécessaires pour explorer de façon plus approfondie ces solutions de conditionnement avant de pouvoir les envisager comme une option raisonnable et industrielle.

4.3 Entreposage

Par soucis de clarté, on distinguera, dans le cadre spécifique de cette étude, deux types d'entreposage :

- Un entreposage tampon (de quelques jours à quelques années) pendant le traitement-conditionnement ou en entrée/sortie d'installation pour coordonner les flux de déchets en attente de prise en charge dans les centres de stockage de surface de l'Andra ou d'un traitement par incinération ou par fusion à Centraco ;
- Un entreposage intermédiaire, de décroissance ou d'attente (pouvant aller de quelques années à quelques décennies) qui a pour fonction première de permettre la décroissance du tritium présents dans les colis entreposés jusqu'à l'atteinte du respect des critères d'acceptation de l'exutoire définitif envisagé et/ou des contraintes transport. Cet entreposage est alors lié à l'incompatibilité des déchets avec l'exutoire envisagé et/ou à l'indisponibilité à un instant donné de l'exutoire final ou de l'installation de traitement.

Seul le second type d'entreposage est évoqué ci-dessous en tant qu'option de gestion des déchets tritiés.

Tenant compte de la difficulté à confiner efficacement le tritium et face au risque de marquage de l'environnement direct autour des stockages, la solution retenue en France pour la gestion des déchets tritiés est un entreposage de décroissance de plusieurs dizaines d'années, le temps de développer une solution de stockage adaptée à la prise en charge des déchets tritiés ou qu'ils deviennent compatibles avec les critères des stockages en exploitation.

En contrepartie, à l'instar de toute installation ayant un inventaire tritium, cet entreposage induit un risque accru de marquage autour des sites d'entreposage de décroissance, sans toutefois y associer de risque sanitaire significatif pour le personnel et les riverains. Aussi, afin d'éviter le marquage d'un nouveau site, l'entreposage de déchets tritiés reste préconisé au plus proche des sites de production, la centralisation et/ou mutualisation d'entreposage de déchets de producteurs différents restant néanmoins envisageable.

Pour rappel, une installation d'entreposage est considérée comme une installation nucléaire accueillant provisoirement des matières ou des déchets nucléaires, dans l'attente d'une solution de gestion définitive.

Concernant l'entreposage d'attente et de décroissance, associé à chaque catégorie de déchets tritiés, regroupée en fonction du niveau de dégazage tritium, le CEA a défini un concept d'entreposage pour une durée d'une cinquantaine d'années pour permettre la décroissance de l'activité tritium des colis et leur prise en charge dans les centres de stockages de l'Andra. Les différents concepts d'entreposage sont fonction du niveau de dégazage du tritium, qui représente un des critères dimensionnants pour la protection des travailleurs et du public. Leur protection contre les risques d'exposition interne implique des ventilations adaptées au risque, qui vont de la ventilation naturelle passive à la ventilation forcée filtrée[11]. Pour les déchets irradiants tritiés, la conception des installations est principalement dictée par le risque d'exposition externe des travailleurs et du public. Aussi, des protections biologiques peuvent être nécessaires au niveau de ces bâtiments d'entreposage.

Des entreposages d'attente et de décroissance sont donc déjà en exploitation, en particulier sur les centres CEA de Valduc et de Marcoule, pour les déchets produits pour le CEA DAM.

L'intérêt principal d'une stratégie d'entreposage de décroissance, telle que définie en 2008, réside dans l'opportunité de développer, durant la période de décroissance de 50 ans une ou des options de gestion définitives et optimisées pour les déchets concernés. Néanmoins, cette stratégie présente l'inconvénient du coût de l'étude, de la construction, de l'exploitation puis du démantèlement d'installations d'entreposage nouvelles.

Dans son avis ASN-AV-0379 du 21/05/2021 relatif aux études concernant la gestion des déchets nécessitant des travaux spécifiques remises en application du PNGMDR 2016-2018, considérant que la pertinence d'une durée d'entreposage supérieure à 50 ans devrait être appréciée à l'aide de l'analyse multicritère susmentionnée, l'ASN estime que l'entreposage de déchets sur une période supérieure à 50 ans doit être dûment justifié et, en tout état de cause, limité aux familles de déchets pour lesquelles cette solution est adaptée. L'ASN souligne le besoin d'avancer activement dans la conception et la création de nouvelles capacités

[11] La filtration est efficace pour les poussières et les autres radionucléides hors tritium si présents.

d'entreposage, afin qu'elles puissent être conçues et réalisées dans des conditions de sûreté et de radioprotection maîtrisées.

Dans le cas où certains déchets ne pourraient être pris en charge qu'après une période bien plus longue, une durée d'entreposage supérieure à 50 ans mériterait d'être instruite au regard des avantages qu'elle présente (finances, transports, stockage, …) et de la sureté de l'installation d'entreposage et des opérations de reprise ultérieures.

4.4 Stockage

4.4.1 Le Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage (Cires)

Description de l'installation

Le Cires est exploité par l'Andra, et implanté sur les communes de Morvilliers et de La Chaise, dans le département de l'Aube. Il assure depuis 2003 le stockage des déchets de très faible activité (TFA). Il dispose également de capacités d'entreposage pour les déchets à vie longue, et d'installations pour le regroupement, tri et traitement de déchets issus de la filière non-électronucléaire (et pour certains déchets de la filière électronucléaire).

Suite à la révision de son arrêté préfectoral le 12 juillet 2024, ce centre d'une superficie totale de 52,5 hectares, dont 25 dédiés au stockage, est autorisé à stocker 950 000 m^3 de déchets TFA. À la fin de l'année 2024, la capacité de stockage utilisée représentait 51,1 %. Les travaux récemment autorisés permettront l'exploitation du Cires jusqu'à l'horizon 2045.

Le Cires est une ICPE relevant de la rubrique 2797 car le centre peut accueillir des déchets radioactifs d'une activité supérieure à 20 Bq/g pour les chaines de l'uranium et du thorium, et pour les déchets à radioactivité d'origine non naturelle (radioactivité d'origine industrielle, médicale, de la recherche…).

Ce centre de stockage est conçu selon les mêmes principes qu'une installation de stockage de déchets dangereux (ISDD). La Figure 4-1 : Principe de conception du stockage au Cires illustre les grands principes de sa conception : les déchets sont stockés en surface, dans des alvéoles creusés à quelques mètres de profondeur dans une couche d'argile de plusieurs mètres d'épaisseur. Une structure multicouche de géomembrane imperméable et de structures drainantes est disposée au-dessus de la couche d'argile.

Une fois remplis de déchets jusqu'à formation d'un dôme, les alvéoles sont recouverts d'une couche de sable, puis fermés par une couverture composée d'un complexe de matériaux techniques et naturels, composés d'une géomembrane garantissant l'imperméabilité du stockage et un géotextile de protection. Une couverture argileuse est ensuite placée sur les alvéoles pour assurer le confinement des déchets à long terme et le réaménagement du site.

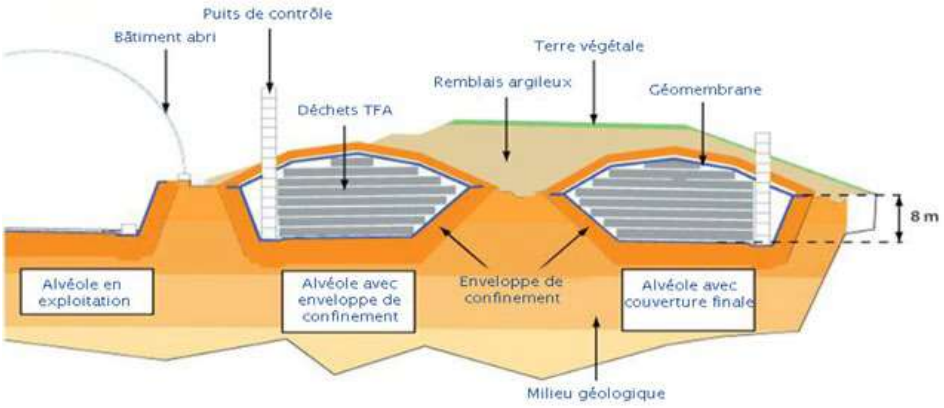

Figure 4-1 : Principe de conception du stockage au Cires

Les déchets qui y sont stockés sont majoritairement des déchets d'assainissement et démantèlement d'installations nucléaires françaises.

Critères radiologiques d'acceptation au Cires

Les déchets stockés au Cires sont caractérisés par une activité massique généralement comprise entre 1 et 100 Bq/g en fonction des radionucléides contenus. Cette activité peut néanmoins être ponctuellement supérieure (jusqu'à quelques milliers de Bq/g) pour de très faibles volumes de déchets et dans le cas de radionucléides très peu radiotoxiques. L'arrêté préfectoral d'autorisation d'exploitation du Cires définit les limites d'activité radiologique maximale susceptible d'être stockée, au travers notamment d'indices radiologiques d'acceptation en capacité (IRAC).

Les spécifications d'acceptation du Cires notifient les critères et limites de prise en charge des déchets. En particulier, elles imposent :

- des activités massiques des radionucléides contenus dans les déchets, au travers du respect de l'indice IRAS[12] ;
- un débit de dose maximal indicatif de 80 µSv/h au contact.

Déchets tritiés pouvant prétendre à un stockage au Cires

Dans le cas des déchets purement tritiés, l'activité maximale en tritium d'un lot de colis s'élève à 1 000 $Bq_{tritium}$/g. Une tolérance à 10 000 $Bq_{tritium}$/g par colis de déchets est néanmoins permise sous réserve de respecter l'exigence sur le lot.

Une activité limite de 15 TBq a été définie pour le tritium en lien avec le respect des autorisations de rejets du site. Pour information, l'activité tritium stockée au 31/05/2024 représente environ 7 % de cette limite.

Le site dispose également d'une limite de capacité de 2 TBq en tritium valable pour l'entreposage et le bâtiment de regroupement, tri, traitement.

[12] Indice Radiologique d'Acceptation au Stockage

4.4.2 Le Centre de Stockage de l'Aube (CSA)

4.4.2.1 Description de l'installation

Implanté sur les communes de Soulaines-Dhuys, Ville-aux-Bois et Epothémont dans le département de l'Aube, le Centre de stockage de l'Aube (CSA) est exploité par l'Andra depuis 1992.

Le CSA est une installation nucléaire de base (INB n°149) autorisée à accueillir 1 million de m^3 de colis de déchets de faible et moyenne activité principalement à vie courte. À fin 2024, le taux de remplissage du CSA s'élevait à 38,7 %. Selon les estimations réalisées par l'Andra, la capacité maximale autorisée pourrait être atteinte à l'horizon 2060-2070.

Les déchets qui y sont stockés sont majoritairement des équipements contaminés lors de la maintenance (gants, vêtements, outils…) et des déchets issus de l'exploitation d'installations nucléaires françaises (traitement d'effluents liquides ou gazeux). Ils proviennent également de laboratoires de recherche, d'hôpitaux, d'universités… ou d'opérations d'assainissement et de démantèlement.

Les colis de déchets radioactifs sont stockés, en surface, dans des ouvrages en béton armé. Une fois remplis, les ouvrages sont fermés par une dalle de béton ferraillé. L'étanchéité des ouvrages est assurée par la pose d'un revêtement imperméable. À terme, une couverture multicouche sera mise en place au-dessus des ouvrages afin d'assurer la protection des ouvrages et la limitation des infiltrations d'eau.

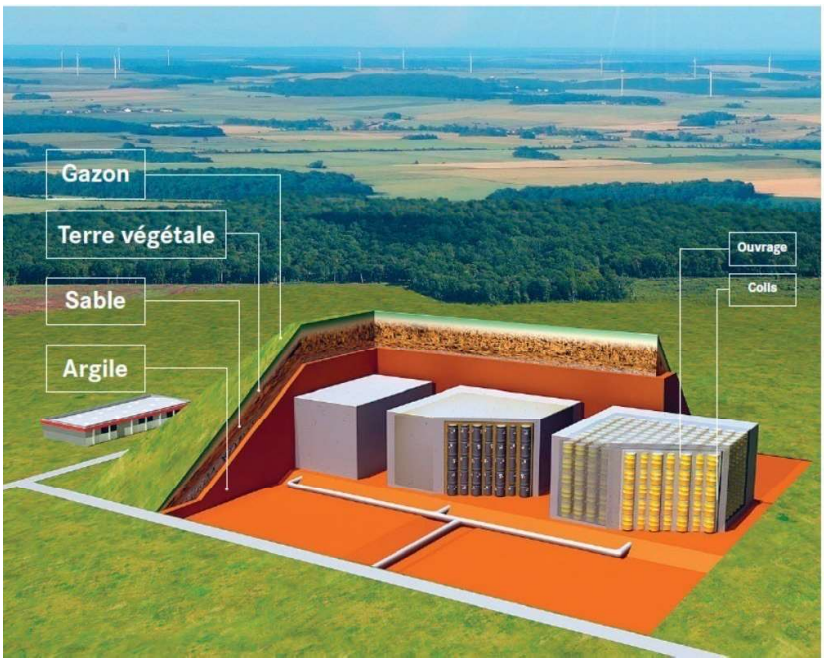

Figure 4-2 : Principe de conception du stockage au CSA

4.4.2.2 Critères d'acceptation au CSA

Les prescriptions techniques définissent une activité radiologique totale maximale stockée au travers de la définition de capacités radiologiques pour certains radionucléides. Des spécifications d'acceptation présentent les différentes exigences à respecter par les colis de déchets pour être acceptables en stockage (critères radiologiques et chimiques, déchets interdits ou dont l'acceptation est limitée, exigence de confinement, …).

Sur le plan des caractéristiques radiologiques, des dispositions de limitation de leur activité radiologique sont notifiées, en particulier elles prévoient les dispositions suivantes :

- Les colis dont les activités massiques dépassent les seuils d'enrobage pour certains radionucléides doivent présenter des performances de confinement spécifiques ;
- La limitation de l'activité massique des déchets, au travers du respect de la LMA[13]. Pour les radionucléides émetteurs alpha, c'est l'activité alpha totale résiduelle à 300 ans après prise en charge du colis qui doit être prise en compte ;

[13] Limite maximale d'acceptabilité des déchets

- Le débit de dose des colis doit être inférieur à 2 mSv/h au contact.

Certains radionucléides font l'objet de LMA individuelles. D'autres valeurs de LMA s'appliquent à des groupes de radionucléides et limitent la somme de leur activité.

Déchets Tritiés pouvant prétendre à un stockage au CSA

La capacité radiologique en tritium du CSA s'élève à 4 000 TBq.

Lors de sa conception, le CSA a bénéficié du retour d'expérience et de progrès réalisés pendant toute l'exploitation du centre de stockage de la Manche (CSM). Toutefois, les inventaires prévisionnels de colis des déchets tritiés décrits dans le dossier de création du CSA étaient prospectifs et présentaient de fortes incertitudes. Des révisions d'inventaires des colis de déchets tritiés du CEA ont été réalisées en 2000 et 2008 et ont permis de réduire ces incertitudes. En parallèle, les caractéristiques des colis des déchets tritiés ont fortement évolué et vont continuer à évoluer avec la perspective de production des déchets d'ITER.

La capacité radiologique en tritium actuelle du CSA (4 000 TBq) représente environ 40% de l'inventaire des déchets tritiés déjà produits avant décroissance (env. 9 100 TBq cf. Tableau 1). Cependant, la gestion prudente de la capacité tritium du CSA se traduit par le fait que cette capacité globale est très peu consommée. L'occupation radiologique de cette capacité tritium était d'environ 2% à fin 2024. Cette prudence vise à maîtriser le risque de marquage de la nappe.

Les critères d'acceptation du CSA concernant la présence de tritium dans les colis de déchets sont les suivants :

- Seuil d'enrobage (SE) ≤ 7,4 10^3 Bq/g
- Limite maximale d'activité (LMA) ≤ 2 10^5 Bq/g
- Taux de dégazage$_{tritium}$ ≤ 0,2 Bq/g/j ;
- Activité$_{tritium}$ totale par colis :
  - pour un fût à compacter, Activité$_{tritium}$ ≤ 1 GBq par fût, avec une acceptation particulière pour les colis ayant une activité$_{tritium}$ comprise entre 0,5 et 1 GBq par fût,
  - pour un caisson de 5 ou 10 m^3 à injecter, Activité$_{tritium}$ ≤ 50 GBq. avec une évaluation de l'activité susceptible d'être rejetée lors de l'injection pour les colis ayant une activité$_{tritium}$ comprise entre 5 et 50 GBq par colis, et une acceptation particulière si cette activité rejetée est > 0,1 GBq,
  - pour les autres colis destinés au stockage : Activité$_{tritium}$ ≤ 50 GBq par colis,

Des mesures de dégazage sont requises pour des colis présentant une activité massique tritium supérieure à 100 Bq/g. Une épreuve technique spécifique définit les conditions de réalisation de ces mesures de dégazage (cf. ET.051/C). Il est aussi demandé aux producteurs d'identifier les différentes formes de tritium (HT, HTO ou TOL) dans les déchets.

D'autres limites réglementaires sont fixées par l'arrêté de rejets du 21 aout 2006 :

Limites de rejets liquides dans les noues d'Amance : 5 GBq/an

Limites annuelles de rejets à la cheminée de l'ACD : 50 GBq/an

Dans les 2 cas les activités rejetées par le centre au cours d'un mois ne doivent pas dépasser le sixième des limites annuelles.

L'Andra a mis en œuvre une approche précautionneuse dans la gestion des colis de déchets tritiés, se basant sur une gestion prudente de la capacité radiologique tritium, et sur l'application de règles contraignantes (acceptations au cas par cas, taux de dégazage à ne pas dépasser et limitation des activités en tritium des colis destinés à être conditionnés et/ou stockés sur le Centre). Les critères actuels permettent de prendre en charge de petits volumes de déchets tritiés. Cependant, cette pratique présente un risque de dépassement de l'objectif de 100 Bq$_{tritium}$/L que l'Agence s'est fixé au niveau des eaux souterraines sous les ouvrages du CSA.

Au stade actuel, l'option de stockage au CSA est écartée pour les déchets tritiés dépassant les critères spécifiés.

Des études sont en cours concernant notamment l'acceptabilité de futurs colis de déchets tritiés d'ITER et du CEA respectant les critères spécifiés ci-dessus, mais dont l'acceptabilité pourrait être remise en cause par le grand nombre de colis à stocker. Un petit nombre de colis de déchets dégazants ou un grand volume de colis de déchets peu dégazants positionnés en ouvrage de stockage pourraient en effet engendrer un impact environnemental identique au niveau de la nappe phréatique du CSA. Les études en cours visent la modélisation phénoménologique du transfert des différentes formes du tritium des colis de déchets jusqu'à la nappe phréatique sous-jacente afin d'obtenir une compréhension adéquate des modes de transfert prépondérant et du comportement du tritium dans le stockage. La consolidation des critères d'acceptation des colis de déchets tritiés est rendue nécessaire au vu des volumes importants de colis de déchets prévus d'être produits par ITER et le CEA dans les décennies à venir.

A cet égard, il faut souligner la complexité des développements visant à évaluer préalablement et de façon sûre ce marquage. Ce dernier dépend en effet de nombreux paramètres, notamment l'inventaire des colis mis en jeu, la spéciation HT/HTO, le niveau de dégazage du colis, les caractéristiques de la nappe, le niveau de saturation hydraulique des composants, …

Mode de prévention du marquage de l'environnement au CSA

Du fait de sa petite taille, le tritium est extrêmement mobile. Sous sa forme eau tritiée, il peut non seulement être facilement absorbé par la peau (exposition transcutanée) et les membranes ou tissus biologiques des êtres vivants, mais peut aussi traverser facilement la matière lorsqu'il se trouve sous la forme de tritium gazeux. Ainsi, tout l'enjeu vis-à-vis du tritium pour un centre de stockage radioactif est de garantir son confinement au sein de l'installation. Cela peut se faire en limitant au maximum le dégazage des colis de déchets tritiés (principale source de tritium sortant des colis), puis éventuellement en cherchant à immobiliser le tritium sous une forme chimique moins mobile que le tritium gazeux (HT), *a minima* durant le temps de sa décroissance radioactive, de sorte à éviter tout marquage de l'environnement.

Dans le cadre de la surveillance des eaux destinées à la consommation humaine (EDCH), la qualité radiologique des eaux est évaluée grâce à plusieurs indicateurs dont l'activité en tritium. Pour le tritium, une valeur de référence est fixée à 100 Bq/l. Considéré comme un *« **indicateur de contamination d'origine anthropique** »*, il ne constitue en aucun cas un seuil sanitaire : l'OMS fixe en effet un seuil de potabilité pour le tritium à 10 000 Bq/l.

L'Andra considère toutefois qu'il n'est pas acceptable de marquer de manière significative la nappe au-delà de 100 Bq/l.

La valeur réglementaire de 100 Bq/L a été retenue par la Commission européenne comme seuil d'alerte pour déclencher des analyses complémentaires (*i.e.* « Directive 98/83/CE du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine ») et transposée dans le code de la santé publique (*i.e.* « Décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles » puis « Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique »).

Le retour d'expérience de l'Andra sur le Centre de la Manche (CSM) et sur le Centre de l'Aube (CSA) ont fait l'objet d'une publication explicitant et justifiant les dispositions restrictives mises en œuvre pour autoriser le stockage de colis de déchets tritiés ([5] §2) dans le respect de cette limite.

Ce schéma basé sur l'absence de marquage significatif en tritium a amené à des conditions de prise en charge particulières en entrée sur les centres de stockage.

Ces conditions ont été prises en données d'entrée pour l'élaboration du Dossier d'Orientation pour la gestion des déchets tritiés (document CEA) et pour la stratégie d'entreposage pour décroissance retenue en 2008 et présentée en introduction (§1.1).

4.4.3 Le projet de Centre industriel de stockage géologique (Cigéo)

Description de l'installation

Cigéo est le projet de centre de stockage de déchets radioactifs de haute (HA) et moyenne activité à vie longue (MA-VL) en couche géologique profonde porté par l'Andra (cf. Figure 4-3).

Le stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde consiste à mettre en place les colis de déchets dans une installation souterraine implantée dans une couche géologique dont les caractéristiques permettent de confiner et limiter la migration des substances radioactives contenues dans ces déchets. La profondeur des ouvrages de stockage doit être telle qu'ils ne puissent être affectés de façon significative par les phénomènes naturels externes attendus (érosion, changements climatiques, séismes…) ou par des activités humaines banales.

L'article D. 542-91 du code de l'environnement précise que l'inventaire à retenir par l'Andra pour les études et recherches conduites en vue de concevoir le centre de stockage Cigéo « *comprend un inventaire de référence et un inventaire de réserve. L'inventaire de réserve prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique* ». L'article D. 542-91 indique également que « *le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence* ».

L'inventaire de référence de Cigéo s'élève à 83 000 m^3 de déchets radioactifs conditionnés (73 000 m^3 de colis de déchets MA-VL et 10 000 m^3 de colis de déchets HA).

L'inventaire de réserve prend en compte des scénarios tels que l'arrêt du retraitement des combustibles usés, la prolongation des réacteurs actuels ou au contraire l'arrêt du nucléaire à l'issue de 50 ans d'exploitation pour les installations, ainsi que la réorientation et la prise en charge d'une partie des déchets catégorisés FA-VL. Cet inventaire est constitué des déchets dont l'envoi au Centre de stockage Cigéo ne constitue pas l'option de gestion de référence, mais pour lesquels il est nécessaire de s'assurer, au travers d'études d'adaptabilité, que la conception du projet ne contient pas d'élément rédhibitoire à leur stockage.

La demande d'autorisation de création du Centre de stockage Cigéo, déposée par l'Andra en janvier 2023, est en cours d'examen par les services instructeurs.

Déchets Tritiés pouvant prétendre à être acceptés dans le Centre de stockage Cigéo

Les déchets MA-VL tritiés entrant en considération dans l'inventaire de Cigéo sont les déchets tritiés possédant soit un niveau d'activation et/ou de contamination important par des radionucléides autres que le tritium, ce qui justifie une prise en charge en stockage géologique. Il s'agit des déchets de démantèlement et de déchets de maintenance d'ITER, tels que des tuiles de couverture et autres équipements endommagés par le plasma, la chaleur ou les radiations.

Rappelons toutefois que la loi de programme de 2006 [1] stipule que l'option de stockage profond ne doit être affichée qu'après avoir démontré qu'il est impossible de stocker ces déchets à faible profondeur pour des raisons de sûreté ou de radioprotection. Pour des questions de proportionnalité aux enjeux de sûreté, le stockage en couche géologique profonde de déchets fortement tritiés ne sera retenu que pour les déchets dont l'activité le justifie. En raison du caractère vie courte du tritium, ce stockage n'est pas la filière préconisée pour les déchets purement tritiés.

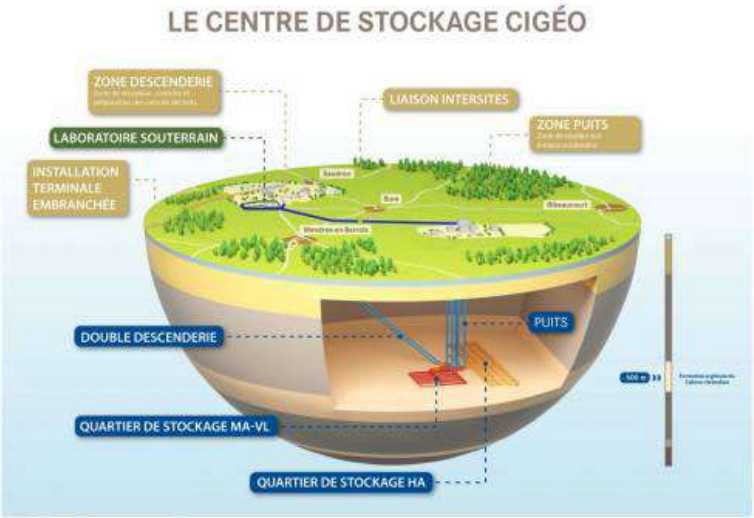

Figure 4-34 : Le projet de centre de stockage Cigéo

Un des objectifs de l'Agence pour l'installation Cigéo est de maitriser ses rejets radioactifs et de les maintenir aussi proche que possible du niveau du bruit de fond autour de l'installation. Aussi, il conviendra donc pour certains déchets MAVL tritiés dégazants de pouvoir réduire via un traitement, un conditionnement ou un entreposage de décroissance, le niveau de dégazage des colis de déchets.

L'exploitation du quartier MAVL de l'installation Cigéo est actuellement prévue jusqu'à l'horizon 2100. Durant ce temps, de nombreuses optimisations relatives à la gestion des déchets tritiés (traitement, conditionnement, entreposage, stockage) pourront être mises en œuvre.

4.4.4 De futurs centres de stockage de surface

Il est d'ores et déjà identifié le besoin de nouvelles installations de stockage de surface afin d'assurer une continuité de prise en charge des colis de déchets TFA et FMA-VC. Dans le cadre des développements de ces stockages, des inventaires prévisionnels de production et besoin de mise en stockage seront remis par les producteurs. Les flux et caractéristiques des déchets tritiés, pouvant relever de ces stockages, devront être intégrés aux inventaires prévisionnels des producteurs transmis à l'Andra en vue de nourrir les études de développement des stockages. Les critères d'acceptation associés à ces centres découleront des études de sûreté.

4.4.4.1 Un futur centre de stockage de surface de déchets très faiblement actifs (TFA2)

L'action TFA.2 du PNGMDR 2022-2026 (6) stipule que « *même dans l'hypothèse d'une diversification des modes de gestion des déchets TFA, une deuxième installation de stockage centralisées demeurera nécessaire*. » Dans ce contexte, l'Andra a rendu un rapport détaillant les démarches d'une recherche de site accompagné d'un calendrier prévisionnel, comme attendu par l'article 15 de l'arrêté du PNGMDR 2022-2026 [13]. Le besoin de la mise en service d'un nouveau centre est projeté à l'horizon 2045.

4.4.4.2 Un futur centre de stockage de surface de déchets faiblement et moyennement actifs (CSFMA2)

Selon les études actuelles, le CSA devrait atteindre sa capacité maximale autorisée à l'horizon 2060-2070, date au-delà de laquelle de nouvelles capacités de stockage pour les déchets FMA-VC seront nécessaires.

4.4.5 Réflexions sur les options de stockage des déchets tritiés

Lors des travaux préparatoires du présent rapport, l'opportunité de développer ou de faire évoluer les options de stockage a fait l'objet d'analyse. Ces opportunités de développement de solutions de gestion se classent en deux grandes familles :

- **Les options d'optimisation du CSA** : Le confinement des déchets radioactifs est assuré par les colis, les ouvrages et la barrière géologique. Au sein d'un centre de stockage existant, en l'occurrence le CSA, tout ou partie d'un ouvrage dédié pourrait être adapté au stockage des déchets tritiés selon les enjeux que ceux-ci soulèvent (voir Encart).

- **Les autres options de stockage** : soit un stockage en milieu argileux, soit un stockage sur un site adapté (sur un site producteur ou ailleurs).

Ces deux familles d'options pourront se décliner en plusieurs sous-familles tel que précisé ci-après.

4.4.5.1 Opportunités d'optimisation du CSA

Des opportunités d'optimisations identifiées au niveau du CSA portent sur la conception d'ouvrages adaptés aux déchets tritiés et se déclinent comme suit :

- Mise en œuvre d'un cuvelage interne en inox soudé :

  Cette option consisterait à ajouter un cuvelage en acier inoxydable à tout ou partie de l'ouvrage dans lequel seront placés les colis de déchets tritiés. L'acier inox est identifié comme un des seuls matériaux métalliques en mesure d'assurer des performances de confinement élevées. Son utilisation, sous réserve de la garantie de l'absence de défauts, pourrait conduire à un relâchement tritium suffisamment faible dans la nappe sous les ouvrages du CSA.

- Ajout de piégeurs dans les ouvrages entre les colis ;

  Les travaux menés dans le cadre des projets MACH[3] (i.e. MAtrices Cimentaires pour le piégeage du tritium (H3)) puis PACH[3] (i.e. PACkage for tritium (H3) waste) pour piéger de façon irréversible le tritium gazeux dans les colis pourraient s'appliquer également aux ouvrages. Il s'agirait ainsi d'intégrer à la formulation du béton de remplissage des Ouvrages Bétonnés (OB) ce mélange d'oxyde d'argent et d'oxyde de manganèse sous une forme et une concentration adaptée. Le premier avantage attendu par une telle mise en œuvre serait le piégeage de la forme HT dégazant des colis de déchets tritiés. Ce béton avec piégeur de HT pourrait également être complété par un système de piégeage de l'eau tritiée (par exemple, de type zéolithe ou conteneur étanche).

NOTE : Comme présenté au chapitre 4.4.2. du présent document, l'objectif de l'Andra est de limiter le marquage des eaux sous les ouvrages à 100 Bq/L au maximum. Dans la mesure où cette limite n'est qu'un indicateur et non un seuil sanitaire (lui-même fixé à 10 000 $Bq.L^{-1}$ par l'OMS), une certaine tolérance par rapport à cette valeur de 100 Bq/l pourrait être envisagée sous réserve qu'elle reste limitée.

Bien que ces opportunités d'optimisation, ainsi que leur éventuelle combinaison, présentent certains atouts tel que de pouvoir bénéficier de l'utilisation d'un centre existant, elles comportent un inconvénient majeur. En effet, elles nécessitent chacune d'importants travaux de R&D dont l'objectif serait de s'assurer que la performance de confinement du tritium est et reste suffisante pendant le temps nécessaire à sa décroissance. Ces différentes pistes d'optimisations feront l'objet de l'analyse multicritère ultérieure.

4.4.5.2 Stockage de déchets tritiés à faible profondeur dans une couche argileuse

Principe

Des évaluations exploratoires de la migration du tritium en milieu argileux et en conditions saturées ont été réalisées considérant des caractéristiques géologiques d'une formation argileuse et le fonctionnement hydraulique d'un site hypothétique de stockage, ainsi qu'un inventaire théorique de colis de déchets tritiés dont le conditionnement ne possède pas de performance de confinement particulière.

En 2017, l'analogie avec le projet de stockage de déchets FA-VL a été considéré à titre d'hypothèse pour les études, celui-ci étant envisagé à faible profondeur dans une formation argileuse sur un site situé au nord de la Communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines. Dans le cadre de ce projet, deux types d'architectures de stockage sont à l'étude :

- une architecture de stockage dite « à ciel ouvert » (cf. Figure 5 gauche), pour laquelle les alvéoles de stockages sont réalisées au fond d'une excavation dans la couche des Argiles tégulines. Après mise en place des colis à stocker dans les alvéoles, l'excavation est refermée par une couverture d'argile constituée des argiles excavées et de matériaux d'apport (« couverture remaniée ») ;
- une architecture de stockage en galeries souterraines (cf. Figure 5 droite), pour laquelle les alvéoles de stockage sont constituées de galeries creusées dans la couche d'argile. Après mise en place des colis dans les alvéoles et réalisation d'un bouchon de fermeture de ceux-ci, les ouvrages d'accès aux alvéoles sont refermés par des matériaux d'apport.

Figure 4-5 : Exemple d'architectures des alvéoles de stockage du programme FAVL

Les résultats des évaluations exploratoires réalisées pour les déchets tritiés montrent que le transfert de tritium et le marquage des eaux souterraines et de surface peuvent être limités à des niveaux très faibles dès lors qu'une couche argileuse d'au moins 10 mètres entoure le stockage des colis de déchets.

L'Andra considère que ce concept de stockage de déchets tritiés dans une formation argileuse est intéressant et qu'il mériterait des développements complémentaires afin d'obtenir une vision plus complète du comportement du tritium et des autres radionucléides également présents dans les déchets, et ce durant toutes les phases de vie du stockage : exploitation, période de fermeture et du transitoire insaturé amenant à la saturation à long terme.

Pour limiter le marquage de l'environnement, un concept de stockage en milieu totalement ou partiellement saturé en eau permettrait de confiner le tritium pendant le temps nécessaire à sa décroissance et de bloquer durablement la migration du tritium au niveau du milieu environnant proche. Un tel concept pourrait donc être plus adapté qu'un concept tel que le CSA dans sa conception actuelle.

Le projet d'installation de Stockage de déchets FA-VL sur le site de la Communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines (CCVS)

Description du projet

Les travaux de l'Andra ont conduit à identifier en 2013 un site présentant des caractéristiques géologiques adaptées à l'accueil d'un stockage de déchets FA-VL, situé sur la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines (CCVS) dans l'Aube. L'Andra a remis un rapport d'étape en 2015 dans le cadre du PNGMDR 2013-2015 (9) concluant à l'absence d'éléments rédhibitoires quant à la poursuite des études pour les déchets étudiés à ce stade.

Aussi, conformément au PNGMDR 2022-2026, les études se poursuivent, afin notamment d'être en mesure de confirmer la faisabilité d'un stockage implanté à 30 m de profondeur dans la formation argileuse du site de la CCVS et d'éclairer sur les typologies de déchets pouvant y être stockés.

En 2024 en réponse à l'article 33 de l'arrêté PNGMDR 2022-2026, les études de faisabilité du développement d'un stockage sur le site de la CCVS ont fait l'objet du rapport Art.33 - Évaluation de la faisabilité d'un stockage à faible profondeur de déchets de faible activité à vie longue dans la formation argileuse du site de la Communauté de Communes de Vendeuvre-Soulaines - Dossier d'options techniques et de sûreté [15]. Les principales conclusions sont les suivantes :

"*L'intégration de l'ensemble des résultats obtenus des études menées dans le cadre du présent rapport et des enseignements tirés permet de montrer, sur le plan technique, la faisabilité d'un stockage à faible profondeur sur la zone d'étude du site de la CCVS pour une partie des déchets étudiés, à savoir une majorité des déchets radifères de l'inventaire étudié et une quantité très limitée de déchets appartenant aux autres typologies de déchets, à savoir les déchets de graphite, les déchets bitumés et les déchets technologiques. L'inventaire précis des déchets, en dehors des déchets radifères, qui seront étudiés (nature et volume des déchets) pour poursuivre les études de conception de l'installation de stockage sera notamment fonction du comportement des radionucléides pilotant les impacts radiologiques cumulés qu'ils occasionnent, afin de respecter la contrainte de dose de 0,25 mSv/an sur la période 0 – 50 000 ans et l'objectif de dose de l'ordre de quelques mSv/an dans le cadre des situations conventionnelles au-delà de 50 000 ans. La définition de cet inventaire reposera également sur les préoccupations et enjeux industriels des producteurs.*"

"*En tout état de cause, l'Andra considère que la conception d'un stockage sur la zone d'étude de la CCVS fait sens, d'une part pour gérer une grande partie des déchets radifères sous réserve d'une réduction significative de leur composition en sels chimiques – il constitue en cela une solution de gestion appropriée et proportionnée aux enjeux de ces déchets, d'autre part pour y étudier le stockage d'autres déchets tels que des déchets TFA pour renforcer la synergie industrielle."*

Déchets tritiés pouvant prétendre à un stockage sur le site de la CCVS

À ce stade, l'Andra considère sur la base des études précédemment réalisées qu'une partie du site de la CCVS pourrait, étant donné ses caractéristiques géologiques, confiner efficacement le tritium et, dès lors constituer une option pour la gestion et le stockage des déchets tritiés. Cette implantation dans la CCVS pourrait être associée géographiquement à l'implantation du projet FAVL. Cette option nécessite toutefois d'être consolidée en fonction des multiples plateformes que pourraient accueillir la CCVS et des exigences associées à toutes les phases de vie d'un stockage.

4.4.5.3 Un futur stockage de déchets tritiés sur site(s) producteurs

Pour préserver des capacités de stockage existants, l'intérêt de stocker les déchets tritiés directement sur les sites appartenant aux producteurs de déchets, et ainsi, à proximité des installations qui les produisent, réside principalement dans la limitation des transports au travers du territoire et potentiellement à une réduction des coûts globaux de gestion. Sous réserve que les déchets tritiés produits sur un site producteur soient compatibles avec les caractéristiques de ce site, cette option consisterait à y implanter un stockage.

Cette solution de gestion de déchets a d'ailleurs fait l'objet d'études spécifiques prescrites par le PNGMDR 2022-2026 pour les déchets TFA. En effet, l'article 16 de la 5e édition du PNGMDR demande que soient réalisées *« une étude sur la faisabilité de créer des installations de stockage décentralisées ainsi qu'une analyse relative à la possibilité de stocker des déchets de très faible activité dans des installations de stockage de déchets dangereux »*.

En premier lieu, cette option nécessite de s'assurer de la compatibilité entre les caractéristiques du site visé, les ouvrages de stockage et les déchets ou colis de déchets qui devront y être stockés. Des études approfondies, de sûreté (radiologique et chimique) et environnementales, sont à mener sur chacun des sites identifiés.

En termes de coût, une analyse entre les gains liés à l'absence de transport, la durée réduite d'entreposage et les éventuels surplus par rapport à un stockage centralisé liés à la réalisation des études sur le ou les sites producteurs, devra être réalisée. En effet, le foncier étant aujourd'hui une ressource rare pour l'implantation de nouveaux centres de stockage, un faible inventaire par site s'oppose à l'intérêt d'établir des centres de stockage au plus près des installations nucléaires concernées.

Il est à noter, que les problématiques de marquage environnemental mentionnées au chapitre 1 et 4 pourraient être identiques sur le site du producteur.

Il est à noter également, qu'en réponse à l'article 16 de la 5ème édition du PNGMDR, pour les seuls déchets TFA d'EDF, d'Orano et du CEA, faute de géologie adéquate sur leurs sites et pour d'autres raisons technico-économiques, aucun développement de centre de stockage n'y est envisagé à ce stade.

Actuellement, cette option n'a été identifiée pour aucune famille de déchets tritiés.

4.4.6 Résumé des réflexions sur les options de stockage

En résumé, à ce stade des travaux d'identification des filières de gestion des déchets tritiés, la première catégorie d'options consiste à considérer les options et projets existants comme le Cires, le CSA avec ou sans adaptation des ouvrages existants ou la conception ce nouveaux, et Cigéo. Ces options seront conservées et étudiées dans l'analyse multicritère ultérieure, tenant compte de différents critères techniques, environnementaux, économiques et sociétaux.

La seconde catégorie d'options qui a été identifiée pour le stockage des déchets tritiés envisage l'implantation d'un nouveau centre de stockage dont tout ou partie de l'installation serait dédiée aux déchets tritiés. Cette implantation pourrait se faire à faible profondeur, dans un site composé d'une formation argileuse, ou bien auprès des installations nucléaires d'entreposage ou de production des déchets tritiés. Cette dernière option présente l'avantage de limiter le transport des colis de déchets. Néanmoins se posera la question des propriétés géologiques et hydrogéologiques de ces sites au regard de celles recherchées pour l'implantation d'un centre de stockage, notamment en termes de perméabilité ou de la présence d'une nappe phréatique ou d'un aquifère avec un faible débit.

Aussi, à ce stade des travaux d'identification des filières de gestion des déchets tritiés, l'option d'établir une installation de stockage des déchets tritiés, dans un centre dédié ou mutualisé, dans une formation argileuse à faible profondeur, apparait également être une option à étudier.

Ces réflexions pourront être développées dans le cadre de l'analyse multicritère ultérieure.

5. Synthèse des options envisageables par nature physique

Le présent document sera utilisé comme base pour les travaux d'un groupe de travail d'analyse multicritères (AMC) des options de gestion des déchets tritiés. Cette étape constitue la première partie dans l'élaboration du futur schéma industriel de gestion.

Pour cela, ce chapitre présente une synthèse de l'ensemble des éléments structurants qui influencent la définition des options de gestion des déchets tritiés.

L'identification d'une option de gestion pour un déchet tritié repose sur trois facteurs principaux :

- les caractéristiques du déchet considéré (sa nature physique, ses caractéristiques radiologiques, les enjeux qu'il présente, sa date de mise à disposition pour stockage …) ;
- les spécifications ou hypothèses d'acceptation de l'option de gestion considérée (capacités volumiques, critères radiologiques, critères chimiques, marquage environnemental, …) ;
- la disponibilité de l'option de gestion (entreposage, stockage) considérée à l'horizon de temps souhaité (liée à la date de mise en service/fin d'exploitation, et aux capacités de réception des installations concernées).

Les options proposées sont données à titre indicatif, sans présager des conclusions d'études de sûreté qui seraient nécessaires pour confirmer la possibilité de prise en charge dans celles-ci. Elles feront l'objet d'une analyse multi critères. De la description des options, il ressort d'ores et déjà des critères d'intérêt tels que les critères technico économiques, les durées de développement des options ainsi que la production de déchets secondaires.

Le tableau ci-dessous reprend les principales données concernant les centres de stockage et l'installation CENTRACO présentés au chapitre 4.3 faisant partie des options de gestion possibles pour tout ou partie des déchets tritiés.

CENTRACO	CIRES	TFA2	CSA	CSFM2	CCVS	Cigéo
Incinération	Centre de surface				Faible profondeur	Couche géologique profonde
		Ouverture à horizon 2045		Ouverture à horizon 2060-2070	Ouverture à horizon 2050	Ouverture à horizon 2050
n.d.	Fermeture à horizon 2040/2045		Fermeture à horizon 2060-2070			Fermeture à horizon 2170

Figure 5 1 : Caractéristiques principales des différentes options de gestion des déchets tritiés

Il convient de noter que le développement et l'implantation d'un nouveau centre de stockage s'inscrivent dans un processus long et soumis à de fortes contraintes notamment environnementales et sociétales. La prévision calendaire pour une nouvelle capacité de stockage fluctue donc fortement selon le schéma retenu pour cette création :

- Une plateforme dédiée sur un site multi-filière (par exemple sur la CCVS) pourrait s'insérer adéquatement avec le schéma global à définir pour un tel site ; au regard de l'inventaire global présenté au §3., la plateforme « déchets tritiés » pourrait être assez limitée en termes d'emprise et pourrait être étudiée.
- L'option d'un nouveau site de stockage dédié aux déchets tritiés dont la recherche de site et la conception n'ont pas été enclenchées serait soumis à de plus fortes incertitudes et prendrait certainement plus d'une décennie.

A ce stade, une approche par niveau d'activité et par nature physique a été privilégiée pour proposer des orientations des déchets vers les options de gestion de façon synthétique. Le niveau d'activité à prendre en compte concerne les critères tritium (activités massique et totale, dégazage) et la filière de stockage principalement définie par le contenu en RN à vie longue.

L'Andra s'appuie sur les connaissances actuelles partagées avec les producteurs. Les chapitres qui suivent sont structurés selon cette approche par niveau d'activité et par nature physique.

5.1 Déchets métalliques

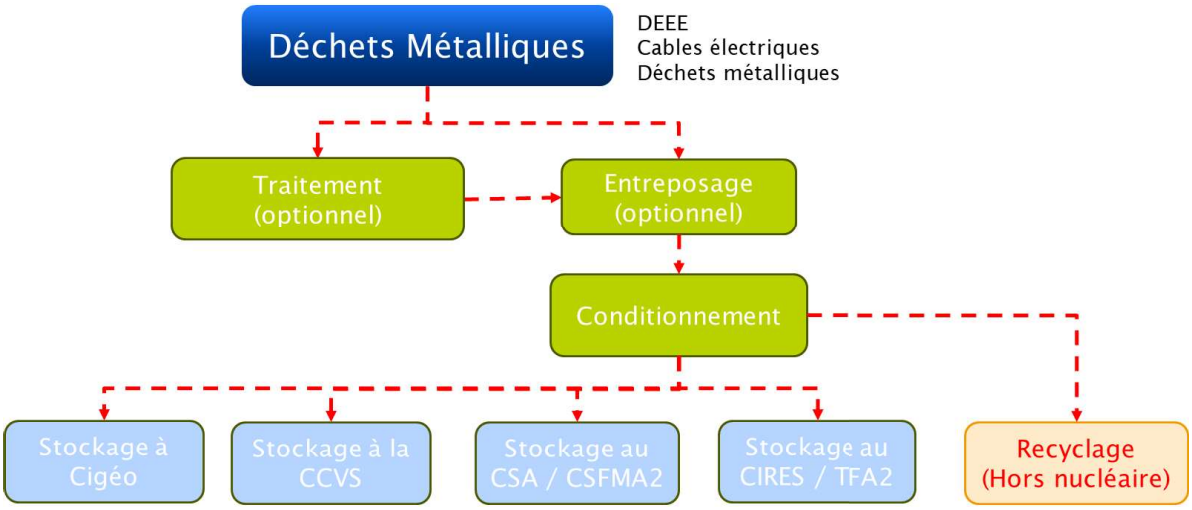

Figure 5-1 : Illustration des options de gestions envisageables pour les déchets métalliques

Dans les figures 5-1 à 5-3, l'option à étudier d'un stockage en ouvrage optimisé au CSA est comprise dans l'option « Stockage au CSA (ou CSFMA2) ».

Les voies les plus intéressantes pour préserver les ressources de stockage sont les voies favorisant le recyclage des métaux quand cela est possible (TFA à ce stade). Les traitements thermiques ou la fusion des métaux avec récupération du tritium (quand c'est possible et justifié économiquement), sont à privilégier pour les déchets purement tritiés ou à fortes teneurs en tritium (première barrière, chambre à vide, …) et permettent de réduire considérablement l'activité des déchets, rapprochant potentiellement les lingots produits des valeurs limites envisageables pour une valorisation de ces métaux à forte valeur ajoutée dans le domaine conventionnel.

NOTE : Concernant les déchets métalliques MAVL d'ITER, les options de gestion consistent à évaluer la plus-value, sur un plan technico-économique, d'un traitement et d'un conditionnement adapté par rapport à un entreposage de longue durée (env. 50 ans) avant prise en charge dans Cigéo.

5.2 Déchets organiques solides

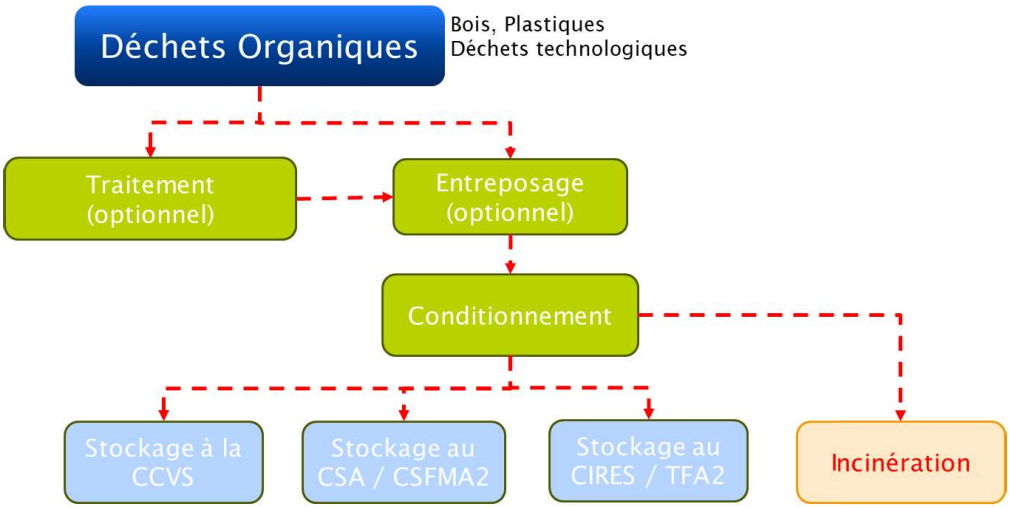

Figure 5-2 : Illustration des options de gestions envisageables pour les déchets organiques

Compte-tenu des volumes considérés et de la faible valeur ajoutée du matériau, le recyclage des plastiques offre peu de perspectives. L'incinération dans l'installation Centraco conduit à un facteur de réduction de volume important ; cependant, ces opérations présentent un coût élevé et conduisent à relâcher la quasi-totalité du tritium contenu dans les déchets.

L'ASN s'étant déjà positionnée contre une éventuelle incinération de déchets tritiés qui rejetterait 100% du tritium, plusieurs voies alternatives restent possibles :

- le stockage au Cires ou TFA2 avec éventuellement colis confinant, et/ou traitement de détritiation (étuvage) et/ou entreposage préalable ;
- le stockage au CSA ou CSFMA2 avec éventuellement colis confinant, et/ou traitement de détritiation (étuvage) et/ou entreposage préalable ;
- Eventuellement colis confinant et/ou entreposage suivi d'un stockage en milieu argileux.

L'aménagement d'un circuit de traitement des gaz apte à retenir le tritium et à le fixer sur un support (type zéolithe ou hydrure[14]) pour le recycler ou l'entreposer pour décroissance, n'apparait pas comme une solution industriellement réalisable sur l'installation Centraco.

Les masses et volumes de déchets organiques/plastiques et chroniques de livraisons (associées à la production et aux caractéristiques tritium des déchets) seront des données fondamentales pour justifier le choix d'une voie par rapport aux autres, sachant que la voie du stockage TFA reste la plus économique à ce jour et pour quelques dizaines d'années encore.

5.3 Déchets inertes solides (minéraux / béton / …)

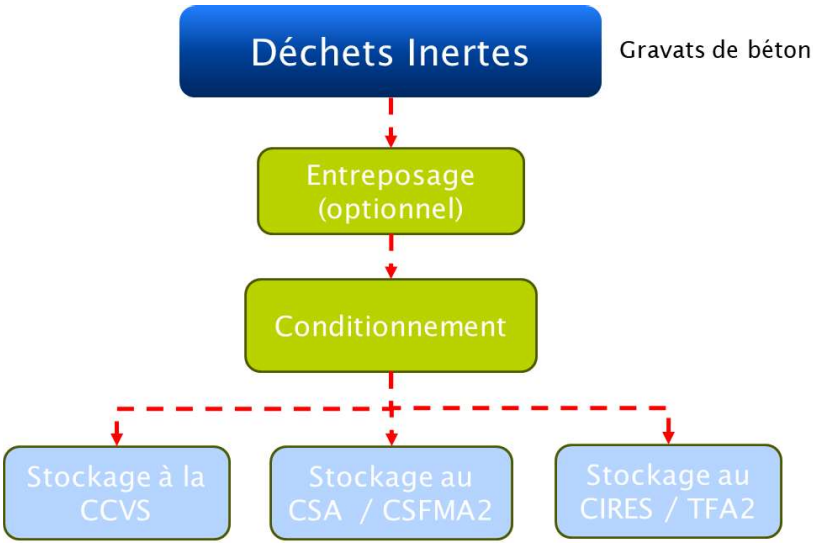

Figure 5-3 : Illustration des options de gestions envisageables pour les déchets inertes

Un stockage avec ou sans entreposage de décroissance pourra être réalisé au CSA ou CSFMA2 ou Cires ou TFA2.

Enfin, une prise en charge sur la CCVS « plateforme déchets tritiés » pourrait être envisagée à condition de démontrer le non-marquage de l'environnement et la faisabilité technico-économique d'un tel stockage.

5.4 Déchets de type zéolithe

Comme indiqué au §2.2, les déchets tritiés liquides (aqueux) issus des procédés de détritiation de Valduc sont adsorbés sur de la zéolithe, conditionnés en conteneur inox mis en fûts de 223L entreposés sur le site producteur en attente de traitement[15] ou d'une prise en charge sur un centre de stockage à définir.

L'eau tritiée fixée sur zéolithe apparait comme le terme source tritium prépondérant du site CEA de Valduc.

[14] Seule l'adsorption sur hydrures métalliques sous la forme gazeuse (HT) permet le recyclage aisé.
[15] Non défini à date

Au regard des activités tritium adsorbées sur la zéolithe (80 TBq par fut de 223 L en moyenne à fin 2022), il apparait que des durées d'entreposage longues seront nécessaires avant de pouvoir respecter les critères actuels d'acceptation du CSA. En moyenne, en considérant un fut de 223 L mis en coque CBF-C1, environ 160 années seraient nécessaires pour respecter les critères de cet exutoire, si bien que ces déchets seront prêts à être stockés à une date ultérieure à la date de saturation du CSA et seront orientés vers un futur projet CSFMA2.

En fonction des caractéristiques du colis, un conditionnement durablement confinant pour le tritium adsorbé sur cette zéolithe semble nécessaire et pertinent pour toutes les options de stockage. Un tel conditionnement, appelé « conditionnement optimisé », reste à développer.

5.5 Déchets tritiés liquides

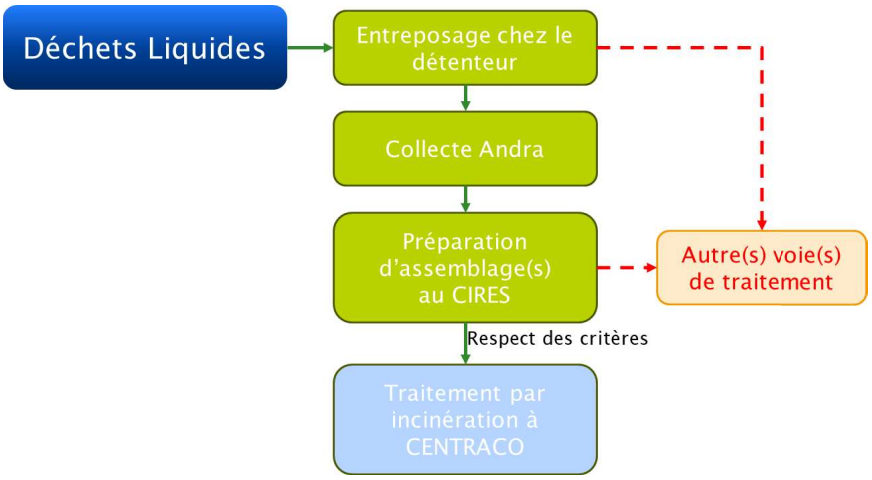

Figure 5-4 : Illustration des options de gestions envisageables pour les déchets liquides

Bien que les solutions de préparation et d'assemblage avant incinération mises en œuvre au Cires donnent une certaine flexibilité pour la prise en charge, les pratiques actuelles ne sont pas suffisantes pour gérer l'ensemble de l'inventaire résiduel des déchets tritiés liquides des producteurs non électronucléaires.

Compte-tenu des activités élevées de certains déchets liquides, des durées d'entreposage longues (> 75 ans en moyenne et en l'absence d'assemblage) sont à prévoir avant incinération de ces déchets et peuvent représenter des risques pour les personnes ou le personnel en cas de dégradation des contenants ou d'incidents durant l'entreposage (incendie, chute, fuite, …).

D'autres voies de traitement seraient envisageables mais sont considérées peu crédibles à ce stade du fait de la complexité de mise en œuvre pour de faibles quantités de déchets ou du fait des rejets importants qu'elles engendreraient. Ce sont par exemple :

- Modifications des spécifications de prise en charge dans l'installation Centraco (= autorisation exceptionnelle de rejets)
- Ouverture de flacons dans le procédé de La Hague (à discuter avec ORANO)
- Traitement par pyrolyse

Les liquides scintillants et huiles tritiées de Valduc pourront suivre la filière « producteurs non électronucléaires » de l'Andra (illustrée à la Figure 5-4) après entreposage si nécessaire.

5.6 Déchets tritiés gazeux

Pour les déchets tritiés gazeux, aucun procédé de traitement nouveau n'existe ou est en projet. La Figure 5-5 donne les options actuelles et envisageables pour ces déchets.

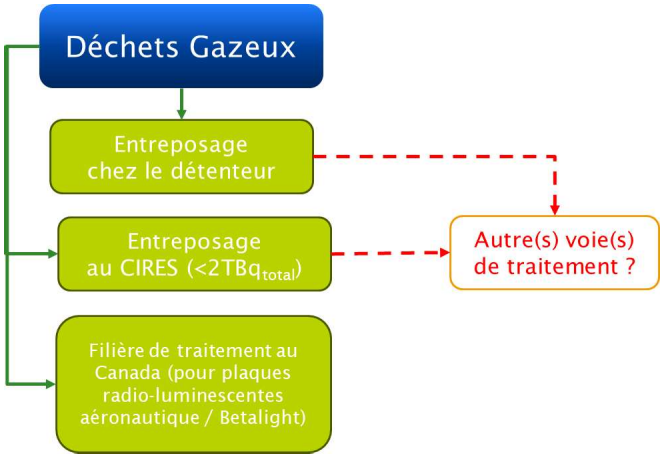

Figure 5-5 : Illustration des options de gestions envisageables pour les déchets gazeux

Une option peu crédible et alternative à l'entreposage chez le détenteur ou au Cires pourrait être l'organisation d'un relâchement maitrisé et concerté dans une installation présentant des autorisations de rejet adéquates : bien qu'inadéquate sur le plan de rejets, cette option consisterait en un ou quelques rejets concertés et très dilués, et avec un impact sanitaire très faible.

Ces déchets aujourd'hui sont entreposés sur des installations adaptées, chez les détenteurs ou au Cires. Une augmentation de capacité d'entreposage du Cires ne semble donc pas nécessaire à date mais paraît accessible sur le plan de la démonstration de sûreté si elle devait s'avérer nécessaire et adaptée à la bonne gestion de certains déchets.

Sous réserve de démonstration de son efficacité envers les gaz contenus, l'utilisation d'une matrice de conditionnement de type PACH3 (décrit au paragraphe 4.2) pourrait permettre de limiter les risques de dégazage de ces déchets après conditionnement dans l'éventualité d'une prise en charge en stockage.

6. Synthèse des enjeux et perspectives

Le présent rapport décrit les options de gestion pour les déchets tritiés établi en réponse aux articles 45 et 46 de l'arrêté du 9 décembre 2022 établissant les prescriptions du PNGMDR [3] .

Il présente les inventaires des différentes catégories de déchets tritiés produits et à produire pour chaque producteur ainsi que leur gestion actuelle ou prévisionnelle associée. Il décrit ensuite les options de gestion existantes ou à développer pour leur traitement, leur conditionnement, leur entreposage ainsi que leur stockage ou autre filière de valorisation. Les différentes options de gestion envisageables ont été identifiées pour chaque typologie de déchets tritiés, selon leur nature physique et niveau d'activité en tritium, ouvrant le champ des possibles pour leur gestion définitive depuis un stockage en surface jusqu'à un stockage en couche géologique profonde.

Depuis 2008, la gestion des déchets tritiés repose sur un entreposage de décroissance d'une cinquantaine d'années dans l'attente de la définition d'options de gestion définitive que constituent les stockages.

Jusqu'à aujourd'hui, la majorité des déchets tritiés est détenue et entreposée par le CEA et l'Andra. Dans le futur, ce ne sera plus le cas avec la mise en service de l'installation ITER. Aussi, l'objectif de l'exercice demandé par le PNGMDR est de proposer in fine un schéma de gestion pour l'ensemble des déchets tritiés produits et à produire sur le territoire. La définition des options de gestion en est la première étape.

Au stade de la définition des options, il est nécessaire de rappeler que les rejets de tritium par les installations existantes qui produisent ou utilisent ce radionucléide ont un impact sanitaire faible (cf. Annexe du livre Blanc ASN - Bilan annuel des rejets de tritium pour les installations nucléaires de base entre 2018 et 2022). Ces rejets induisent toutefois un marquage systématique de l'environnement mesuré dans les eaux souterraines notamment. Les rejets de tritium de ces installations font l'objet de contrôles continus et d'évaluations régulières. La future installation ITER n'ayant pas encore d'autorisations de rejets est conçue pour ne pas générer d'impact sanitaire notable. Néanmoins, à l'instar des installations existantes, l'installation ITER est également susceptible de marquer l'environnement durant l'exploitation et la maintenance de la machine principalement, mais également dans le cas où les déchets doivent y être entreposés pour décroissance.

Dans ce contexte, considérant les inventaires présentés au Tableau 2, les enjeux associés aux différentes catégories de déchets tritiés sont résumés ci-après :

- *Enjeux liés à l'activité des déchets et à la période radioactive du tritium*

Les critères d'acceptation pour le stockage au Cires, au CSA ou pour un traitement par incinération sont très restrictifs pour éviter un marquage environnemental local principalement. Cela conduit à devoir entreposer ces déchets sur des durées qui pourraient être largement supérieures à 50 ans pour certains colis car il n'existe pas de solution de stockage actuelle qui semble adaptée à la prise en charge d'une grande quantité de déchets tritiés sans période d'entreposage pour décroissance ou sans traitement ou conditionnement adapté préalable au stockage.

- *Enjeux liés aux déchets tritiés liquides et gazeux*

Concernant les déchets tritiés liquides et gazeux, deux problématiques se cumulent :

- une problématique liée à un faible inventaire de déchets, qui ne justifie pas la création d'un entreposage ad hoc, ni le développement d'installations de traitements particuliers ;
- une problématique liée à la caractérisation des déchets, très couteuse en temps et en ressources pour un inventaire faible et possédant de grosses incertitudes en termes de représentativité quant aux échantillons sélectionnés.

- *Enjeux liés au conditionnement des déchets tritiés*

Pour éviter un marquage autour et au droit des centres de stockage, la maitrise du confinement du tritium des colis de déchets est essentielle et doit faire l'objet de démonstration aussi bien pour la phase d'exploitation que pour la phase de surveillance de ces centres.

En fonction des caractéristiques du colis, un conditionnement durablement confinant pour le tritium pourrait être nécessaire et pertinent pour certaines options de stockage car l'inventaire en volume et en activité peut être très significatif, à l'exemple des fûts contenant de l'eau tritiée adsorbée sur zéolithe. On notera que les conditions de relargage du tritium des colis peuvent être incertaines à moyen terme en stockage du fait de phénomènes possibles comme l'auto-radiolyse, de la pression d'hélium engendrée dans le conteneur et des conditions de saturation du stockage. Le TRL actuel étant faible, un tel conditionnement limitant le dégazage

des colis de déchets, pourrait être appelé « conditionnement optimisé », nécessitera environ une dizaine d'années de R&D, durée compatible avec les besoins d'évacuation et le développement des stockages. On notera également qu'au niveau de l'entreposage, un conditionnement optimisé de certains déchets pourrait diminuer les rejets gazeux de l'installation d'entreposage.

- *Enjeux liés au traitement des déchets tritiés*

L'enjeu lié au traitement des déchets tritiés, tel que la détritiation, tient d'abord dans sa justification technico-économique, la complexité opérationnelle (notamment pour les déchets FMA-VC et MAVL) et ensuite dans le dimensionnement des procédés à mettre en œuvre au vu du gain espéré pour la gestion globale de ces déchets. De plus, certains procédés sont encore à un niveau TRL bas et nécessitent des développements à l'image du projet Valofusion.

De manière prospective, le dimensionnement des capacités de traitement des déchets métalliques et plastiques d'ITER devraient donc être définies sur la base d'une analyse multicritère à mener dès que les inventaires prévisionnels liés au nouveau programme de recherche seront consolidés.

- *Enjeux liés au stockage des déchets tritiés*

Le tritium est un élément radioactif très mobile, très difficile à confiner. Il peut donc franchir les différentes barrières mise en œuvre classiquement dans les stockages actuels et, au-delà d'une certaine teneur dans les déchets, induire un marquage de l'environnement du stockage.

De ce fait, les teneurs en tritium dans les déchets admissibles sur les centres de stockage Andra sont limitées comme indiqués au §4.4.2. Le retour d'expérience lié au marquage du CSM en 1976 confirme qu'il est nécessaire de gérer le tritium avec prudence car le marquage de l'environnement au tritium, bien qu'induisant un impact sanitaire très faible au regard des activités mises en jeu, est une spécificité propre à ce radionucléide et à sa grande mobilité. Une augmentation significative du tritium mesuré dans l'environnement du stockage peut conduire à questionner et mettre en doute les performances de confinement des autres radionucléides stockés et le bon fonctionnement du stockage alors que celui n'est pas remis en cause.

Pour un nombre important de colis de déchets tritiés, l'acceptabilité de ceux-ci dans les centres de stockage existants ne peut pas être confirmée à ce stade par l'Andra en raison des risques de marquage de la nappe située sous le centre de stockage et de la difficulté d'évaluer ce marquage. Ce sujet fait l'objet d'une étude particulière dont les objectifs sont la bonne compréhension des modes de transfert du tritium dans les ouvrages du CSA et la consolidation des critères d'acceptation liés au tritium. Les conclusions de ces études seront intégrées à la réalisation de l'analyse multicritères.

A ce stade, l'Andra rappelle qu'un concept de stockage comme celui du CSA ou du CIRES ne semble pas adapté au stockage d'une grande quantité de tritium dans les colis. Des adaptations aux ouvrages du CSA seront néanmoins étudiées dans le cadre des travaux futurs ainsi que le développement de nouvelles installations de stockage.

En synthèse, au stade de la réflexion sur les options de gestion, il ressort que les déchets tritiés pourraient être :

- entreposés pour décroissance dans des installations existantes ou à créer jusqu'à l'atteinte des critères de prise en charge sur les centres de stockage en activité : la durée d'entreposage dépend de l'activité (et du dégazage) initiale des colis et des critères d'admission des centres de stockage à la date envisagée de prise en charge. Compte-tenu des exutoires existants et de leurs capacités de confinement et de stockage du tritium, des durées d'entreposage supérieures à 50 ans pourraient être envisagées pour certains déchets afin de respecter les critères d'admission et limiter le marquage environnemental. Aussi, le stockage de ces déchets ne serait pas compatible avec les durées d'exploitation des installations de stockage actuelles. A cet égard, dans son avis ASN-AV-0379 du 21/05/2021 relatif aux études concernant la gestion des déchets nécessitant des travaux spécifiques remises en application du PNGMDR 2016-2018, considérant que la pertinence d'une durée d'entreposage supérieure à 50 ans devrait être appréciée à l'aide de l'analyse multicritère (susmentionnée), l'ASN estime que l'entreposage de déchets sur une période supérieure à 50 ans doit être dûment justifié et, en tout état de cause, limité aux familles de déchets pour lesquelles cette solution est adaptée. Pour ces déchets des options de gestion (traitement, conditionnement, stockage en milieu argileux) devraient être envisagées ;
- traités thermiquement pour réduire la quantité de tritium présente dans les déchets : bien qu'estimés très efficaces, les traitements thermiques sont relativement couteux à mettre en œuvre et ne permettent pas toujours d'éviter la phase d'entreposage de décroissance pour respecter les critères d'admission des exutoires actuels. En outre, ces traitements concernent uniquement certaines natures physiques déchets (métaux et plastiques principalement) et déplacent la contamination liée au tritium vers les déchets secondaires issus du traitement. Les quantités et propriétés de déchets secondaires générés par ces traitements ainsi que l'intérêt technico-économique de l'ensemble de ce processus restent à évaluer dans le détail;
- évacués vers une future installation de stockage à créer (ou à modifier) dont la conception et le dimensionnement pourraient prendre en compte les caractéristiques des colis de déchets tritiés. Les éventuelles modifications aux ouvrages du CSA entrent dans cette catégorie de solutions à étudier.

Ces solutions ne sont pas exclusives les unes des autres.

Soulignons qu'en cas de succès de la R&D visant à développer des colis innovants et aux caractéristiques confinantes pour le tritium, ces colis innovants pourraient faciliter la prise en charge des déchets tritiés sur les sites de stockage et/ou réduire significativement les durées d'entreposage.

Comme demandé par le PNGMDR, la suite de ce travail sera la réalisation de l'analyse multi-critères de ces options de gestion qui nourrira, avec l'avis de l'ASNR, le schéma industriel attendu au titre de l'article 47 de l'arrêté PNGMDR de décembre 2022.

Certaines options identifiées dans ce rapport nécessiteront des études et développements techniques, des études complémentaires de sûreté, pour s'assurer de la compatibilité des enjeux présentés par ces déchets avec les options de stockage, et/ou encore des évolutions réglementaires pour leur mise en œuvre. Par ailleurs, des concertations avec les territoires qui accueilleraient ces projets pourront être organisées.

ANDRA.398.C

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
www.andra.fr

Document arrivé

en interne