

ETUDE DES SCENARIOS DE GESTION A LONG TERME DES DECHETS DE FAIBLE ACTIVITE MASSIQUE A VIE LONGUE

Page : 1/56

Ce document, bien que propriété de l'Andra, peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation

21/12/2012





Titre original du document

Etude des scénarios de gestion à long terme des déchets de faible activité
massique à vie longue

Contenu du document

Ce rapport rend compte de l'étude des scénarios de gestion des différents déchets de faible activité massique à vie longue (FAVL) prévue par le décret n°2012-542 du 23 avril 2012 pris pour l'application de 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.

L'étude s'appuie sur les résultats de travaux antérieurs ainsi que sur des actions complémentaires menées par l'Andra et les producteurs de déchets depuis 2010.

Les données d'entrée de l'étude sont constituées par :

- les différents types de stockage existants ou à l'étude (chapitre 2) ;
- l'inventaire des différents déchets FAVL, leur contenu radiologique et chimique, et la connaissance du comportement des déchets. Les actions menées par les producteurs depuis 2010 en lien avec l'Andra ont apporté des compléments de connaissances déterminants pour l'étude, notamment en matière d'inventaire radiologique. Ces actions de caractérisation et de recherche, complétées par des échanges à l'international, se poursuivront dans les prochaines années. Pour les déchets radifères, l'inventaire, les hypothèses de colisage et l'état des connaissances sur le comportement sont synthétisés au chapitre 3. Pour les déchets de graphite ils sont synthétisés au chapitre 4. Enfin l'état des connaissances des autres types de déchets FAVL est donné au chapitre 5 ;
- les avancées des travaux exploratoires menés par les producteurs sur les techniques possibles de traitement des déchets ;
- les recommandations du groupe de travail mis en place par le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) afin de faire un retour d'expérience du processus de recherche d'un site pour les déchets FAVL.

Ces données ont permis à l'Andra et aux producteurs de bâtir des scénarios possibles de gestion des différents types de déchets FAVL, articulant entreposage, tri ou traitement éventuels, conditionnement et stockage. Ces scénarios sont décrits au chapitre 3 pour les déchets radifères, au chapitre 4 pour les déchets de graphite et au chapitre 5 pour les autres déchets FAVL. En s'appuyant sur les conclusions de cette analyse, de nouvelles orientations pour la poursuite des études sont présentées au chapitre 6.

Une synthèse du rapport est donnée ci-après. Elle inclut, outre les principaux résultats des travaux réalisés, des propositions pour la poursuite de la démarche de recherche de site en vue de l'implantation d'un stockage à faible profondeur. Ces propositions sont fondées sur les recommandations du groupe de travail du HCTISN.

SYNTHESE ET PROPOSITIONS

Contexte

L'article 4 de la loi de programme n°2006-739 du 28 juin 2006 prévoit la mise au point de solutions de stockage pour les déchets graphites et les déchets radifères, ainsi que la mise au point de procédés permettant le stockage des sources scellées usagées dans les centres existants ou à construire.

La recherche de site pour l'implantation d'un centre de stockage pour ces déchets, classés de type FAVL, a été lancée à l'échelle nationale par l'Andra avec l'accord du Gouvernement en juin 2008.

L'Andra a transmis fin 2008 au Gouvernement un rapport d'analyse au plan géologique, environnemental et socio-économique de la quarantaine de communes qui avaient marqué leur intérêt pour le projet.

En juin 2009, le Gouvernement a demandé à l'Andra de réaliser des investigations géologiques sur les deux communes qu'il a retenues. Pendant l'été 2009, les conseils municipaux des deux communes ont décidé de retirer leur candidature.

Dans ce contexte, l'Etat a demandé à l'Andra de poursuivre les discussions avec les territoires où des communes avaient exprimé leur candidature. Le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire a constitué un groupe de travail afin de faire un retour d'expérience du processus de recherche d'un site pour les déchets FAVL.

Le décret n°2012-542 du 23 avril 2012 établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) demande à l'Andra de remettre aux ministres chargés de l'énergie, de l'environnement, de la sûreté nucléaire et de la radioprotection avant le 31 décembre 2012 une étude des scénarios de gestion des déchets FAVL, intégrant la possibilité de gérer séparément les déchets de graphite et les déchets radifères, objet du présent rapport.

Options de conception étudiées pour le stockage

Deux options de conception se distinguant notamment par leur profondeur et l'épaisseur de la couche d'argile hôte ont été considérées. L'option de stockage sous couverture remaniée (SCR) repose sur une implantation du stockage dans une couche de faible perméabilité avec une composante argileuse ou marneuse dominante, à une dizaine à une quinzaine de mètres de profondeur. On considère à ce stade la réalisation d'une excavation à ciel ouvert jusqu'au niveau du stockage. Les alvéoles de stockage sont creusées à même l'argile. Les déchets sont conditionnés dans des conteneurs et stockés dans l'alvéole sur plusieurs niveaux. Les vides entre conteneurs sont comblés par un matériau granulaire ou cimentaire. Une fois remplis, les alvéoles sont couvertes d'une couche d'argile compactée, provenant des déblais du site, puis d'une couche de protection végétale reconstituant le niveau naturel du site.

Dans un stockage sous couverture intacte (SCI), les alvéoles de stockage sont implantées au milieu d'une formation argileuse épaisse. L'accès s'effectue par une descenderie et des galeries longitudinales. Une fois le stockage exploité, des scellements sont posés et les accès sont remblayés par les déblais du site.

Scénarios de gestion des déchets radifères

Les déchets radifères sont essentiellement des déchets historiques provenant de l'exploitation de minerais pour l'extraction de terres rares (Rhodia), de zirconium (Areva/Cezus, la seule production poursuivie à ce jour) ou d'uranium (CEA) ainsi que de la dépollution d'anciens sites industriels ayant utilisé le radium ou le thorium (mission de service public assurée par l'Andra).

Les déchets de Rhodia sont constitués de trois familles : (i) les résidus radifères (RRA) entreposés dans les installations exploitées par le CEA sur le site de Cadarache, avec une autorisation actuellement prévue jusqu'en 2015, (ii) les résidus solides banalisés (RSB) qui sont entreposés sur le site de Rhodia de la Rochelle et (iii) les déchets qui seront issus de la valorisation des matières thorium.

Les déchets de Cezus sont entreposés sur le site de Jarrie (Isère) dans un bâtiment dédié. L'installation pourrait accueillir les déchets non insolubilisés produits jusqu'en 2023.

Les déchets radifères du CEA sont entreposés sur la dépositaire d'Itteville (Essonne), site annexe de l'ancienne usine de traitement de minerai du Bouchet, situé à l'extérieur de l'enceinte de l'usine. Ces déchets résultent d'opérations d'assainissement du site de l'ancienne usine du Bouchet conduites par le CEA et qui sont terminées à ce jour. La commune a demandé au CEA d'évacuer cette dépositaire.

Les déchets issus des opérations d'assainissement de sites pollués au radium ou au thorium seront entreposés par l'Andra dans son nouveau bâtiment d'entreposage (mis en service à l'automne 2012) situé sur le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires, Aube). Lors de l'enquête publique sur le bâtiment d'entreposage, les élus ont demandé à avoir une visibilité sur le projet de stockage des déchets qui y seront entreposés.

Le tonnage total des déchets radifères à stocker est limité à ce stade à environ 50 000 tonnes, soit un volume conditionné de l'ordre de 60 000 m³ selon les hypothèses de conditionnement envisagées. Des incertitudes existent, liées en particulier au nombre de sites à assainir et au niveau d'assainissement requis ainsi qu'au choix de la filière de gestion de certains déchets radifères qui sont déclarés à ce jour TFA.

Les déchets radifères de l'inventaire actuel présentent une activité massique en radium 226 allant de quelques becquerels par gramme à quelques centaines de becquerels par gramme, une activité massique moyenne en uranium 238 et en thorium 232 de l'ordre de 20 becquerels par gramme.

La faible mobilité des radionucléides contenus dans les déchets radifères¹ et la possibilité d'une décroissance significative de leur activité radiologique à l'échelle de quelques dizaines de milliers d'années² permettent leur gestion à long terme en SCR. Une attention particulière doit néanmoins être apportée à l'inventaire radiologique en radioéléments à vie très longue notamment l'uranium et le thorium et au contenu chimique des déchets.

Pour le cas particulier des RSB, Rhodia mène des études d'exploration d'autres pistes de gestion notamment une extraction des terres rares et du thorium contenu dans le cadre d'une valorisation avec les matières thorium ou une incinération en vue d'une réduction de volume. Dans l'hypothèse où un suremballage en conteneur serait considéré pour le stockage des fûts de RRA, les cendres ainsi obtenues pourraient être utilisées comme matériau de remplissage des conteneurs. Selon les résultats de ces études, une partie ou la totalité des RSB resteront destinées au stockage SCR.

¹ A condition de s'assurer du maintien de conditions physico-chimiques et hydrogéologiques favorables.

² Cette échelle correspond au seuil supposé de préservation de l'intégrité du stockage SCR en lien avec la cinétique d'évolution géodynamique externe (érosion,...) dans un site présentant des caractéristiques géomorphologiques adaptées.

Scénarios de gestion des déchets de graphite

Les déchets de graphite représentent un tonnage d'environ 23 000 tonnes. Compte tenu de leur inventaire radiologique EDF et le CEA différencient les empilements et protections biologiques en graphite des chemises de cartouches de combustibles.

L'essentiel des déchets (environ 80 %) proviendra du démantèlement des « empilements en graphite » des réacteurs EDF et CEA de la filière Uranium Naturel – Graphite – Gaz (Bugey, Saint-Laurent, Chinon, Marcoule). Les opérations de démantèlement sous eau prévues par EDF produiraient également des résines échangeuses d'ions (REI). L'autre partie des déchets de graphite (environ 20 %) est issue de l'exploitation passée de ces réacteurs. Ces déchets d'exploitation sont entreposés sur les sites de Saint-Laurent (chemises graphite entreposées dans des silos semi-enterrés), Marcoule (chemises graphite des réacteurs Chinon A2 et A3 entreposées dans les fosses de l'installation MAR 400 et de l'installation de dégainage) et de La Hague (déchets issus du traitement des combustibles UNGG entreposés dans les silos 115 et 130 ; ces déchets seront conditionnés à partir de 2016 et entreposés dans un bâtiment dédié). Un volume limité de déchets graphite (de l'ordre de 1%) est également issu des réacteurs expérimentaux du CEA.

Avec l'hypothèse de conditionnement en colis de 10 m³ en béton armé, les déchets de graphite représenteraient un volume total de stockage de l'ordre de 100 000 m³.

Compte tenu de leur inventaire présumé en produits d'activation à vie longue mobiles (en particulier le chlore 36, estimé initialement de l'ordre de 32 TBq, et éventuellement la fraction organique du carbone 14), les études menées par l'Andra jusqu'en 2009 ont montré qu'un stockage sous couverture remaniée (SCR) ne permettrait pas d'atteindre des performances suffisantes pour les déchets de graphite. La sûreté à long terme du stockage impose une barrière argileuse de diffusion épaisse, performante et durable entre les déchets et l'environnement conduisant l'Andra à proposer un stockage sous couverture intacte (SCI) pour ces déchets. Lors de la recherche de site, la Commission nationale d'évaluation (CNE) avait recommandé dans son rapport de juin 2008 de rechercher un site permettant de stocker les déchets de graphite dans une couche d'environ 100 m d'épaisseur et à une profondeur d'une centaine de mètres. La CNE avait également recommandé de conduire en parallèle une étude sur les conséquences et le coût supplémentaire qu'entraînerait le stockage profond des déchets de graphite.

Depuis 2010, les évolutions en matière de caractérisation radiologique et les récents développements en matière de procédés de traitement ont conduit l'Andra, EDF et le CEA à envisager d'autres scénarios de gestion, fondés sur des opérations de tri et de traitement en amont, pouvant élargir le choix de filières de stockage. Concernant l'inventaire radiologique des déchets, les travaux menés par EDF et le CEA les conduisent à proposer une révision à la baisse de l'activité radiologique en ³⁶Cl, rendant une partie importante de ce graphite (les empilements) potentiellement acceptable dans un stockage de type SCR. Concernant le traitement, les résultats des premiers travaux de R&D réalisés par EDF offrent des perspectives d'une décontamination importante du chlore 36 et du tritium, ainsi que d'une décontamination sélective du carbone 14.

En plus du scénario qui considère le stockage de la totalité des déchets de graphite en SCI, les scénarios industriels suivants sont ainsi étudiés pour les déchets de graphite d'EDF et du CEA³ :

- Tri des déchets pour un stockage des empilements en SCR (environ 69 000 m³ de volume de stockage) et des chemises et autres dans Cigéo (environ 10 000 m³ de chemises et 5 000 m³ de résines échangeuses d'ions en volume de stockage) ;

³ Pour les déchets de graphite entreposés dans les silos 115 et 130 de l'établissement de La Hague (environ 7 000 m³ de volume de stockage), Areva n'avait pas retenu de scénario de tri ou d'un traitement en phase amont de son projet de reprise des silos. Areva est en cours de redéfinition de son scénario global de conditionnement des déchets UNGG. A ce jour leur gestion repose sur un SCI dans une hypothèse de co-stockage avec les autres déchets de graphite. A titre de précaution ces déchets sont pris en compte dans les réserves de l'inventaire de Cigéo.

- Extraction de radionucléides (^{36}Cl , ^{14}C , ^3H ,...) avec stockage du graphite partiellement décontaminé en SCR et des résidus concentrés conditionnés et des résines échangeuses d'ions dans Cigéo ;
- Gazéification (destruction totale) du graphite après décontamination avec stockage des résidus de traitement conditionnés et des résines échangeuses d'ions dans Cigéo.

Ces scénarios sont évalués par l'Andra, en lien avec EDF et le CEA, sous les angles de la sûreté, de la technico-économie et des risques techniques et réglementaires.

Les études de sûreté à long terme montrent que la performance du stockage des empilements ou du graphite partiellement décontaminé en SCR dépend notamment de leur inventaire radiologique, du terme source résiduel (lié à la cinétique de relâchement des radionucléides par les déchets) et des caractéristiques du site.

L'exercice préliminaire d'évaluation technico-économique des scénarios montre que le coût ne permet pour l'instant d'écarter aucun scénario. La comparaison économique des scénarios est notamment dépendante du coût des installations de stockage et/ou de traitement, non encore opérationnelles. En l'état des connaissances, les analyses de risques techniques et réglementaires ne conduisent pas non plus à écarter de scénario.

Par mesure conservatoire, l'évaluation de sûreté du projet Cigéo présentée dans le cadre de sa demande d'autorisation de création couvrira des déchets issus du graphite : au titre de réserves, l'évaluation prendra en compte l'activité radiologique totale des déchets de graphite. Cette activité sera supposée concentrée dans un volume de colis de stockage réduit issu pour partie d'opérations de tri et/ou traitement (22 000 m³ au total).

EDF a lancé, en lien avec le CEA et l'Andra, des actions de R&D pour évaluer les possibilités de mise en œuvre industrielle de procédés de décontamination et de gazéification du graphite. Ce programme, déployé de 2012 à 2014, étudie d'une part les différentes voies de traitement du graphite et d'autre part les différents modes de conditionnement des résidus concentrés. Au final, ces études permettront de disposer à fin 2014 des premiers éléments sur les performances accessibles par les voies de traitement et des coûts associés. Par ailleurs, EDF et le CEA poursuivront à la demande de l'Andra leurs actions pour consolider la connaissance du contenu radiologique et des modalités de relâchement issues de leurs différents types de déchets de graphite.

L'Andra poursuivra d'ici 2015 les analyses relatives à l'acceptabilité des déchets issus des scénarios considérés dans les différents types de stockage et les modes de conditionnement associés. Pour les scénarios de tri et de traitement qui conduiraient à stocker une partie des déchets dans un stockage SCR, cela nécessite de disposer des caractéristiques réelles d'un site.

L'évaluation technico-économique des scénarios sera approfondie par l'Andra et les producteurs, sur la base de la définition des installations de traitement et de conditionnement, du futur coût de référence de Cigéo et des estimations économiques des autres filières de stockage.

Le besoin futur éventuel en capacité d'entreposage des déchets de graphite déjà produits et de ceux à produire par les opérations de démantèlement sera évalué sur la base des solutions de gestion à long terme retenues en 2015, de leur calendrier de mise en œuvre, du calendrier de démantèlement des réacteurs UNGG et des contraintes de sûreté sur les installations d'entreposage existantes.

L'ensemble de ces éléments permettra de définir le schéma global de gestion des différents déchets de graphite d'ici 2015.

Scénarios de gestion des déchets bitumés

Les fûts d'enrobés bitumineux (FAVL et MAVL) sont entreposés dans les casemates de la station de traitement des effluents liquides de Marcoule. La totalité des casemates doit être progressivement reprise à la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire Défense. Dans ce cadre, une partie de ces fûts est déjà extraite et reconditionnée pour un entreposage intermédiaire polyvalent (EIP). La reprise de l'ensemble des 60 000 fûts est prévue par le CEA d'ici fin 2035.

A la demande du CEA, l'Andra a mené en 2009 une étude d'acceptabilité au plan de la sûreté des enrobés bitumineux les moins actifs de Marcoule en SCR, évalués par le CEA à environ 40 000 fûts.

Du point de vue de la sûreté, les résultats obtenus par l'Andra montrent que l'acceptabilité en SCR des fûts d'enrobés bitumineux dépend notamment (i) des activités radiologiques, particulièrement en radionucléides mobiles (^{129}I , ^{36}Cl), (ii) des caractéristiques du site et (iii) de l'inventaire radiologique total qui sera considéré *in fine* dans ce stockage.

Des scénarios de tri, conditionnement et entreposage des bitumes sont étudiés par le CEA en lien avec l'Andra. Le CEA estime que certains fûts d'enrobés bitumineux relèvent de la catégorie FAVL de par leur inventaire radiologique établi au travers de l'historique des combustibles traités à l'origine. Les opérations de reprise et de tri opérées par le CEA lui permettent de conforter les inventaires radiologiques au travers de caractérisations non destructives (mesures nucléaires) et pour partie destructives. Le CEA réévaluera les activités radiologiques contenues. Sur cette base, l'Andra et le CEA ont défini plusieurs scénarios de gestion à étudier :

- stockage en SCR ;
- caractérisation / tri avec stockage des bitumes les moins actifs en SCR et des autres bitumes dans Cigéo ;
- stockage en SCI avec les déchets de graphite (si cette solution était retenue pour les déchets de graphite) ;
- traitement avec stockage des résidus concentrés dans Cigéo ;
- stockage dans Cigéo.

Ces scénarios sont associés par le CEA à différentes modalités d'entreposage à l'étude.

Dans le cadre du PNGMDR 2013-2015, le CEA fournira son point de vue technique et économique concernant l'option du traitement chimique ou thermique de ces bitumes pour tenter d'immobiliser dans d'autres matrices les déchets radioactifs qu'ils contiennent.

L'Andra poursuivra les études d'évaluation de sûreté du stockage des déchets bitumés en fonction des données de site.

Ces scénarios seront évalués par l'Andra et le CEA sous les angles de la sûreté, de la technico-économie et des risques techniques et réglementaires.

A titre conservatoire, l'évaluation de sûreté du projet Cigéo présentée dans le cadre de sa demande d'autorisation de création couvrira également ces enrobés bitumineux FAVL et leur inventaire radiologique. Un volume de colis de stockage de 39 000 m³ est pris en compte dans les réserves de l'inventaire du projet.

Les capacités futures d'entreposage nécessaires seront précisées par le CEA en tenant compte des résultats d'étude des différents scénarios de gestion envisagés pour ces déchets.

L'ensemble de ces éléments permettra d'élaborer une filière de gestion de ces déchets. Le choix d'un scénario optimal nécessite notamment de disposer des caractéristiques réelles d'un site SCR.

Autres déchets FAVL

Les autres déchets FAVL identifiés à ce jour sont les sources scellées usagées et les objets contenant du radium, de l'uranium et du thorium de faible activité massique, les déchets à radioactivité naturelle renforcée (RNR) et les résidus du traitement de l'uranium naturel produits par l'établissement de Malvési de la société Comurhex (Areva).

- Concernant les sources scellées usagées et les objets, les études menées [9] et [10] par l'Andra ont permis d'identifier des filières de stockage pour les différents types de sources scellées usagées et des objets. Environ 80 % en nombre des sources répertoriées seraient destinées au SCR, en particulier les détecteurs de fumée à l'américium, les parasurtenseurs au tritium ou radium. Une fois conditionnés, ces sources et objets constitueront un volume de stockage limité (de quelques centaines de mètres cubes à quelques milliers de mètres cubes).
- Une partie des déchets à radioactivité naturelle renforcée est déjà comprise dans l'inventaire des déchets radifères. Selon les déclarations des producteurs dans le cadre de l'élaboration de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs 2012, à fin 2010 17 000 m³ sont considérés comme relevant de la catégorie FAVL (dont des déchets radifères). A ce stade peu de données sont disponibles sur le contenu radiologique et physico-chimique de ces déchets. L'étude des scénarios de gestion nécessite de poursuivre le travail sur l'inventaire et la connaissance de ces déchets. Il sera aussi nécessaire de préciser le rythme de production de ces déchets pour suivre l'évolution des quantités produites.
- Sur le site de Malvési de la société Comurhex (Areva), les résidus du traitement de conversion en tétrafluorure (UF₄) des concentrés d'uranium naturel sont actuellement entreposés dans des bassins couvrant environ 30 hectares pour décantation des rejets solides (boues), puis évaporation des effluents liquides. Les boues de décantation présentes dans ces bassins admettent une activité massique moyenne (sur matière brute) en uranium 238 d'environ 30 Bq / g et en thorium 230 pouvant aller jusqu'à 200 Bq / g.

Dans le cadre du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) 2010-2012, Comurhex a réalisé une étude sur les possibilités de stockage *in situ* de ces déchets et des terres et stériles miniers contaminés présents sur le site [15]. Comurhex a également présenté les prévisions de production de déchets à venir, qui font apparaître un flux annuel d'environ 3 500 m³ de résidus de traitement filtrés, soit un volume à produire de l'ordre de 88 000 m³ à échéance 2030, pour lesquels Areva a étudié les possibilités de stockage sur site avec les déchets historiques déjà présents.

Dans son avis n°2012-AV-0166 du 4 octobre 2012, l'ASN a indiqué qu'il convenait que Comurhex Malvési distingue la gestion des déchets historiques de celle des déchets à produire.

Pour les déchets historiques, Comurhex poursuivra la caractérisation de ces déchets ainsi que les études de faisabilité des options de stockage *in situ* en sub-surface. Comurhex présentera d'ici fin 2013 un calendrier des études et des investigations nécessaires à engager afin d'évaluer les délais de faisabilité des options de stockage.

Pour les déchets à produire, Comurhex étudiera en lien avec l'Andra les conditions de gestion de ces déchets et leur impact sur l'ensemble de la filière FAVL. L'Andra et Comurhex présenteront d'ici fin 2013 un rapport d'étape où figureront les orientations envisagées et les filières optimisées.

- L'Andra et les producteurs poursuivront les travaux engagés dans le cadre du PNGMDR 2010-2012 concernant l'optimisation des flux de déchets radioactifs entre les filières de gestion existantes et en projet [2]. Les producteurs ont demandé notamment d'étudier la faisabilité de stockage en SCR d'une partie des déchets technologiques de la Hague (colis du type CBF-C'2).

Orientations du projet

La majorité des déchets radifères est déjà produite et est actuellement entreposée dans l'attente d'une solution de stockage. Les études 2010-2012 confirment la possibilité de prendre en charge les déchets radifères dans un stockage SCR, dans une couche géologique à dominante argileuse affleurante ou sub-affleurante présentant une épaisseur suffisante. La caractérisation du site constitue un préalable au passage du projet de stockage à une phase industrielle. Parallèlement, la poursuite des travaux de consolidation de l'inventaire radiologique et chimiques et de caractérisation du terme source permettront d'étayer les éléments de conception de leur stockage. Le calendrier de mise à disposition d'une solution de stockage impactera le besoin en capacité d'entreposage supplémentaire ainsi que le calendrier des opérations d'assainissement des sites pollués.

Concernant les déchets de graphite, 20 % des déchets en masse sont entreposés en attente d'une solution de stockage. Pour les autres déchets qui seront produits lors du démantèlement des réacteurs UNGG, le respect du calendrier de démantèlement suppose de disposer d'une solution de stockage pour la gestion du graphite à l'horizon 2022. Selon le calendrier de sa mise en œuvre, cette solution peut nécessiter ou non une phase d'entreposage préalable. Statuer sur la prise en charge d'une partie des déchets de graphite dans le stockage SCR nécessite de disposer des caractéristiques du site ainsi que d'éléments complémentaires sur l'inventaire radiologique et les différents termes sources de ces déchets. Cela renforce la nécessité de réaliser des investigations géologiques de site(s) SCR pour disposer de résultats en 2014. Si le scénario retenu comporte le stockage d'une partie des déchets de graphite en SCR, la disponibilité au plus tôt de ce stockage favoriserait le calendrier du démantèlement et réduirait les besoins en entreposage.

Les déchets bitumés actuellement entreposés sur le site de Marcoule font l'objet d'opérations pilotes de reprise/conditionnement par le CEA. Leur reprise industrielle nécessitera des investissements spécifiques. Déterminer leur scénario de gestion à long terme nécessite de disposer des résultats des investigations géologiques de site(s) SCR et de caractérisation des déchets.

Les études menées dans le cadre du PNGMDR 2010-2012 montrent également la nécessité de prévoir de nouvelles capacités de stockage pour les déchets TFA. En effet, selon les dernières données fournies par les producteurs de déchets, les volumes prévisionnels de déchets TFA qui seront produits à fin 2030 sont de l'ordre de 1 300 000 m³. Or, au rythme actuel d'exploitation du Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) exploité par l'Andra à Morvilliers (Aube), sa capacité autorisée (650 000 m³) sera atteinte à l'horizon 2025, voire avant si le flux annuel augmente. L'Andra étudie la possibilité d'augmenter la capacité de stockage du Cires dans son emprise actuelle, mais cela ne permet pas de répondre à l'ensemble des besoins identifiés.

Les concepts de stockage pour les déchets radifères et TFA sont communément fondés sur une implantation dans une couche géologique à dominante argileuse affleurante ou sub-affleurante. Ils peuvent donc être mis en œuvre sur le même site. Ces éléments conduisent l'Andra à étudier un stockage capable de prendre en charge les déchets TFA et radifères sur le même site. L'éventuelle adjonction d'une partie des déchets de graphite et d'autres déchets FAVL sera également analysée. Les délais techniques et réglementaires nécessaires à la mise en service d'un tel centre sont estimés de l'ordre d'une dizaine d'années, une fois le site choisi.

L'ensemble de ces éléments suggère de lancer en 2013 des investigations géologiques pour l'implantation d'un centre comprenant une zone de stockage à faible profondeur (SCR) pour des déchets FAVL et une zone de stockage en surface pour des déchets TFA. Sur la base des résultats de ces investigations, de la poursuite de la caractérisation des déchets et des actions de R&D sur le traitement des déchets, l'Andra propose de remettre à l'Etat en 2015 un rapport comprenant :

- les propositions de choix de scénarios de gestion pour les déchets de graphite et les déchets bitumés avec notamment l'opportunité ou non de relancer la recherche d'un site de stockage SCI ;
- un schéma industriel pour la gestion des déchets TFA et radifères ;
- un dossier de faisabilité du projet de stockages sur le(s) site(s) investigué(s), le périmètre des déchets à y stocker et le calendrier de sa mise en œuvre.

La mise à disposition de ces éléments à l'horizon 2015 permettra à l'Etat d'établir des jalons décisionnels pour la mise en place des solutions de gestion à long terme des déchets FAVL.

Propositions pour la poursuite de la démarche de recherche de site

- Recommandations du Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) :

Le Haut Comité a transmis aux ministres en charge de la sûreté nucléaire et de l'énergie en octobre 2011 ses recommandations pour la reprise de la recherche de site pour le stockage des déchets FAVL [1].

Le Haut Comité rappelle que la sûreté est le facteur premier de choix de site. Il recommande que l'Etat sélectionne un nombre restreint de territoires sur recommandation de l'Andra, en s'appuyant sur les résultats de l'appel à candidatures 2008. Il considère que l'interlocuteur au niveau local doit être *a minima* intercommunal avec le soutien de l'Etat et des grandes collectivités. Il propose que le choix de territoires accueillant déjà des installations nucléaires soit privilégié.

Le Haut Comité recommande de mener un travail de concertation et d'information du public et souligne que le projet de stockage doit être accompagné d'un certain nombre d'avantages réels sur le plan économique et du développement territorial.

- Propositions pour la poursuite de la démarche de recherche de site :

Le territoire de la Communauté de communes de Soulaines (Aube) répond aux trois recommandations du Haut Comité. Il comporte des communes qui s'étaient portées candidates en 2008, présente une géologie *a priori* favorable pour un stockage à faible profondeur et accueille déjà une installation nucléaire (le centre de stockage de l'Aube exploité par l'Andra). L'étude d'une extension des activités de l'Andra dans la Communauté de communes de Soulaines devra faire l'objet d'une concertation avec les acteurs locaux.

Concernant l'examen des possibilités de stockage sur d'autres territoires accueillant déjà des installations nucléaires, aucune démarche n'a été engagée à ce stade auprès des élus locaux concernés. Pour approfondir cette option, l'Andra devra se rapprocher d'Areva, du CEA et d'EDF pour préciser les sites potentiels comportant une couche d'argile affleurante ou sub-affleurante. Il est à noter que la majorité des sites INB sont situés à proximité immédiate de cours d'eau. Une analyse détaillée serait à mener vis-à-vis de la compatibilité avec les orientations de sûreté définies par l'ASN en vue de la recherche d'un site de stockage pour les déchets FAVL [5].

Concernant les autres territoires où des communes s'étaient portées candidates en 2008, aucune démarche n'a été engagée à ce stade auprès des élus locaux concernés. L'Andra devrait se rapprocher des Communautés de communes concernées pour mener l'analyse.

Dans son rapport, le HCTISN souligne également que l'Etat « *doit s'engager et exercer ses responsabilités dans la définition, l'exécution et la continuité du processus* » et « *afficher le caractère d'utilité publique et de service rendu à la Nation du stockage des déchets FAVL* ». Quel que soit le scénario retenu, l'Andra propose à l'Etat de marquer son engagement, en encadrant la démarche d'information et de dialogue autour des investigations géologiques, tant au niveau national, dans le cadre du HCTISN, qu'au niveau local, au travers par exemple d'un protocole, établi pour chaque site investigué, entre l'Etat, les élus concernés, les producteurs et l'Andra. Un rapport pourrait être remis à l'Etat en 2015 comprenant une synthèse des échanges avec le public et le résultat des discussions avec les acteurs locaux sur les modalités d'accompagnement du projet.

SOMMAIRE

1.	Introduction	14
1.1	<i>Contexte</i>	14
2.	Filières de stockage	15
2.1	<i>Introduction</i>	15
2.2	<i>Le stockage des déchets TFA au Cires</i>	16
2.2.1	Description	16
2.2.2	Principes de sûreté	16
2.3	<i>Le Centre de stockage de l'Aube</i>	18
2.3.1	Description	18
2.3.2	Principes de sûreté	18
2.4	<i>Le projet de stockage à faible profondeur</i>	19
2.4.1	Stockage sous couverture remaniée	20
2.4.2	Stockage sous couverture intacte	21
2.5	<i>Le projet de stockage en formation géologique profonde (Cigéo)</i>	22
2.5.1	Description	22
2.5.2	Principes de sûreté	22
3.	Gestion à long terme des déchets radifères	23
3.1	<i>Inventaire</i>	23
3.2	<i>Colisage</i>	26
3.3	<i>Particularités des déchets radifères</i>	26
3.4	<i>Scénarios de gestion à long terme</i>	27
3.4.1	Description des scénarios de gestion	27
3.4.2	Synthèse	29
3.5	<i>Evaluation du stockage des déchets radifères en SCR</i>	29
3.5.1	Introduction	29
3.5.2	Fonctions de sûreté pendant la première phase après fermeture	30
3.5.3	Satisfaction des fonctions de sûreté pendant la première phase après fermeture	30
3.5.4	Analyse de sûreté pendant la première phase après fermeture	32
3.5.5	Dispositions relatives à la phase de très long terme	34
3.6	<i>Perspectives</i>	34
4.	Gestion à long terme des déchets de graphite	36
4.1	<i>Inventaire</i>	36
4.2	<i>Colisage</i>	38

4.3	<i>Particularités des déchets de graphite en stockage</i>	39
4.4	<i>Scénarios de gestion à long terme</i>	40
4.5	<i>Evaluation du stockage des empilements en graphite en SCR</i>	44
4.5.1	Satisfaction des fonctions de sûreté pendant la première phase après fermeture	44
4.5.2	Analyse de sûreté pendant la première phase après fermeture	44
4.5.3	Dispositions relatives à la phase de très long terme	45
4.6	<i>Conclusions et perspectives</i>	46
5.	Gestion à long terme des autres déchets FAVL	48
5.1	<i>Introduction</i>	48
5.2	<i>Fûts d'enrobés bitumineux</i>	48
5.3	<i>Sources scellées usagées</i>	49
5.4	<i>Déchets à radioactivité naturelle renforcée</i>	49
5.4.1	Définition et inventaire	49
5.4.2	Gestion à long terme des déchets RNR	50
5.4.3	Perspectives	51
5.5	<i>Résidus de traitement de conversion de l'uranium</i>	52
6.	Orientations du projet	53
6.1	<i>Déchets radifères</i>	53
6.2	<i>Déchets de graphite</i>	53
6.3	<i>Fûts d'enrobés bitumineux</i>	53
6.4	<i>Synergies possibles entre déchets TFA et FAVL</i>	54
6.5	<i>Propositions techniques</i>	54
7.	Références	56

1. Introduction

1.1 Contexte

L'article 4 de la loi de programme n°2006-739 du 28 juin 2006 prévoit la mise au point de solutions de stockage pour les déchets de graphite et les déchets radifères, ainsi que la mise au point de procédés permettant le stockage des sources scellées usagées dans les centres existants ou à construire. L'Etat a également demandé à l'Andra d'étudier la possibilité d'inclure d'autres déchets de type FAVL.

La recherche de site pour l'implantation d'un centre de stockage FAVL a été lancée à l'échelle nationale par l'Andra à la demande du Gouvernement en juin 2008. L'Andra a contacté 3 115 communes, dont le territoire était *a priori* géologiquement favorable à l'implantation d'un centre de stockage à faible profondeur, afin de leur présenter le projet. Fin 2008, L'Andra a remis au Gouvernement un rapport d'analyse au plan géologique, environnemental et socio-économique de la quarantaine de communes qui ont marqué leur intérêt pour le projet.

Après consultation de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), de la Commission nationale d'évaluation (CNE) et des élus des territoires concernés, le Gouvernement a demandé à l'Andra en 2009 de mener des investigations géologiques approfondies sur deux communes. Toutefois, ces dernières ont retiré leur candidature. Le Gouvernement et l'Andra ont pris acte de ces décisions.

Dans ce contexte, l'Etat a demandé à l'Andra de poursuivre les discussions avec les territoires où des communes ont exprimé leur candidature. L'Etat a également demandé à l'Andra de rouvrir les différentes options de gestion des déchets de graphite et radifères, en étudiant notamment les possibilités de gestion séparée de ces deux types de déchets et d'analyser les capacités d'entreposage des déchets FAVL.

Afin d'effectuer un retour d'expérience du processus de recherche de site, le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) a constitué un groupe de travail. Son rapport [1], comportant les principaux constats établis à partir d'auditions locales et nationales et les recommandations qu'il émet sur le processus de recherche d'un site de stockage pour les déchets FAVL, a été transmis aux ministres en charge de la sûreté nucléaire et de l'énergie en octobre 2011.

Le décret n°2012-542 du 23 avril 2012 pris pour l'application de 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 (PNGMDR) stipule dans son article 16 :

« Les solutions de stockage mentionnées au 1° de l'article 4 de la loi de programme du 28 juin 2006 susvisée sont étudiées et conçues par l'ANDRA pour recevoir des déchets de faible activité à vie longue, tels que :

- 1. Les déchets de graphite et de procédés associés issus du démantèlement des réacteurs uranium naturel-graphite-gaz (UNGG), ainsi que d'autres réacteurs, notamment expérimentaux ;*
- 2. Les déchets radifères dont l'activité massive est telle qu'elle ne permet pas leur stockage en centre de surface ;*
- 3. D'autres types de déchets de faible activité à vie longue, notamment certains effluents bitumés, des objets contenant du radium, de l'uranium et du thorium de faible activité massive, ainsi que certaines sources radioactives scellées usagées à vie longue de faible activité.*

L'ANDRA remet aux ministres chargés de l'énergie, de l'environnement, de la sûreté nucléaire et de la radioprotection avant le 31 décembre 2012 une étude des scénarios de gestion de ces différents déchets, intégrant la possibilité de gérer séparément les déchets de graphite et les déchets radifères. Cette étude est accompagnée des études de sûreté justifiant la compatibilité de ces déchets avec les différentes solutions de stockage. L'Autorité de sûreté nucléaire est saisie pour avis ».

2. Filières de stockage

2.1 Introduction

Les centres de stockage mis en œuvre ou étudiés par l'Andra visent à disposer de solutions de gestion à long terme adaptées aux différents types de déchets radioactifs produits en France.

Une classification générale des déchets radioactifs est donnée dans le PNGMDR. Elle repose sur le niveau d'activité des éléments radioactifs contenus et leur période et permet schématiquement d'associer aux différentes catégories de déchets des filières de gestion à long terme (cf. Figure 1).

Le PNGMDR 2010-2012 rappelle que « *de nombreux autres critères doivent être pris en compte afin de déterminer si un type de déchet peut être accepté dans une filière de gestion : chacun des centres de stockages de déchets actuels ou futurs est soumis à des contraintes d'exploitation et de comportement à long terme, qui induisent des critères d'acceptation en termes de forme physique, toxicité chimique, puissance thermique, dégagement gazeux, etc. Une optimisation de la répartition des déchets entre filières de gestion est donc souhaitable, et doit être mise à jour périodiquement.* ».

Pour initier ce travail d'optimisation un groupe de travail a été mis en place par la DGEC, associant l'Andra, les producteurs de déchets ainsi que l'ASN et son appui technique l'IRSN. Les premiers résultats de ce groupe de travail [2] viendront enrichir la réflexion sur les scénarios de gestion des déchets FAVL décrits plus loin.

Période Activité	Très courte durée de vie Demi vie < 100 jours	Courte durée de vie Demi-vie ≤ 31 ans	Longue durée de vie Demi vie > 31 ans
Très faible activité	Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis élimination dans les filières conventionnelles	Stockage de surface Centre industriel de regroupement d'entrepasage et de stockage (Cires) Filières de recyclage	
Faible activité		Stockage de surface Centre de stockage de l'Aube	Stockage à faible profondeur à l'étude dans le cadre de l'article 4 de la loi de programme du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs
Moyenne activité			Stockage profond à l'étude dans le cadre de l'article 3 de la loi de programme du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs
Haute activité	Non applicable (la catégorie des déchets de haute activité à vie courte n'existe pas)		

Figure 1 : Classement selon le PNGMDR des déchets radioactif et leurs destinations en fonction de leurs activité et période.

2.2 Le stockage des déchets TFA au Cires

2.2.1 Description

L'Andra exploite depuis 2004 un stockage de déchets de très faible activité au sein de son Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) situé sur les communes de Morvilliers et La Chaise (Aube). Le centre couvre une superficie de 45 hectares. La capacité de stockage autorisée par arrêté préfectoral d'autorisation du Cires [3] est de 650 000 m³ de déchets TFA. Ces déchets proviennent pour l'essentiel du fonctionnement et du démantèlement des installations nucléaires.

Les colis de déchets sont stockés dans des alvéoles creusées dans l'argile à quelques mètres de profondeur et dont le fond est aménagé pour recueillir d'éventuelles eaux infiltrées. Pendant leur exploitation, les alvéoles sont protégées par des toits démontables en forme de tunnel et équipés de dispositifs de surveillance (Figure 2). Une fois remplis les alvéoles sont couverts d'une couche d'argile et d'une membrane synthétique entourant les déchets, associée à un système de collecte de lixiviats et de contrôle.

Le Cires est une ICPE régie par arrêté préfectoral [3]. Ce dernier fonde les spécifications d'acceptation des déchets.

2.2.2 Principes de sûreté

Les critères qui conduisent à classer des déchets radioactifs dans la catégorie TFA en vue d'un stockage au Cires résultent essentiellement de deux considérations :

- leur niveau de radioactivité et éventuelle toxicité doivent être suffisamment faibles pour en permettre la collecte, la manutention, le transport et la mise en stockage sans contraintes de radioprotection lourdes pour le personnel se trouvant au contact de ces déchets,
- ce niveau de radioactivité et leur éventuelle toxicité chimique doivent également être compatibles avec les objectifs de protection à court et long terme de l'homme et de l'environnement.

Compte tenu de la spécificité des déchets TFA, les principes de sûreté de leur stockage sont fondés sur (i) une implantation dans une couche argileuse qui limite et retarde le transfert des polluants vers la biosphère, (ii) la capacité du stockage à garantir un environnement chimique favorable et (iii) le contrôle des activités et des quantités de toxiques chimiques stockées.

Ces principes conduisent notamment à définir pour le stockage au Cires des capacités radiologiques et des limites d'activités massiques pour différents radionucléides ainsi que des capacités et des concentrations pour les substances chimiques en fonction de leur toxicité ou de leur capacité de perturbation de l'équilibre physico-chimique du stockage et de son environnement.

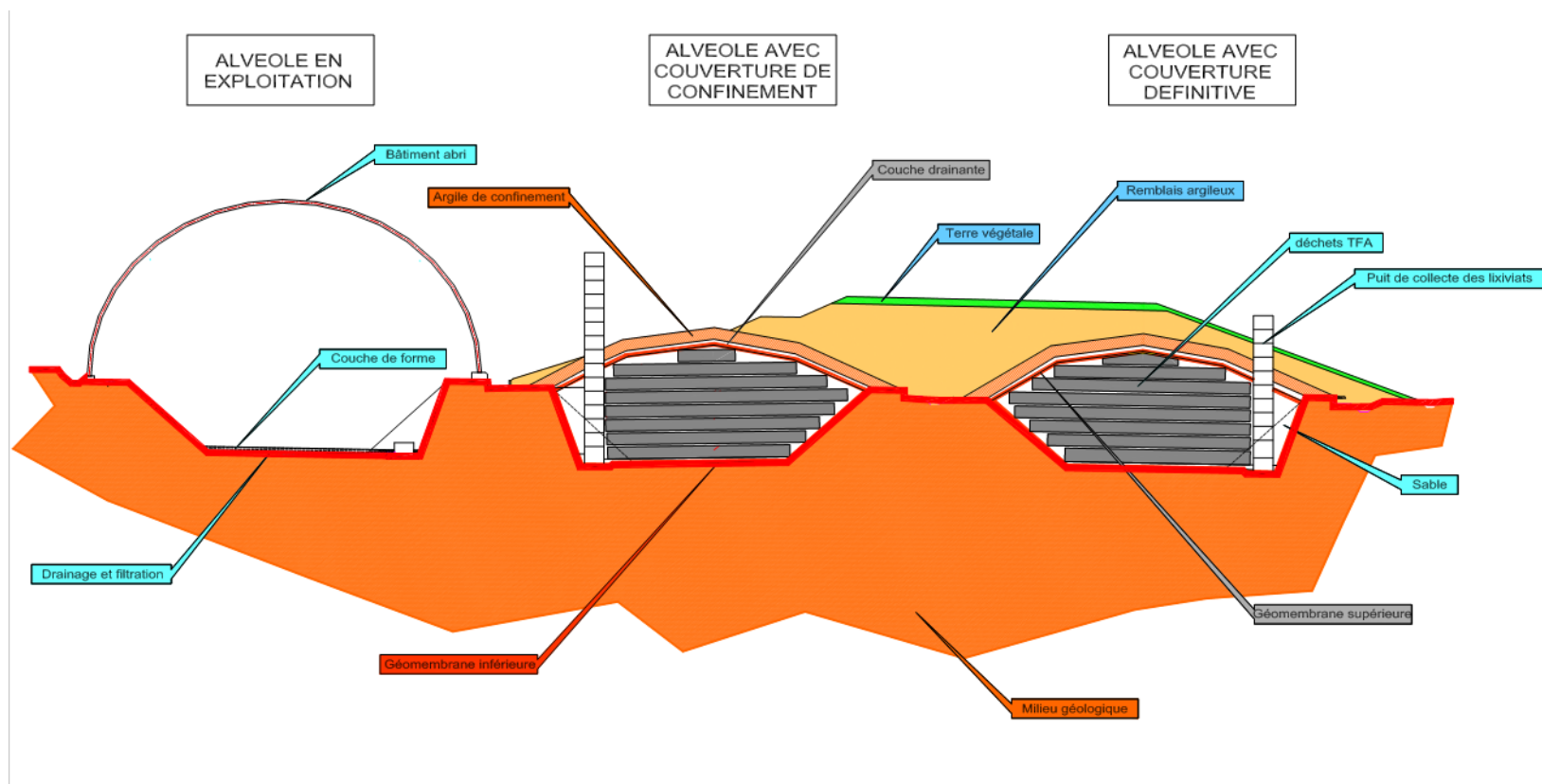


Figure 2 : Coupe schématique des alvéoles de stockage au Cires à différentes phases de vie

2.3 Le Centre de stockage de l'Aube

2.3.1 Description

L'Andra exploite depuis 1992 un centre de stockage en surface pour des déchets de faible et moyenne activité à vie courte dans le département de l'Aube (CSA, Figure 3). Il couvre une superficie de 95 hectares sur les communes de Soullaines-Dhuys, Epothémont et Ville-aux-bois (Aube). Le Centre est prévu pour accueillir 1 000 000 m³ de déchets issus essentiellement des opérations de maintenance et du fonctionnement des installations nucléaires, des laboratoires de recherche, des hôpitaux et des opérations d'assainissement et de démantèlement.

Des opérations de compléments de conditionnement peuvent être effectuées sur le centre telles que la solidification de déchets liquides ou le compactage de certains fûts de déchets pour réduire leur volume. Les colis sont ensuite stockés dans des ouvrages en béton armé et les espaces entre les colis sont comblés par du béton ou des gravillons. Une fois rempli, l'ouvrage est fermé par une dalle de béton et recouvert d'une couche de polyuréthane imperméable. A la fin de l'exploitation du Centre, les ouvrages seront recouverts par une couche d'argile puis le site sera surveillé pendant au moins 300 ans.



Figure 3 : Centre de stockage de l'Aube

Le CSA est une installation nucléaire de base (INB) régie par les règles fondamentales de sûreté relatives aux INB autres que les réacteurs. Ces règles sont retranscrites dans les prescriptions techniques du CSA [4] sur lesquelles sont fondées les spécifications d'acceptation des colis de déchets radioactifs.

2.3.2 Principes de sûreté

Le CSA est conçu pour gérer des déchets dont la radioactivité provient principalement de radionucléides à vie courte (période ≤ 31 ans).

Ses objectifs de sûreté et ses bases de conception sont définis en conformité avec la Règle fondamentale de sûreté (RFS) n° 1.2 émise par l'ASN. Le respect de ces objectifs a conduit l'Andra à adopter les options techniques de sûreté suivantes :

- l'interposition d'un système multi barrières (conformément à la RFS 1.2) qui participe à la fois à l'isolement des déchets et au confinement des radionucléides,
- la limitation des quantités de certains radionucléides stockés sur l'ensemble du Centre et au niveau de chaque colis,
- la répartition aussi homogène que possible de l'activité stockée sur le Centre.

Afin de garantir le niveau de sûreté requis pour le stockage, des limites d'activités ont été définies pour le Centre sous forme d'une capacité radiologique totale et, pour le colis et l'ouvrage, sous forme de limites maximales d'acceptabilité (LMA). En outre le site d'implantation retenu présente des

caractéristiques hydrogéologiques favorables pour limiter le flux de radionucléides et de toxiques chimiques susceptibles d'être transférés à l'homme. En effet la géologie du site présente un substratum d'argile imperméable constituant une barrière naturelle et une couche semi-perméable sableuse sus jacente qui draine les eaux d'infiltration vers un exutoire unique, facilitant ainsi la surveillance de l'environnement.

Il est à noter que les déchets susceptibles d'engendrer des émanations de radon 222 ou de radon 220 à relativement court terme ne sont pas acceptables au CSA. Les radionucléides dont la filiation comprend un isotope du radon ne doivent représenter qu'une fraction minime et indissociable de l'activité totale des déchets, en raison de la conception du stockage qui n'est pas adaptée à la gestion du risque d'émanation de radon. Leur activité (^{232}Th , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{226}Ra) est en tout état de cause limitée à 1 % de l'activité massique totale déclarée du colis au maximum.

2.4 Le projet de stockage à faible profondeur

Les orientations générales de sûreté en vue d'une recherche de site pour le stockage des déchets de faible activité massique à vie longue, publiées par l'ASN en 2008 [5] définissent la fonction suivante du stockage : « *isoler les déchets de l'homme et de la biosphère pour que la sûreté du stockage ne soit pas affectée de façon significative par les phénomènes d'érosion climatiques ou par les activités humaines banales* ». Dans son préambule, il mentionne que : « *Une installation de stockage de déchets FAVL devrait présenter néanmoins des différences majeures de conception par rapport à une installation de stockage géologique profonde du fait de la faible activité des déchets stockés en comparaison de l'activité des déchets MA-VL/HA. Il appartiendra au concepteur de préciser les exigences qu'il associe aux dispositifs mis en œuvre pour assurer la sûreté du stockage des déchets FAVL en fonction des résultats de son analyse de sûreté. Il apparaît toutefois que les principales différences porteront sur la profondeur et les performances dans la durée du milieu géologique, les performances des colis et les dispositions de conception visant à assurer la sûreté de l'exploitation de l'installation. Par ailleurs, comme pour les stockages de surface, il sera nécessaire de limiter l'activité à vie longue pouvant être reçue dans l'installation, notamment pour les radionucléides qui ne décroissent pas en quelques dizaines de milliers d'années, et le cas échéant d'examiner l'opportunité de fixer des règles de répartition de l'activité au sein de l'installation afin de limiter l'apparition de zones d'activité concentrée lorsque le stockage ne sera plus à l'abri des intrusions humaines banales. Les limitations d'activité seront donc des éléments fondamentaux pour définir les catégories de déchets susceptibles d'être acceptées dans un stockage de déchets FAVL, au vu du site et du concept retenus* ».

En cohérence avec ces orientations, la sûreté d'une installation de stockage de déchets de faible activité massique à vie longue dépendra des propriétés favorables de la formation géologique accueillant les déchets, de sa profondeur d'implantation, du rôle complémentaire des composants ouvrages (colis, ouvrages, couvertures ou scellements), de la surveillance et de la limitation de l'activité stockée.

Deux options de stockage de déchets de faible activité massique à vie longue ont été étudiées, se distinguant notamment par leur profondeur⁴ et l'épaisseur de la couche d'argile hôte⁵. L'option sous couverture remaniée (SCR) porte sur une profondeur d'une dizaine à une quinzaine de mètres avec une couche d'argile affleurante ou sub-affleurante (cf. section 2.4.1). Cette option a été retenue pour la gestion des déchets radifères. L'option avec couverture intacte (SCI), adaptée à la gestion de l'ensemble des déchets de graphite, concerne une profondeur d'une centaine de mètres avec une couche d'argile épaisse (cf. section 2.4.2).

⁴ La profondeur du stockage modifie la nature et les caractéristiques des scénarios d'intrusion.

⁵ L'épaisseur et les caractéristiques des couches d'argile (intactes ou remaniées) déterminent l'atténuation du relâchement et l'étalement dans le temps du transfert des radionucléides pour les transferts par l'eau, particulièrement pour les radionucléides à vie longue mobiles.

Une description détaillée des deux types de stockage est donnée dans le rapport d'étape Andra 2008, préalable à la recherche de site [6].

2.4.1 Stockage sous couverture remaniée

2.4.1.1 Description

Le principe du stockage SCR repose sur une implantation du stockage dans une couche géologique de faible perméabilité avec une composante argileuse ou marneuse dominante, à une profondeur d'une dizaine à une quinzaine de mètres (Figure 4). On considère à ce stade la réalisation d'une excavation à ciel ouvert⁶ jusqu'au niveau du stockage. Les alvéoles de stockage sont creusés à même l'argile. Les déchets sont conditionnés dans des conteneurs et stockés dans l'alvéole sur plusieurs niveaux. Les vides entre conteneurs sont comblés par un matériau granulaire ou cimentaire. Une fois remplis, les alvéoles sont couverts d'une couche d'argile compactée, provenant des déblais du site, puis d'une couche de protection végétale reconstituant le niveau naturel du site.

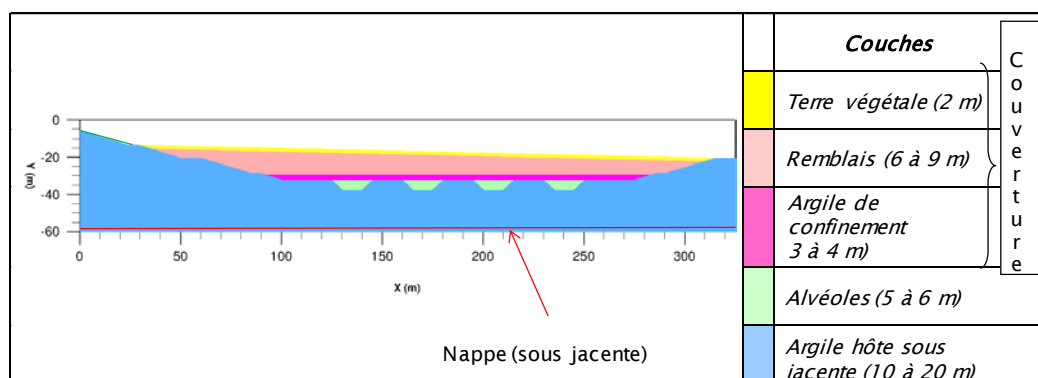


Figure 4 : Schéma de principe du stockage à faible profondeur en couverture remaniée⁷

2.4.1.2 Principes de sûreté

Compte tenu de sa profondeur et de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la couche d'argile, les principes de sûreté du stockage SCR sont fondés sur :

- sa capacité à confiner jusqu'à décroissance radioactive les radionucléides à vie courte : radio-isotopes de période radioactive inférieure à 31 ans – ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs ...
- sa capacité à confiner jusqu'à décroissance radioactive les radionucléides peu mobiles dont la période radioactive est compatible avec la préservation de l'intégrité du stockage en lien avec la cinétique d'évolution géodynamique externe (soit une durée de 50 000 à 100 000 ans) dans un site présentant des caractéristiques géomorphologiques adaptées, en s'assurant du maintien de conditions physico-chimiques et hydrauliques limitant la mobilité des radionucléides : les radionucléides peu mobiles envisagés sont ceux de période inférieure ou égale à celle du carbone 14 (5 700 ans). Cela couvre en particulier le radium 226 (1 600 ans) se trouvant sous une forme peu mobile ;
- la limitation de l'activité en radionucléides peu mobiles qui entraînent un impact radiologique dans le cas de scénarios d'intrusion humaine involontaire après perte supposée de la mémoire du stockage (500 ans). Cela concerne les actinides, notamment le plutonium et l'américium ;

⁶ La technique de creusement sera définie en fonction des caractéristiques du site d'implantation retenu.

⁷ Ce schéma est fourni à titre indicatif et sera à adapter en fonction des caractéristiques des sites investigués.

- la limitation de l'activité en radionucléides ne décroissant pas à une échelle de temps compatible avec la préservation de l'intégrité du stockage en lien avec la cinétique d'évolution géodynamique externe (à titre illustratif : une érosion, un pergélisol) : cela concerne en particulier les radio-isotopes de tête des chaînes naturelles : chaîne 4N : Th232 -> Ra228 -> Th228 ; chaîne 4N+2 : U238 -> U234 -> Th230 -> Ra226 -> Pb210 et chaîne 4N+3 : U235 -> Pa231 -> Ac227 ;
- la limitation de l'activité en radionucléides mobiles à vie longue.

Les options de sûreté reposeront notamment sur les éléments de conception suivants :

- un environnement chimique adapté aux radionucléides et toxiques chimiques présents dans les déchets pour en limiter le relâchement (vis-à-vis des transferts par l'eau). Cet environnement dépend notamment de la forme chimique intrinsèque des déchets, de leur mode de colisage et de stockage ainsi que des propriétés de l'argile de site et de la couverture. Les modalités de conditionnement des déchets peuvent participer activement à assurer cet environnement ;
- une couverture de performances mécaniques et hydrauliques adéquates (vis-à-vis des transferts par l'eau et par gaz). Ces performances dépendent des qualités intrinsèques de l'argile de site, de ses modalités de préservation ainsi que des modalités de réalisation de la couverture. Les propriétés mécaniques des colis peuvent également intervenir dans la pérennisation de ces performances ;
- une implantation du stockage dans un milieu et à une profondeur favorables au maintien des conditions physico-chimiques recherchées.

2.4.2 Stockage sous couverture intacte

2.4.2.1 Description

Dans un stockage SCI, les alvéoles de stockage sont implantés à une centaine de mètres de profondeur au milieu d'une formation argileuse épaisse selon la technique de creusement en sous-sol (Figure 5). L'accès s'effectue par une descenderie et des galeries longitudinales. Une fois le stockage exploité, des scellements sont posés et les accès sont remblayés par les déblais du site.



Figure 5 : Schéma de principe d'un stockage sous couverture intacte (SCI)

2.4.2.2 Principes de sûreté

Les principes de sûreté décrits pour le SCR sont applicables au SCI. En outre la plus grande épaisseur de couche d'argile hôte confère au SCI la capacité à gérer des radionucléides mobiles à vie longue tels que le chlore 36 et l'iode 129 par l'atténuation de leur relâchement et l'étalement dans le temps de leur transfert.

2.5 Le projet de stockage en formation géologique profonde (Cigéo)

La loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 charge l'Andra de mener des études et recherches pour choisir un site et concevoir un centre de stockage réversible en couche géologique profonde. Ce centre est destiné à accueillir les déchets radioactifs qui ne peuvent pas être stockés en surface ou en faible profondeur pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection. La mise en service du Centre industriel de stockage géologique (Cigéo), sous réserve de son autorisation, est prévue en 2025.

2.5.1 Description

L'implantation de l'installation souterraine du stockage est étudiée dans la formation d'argilite du Callovo-Oxfordien étudiée au moyen du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, située à environ 500 m de profondeur. Un schéma de principe du stockage est donné sur la Figure 6.

L'installation souterraine de stockage est réalisée progressivement par tranches successives, au fur et à mesure de l'accueil de nouveaux colis. L'architecture d'ensemble est évolutive : les premiers ouvrages d'accès et les premières tranches de stockage ne figent pas les solutions et moyens techniques qui pourront être mis en œuvre pour les tranches suivantes, permettant de bénéficier du retour d'expérience et des progrès technologiques.

Pour la construction des ouvrages souterrains, la mise en stockage des colis de déchets et la gestion des installations jusqu'à leur fermeture, l'accès s'effectue par des puits verticaux et des descenderies entre la surface et le niveau de stockage, puis par des galeries de liaison jusqu'aux alvéoles de stockage.

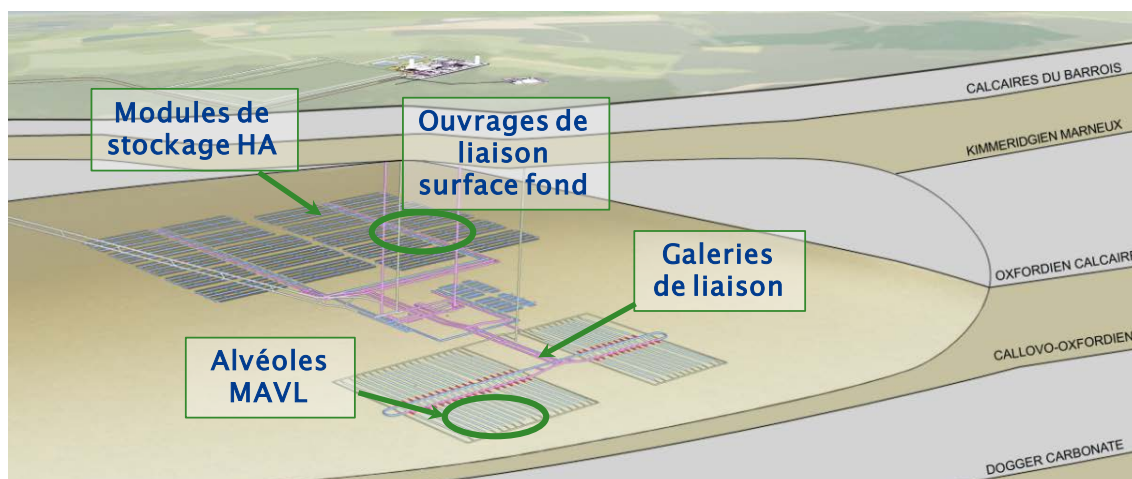


Figure 6 : Schéma de principe de Cigéo à terminaison

2.5.2 Principes de sûreté

Le Guide de sûreté relatif au stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde (ex RFS III.2.f) [7], publié par l'ASN en 2008, définit les objectifs qui doivent être retenus dès les phases d'investigations d'un site et de conception de l'installation d'un stockage, pour permettre d'assurer la sûreté après la fermeture de l'installation de stockage.

Les déchets HA concentrent la plus grande part de la radioactivité des déchets et se caractérisent par un dégagement thermique élevé : la densité de stockage des déchets HA (nombre de colis par alvéole de stockage, distances entre alvéoles) doit être limitée de manière à maintenir la température à un niveau compatible avec les fonctions de sûreté du stockage (i.e. 90° C maximum dans la roche au voisinage des déchets).

La thermicité négligeable ou faible des déchets MAVL permet un stockage plus compact, alors que le volume total des colis de déchets MAVL est supérieur à celui des déchets HA.

3. Gestion à long terme des déchets radifères

3.1 Inventaire

Les déchets radifères sont essentiellement des déchets historiques, déjà produits, provenant de l'exploitation de minerais pour l'extraction de terres rares (Rhodia), de zirconium (Cezus, la seule production poursuivie à ce jour) ou d'uranium (CEA) ainsi que de la dépollution d'anciens sites ayant historiquement abrité des activités utilisant du radium ou du thorium (mission de service public de l'Andra).

A ce jour l'inventaire des déchets radifères comprend :

- les résidus radifères (RRA) et les résidus solides banalisés (RSB) de Rhodia ;
- les résidus de traitement des hydroxydes bruts de thorium (HBTh), qui seront produits ultérieurement lorsque Rhodia valorisera le thorium, l'uranium et les terres rares contenus dans cette matière⁸ ;
- les déchets provenant de la fabrication d'éponge de zirconium, de sels de zirconium et d'hafnium (Cezus) ;
- les déchets de la dépositaire d'Itteville (ancien bassin de décantation et aire de stockage, annexe de l'ancienne usine du Bouchet), constitués de stériles et d'hydroxydes (CEA) ;
- les déchets issus des opérations d'assainissement de sites pollués au radium ou au thorium, gérés par l'Andra au titre de sa mission de service public.

Les RRA, conditionnés dans environ 26 000 fûts de 220 litres (Figure 7), sont entreposés sur le site CEA de Cadarache, avec une autorisation actuellement prévue jusqu'en 2015.

Les RSB sont entreposés sur le site Rhodia de la Rochelle (Figure 8). Ils représentent une masse d'environ 8 500 tonnes.

Les déchets de Cezus sont entreposés sur le site de Jarrie (Isère) dans un bâtiment dédié (Figure 9). L'installation pourrait accueillir les déchets produits non insolubilisés jusqu'en 2023. A fin 2010 la quantité produite était de 2 900 tonnes de déchets après mélange et stabilisation. A l'échéance 2030, la quantité de déchets produits est estimée à environ 9 000 tonnes. Cependant Cezus considère aussi l'option d'un arrêt prématuré de la production de ces déchets qui pourrait conduire à une diminution de son inventaire prévisionnel.

Les déchets du CEA sont entreposés sur la dépositaire d'Itteville (Essonne), site annexe de l'usine du Bouchet, situé à l'extérieur de l'enceinte de l'usine (Figure 10). La masse totale des déchets déposés est de 40 000 tonnes dont une partie est considérée par le CEA comme déchets TFA (environ 28 000 t).

Les déchets gérés par l'Andra au titre de sa mission de service public sont prévus d'être entreposés dans le nouveau bâtiment d'entreposage situé sur le site du Cires. Cette installation a été mise en service à l'automne 2012 pour une capacité d'entreposage de 5 000 m³. A fin 2010, le volume de déchets produits était de 3 900 m³.

Le tonnage total des déchets radifères à stocker est limité à ce stade à environ 50 000 tonnes, soit un volume conditionné de l'ordre de 60 000 m³ selon les hypothèses de conditionnement envisagées. Des incertitudes résultent toutefois du nombre de sites à assainir et du niveau d'assainissement requis ainsi que du choix de la filière de gestion de certains déchets radifères considérés TFA à ce jour.

⁸ Les HBTh sont considérés par Rhodia comme une matière valorisable au titre du thorium et des terres rares qu'ils contiennent.

Les déchets radifères de l'inventaire actuel présentent une activité massique en radium 226 allant de quelques becquerels par gramme à quelques centaines de becquerels par gramme (avec une activité moyenne de l'ordre de 60 Bq/g) et une activité massique moyenne en uranium 238 et en thorium 232 de l'ordre de 20 becquerels par gramme.

Les inventaires radiologiques des principaux déchets radifères sont présentés au Tableau 1.

Les déchets présentent des teneurs variables en éléments chimiques toxiques ou perturbateurs. Les quantités de toxiques chimiques restent assez faibles dans l'inventaire prévisionnel. Il s'agit essentiellement de plomb, de bore et d'uranium. De faibles quantités de chrome et d'arsenic peuvent aussi être observées.



Figure 7 : Fûts de résidus radifères (Rhodia)



Figure 9 : Fûts de résidus industriels (Areva/Cezus)



Figure 8 : Résidus solides banalisés en vrac (Rhodia)



Figure 10 : Déchets issus du traitement de minerais d'uranium (site CEA d'Itteville)

Déchets / Masse (t)		RRA (Rhodia)	5 300	RSB (Rhodia)	8 400	CEZUS	8 270	Déchets issus de la valorisation du HBTh (Rhodia)	9 410	Déchets d'ltteville (CEA)	12 000	Total Masses (t)	Total activités (Bq)	49 380
Rn	Période (ans)	Activité à 2013 (Bq)	Activité massique (Bq/g)	Activité à 2013 (Bq)	Activité massique (Bq/g)	Activité à 2013 (Bq)	Activité massique (Bq/g)	Activité (Bq)	Activité massique (Bq/g)	Activité (Bq)	Activité massique (Bq/g)	Total Masses (t)	Total activités (Bq)	Activité massique moyenne (Bq/g)
²³⁸ U	4,5E+09	5,7E+10	10,7	5,0E+10	5,9	6,6E+11	79,5	2,2E+10	2,4E+00	5,5E+10	4,6	6,6E+07	8,41E+11	17
²³⁴ U	2,5E+05	5,7E+10	10,7	5,0E+10	5,9	6,6E+11	79,5	2,2E+10	2,4	5,5E+10	4,6		8,41E+11	17
²³⁰ Th	7,5E+04	8,5E+09	1,6	2,5E+10	3,0	6,6E+11	79,5	6,7E+10	7,1	5,5E+10	4,6	1,1E+03	8,13E+11	16
²²⁶ Ra	1,6E+03	1,0E+12	197,0	2,9E+10	3,5	7,9E+11	95,4	4,4E+11	46,5	7,0E+11	58,0		3,00E+12	61
²¹⁰ Pb	2,2E+01	1,0E+12	197,0	8,4E+10	10,0	7,9E+11	95,4	4,4E+11	46,5	7,0E+11	58,0		3,05E+12	62
		0,0E+00		0,0E+00						0,0E+00				
²³⁵ U	7,0E+08	2,3E+09	0,43	2,5E+09	0,3	3,0E+10	3,7	1,0E+09	0,1	2,8E+09	0,2		3,89E+10	1
²³¹ Pa	3,3E+04	4,2E+08	0,08	9,2E+09	1,1	3,0E+10	3,7	3,7E+09	0,4	2,8E+09	0,2		4,63E+10	1
²²⁷ Ac	2,2E+01	4,2E+08	0,08	5,9E+09	0,7	3,0E+10	3,7	3,7E+09	0,4	2,8E+09	0,2		4,30E+10	1
		0,0E+00								0,0E+00				
²³² Th	1,4E+10	5,9E+10	11,1	1,3E+11	15,0	1,0E+11	12,0	4,7E+11	49,9	5,6E+09	0,5	1,9E+08	7,60E+11	15
²²⁸ Ra	5,8E+00	7,5E+11	142,0	1,1E+11	13,0	1,2E+11	14,0	7,9E+12	836,4	5,6E+09	0,5		8,85E+12	179
²²⁸ Th	1,9E+00	1,1E+12	205,0	1,0E+11	12,0	1,2E+11	14,0	4,7E+11	49,9	5,6E+09	0,5		1,78E+12	36

Tableau 1 : Inventaires radiologiques des principaux déchets radifères à 2013

3.2 Colisage

Le conditionnement des déchets radifères vise à éviter la dissémination d'éléments radioactifs et limiter la dose reçue par les travailleurs et le public au cours du transport et en phase d'exploitation du stockage. Après fermeture des alvéoles de stockage, le conditionnement contribue également à la bonne tenue mécanique des couches d'argiles sus-jacentes aux alvéoles. En effet, pour limiter les éventuelles déformations mécaniques dans ces couches, le taux de vide au sein des colis doit être minimisé, la limite d'acceptation étant à déterminer en fonction des conditions de site et de la profondeur d'implantation du stockage. Les vides dans le conteneur peuvent être comblés, si nécessaire, soit par injection d'un coulis de ciment ou par remplissage avec un matériau granulaire.

Le conditionnement actuellement envisagé pour les déchets radifères consiste en des fûts de 220 litres pour les déchets déjà conditionnés ou en cours de conditionnement, ou en des conteneurs métalliques d'une capacité d'environ 6 m³ (Figure 11). Afin de standardiser le processus d'exploitation, les fûts peuvent être regroupés dans un sur-conteneur de 6 m³.

D'autres types de conditionnement peuvent être considérés selon les besoins des producteurs en termes d'entreposage intermédiaire ou d'évacuation vers le centre de stockage. Dans ce cas des études technico-économiques peuvent être réalisées ultérieurement pour optimiser ce choix.

Des exigences supplémentaires sur le taux d'exhalaison du radon des colis pourront être fixées en fonction des conditions d'exploitation. Le comblement des vides au sein des fûts ou conteneurs, évoqué ci-dessus, pourrait contribuer à réduire le taux d'exhalaison des colis de déchets radifères.

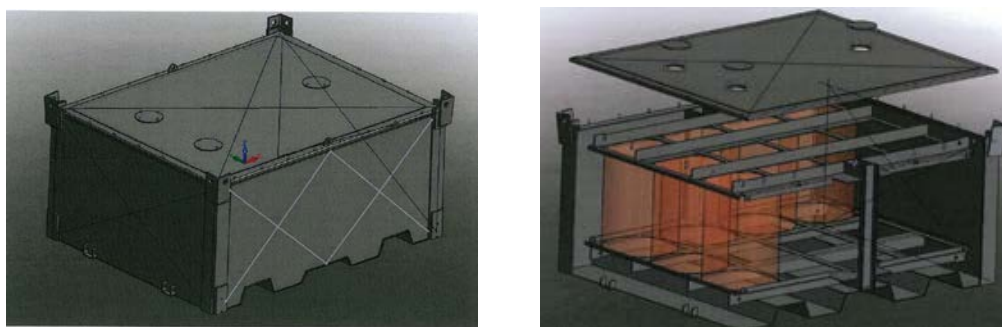


Figure 11 : Projet de conteneur pour les déchets radifères

3.3 Particularités des déchets radifères

Les déchets radifères sont caractérisés par la présence des radionucléides des trois chaînes naturelles $4N$ (^{232}Th), $4N+2$ (^{238}U), et $4N+3$ (^{235}U) avec une prédominance des deux chaînes $4N$ et $4N+2$ les activités de la chaîne $4N+3$ étant faibles. Pour la plupart des familles, la présence de radium 226 est due aux procédés de séparation utilisés dans le traitement des minerais. Après décroissance du radium initial (sur une durée de 15 000 à 20 000 ans), l'activité radiologique des déchets est quasiment constante et pilotée par l'activité des radioéléments à période très longue éventuellement contenus, soit l'uranium 238 et le thorium 232.

Les déchets radifères exhalent du gaz radon (essentiellement ^{222}Rn , de période radioactive 3,8 jours) dû à la désintégration radioactive du radium 226. Les options de conception du stockage envisagées devront interposer entre le radium 226 et l'homme une barrière retardant suffisamment la migration du radon en phase gazeuse pour bénéficier de sa décroissance radioactive avant qu'il n'atteigne l'environnement.

Certains déchets radifères comportent des nitrates susceptibles de générer des perturbations chimiques en stockage et d'augmenter la solubilité d'éléments contenus. L'évaluation de ces perturbations peut conduire à proposer un traitement pour ces déchets.

Dans les déchets radifères de l'inventaire actuel (sauf les déchets d'assainissement des sites pollués), le radium initialement présent dans les déchets est insolubilisé sous forme de sulfate ou, pour les RSB, de phosphate. Compte tenu de cette forme chimique du radium et de la faible solubilité du thorium et de l'uranium (dans des conditions redox favorables), le relâchement dans l'eau de ces différents radioéléments est limité. La fraction de radium mise en solution dans l'eau peut être suffisamment retardée lors de son transport aqueux de manière à permettre une décroissance radioactive avant d'atteindre la biosphère. Pour les radionucléides à période très longue, ce sont essentiellement (i) la faible activité radiologique contenue et leur faible activité massique, (ii) la maîtrise de la circulation de l'eau ainsi que du transfert et (iii) la faible dissolution de ces radionucléides qui limiteront le niveau d'exposition.

3.4 Scénarios de gestion à long terme

3.4.1 Description des scénarios de gestion

Les éléments décrits ci-dessus conduisent à envisager pour la gestion à long terme des déchets radifères un stockage de type SCR. Les déchets radifères ne sont pas acceptables en stockage au Cires à cause notamment d'activités en thorium 232 et en radium 226 supérieures aux capacités radiologiques et d'activités massiques en radium 226 supérieures aux indices radiologiques d'acceptation du centre. Ils ne sont pas admissibles au CSA du fait qu'ils engendrent des émanations de radon 222 et de radon 220 supérieures à la teneur admissible.

Les scénarios possibles de gestion à long terme des déchets radifères articulent un stockage en SCR, un entreposage préalable et des hypothèses de tri et de traitement avant conditionnement.

De manière générale un traitement vise à une valorisation et/ou une réduction de nocivité qui peut conduire à un changement de filière de stockage. Il peut aussi viser une réduction des volumes.

La recherche d'une réduction de nocivité peut s'attacher à plusieurs aspects :

- renforcement de l'immobilisation / insolubilisation de radioéléments contenus dans les déchets ;
- extraction d'espèces chimiques perturbatrices.

Les déchets radifères sont pour une bonne part des déchets anciens dont la production est arrêtée et dont les modalités actuelles d'entreposage ont été présentées à la section 3.1. Les processus de production ont parfois déjà inclus une forme de tri et de traitement. L'intérêt de la combinaison de différentes étapes dépend de la famille des déchets, comme présenté ci-après.

3.4.1.1 Déchets de Rhodia

Résidus radifères (RRA)

Les RRA forment une population relativement homogène de déchets anciens qui ne pose pas la question d'un tri éventuel. Par ailleurs ces déchets ont d'ores et déjà fait l'objet lors de leur production d'une insolubilisation du radium.

Leur contenu en nitrates conduit l'Andra et Rhodia à examiner les possibilités et les bénéfices éventuels d'une reprise de ces déchets pour en extraire les nitrates. La question se posera notamment de la localisation de l'installation de reprise et de traitement en tenant compte de la gestion des effluents. Cette question renvoie également au mode d'entreposage des RRA au-delà de 2015 : prolongement de l'autorisation d'exploitation de l'entrepôt actuel (le CEA a déposé en 2012 un dossier à la direction régionale, de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) pour une demande de prolongation jusqu'en 2030), création d'un nouvel entrepôt accompagné d'un transfert des déchets entre les deux installations et éventuellement d'un reconditionnement des déchets.

Au final les scénarios de gestion applicables aux RRA sont un stockage en l'état en SCR avec ou sans traitement préalable d'extraction des nitrates.

Résidus solides banalisés (RSB)

Le thorium 232 est le radioélément contenu dans les RSB le plus pénalisant pour le choix d'une filière de stockage (activité massique de l'ordre de 15 Bq/g et activité totale de 130 GBq). En effet une réduction de l'activité en thorium 232 permettrait d'envisager un stockage au Cires (sous réserve du respect des conditions d'acceptation au Cires actuelles suivantes : activité massique en ^{232}Th inférieure à 10 Bq/g et activité totale bien en deçà de 11 GBq, compte tenu de la capacité radiologique en ^{232}Th autorisée).

Dans cette perspective, Rhodia étudie la possibilité d'intégrer les RSB dans le procédé de valorisation du thorium et des terres rares contenus dans ses hydroxydes brut de thorium (HBTh). Rhodia étudie plusieurs voies de gestion pour les RSB :

- un stockage au Cires après traitement ;
- une incinération qui permettrait une réduction de volume et éventuellement, dans l'hypothèse où un suremballage en conteneur était considéré pour le stockage des fûts de RRA, le remplissage du conteneur par ce produit calciné ;
- un stockage dans les bassins de résidus de traitement dynamique des minerais d'uranium.

Selon les résultats de ces études, une partie ou la totalité des RSB restera destinée au stockage SCR.

Déchets de valorisation des hydroxydes de thorium

Comme mentionné à la section 3.1, ces déchets seront produits ultérieurement si la valorisation du thorium, de l'uranium et des terres rares est mise en œuvre par Rhodia. La date de production de ces déchets est inconnue à ce jour. La question se posera du maintien de la disponibilité d'une filière SCR aussi longtemps que la valorisation des HBTh n'aura pas été mise en œuvre.

Rhodia développe actuellement un nouveau procédé de valorisation. Ce nouveau procédé pourrait permettre de réduire l'inventaire en thorium des déchets par rapport aux données d'inventaire actuel présentées au Tableau 1 et le volume prévisionnel des déchets jusqu'à un facteur 4.

Quel que soit le procédé de valorisation retenu, l'extraction d'espèces chimiques perturbatrices, notamment les nitrates contenus dans ces déchets, est prévue d'être mise en œuvre pour les déchets à produire. Une insolubilisation du radium est également prévue.

3.4.1.2 Déchets de Cezus

Le caractère homogène des déchets de Cezus écarte la question d'un tri. Un traitement d'insolubilisation du radium est prévu par Cezus avant conditionnement.

La saturation de l'entrepôt de Cezus à l'horizon 2023 conduirait à la nécessité de mettre en œuvre de nouvelles capacités d'entreposage, sous réserve d'une poursuite par Cezus de la production des déchets.

3.4.1.3 Déchets de la dépositante d'Itteville

Un tri des déchets est l'option de base du CEA pour une partie des déchets de la dépositante d'Itteville (cf section 3.1). Les volumes pris en compte dans l'inventaire actuel des déchets radifères résultent d'une hypothèse de tri. Le radium contenu dans la partie dite « FAVL » se trouve *a priori* sous forme sulfate peu soluble. Les données fournies par le CEA indiquent un contenu en nitrates très faible.

Ces éléments ne suggèrent pas de besoin de traitement préalablement au conditionnement.

L'évacuation de la dépositante d'Itteville est envisagée par le CEA dès que la filière SCR sera disponible. Le CEA étudie en lien avec l'Andra les modalités d'évacuation. La poursuite de l'étude s'appuiera notamment sur le calendrier de mise en œuvre de la filière SCR, la localisation du futur site d'implantation et sa caractérisation en vue de l'établissement des spécifications de conditionnement.

3.4.1.4 Déchets issus des opérations d'assainissement des sites pollués au radium

Les déchets issus des opérations d'assainissement des sites pollués se caractérisent par une incertitude sur le calendrier de production et les volumes associés à terminaison.

En matière de volume, une première incertitude provient de l'identification des sites qui seront *in fine* concernés. Une autre incertitude est due aux opérations de caractérisation et de tri des déchets lors des opérations d'assainissement, qui détermineront les volumes affectés à chaque filière de stockage : *in situ*, Cires (TFA) et SCR. Ces incertitudes perdureront aussi longtemps que les opérations de caractérisation, de tri et d'assainissement n'auront pas été achevées.

Les capacités d'entreposage de déchets FAVL dont l'Andra se dote au Cires à fin 2012 donneront de la souplesse à l'assainissement des sites pollués. Selon les calendriers respectifs d'assainissement des sites et de mise en service de la filière SCR, il sera envisageable qu'une partie des déchets soit évacuée directement depuis le site d'assainissement vers le stockage. Si nécessaire de nouvelles capacités d'entreposage devront être envisagées.

3.4.2 Synthèse

Les options de gestion des différentes familles de déchets radifères présentées ci-dessus se traduisent essentiellement par des incertitudes sur les volumes de déchets à stocker, le scénario de gestion à long terme des déchets radifères restant en tout état de cause un stockage en SCR.

Les besoins éventuels en complément de traitement seront précisés une fois le site d'implantation caractérisé et les options de conception du stockage fixées. Des choix peuvent être effectués par anticipation, sur la base des meilleures connaissances disponibles, selon les besoins et calendriers des producteurs relatifs à la reprise des déchets (et des matières), de leur conditionnement et de leur entreposage.

3.5 Evaluation du stockage des déchets radifères en SCR

3.5.1 Introduction

Après fermeture, l'objectif fondamental du stockage est de protéger les personnes et l'environnement contre les risques liés à la dissémination des substances radioactives contenues dans les déchets, ainsi que de l'exposition externe. Certains déchets radioactifs pouvant également comprendre des toxiques chimiques, le respect de l'objectif fondamental assigné à un stockage implique aussi de considérer le risque potentiel associé à la présence de ces substances.

La faible profondeur du SCR le rend sensible⁹ à l'évolution géodynamique externe (érosion, pergélisol) qui peut intervenir à l'échelle de 50 000 à 100 000 ans¹⁰. Les orientations générales de sûreté émises par l'ASN [5] recommandent de concevoir l'installation de stockage des déchets FAVL principalement pour confiner les déchets efficacement pendant quelques dizaines de milliers d'années. Au terme de cette durée, l'activité contenue dans les déchets devra avoir atteint un niveau résiduel tel que les expositions de l'homme et de l'environnement ne soient pas inacceptables même en cas de perte significative des propriétés de confinement de l'installation.

Cela conduit à distinguer dans la suite deux phases de vie successives après fermeture, reliées à la connaissance de l'évolution géodynamique externe du site. La première phase de quelques dizaines de milliers d'années se caractérise par une évolution lente et limitée qui n'induit pas de modification majeure dans le fonctionnement du stockage. La deuxième phase, pendant et au-delà du prochain épisode glaciaire, peut se traduire par une dégradation du site de stockage, par exemple la formation d'un pergélisol, voire une érosion totale du stockage avec mise à nu des déchets. Des études détaillées

⁹ L'évolution géodynamique externe peut conduire à la perte de l'intégrité du stockage SCR.

¹⁰ Selon le scénario climatique considéré : évolution climatique naturelle ou perturbée

sur le site d'implantation permettront de préciser les conditions de l'évolution géomorphologique ainsi que les temps caractéristiques des processus d'érosion.

Il est à noter que le radium 226, radioélément prépondérant initialement présent dans les déchets radifères, aura pratiquement totalement décru après les premières dizaines de milliers d'années ou sera mis à l'équilibre avec son père (d'activité plus limitée). Au-delà de 15 000 à 20 000 ans, la radiotoxicité des déchets radifères sera quasiment constante dans le temps.

3.5.2 Fonctions de sûreté pendant la première phase après fermeture

Sur les premières dizaines de milliers d'années, l'objectif fondamental ci-dessus se décline en fonctions de sûreté vis-à-vis des différentes voies de transfert possibles de la radioactivité des déchets (et des toxiques chimique) jusqu'à l'homme. Les dispositifs mis en œuvre pour assurer ces fonctions doivent rester disponibles de manière passive, c'est-à-dire sans nécessiter d'action humaine au-delà d'une période définie. Dans le rapport [6], l'Andra a décliné les fonctions de sûreté identifiées dans la note d'orientations générales de sûreté de l'ASN [5], en prenant en compte les différentes voies de transfert.

La première fonction consiste à isoler les déchets des phénomènes naturels ainsi que des activités humaines banales. Elle protège l'homme de l'irradiation par les déchets et de la contamination radioactive ou chimique par contact ou par poussières.

Vis-à-vis des transferts par l'eau, la sûreté du stockage dépend également des flux d'eau qui le traversent, de la cinétique de libération des éléments par les déchets (terme source) et des mécanismes d'interaction qui ralentissent le déplacement. Cela implique (i) de limiter la circulation de l'eau, (ii) de limiter le relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques au plus près des déchets (empêcher leur mise en solution, favoriser leur précipitation et/ou favoriser des formes chimiques peu mobiles des solutés) et (iii) de retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques relâchés hors des alvéoles de stockage¹¹.

Vis-à-vis des transferts des gaz, il s'agit de limiter l'exhalaison à la surface de gaz radioactif.

3.5.3 Satisfaction des fonctions de sûreté pendant la première phase après fermeture

3.5.3.1 Isoler les déchets de l'homme et de la biosphère

La nature du site et la profondeur d'implantation considérées préservent le stockage d'activités humaines touchant la surface ou les premiers mètres du sous-sol.

Pour réduire la possibilité d'une intrusion involontaire plus profonde, un contrôle institutionnel du site sera maintenu après fermeture accompagné de la mise en place de servitudes. En outre, la mémoire du stockage sera maintenue le plus longtemps possible. Cependant on ne peut exclure une perte de mémoire de son existence au bout d'une durée de l'ordre de 500 ans. Au-delà de cette durée, des intrusions humaines involontaires dans le stockage sont donc considérées comme possibles.

3.5.3.2 Limiter la circulation de l'eau

L'implantation du SCR dans une couche d'argile de faible perméabilité permet de limiter la circulation de l'eau. Cela favorise la mise en place d'équilibres chimiques et contribue à la maîtrise des transports (migration) de solutés.

L'Andra a étudié le fonctionnement hydraulique d'un SCR à partir de simulations numériques d'écoulement pour un ensemble de domaines plausibles de propriétés hydro-dispersives (perméabilité,

¹¹ « Retarder » signifie augmenter la durée du transfert vers la biosphère, ce qui permet de réduire l'impact du fait de la décroissance radioactive. « Atténuer » la migration doit se comprendre dans une double acception, à la fois dans le temps et dans l'espace. Pour un temps de parcours moyen donné et à quantité constante, un flux de radionucléides sera d'autant moins nocif que son panache est plus étendu et que son arrivée dans la biosphère est répartie sur une période de temps plus longue.

coefficient de diffusion, porosité accessible à la diffusion) et un contexte hydrogéologique de site compatible avec une implantation d'un SCR.

Il en ressort que la perméabilité de l'argile hôte, le contraste de perméabilité entre l'argile hôte et la couverture et l'état de la nappe sous-jacente déterminent le sens des écoulements verticaux. La topographie de la couverture conditionne la présence d'écoulements horizontaux.

Une fois le site choisi et caractérisé, un modèle hydrogéologique sera établi pour déterminer le fonctionnement hydraulique du stockage. Sur cette base des dispositions constructives pourront être intégrées à la conception du stockage pour favoriser la fonction de limitation de la circulation de l'eau.

3.5.3.3 Limitier le relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques au plus près des déchets

La fonction de sûreté précédente limite le débit d'eau atteignant les déchets. Dans ce contexte, la forme chimique des éléments contenus dans les déchets et les conditions physico-chimiques régnant dans le stockage conditionnent la fraction de l'inventaire mise en solution dans l'eau au cours du temps suivant une hypothèse d'équilibre chimique. De manière générale les radioéléments contenus dans les déchets radifères restent peu solubles sur une large gamme de conditions aqueuses.

L'insolubilisation (sous forme de sulfate ou phosphate) du radium initial dans la plus grande part des déchets assure la limitation de son relâchement. Cela suppose toutefois de constituer au sein du stockage des conditions physico-chimiques favorisant la stabilité de la forme insolubilisée. Dans une grande part de l'inventaire, le radium insolubilisé par co-précipitation est incorporé dans la barytine (BaSO_4) avec une fraction molaire de l'ordre de 10^{-7} , ce qui donne au composé $\text{Ba,Ra}(\text{SO}_4)$ des propriétés similaires à celles de la barytine. Dans ce cas, la solubilité de la phase porteuse du radium est contrôlée par la teneur en sulfate en solution. La réduction de cette concentration risque de mettre en solution une fraction du radium par dissolution du co-précipité. Plusieurs pistes sont explorées pour éviter cet effet :

- les investigations de site permettront d'évaluer la teneur en sulfate des eaux interstitielles ;
- un apport en sulfate dans le colis ou l'alvéole de stockage est possible avec l'ajout de gypse par exemple ;
- la limitation de l'activité microbienne sulfato-réductrice en limitant l'apport en nutriments.

Pour les déchets issus des opérations d'assainissement de sites pollués dans lesquels le radium n'est pas insolubilisé, l'utilisation de matériaux cimentaires permettra si nécessaire (selon le niveau d'activité radiologique des déchets) de limiter son relâchement au plus près des déchets. Des travaux sont en cours pour évaluer et caractériser les processus de piégeage du radium dans des matrices cimentaires.

La mobilité de l'uranium augmente dans un environnement oxydant à pH neutre. Ce sont essentiellement les caractéristiques minéralogiques et chimiques de la roche d'accueil qui permettront de réguler les conditions redox autour du stockage. En compléments, plusieurs dispositions peuvent être considérées :

- une implantation du stockage (et de la partie confinante de la couverture) sous la limite séculaire entre zone saturée et zone non saturée sera privilégiée pour favoriser le maintien de conditions anoxiques ;
- l'élimination des nitrates des déchets permettrait si nécessaire d'éviter le risque d'une perturbation conduisant à diminuer le potentiel réducteur de la couche hôte ;
- la présence de fer apporté par les conteneurs et fûts métalliques des colis contribuera, au moins dans une première période, à consommer l'oxygène par corrosion, et donc à favoriser des conditions anoxiques.
- l'utilisation des matériaux cimentaires au sein du stockage, la mobilité de l'uranium (VI) (forme dans laquelle se trouve l'uranium en conditions oxydantes) y étant tout aussi limitée que celle de l'uranium (IV) (forme dans laquelle se trouve l'uranium en conditions réductrices).

Le thorium est très peu sensible aux conditions redox, et sa mobilité (solubilité et sorption) reste très limitée, qu'il s'agisse des milieux argileux ou cimentaires.

Concernant les toxiques chimiques présents dans les déchets radifères, les paramètres suivants contrôlent leur mobilité :

- le plomb est facilement adsorbé sur les oxy-hydroxydes de fer, de manganèse ainsi que sur les surfaces des minéraux argileux ;
- la solubilité du bore dépend de sa forme chimique. En conditions argileuses il peut s'absorber ou co-précipiter sur la surface de la calcite en fonction du pH ;
- la mobilité du chrome dans les milieux argileux est conditionnée par le processus redox. La présence de matériaux à base de fer et de leurs produits de corrosion sous conditions anoxiques constitue un piège potentiel pour le chrome ;
- le comportement de l'arsenic est sensible aux conditions Eh-pH des eaux interstitielles ; la présence de fer, de soufre et de matière organique, ainsi que les teneurs en oxy-anions, notamment les phosphates participent à son immobilisation au sein du stockage.

Il ressort de ces éléments que pour limiter la solubilité des substances contenues dans les déchets radifères, une recherche de conditions aqueuses favorables pourra être réalisée sur la base des caractéristiques de site en visant à préserver les propriétés réductrices et de sorption de l'argile. Au sein des alvéoles de stockage, des possibilités de regroupements de types de déchets par alvéole ou d'usage de matériaux cimentaires seront étayées. La capacité du stockage à retenir les toxiques chimiques sera également vérifiée.

3.5.3.4 Retarder et atténuer la migration des radionucléides et des toxiques chimiques par voie aqueuse

La migration de la fraction de radioéléments relâchés dans l'eau est retardée et atténuée par l'épaisseur d'argile de la formation hôte et par celle de la couverture.

Retarder et atténuer la migration des radionucléides repose sur la vitesse et la trajectoire de transport des solutés (convection ou diffusion selon le fonctionnement hydraulique du système) ainsi que sur la capacité de l'argile à retenir les radioéléments (mécanismes de sorption).

Retarder et atténuer la migration des toxiques chimiques reposent sur les mêmes mécanismes que ceux mobilisés pour les radioéléments dont la décroissance dans le temps n'est pas significative.

3.5.3.5 Limiter l'exhalaison à la surface de gaz radioactif

Dans le cas des déchets radifères, la migration du radon (de période environ 3,8 jours) doit être suffisamment retardée pour bénéficier de sa décroissance radioactive avant qu'il n'atteigne la biosphère. Le radon est susceptible de migrer sous forme gazeuse au travers de la porosité des matériaux de couverture. La capacité de la couverture à confiner le radon se fonde sur son épaisseur, sa perméabilité et son taux d'humidité.

Limiter la migration du radon est favorisée en limitant le relâchement du radium au plus près des déchets et en visant une implantation du stockage et de la partie confinante de la couverture sous la limite séculaire entre zone saturée et zone non saturée. En effet plus l'espace poral des matériaux traversés est saturé en eau, plus la vitesse de propagation du radon est lente.

3.5.4 **Analyse de sûreté pendant la première phase après fermeture**

Conformément à la note d'orientations générales de l'ASN [5], l'analyse de sûreté d'un stockage à faible profondeur doit considérer une situation de référence et des situations altérées, liées à des événements d'origine naturelle ou liée à l'activité humaine.

A ce stade, l'analyse de sûreté faisant le lien entre la défaillance d'une ou plusieurs fonctions de sûreté n'est pas encore réalisée. Elle sera menée sur la base des données de site et des choix de conception envisagés du stockage. Elle pourra conduire, dans une démarche itérative, à modifier certaines options de conception.

Le stockage des déchets radifères en SCR a été évalué à ce stade sur la base d'une analyse préliminaire (i) du comportement physico-chimique et hydraulique du stockage dans une situation de référence et (ii) de la défaillance de la fonction « isoler les déchets de l'homme et de la biosphère » au regard d'une situation de forage.

3.5.4.1 Analyse préliminaire du comportement physico-chimique et hydraulique du stockage dans une situation de référence

L'Andra a évalué le comportement du stockage sur la base d'une configuration représentative d'un SCR, via le calcul de débits molaires aux limites de la couche hôte et de la couverture. Du fait de la forte dépendance de l'impact dosimétrique aux paramètres de la biosphère et aux caractéristiques des exutoires (nature, débit d'eau, distance au stockage...), la traduction des débits molaires aux exutoires¹² en impact dosimétrique n'aura de sens qu'une fois le site choisi et qualifié.

Une représentation de cette configuration est donnée à la Figure 12. La sensibilité aux paramètres de rétention a été étudiée.

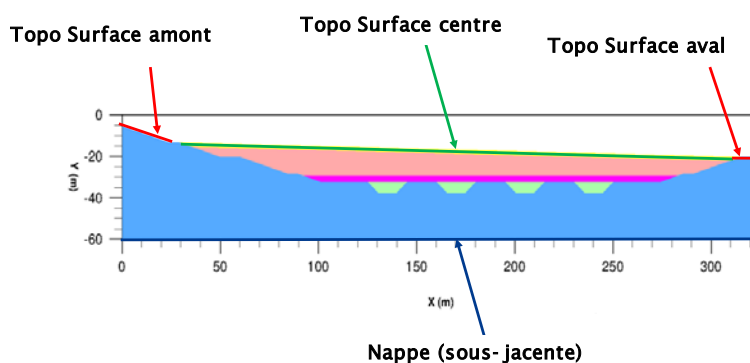


Figure 12 : Positionnement des surfaces au droit desquelles les débits molaires sont calculés dans un stockage SCR

Ces travaux montrent que la forte sorption du thorium en milieu argileux et son indépendance aux conditions redox conduisent à des débits molaires négligeables pour l'ensemble des isotopes de la chaîne 4N.

Pour l'uranium, dont le comportement dépend des conditions redox, la forte sorption en milieu réducteur induit une cinétique de migration lente et par conséquent des débits molaires négligeables. En revanche, dans le cas de conditions oxydantes telles que celles induites par la présence de sels de nitrates, les débits molaires de l'uranium, ainsi que ceux de ses descendants de milieu et de fin de chaîne (^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra et ^{210}Pb), augmentent du fait de sa mobilité. L'étude montre que pour l'uranium 238 et 234 et le thorium 230, l'augmentation des débits molaires n'est significative qu'après une période de l'ordre de la dizaine de milliers d'années. En conséquence, si la perturbation oxydante présente un caractère transitoire (d'une durée de moins de 10 000 ans), elle aura un impact réduit sur la migration de l'uranium et sur les débits molaires associés.

Pour le radium, l'étude s'est fondée sur une limite de solubilité élevée au niveau des alvéoles ne tenant pas compte de son état d'insolubilisation. Ce dernier lui confère en effet une limite de solubilité de 10^6 à 10^8 fois inférieure à celle retenue dans les évaluations.

¹² Pompage dans la nappe, rivière en surface, sols contaminés en surface

Les niveaux de débit molaire du radium initial et celui de son descendant de fin de chaîne (^{210}Pb) dépendent du niveau de sorption retenu et du fonctionnement hydraulique du site. Les résultats des évaluations réalisées montrent l'intérêt d'une forte limitation du relâchement de ce radioélément au plus près des déchets, grâce à son insolubilisation, et sur la nécessité de préciser ses caractéristiques de rétention dans l'argile du site.

Les effets potentiels des toxiques chimiques associés aux déchets radifères ont été évalués de manière préliminaire. Ces études se sont appuyées sur des limites de solubilité calculées pour chaque élément chimique dans un contexte géochimique argileux et ont considéré une rétention du plomb, du chrome et du nickel dans l'argile. Il en ressort que le relâchement des toxiques chimiques décroît linéairement avec la valeur de la perméabilité de l'argile hôte. Des évaluations complémentaires seront réalisées sur la base des caractéristiques physico-chimiques et hydrogéologiques des sites investigués.

3.5.4.2 Analyse préliminaire de la défaillance de la fonction « isoler les déchets de l'homme et de la biosphère » au regard d'une situation de forage

Compte tenu de la profondeur d'implantation envisagée, la défaillance de cette fonction de sûreté a été évaluée par un scénario de type « forage de reconnaissance géotechnique avant implantation d'une résidence ». L'optimisation de la répartition des différentes familles de déchets dans les ouvrages de stockage contribue à réduire l'impact associé à ce type de scénario.

Compte tenu de l'inventaire des déchets radifères, il paraît possible de maintenir cet impact à une valeur inférieure à 1 mSv/an.

3.5.5 Dispositions relatives à la phase de très long terme

Les orientations de sûreté définies par l'ASN indiquent que *« comme pour les stockages de surface, il sera nécessaire de limiter l'activité à vie longue pouvant être reçue dans l'installation, notamment pour les radionucléides qui ne décroissent pas en quelques dizaines de milliers d'années, et le cas échéant d'examiner l'opportunité de fixer des règles de répartition de l'activité au sein de l'installation afin de limiter l'apparition de zones d'activité concentrée lorsque le stockage ne sera plus à l'abri des intrusions humaines banales. Les limites d'activité seront donc des éléments fondamentaux pour définir les catégories de déchets susceptibles d'être acceptées dans un stockage de déchets FAVL, au vu du site et du concept retenu. »*

Pour identifier les dispositions à mettre en œuvre en vue de la phase de très long terme, l'Andra a effectué une évaluation de l'impact du stockage dans l'hypothèse extrême d'une érosion totale et rapide de la couverture. L'érosion totale entraîne à long terme une remise en surface de la radioactivité résiduelle des déchets. Cette situation associée à une activité humaine (résidence sur le site, chantier routier) peut entraîner une exposition du public. L'Andra a retenu à ce stade un scénario de « type résidence » pour cette évaluation.

Les résultats des calculs montrent que l'activité massique en uranium 238 et en thorium 230 combinée à la répartition des déchets au sein du stockage détermine le niveau d'impact. A titre indicatif, l'impact, au-delà de 50 000 ans, d'une intrusion dans le stockage mis à nu est de quelques millisieverts par an pour une activité massique moyenne en uranium 238 d'une dizaine de becquerels par gramme.

3.6 Perspectives

Les caractéristiques des déchets radifères et les différents leviers de conception qui peuvent être mobilisés permettront de satisfaire les fonctions de sûreté attendues pour leur stockage en SCR.

Les résultats des études menées à ce jour sur site générique montrent que, pour quantifier le niveau de performance, il est nécessaire de définir les interactions chimiques, de déterminer les conditions de transport et de quantifier le caractère réducteur et les propriétés hydro-dispersives de l'argile hôte. Cela ne peut s'effectuer qu'après la caractérisation du site d'implantation.

En effet la reconnaissance de l'épaisseur et de la continuité des formations géologiques ainsi que des mesures *in situ* de charges hydrauliques et de perméabilités permettront d'établir le schéma hydraulique du site. Des mesures de diffusivité et de porosité sur échantillons prélevés sur le site sont également nécessaires à la modélisation de la migration des radioéléments et des toxiques chimiques

dans l'argile. La capacité de rétention des radioéléments par l'argile du site sera acquise par des mesures sur échantillons d'argile prélevés sur le site. L'acquisition de la composition minéralogique de l'argile et de la chimie de l'eau interstitielle permettra de modéliser les équilibres chimiques et de préciser la capacité redox de l'argile. Des tests de lixiviation des déchets avec l'eau du site permettront de consolider les calculs de solubilité de radioéléments et d'espèces chimiques et de les caler aux conditions réelles du site. Sur cette base des compléments de traitement pourraient être décidés et la conception du SCR pourra être précisée.

4. Gestion à long terme des déchets de graphite

4.1 Inventaire

La masse totale des déchets de graphite est d'environ 23 000 t. Environ 80 % en masse proviendra du démantèlement des empilements et protections biologiques en graphite (Figure 13) des réacteurs EDF et CEA de la filière Uranium Naturel – Graphite – Gaz (UNGG) de Chinon (37), Saint-Laurent-des-Eaux (41), Bugey (01) et Marcoule (30). Le programme de démantèlement d'EDF est en cours de réalisation et démarre par le réacteur Bugey 1. Les empilements sont constitués de briques de graphite de dimensions variables. Les opérations de démantèlement prévues par EDF produiraient également des résines échangeuses d'ions (REI) utilisées pour la purification de l'eau du procédé de démantèlement prévu pour quatre réacteurs UNGG : Bugey 1, Saint Laurent A1 et A2, Chinon A3.

Environ 20 % en masse est issue de l'exploitation passée de ces réacteurs. Ces déchets d'exploitation (« chemises » (Figure 14) et « âmes ») sont aujourd'hui entreposés dans des silos sur les sites nucléaires de Saint-Laurent-des-Eaux (chemises graphite entreposées dans des silos semi-enterrés), Marcoule (chemises graphite des réacteurs Chinon A2 et A3 entreposées dans les fosses de l'installation MAR 400 et de l'installation de dégainage) et La Hague (50). Un volume limité de déchets de graphite (de l'ordre de 1 % de la masse totale environ) provient aussi de réacteurs expérimentaux (Saclay, Marcoule,...).

EDF et le CEA différencient les empilements et protections biologiques des chemises de cartouches de combustibles.

Les déchets de graphite et de magnésium d'Areva proviennent du traitement des combustibles UNGG, ils représentent une masse d'environ 1 100 tonnes et sont entreposés dans les silos 115 et 130 de La Hague. Dans le cadre du programme de reprise des déchets entreposés dans ces silos, il est prévu un conditionnement dans des colis spécifiques en vue de leur entreposage, sur le site de La Hague dans un bâtiment dédié à cet effet, dans l'attente de l'ouverture d'une filière de stockage permettant leur prise en charge.



Figure 13 : Empilement en graphite

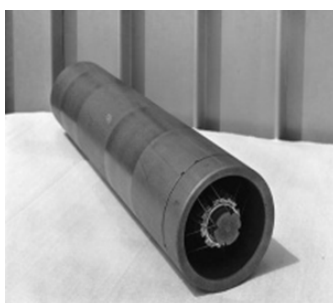


Figure 14 : Chemise en graphite

L'essentiel des radionucléides contenus dans les déchets sont des produits d'activation (PA) du graphite et de ses impuretés : c'est le cas notamment du cobalt 60 et du fer 55 pour les PA à période courte, du carbone 14, chlore 36, calcium 41, nickel 59 et 63, niobium 94... pour les PA à période longue. Il s'y ajoute des produits de fission (strontium 90, césium 137 et 135, technétium 99...) et des actinides (américium, plutonium...) qui ont été relâchés par des combustibles lors du fonctionnement des réacteurs.

Les plus fortes activités dans les empilements sont représentées par le carbone 14 (5 730 ans), le tritium (de période 12,3 ans) et le nickel 63 (100 ans), dans les chemises par le fer 55 (2,7 ans), le cobalt 60 (5,27 ans), le nickel 63 et le strontium 90 (29 ans) et dans les déchets d'Areva par le césium 137 (30 ans), le plutonium 241 (14 ans), le nickel 63 et le strontium 90. Une attention particulière est portée aux activités du chlore 36 et carbone 14, principaux contributeurs à l'impact à long terme en stockage.

L'inventaire radiologique des déchets de graphite présente des incertitudes. Ces incertitudes proviennent notamment du manque de connaissance sur la sensibilité de l'inventaire à des paramètres tels que le coke utilisé, le procédé de fabrication des éléments de graphite, l'historique d'exploitation du réacteur et le procédé de démantèlement.

Pour lever ces incertitudes, le comportement du graphite fait l'objet de R&D dans le cadre de plusieurs structures :

- Le Comité technique UNGG (CT UNGG) dont les actions sont dédiées à la caractérisation des déchets de graphite et des REI d'EDF en vue du démantèlement.
- Le Comité Technique R&D Graphite (CT Graphite), créé en janvier 2008, dont les actions sont menées en vue du futur stockage des déchets de graphite.
- Le projet européen Carbowaste (2008-2013), dédié au démantèlement, au traitement et au stockage des déchets de graphite
- le projet « Treatment of irradiated graphite to meet acceptance criteria for waste disposal », commun EDF/CEA/Andra, sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

Par ailleurs une proposition de projet européen portant sur le relâchement du carbone 14 (CAST : carbon 14 source term) a été déposée en novembre 2012. Ce projet, qui pourrait démarrer au premier semestre 2013, comprend un pôle qui traite de la spéciation du carbone 14 relâché par les déchets de graphite.

Ces travaux visent à améliorer la robustesse de l'inventaire des radionucléides, de préciser les mécanismes de relâchement des radionucléides en stockage et de déterminer leur spéciation (sous forme gazeuse/en solution, forme organique/forme inorganique) ainsi que d'évaluer le comportement en stockage des graphites et des REI et notamment leurs interactions possibles avec les matériaux du stockage.

Le chlore 36 proviendrait de l'activation du chlore 35 en réacteur. L'origine du chlore n'est pas encore clairement identifiée : impureté des brais et des cokes, procédé de traitement du graphite vierge (lavage à l'acide chlorhydrique mais il n'est pas certain que tous les graphites aient subi ce traitement), traces de chlore dans les gaines du combustible et dans le caloporteur susceptibles de migrer lors du passage en réacteur.

Sur la base d'essais de lixiviation, lorsque le graphite constitutif des empilements des réacteurs sera mis en présence d'eau lors du démantèlement, une part de certains radionucléides contenus, notamment le chlore 36, sera lixiviée et sera piégée dans les REI.

L'inventaire radiologique des déchets de graphite utilisé en 2008 dans [6] était fondé sur l'extrapolation des valeurs mesurées les plus élevées à l'ensemble des déchets de graphite, conduisant à majorer l'activité globale.

En poursuivant un travail de caractérisation plus fine du graphite (sur la base des mesures réalisées sur des prélèvements provenant de chaque empilement et d'une modélisation numérique de l'ensemble de l'empilement), EDF a réévalué à la baisse l'inventaire en chlore 36 dans ses déchets de graphite : il serait de l'ordre de 5,5 TBq au lieu de 13 TBq. EDF indique que cet inventaire est essentiellement contenu dans les chemises. Les empilements, qui constituent 80 % en masse des déchets de graphite en comprendraient une faible quantité (de l'ordre de 0,3 TBq).

Le CEA a également révisé l'inventaire en chlore 36 de ses déchets de graphite qui serait de 1,6 TBq au lieu de 6,5 TBq.

Le carbone 14 peut être relâché sous différentes formes, organique et inorganique, en solution ou en phase gaz. Les premiers résultats des essais de lixiviation montrent toutefois que le carbone 14 est essentiellement relâché en solution.

Pour l'ensemble des déchets de graphite, un inventaire total en carbone 14 de 1 200 TBq est estimé par les producteurs, majoritairement sous forme inorganique, dont 1 000 TBq dans les empilements. L'inventaire en carbone 14 organique est estimé sur la base de travaux expérimentaux menés par le CEA et Subatech sur la lixiviation des déchets graphites en milieu sodé (pH 13). Ces travaux indiquent un relâchement très limité du carbone 14 (< 1%), dont une très faible part en phase gaz sous forme organique (ou CO). Ces premiers résultats sont cohérents avec de précédents essais menés sur des déchets graphites anglais [8] indiquant un relâchement en phase gaz inférieur à 0,01 %. Pour la présente analyse, la proportion de carbone 14 organique a été fixée par hypothèse à 0,03 % de l'inventaire total en carbone 14.

4.2 Colisage

Le conditionnement considéré par EDF et le CEA pour les déchets de graphite est un conteneur en béton armé de volume extérieur de l'ordre de 10 m³ (Figure 15). Les caractéristiques dimensionnelles des colis de déchets de graphite d'EDF ne sont pas fixées et sont en cours d'optimisation.

Les déchets de procédé de démantèlement sous eau (résines échangeuses d'ions) sont supposés être conditionnés dans des colis C1PG en béton armé d'environ 2 m³ de volume extérieur (Figure 16).

Les masses, le nombre de colis et les volumes conditionnés des déchets de graphite et des résines échangeuses d'ions (REI) fournis par les producteurs sont donnés au *Tableau 2*.

Avec l'hypothèse de conditionnement en colis de 10 m³ en béton armé, l'ensemble des déchets de graphite représenterait un volume total à stocker de l'ordre de 90 000 m³.

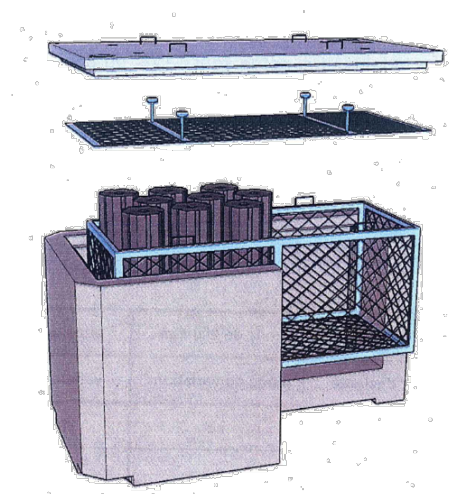


Figure 15 : Projet de colis de stockage EDF et CEA de déchets de graphite de 10 m³



Figure 16 : Projet de colis de stockage des résines échangeuses d'ions de 2m³

Producteurs / Déteneteurs	Nature du déchet	Masse initiale des déchets (tonnes)	Nombre de colis pour le stockage	Volume total conditionné (m3)
EDF	Empilements	15120	6550	59500
	Chemises de St Laurent	2000	900	8100
CEA	Empilements	3900	980	8820
	Chemises Chinon A2/A3	650	190	1700
	Divers CEA	95	24	215
AREVA	Structures combustibles (Silos 115+130)	1050	620	6200
	Ames graphite HADE	100	60	600
Total		22 920	9 320	85 140
	Total empilements	19 020	7 530	68 320
	Total Chemises+autres	3 900	1 790	16 820
	REI		2 560	5 120
Total EDF		17120	7450	67600
Total CEA		4650	1190	10740
Total AREVA		1150	680	6800
Total Graphite		22 920	9 320	85 140

Tableau 2 : Masse, nombre de colis et volume à stocker des déchets de graphite

4.3 Particularités des déchets de graphite en stockage

Les principales contraintes que suscitent les déchets de graphite pour leur gestion à long terme en stockage sont liées à leurs activités en radionucléides à vie longue en particulier le chlore 36 pour sa mobilité et le carbone 14 pour son inventaire initial important associé au risque de présence d'une forme organique mobile dans le stockage.

Dans une moindre mesure, le contenu en d'autres radionucléides ne décroissant pas à l'échelle de quelques dizaines de milliers d'années tels que le béryllium 10, le calcium 41, le neptunium 237 et le technétium 99 est aussi à apprécier. La présence de cobalt 60 et du tritium est à prendre en compte, particulièrement pendant la période d'exploitation du centre de stockage vis-à-vis respectivement du risque d'exposition et des rejets.

Le caractère mobile et soluble du chlore 36 impose la présence d'une barrière de diffusion suffisamment épaisse pour atténuer sa migration par voie aqueuse. Les études et recherches en cours sur les déchets de graphite montrent qu'il existerait une part labile et une part non labile, dépendant de l'origine du graphite et son historique au cœur du réacteur. Les expériences de lixiviation du chlore 36 mettent en évidence un relâchement avec une cinétique très rapide (fraction labile) portant sur quelques pourcents à quatre-vingt-dix pourcents de l'inventaire, puis un relâchement avec une cinétique très lente pour le reste de l'inventaire. Les fractions labiles les plus importantes correspondent aux températures les plus faibles en réacteur (les deux explications avancées à ce jour sont soit la présence de deux formes chimiques de chlore, soit des localisations différentes du chlore). Toutefois dans les simulations de transfert par l'eau réalisées jusqu'à maintenant le chlore 36 contenu dans les déchets de graphite est considéré comme labile. La quantité de chlore 36 atteignant la surface ou la nappe sera ainsi proportionnelle à l'activité contenue dans les déchets. La consolidation de l'inventaire en chlore 36 détermine les possibilités de gestion des déchets de graphite.

Concernant le carbone 14, les travaux de R&D en cours montrent que lors de la lixiviation du graphite, sa cinétique de relâchement est faible. Le relâchement s'effectue majoritairement en phase liquide. En phase gazeuse, le carbone 14 se trouve soit sous forme organique, soit sous forme de monoxyde de carbone. De la forme sous laquelle il est relâché (inorganique, par exemple carbonates ou dioxyde de carbone ; organique, par exemple méthane) dépendent les modalités de migration de ce radionucléide au sein du stockage et du milieu géologique. Sous forme inorganique (gaz ou en solution dans l'eau), le carbone 14 peut être piégé en grande partie grâce aux mécanismes de rétention au sein des matériaux cimentaires introduits dans le stockage et de la couche d'argile, conduisant ainsi à limiter l'atteinte de la biosphère du fait de sa décroissance radioactive. La mobilité du carbone 14 sous forme organique est plus importante.

La gestion à long terme des déchets de graphite se fondera principalement sur la gestion spécifique des radionucléides précités. Il est aussi nécessaire de vérifier que le contenu des déchets en autres produits d'activation (^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{94}Nb), de fission (^{90}Sr , ^{137}Cs et ^{134}Cs) et en actinides (Pu, Am) reste compatible avec les options de stockage considérées.

4.4 Scénarios de gestion à long terme

Compte tenu de leur inventaire présumé en produits d'activation à vie longue mobiles (en particulier le chlore 36, estimé initialement de l'ordre de 32 TBq, et éventuellement la fraction organique du carbone 14), les études et recherches menées par l'Andra jusqu'en 2009 [6] ont montré qu'un stockage sous couverture remaniée (SCR) ne permettrait pas d'atteindre des performances suffisantes vis-à-vis du comportement du chlore 36 pour les déchets de graphite. La sûreté à long terme du stockage impose une barrière argileuse épaisse, performante et durable entre les déchets et l'environnement conduisant l'Andra à proposer un stockage sous couverture intacte (SCI) pour ces déchets. Lors de la recherche de site, la Commission nationale d'évaluation (CNE) avait recommandé de rechercher un site permettant de stocker les déchets de graphite dans une couche d'argile d'une épaisseur de cent mètres à une profondeur d'une centaine de mètres. La CNE a également recommandé d'étudier un scénario alternatif de stockage profond des déchets de graphite.

Depuis 2010, les développements en matière de procédés de traitement et les évolutions en matière de caractérisation radiologique ont conduit l'Andra, EDF et le CEA à envisager d'autres scénarios de gestion, fondés sur des opérations de tri et de traitement en amont, pouvant élargir le choix de filières de stockage.

Concernant la caractérisation des déchets, les travaux menés par EDF et le CEA les conduisent à proposer une révision à la baisse (une réduction d'environ 75 %) de l'activité radiologique en ^{36}Cl (cf. section 4.1). Les empilements (et protections biologiques) présentent une activité radiologique moindre que les chemises de cartouches de combustibles.

Concernant le traitement, les résultats prometteurs des premiers travaux de R&D (EDF, CEA, Jülich) offrent des perspectives d'une décontamination importante du chlore 36 et du carbone 14 et d'une décontamination quasi-totale du tritium. Les questions du traitement des effluents, en particulier gazeux, et du conditionnement des résidus du traitement restent cependant à instruire.

En plus du scénario qui considère le stockage de la totalité des déchets de graphite en SCI (Figure 17), les scénarios industriels suivants sont ainsi étudiés pour les déchets de graphite d'EDF et du CEA :

- Tri des déchets (Figure 18) pour un stockage des empilements en SCR (environ 69 000 m³ de volume de stockage) et des chemises et autres déchets dans Cigéo (environ 10 000 m³ de chemises et 5 000 m³ de résines échangeuses d'ions en volume de stockage) ;
- Extraction de radionucléides (³⁶Cl, ¹⁴C, ³H,...) avec stockage du graphite partiellement décontaminé¹³ en SCR (Figure 19) et des résidus concentrés et des résines échangeuses d'ions dans Cigéo¹⁴ ;
- Gazéification (destruction totale) du graphite après décontamination (Figure 20) avec stockage des résidus de traitement dans Cigéo (réduction de l'ordre de 80 % du volume total à stocker).

Pour les déchets de graphite entreposés dans les silos 115 et 130 de l'établissement de La Hague (qui représentent moins de 1 % en masse des déchets à stocker), Areva n'avait pas retenu de scénario de tri ou d'un traitement en phase amont de son projet de reprise des silos. Areva est en cours de redéfinition de son scénario global de conditionnement des déchets UNGG. A ce jour leur gestion repose sur un SCI dans une hypothèse de co-stockage avec les autres déchets de graphite.

Par mesure conservatoire, la demande d'autorisation de création de Cigéo couvrira des déchets issus du graphite. Au titre de réserves de l'inventaire, l'évaluation de sûreté du projet Cigéo présentée dans le cadre de cette demande prendra en compte l'activité radiologique totale des déchets de graphite. Cette activité sera supposée concentrée dans un volume de colis de stockage réduit issu pour partie d'opérations de tri et/ou traitement (22 000 m³ au total).

Ces scénarios sont évalués par l'Andra, en lien avec EDF et le CEA, sous les angles de la sûreté, de la technico-économie et des risques techniques et réglementaires.

L'exercice préliminaire d'évaluation technico-économique montre que le coût ne permet pour l'instant d'écarter aucun scénario. La comparaison économique des scénarios est notamment dépendante du coût des installations de stockage et/ou de traitement, non encore opérationnelles. En l'état des connaissances, les analyses de risques techniques et réglementaires ne conduisent pas non plus à écarter de scénario.

Au plan de la sûreté à long terme, ces scénarios conduisent l'Andra à compléter les études antérieures [6] par une évaluation du stockage des empilements ou du graphite décontaminé en SCR et par la prise en compte du stockage des chemises ou de résidus de traitement concentrés dans Cigéo. Le stockage des empilements en SCR est évalué à la section suivante.

L'évaluation du stockage du graphite décontaminé en SCR nécessite de disposer de la description de son contenu radiologique qui résultera des travaux de R&D. L'analyse réalisée pour les empilements est transposable au graphite décontaminé.

¹³ Signification de « graphite décontaminé » : graphite dont on aurait extrait de manière sélective les radionucléides non acceptables dans la filière de stockage envisagée.

¹⁴ Les déchets technologiques associés à la mise en œuvre industrielle du traitement n'ont pas été couverts par l'étude à ce stade.

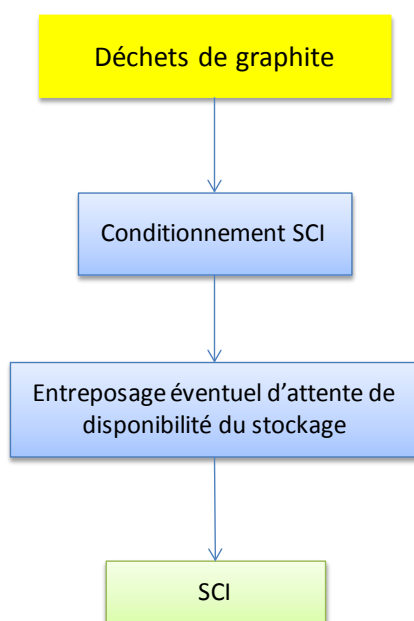


Figure 17 : Scénario de stockage en l'état des déchets de graphite (SCI)

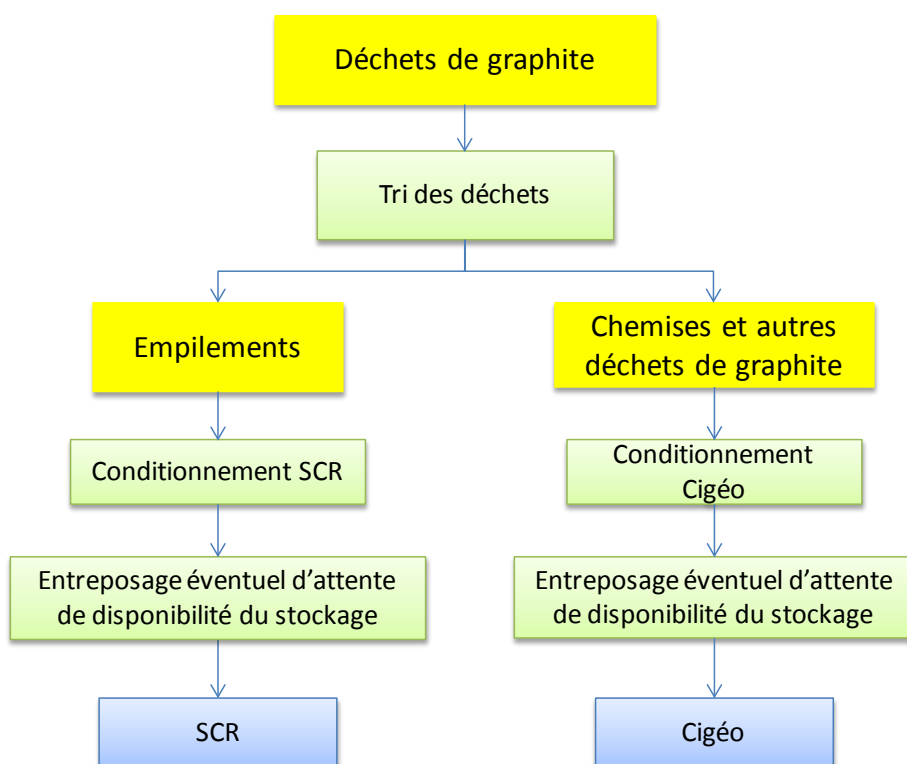


Figure 18 : Scénario de gestion des déchets de graphite fondé sur un tri

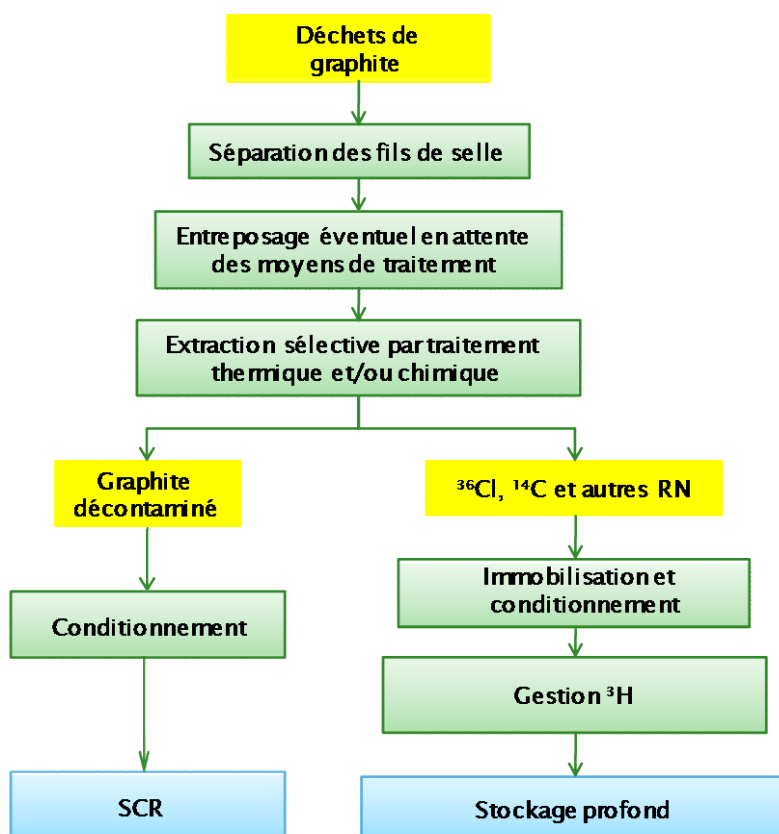


Figure 19 : Scénarios de gestion des déchets de graphite fondés sur une décontamination

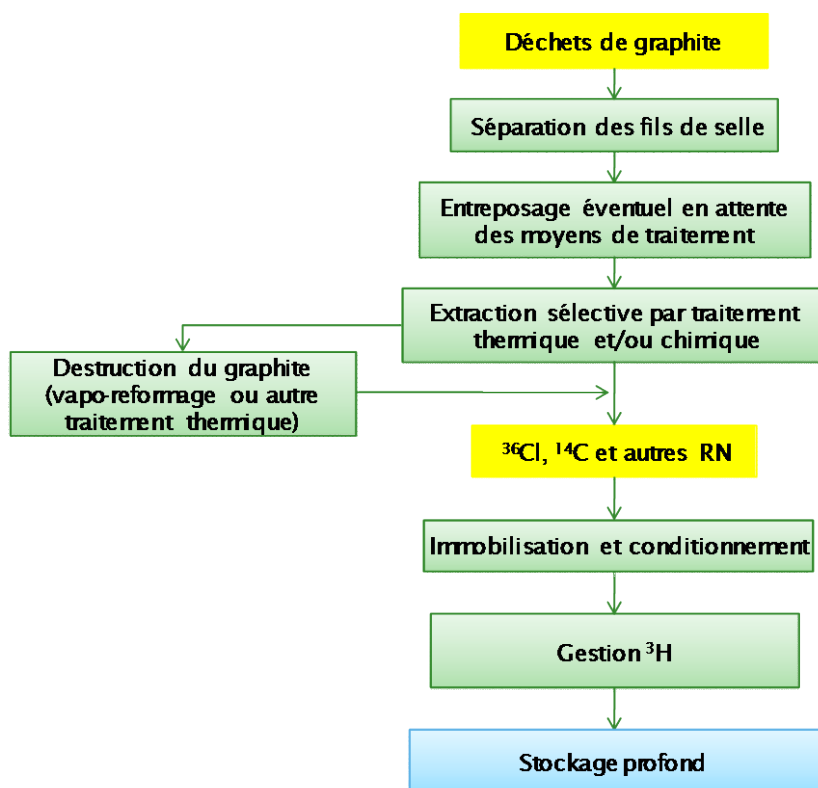


Figure 20 : Scénario de gestion des déchets de graphite fondé sur une destruction totale du graphite

4.5 Evaluation du stockage des empilements en graphite en SCR

L'évaluation du stockage des empilements en SCR est fondée sur la satisfaction des fonctions de sûreté décrites à la section 3.5.

4.5.1 Satisfaction des fonctions de sûreté pendant la première phase après fermeture

4.5.1.1 Isoler les déchets de l'homme et de la biosphère

La démarche explicitée pour les déchets radifères (cf. section 3.5.3.1) s'applique également au stockage des empilements.

4.5.1.2 Limiter la circulation de l'eau

Le fonctionnement hydraulique du SCR est décrit plus haut (cf. section 3.5.3.2) dans le cas des déchets radifères. Les dispositions associées s'appliquent également au stockage des empilements.

4.5.1.3 Limiter le relâchement des radionucléides au plus près des déchets

Compte tenu de sa solubilité, cette fonction renvoie pour le chlore 36 à la cinétique de relâchement par la matrice de graphite. A ce stade le chlore 36 est considéré comme entièrement labile (taux de relâchement de 1 an^{-1}). Des recherches sont en cours pour caractériser la part éventuelle non labile (incorporée au cœur de cette matrice) et la vitesse de relâchement associée.

Les mécanismes de rétention du carbone 14 inorganique reposent sur l'échange isotopique qui correspond à un partage solides/solution quasi-irréversible.

4.5.1.4 Retarder et atténuer la migration des radionucléides par voie aqueuse

La forte mobilité du chlore 36 et du carbone 14 organique contenues dans les empilements en graphite implique de fonder la sûreté du stockage sur l'atténuation de sa migration à travers la couche d'argile. Une fois le site choisi et caractérisé, l'adéquation de la couche d'argile à la réalisation de cette fonction (épaisseur, perméabilité...) pourra être vérifiée.

La période radioactive du carbone 14 et la limitation de sa migration par des matériaux cimentaires introduits dans le stockage et par l'argile permettent de bénéficier de sa décroissance radioactive avant qu'il n'atteigne la biosphère.

4.5.1.5 Limiter l'exhalaison à la surface de gaz radioactif

Cette fonction concerne la fraction du carbone 14 organique relâché sous forme gazeuse.

En fonction de l'inventaire de cette fraction gazeuse, une implantation du stockage et de la partie confinante de la couverture sous la limite séculaire entre zone saturée et zone non saturée permet de limiter la migration de cette fraction sous forme dissoute.

4.5.2 Analyse de sûreté pendant la première phase après fermeture

4.5.2.1 Analyse préliminaire du comportement physico-chimique et hydraulique du stockage des empilements dans une situation de référence

L'Andra a mené des évaluations exploratoires des performances du stockage vis-à-vis du transfert par l'eau du chlore 36 et du carbone 14.

Pour le carbone 14 inorganique, les simulations de performance peuvent représenter l'échange isotopique relatif au mécanisme de rétention par deux modèles de comportement :

- un modèle de précipitation conduisant à considérer une limite de solubilité faible, particulièrement en milieu cimentaire ;
- un modèle fondé sur une forte solubilité et un retard élevé en milieu cimentaire.

Pour la présente étude, les simulations réalisées ont été fondées sur la seconde représentation du comportement du carbone 14 inorganique et ont montré l'intérêt de mobiliser la sorption du carbone 14 inorganique dans les matériaux cimentaires et argileux.

Concernant le carbone 14 sous forme organique, l'étude de performance exploratoire a été menée en considérant un terme source « labile » supposé totalement en solution.

Les résultats des calculs montrent que les performances du stockage des empilements dépendent de leur inventaire radiologique, des paramètres hydro-dispersifs de l'argile hôte et de la couverture, de leurs épaisseurs et du gradient de charge hydraulique.

Pour tenir compte de l'existence éventuelle d'une part non labile du chlore 36, une étude de sensibilité de la performance du stockage au taux de relâchement a été menée. Il en ressort que la prise en compte d'un terme source non labile réduit les pics de relâchements dès lors que le taux de relâchement est inférieur à 10^{-4} an^{-1} . En particulier dans le cadre des configurations de site testées, un taux de relâchement de 10^{-5} an^{-1} permettrait la gestion de l'activité présumée des empilements en chlore 36 en SCR. De tels taux de relâchement peuvent être attendus du chlore 36 restant piégé dans le graphite après un traitement de décontamination.

La prise en compte d'une sorption éventuelle du chlore 36 dans les matériaux cimentaires, qui restera faible tel qu'établi par des mesures expérimentales, ne modifie pas significativement les débits molaires.

Le carbone 14 organique en solution ayant un comportement similaire à celui du chlore 36 sans sorption, il est donc possible d'extrapoler par analogie les résultats obtenus pour le chlore 36. Un enjeu important apparaît être la caractérisation de l'inventaire en carbone 14 organique initial et la fraction qui peut être dissoute, la caractérisation de son taux de relâchement et la prise en compte de l'état hydraulique du stockage.

4.5.2.2 Analyse préliminaire de la défaillance de la fonction « isoler les déchets de l'homme et de la biosphère » au regard d'une situation de forage

De même que pour les déchets radifères, pour les premières dizaines de milliers d'années, l'intrusion dans un stockage en SCR des empilements est évaluée à travers le scénario « forage de reconnaissance géotechnique avant implantation d'une résidence », supposé avoir lieu à partir de 500 ans après fermeture du stockage.

L'impact est lié principalement à l'américium 241, au plutonium (239 et 240) (inhalation de poussières) et au niobium 94. A plus long terme, l'impact est dû à l'exposition externe (^{94}Nb). Les résultats des calculs préliminaires montrent des impacts de l'ordre de quelques millisieverts par an.

4.5.3 Dispositions relatives à la phase de très long terme

Comme pour les déchets radifères, les dispositions relatives à cette phase sont approchées par l'évaluation du scénario « résidence sur stockage sans couverture ». Les résultats des calculs montrent que l'activité massique en niobium 94 détermine le niveau d'impact. A titre indicatif, l'impact du stockage dans un alvéole de colis d'empilements en graphite est de l'ordre de quelques millisieverts par an.

4.6 Conclusions et perspectives

Différents scénarios de gestion à long terme des déchets de graphite ont été établis, consistant en :

- un stockage en l'état : sur un site dédié à faible profondeur en couverture intacte (SCI) ;
- un tri des déchets : stockage des empilements en SCR et des chemises et autres déchets de graphite dans Cigéo ;
- une décontamination : extraction de certains radionucléides puis stockage du graphite partiellement décontaminé avec les déchets radifères à faible profondeur en couverture remaniée (SCR) et des résidus concentrés dans Cigéo ;
- une gazéification : destruction intégrale du graphite (décontamination suivie d'une gazéification) puis d'un stockage des résidus concentrés dans Cigéo.

A ce stade, le stockage d'une partie des déchets de graphite en SCR a été évalué du point de vue de la performance du stockage vis-à-vis du transfert par l'eau du chlore 36 et du carbone 14 et vis-à-vis des scénarios d'intrusion. Une analyse de sûreté, sur la base d'une situation de référence et de situations altérées correspondant à la défaillance d'une ou plusieurs fonctions de sûreté sera menée sur la base des données de site et de conception envisagée du stockage. Elle pourra conduire, dans une démarche itérative, à modifier certaines options de conception ou à reconsidérer l'acceptabilité d'une partie des déchets de graphite en SCR au regard des données de sites et d'inventaire.

- Pour le scénario « tri », le stockage des empilements en SCR dépend notamment des activités radiologiques en chlore 36 et carbone 14 (organique et inorganique), du caractère labile du chlore 36 et du carbone 14 organique, du contenu radiologique en américium 241, en plutonium 239 et 241 et en niobium 94 ainsi que des conditions de site. Le stockage des chemises et autres déchets de graphite dans Cigéo sera étudié d'ici 2015. Cela recouvre la définition d'un conditionnement compatible avec le projet Cigéo, l'ordonnancement de leur livraison en lien avec les contraintes d'entreposage ainsi que leur prise en compte dans l'évaluation de sûreté de Cigéo.
- Pour le scénario « décontamination », le stockage en SCR du graphite partiellement décontaminé dépendra également des caractéristiques du site, des activités radiologiques résiduelles en particulier en chlore 36 et carbone 14 (organique et inorganique) et de leurs cinétiques de relâchement (taux de relâchement des radionucléides restant dans le graphite traité). Ces deux derniers éléments sont liés aux performances accessibles des procédés de traitement.

Le programme de R&D sur le traitement des déchets de graphite évaluera les performances de décontamination possibles, notamment pour le chlore 36 et le carbone 14, voire les autres radionucléides contributeurs principaux à l'impact du stockage SCR vis-à-vis des différentes voies de transfert (particulièrement ^{10}Be , ^{94}Nb , ^{241}Am , ^{239}Pu , et ^{240}Pu). Un traitement poussé ouvre notamment la perspective de limiter la cinétique de relâchement des radionucléides présents dans le graphite décontaminé.

Le stockage dans Cigéo des résidus concentrés issus du traitement sera étudié de façon similaire au cas des chemises dans le scénario précédent. L'étude requiert une description des résidus conditionnés et de leur comportement.

- Le scénario « gazéification » avec stockage des résidus concentrés dans Cigéo présenterait l'avantage de réduire de l'ordre de 80 % le volume total à stocker, préservant ainsi la ressource rare que constituent les stockages.

La gestion des effluents et rejets sur le site de l'installation de traitement est à examiner.

Le programme de R&D sur le traitement des déchets de graphite explorera la faisabilité de procédés permettant la destruction totale du graphite décontaminé.

Pour proposer des scénarios de gestion consolidés, la poursuite du travail comprend les actions suivantes :

- EDF et le CEA poursuivront leurs actions d'ici 2014 pour consolider la connaissance du contenu radiologique et du terme source de leurs différents types de déchets de graphite.
- EDF, le CEA et l'Andra ont lancé un programme de R&D pour évaluer les possibilités de mise en œuvre industrielle de procédés de décontamination et de gazéification du graphite. Ce programme, déployé de 2012 à 2014, étudie différentes voies de traitement et de modes de conditionnement des résidus concentrés. Le programme permettra de disposer à fin 2014 des performances accessibles par les voies de traitement.
- L'Andra poursuivra d'ici 2015 les analyses relatives à l'acceptabilité des déchets issus des scénarios considérés dans les différents types de stockage sur la base notamment des résultats d'investigations géologiques de site(s) SCR. Elle poursuivra aussi les actions de R&D relatives à l'acquisition de données pour évaluer les paramètres géochimiques pilotant les performances des stockages. Au final le stockage des empilements en SCR ou du graphite décontaminé ne pourra être validé qu'une fois l'inventaire total à gérer en SCR défini, le site caractérisé et les éléments de conception du stockage finalisés.
- L'évaluation technico-économique des scénarios sera poursuivie sur la base de la définition des installations de traitement et de conditionnement, du futur coût de référence de Cigéo et des estimations économiques des autres filières de stockage.
- EDF, le CEA et l'Andra poursuivront les analyses de risques techniques et réglementaires en lien avec la définition des installations de traitement et de stockage SCR.

Le besoin futur éventuel en capacité d'entreposage des déchets de graphite déjà produits et de ceux à produire par les opérations de démantèlement sera évalué sur la base des solutions de gestion à long terme retenues en 2015, de leur calendrier de mise en œuvre, du calendrier de démantèlement des réacteurs UNGG et des contraintes de sûreté sur les installations d'entreposage existantes.

L'ensemble de ces éléments permettra de définir la filière de gestion des différents déchets de graphite d'ici 2015.

5. Gestion à long terme des autres déchets FAVL

5.1 Introduction

D'autres déchets sont susceptibles de relever de la catégorie FAVL, tels que les fûts d'enrobés bitumineux les moins actifs de Marcoule, des sources scellées usagées et des objets contenant du radium, de l'uranium et du thorium de faible activité massique, des déchets à radioactivité naturelle renforcée (RNR) et les résidus du traitement de l'uranium naturel produits par l'établissement de Malvési de la société Comurhex (Areva).

Dans le cadre de la réflexion sur l'optimisation de la répartition des flux de déchets radioactifs entre les filières de gestion existantes et en projet (cf. section 2.1), les producteurs ont demandé notamment d'étudier la faisabilité de stockage en SCR d'une partie des déchets technologiques de la Hague (colis du type CBF-C'2). Cette réflexion initiée en 2010 sera poursuivie dans le cadre du PNGMDR 2013-2015 et pourra amener à identifier d'autres déchets dont l'intégration éventuelle dans l'inventaire d'un stockage SCR pourra être étudiée.

5.2 Fûts d'enrobés bitumineux

Les fûts d'enrobés bitumineux (FAVL et MAVL) sont entreposés dans les casemates de la station de traitement des effluents liquides de Marcoule, construites entre 1966 et 1994. La totalité des casemates doit être progressivement reprise par le CEA à la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire Défense. Dans ce cadre, une partie de ces fûts est déjà extraite et reconditionnée pour un entreposage intermédiaire polyvalent (EIP). La reprise de l'ensemble des 60 000 fûts est prévue par le CEA d'ici fin 2035.

A la demande du CEA, l'Andra a mené en 2009 une étude d'acceptabilité au plan de la sûreté des enrobés bitumineux les moins actifs de Marcoule en SCR. Les fûts d'enrobés anciens considérés dans l'étude sont ceux qui satisfont simultanément les deux critères : (i) une activité alpha par fût inférieure à 10,72 GBq à 300 ans et (ii) un débit de dose au contact du fût inférieur à 60 mGy/h. Sur ces bases, le CEA a évalué le nombre de fûts concernés à 40 000.

Du point de vue de la sûreté, les résultats obtenus montrent que l'acceptabilité en SCR des fûts d'enrobés bitumineux dépend notamment :

- des activités radiologiques, notamment en radionucléides mobiles (^{129}I , ^{36}Cl) ;
- des caractéristiques du site ;
- de l'inventaire radiologique total qui sera considéré in fine dans ce stockage.

Des scénarios de tri, conditionnement et entreposage des bitumes sont étudiés par le CEA en lien avec l'Andra. Le CEA estime que certains fûts d'enrobés bitumineux relèvent de la catégorie FAVL de par leur inventaire radiologique établi au travers de l'historique des combustibles traités à l'origine. Les opérations de reprise et de tri opérées par le CEA lui permettent de conforter les inventaires radiologiques au travers de caractérisations non destructives (mesures nucléaires) et pour partie destructives. Le CEA réévaluera les activités radiologiques contenues. Sur cette base, l'Andra et le CEA ont défini plusieurs scénarios de gestion à étudier :

- stockage en SCR ;
- caractérisation / tri avec stockage des bitumes les moins actifs en SCR et des autres bitumes dans Cigéo ;
- traitement avec stockage des résidus concentrés dans Cigéo ;
- stockage en SCI avec les déchets de graphite (si cette solution était retenue pour les déchets de graphite, cf. section 4.4) ;
- stockage dans Cigéo.

Ces scénarios sont associés par le CEA à différentes modalités d'entreposage à l'étude.

Ces scénarios seront évalués par l'Andra et le CEA sous les angles de la sûreté, de la technico-économie et des risques techniques et réglementaires.

Le CEA fournira d'ici fin 2013 son point de vue technique et économique concernant l'option du traitement de ces bitumes.

L'Andra poursuivra les études d'évaluation de sûreté du stockage en SCR des déchets bitumés en fonction des données de site et des nouvelles données d'inventaire.

A titre conservatoire, l'évaluation de sûreté du projet Cigéo présentée dans le cadre de sa demande d'autorisation de création couvrira également ces enrobés bitumineux faiblement actifs. Un volume de colis de stockage de 39 000 m³ est pris en compte dans les réserves associées à l'inventaire du projet.

Les capacités futures d'entreposage nécessaires seront précisées en tenant compte des résultats d'étude des différents scénarios de gestion envisagés pour ces déchets.

L'ensemble de ces éléments permettra d'élaborer une filière de gestion de ces déchets. Le choix d'un scénario optimal pour gérer ces déchets pourra être décidé en 2015 en lien avec les résultats des investigations géologiques sur un site SCR.

5.3 Sources scellées usagées

Les études menées par l'Andra en 2008 [9] et [10] ont permis d'identifier des filières de stockage pour les différents types de sources scellées usagées et les objets contenant du radium, de l'uranium et du thorium de faible activité massique. Environ 80 % en nombre des sources répertoriées seraient destinées au stockage à faible profondeur de type SCR, en particulier les détecteurs de fumée à l'américium, les parasurtenseurs au tritium ou radium.

Une fois conditionnés, l'ensemble des sources et objets constitueraient un volume de stockage limité (de quelque centaines de mètres cubes à quelques milliers de mètres cubes).

5.4 Déchets à radioactivité naturelle renforcée

Les déchets à radioactivité naturelle (RNR) font l'objet d'études et recherches pour compléter et renforcer leurs modes de gestion à long terme. En particulier, l'Andra étudie conformément au PNGMDR 2010-2012 dans le cadre de ses projets d'entreposage de déchets, la mise à disposition de solutions d'entreposage pour les industriels produisant ponctuellement des déchets à radioactivité naturelle renforcée destinés à être stockés dans le futur centre de stockage de déchets FAVL.

5.4.1 Définition et inventaire

Les déchets RNR sont des déchets générés par la transformation de matières premières naturellement riches en radioéléments mais qui ne sont pas utilisées pour leurs propriétés radioactives. Ces déchets sont d'origines très diverses et présentent des volumes significatifs. Ce sont des déchets à vie longue avec des activités radiologiques variables. L'Andra a mené une étude bibliographique pour identifier leurs modes de gestion à long terme.

Un inventaire des déchets RNR a été établi en s'appuyant sur les déclarations faites par les producteurs en vue de l'établissement de l'Inventaire national. Ces informations ont été complétées par les données collectées par l'association Robin des Bois [11] et les publications de l'ASN [12] et [13].

Des déchets RNR sont produits lors de l'extraction à partir de minéraux d'éléments valorisables (tels que l'oxyde de titane, l'alumine, l'acide phosphorique, le zirconium, les terres rares). Il s'agit de boues rouges, de phosphogypses et une partie des déchets radifères (déchets de Rhodia et de Cezus).

Les boues rouges sont produites notamment par l'extraction de l'alumine à partir de la bauxite et par le traitement des eaux chargée en uranium, radium et en polluants chimiques (dans le cas d'une co-extraction du manganèse et du fer).

Dans le domaine de l'énergie, la production de chaleur et d'électricité par la combustion de la biomasse et du charbon peut concentrer la radioactivité dans les cendres. L'extraction du gaz et du pétrole produit des tartres et des boues radioactifs.

Un autre processus pouvant conduire à la concentration de la radioactivité naturelle est l'incorporation d'un élément radioactif dans un produit. Il s'agit par exemple d'uranium ou de thorium dans des alliages principalement utilisés dans l'aéronautique, de zircon dans des céramiques, ou de sable de zircon utilisé en fonderie. Le zircon est un minéral naturellement riche en radionucléides.

Par ailleurs, la radioactivité peut également se concentrer sur des machines ou dans des tuyaux au cours de processus industriels.

La Figure 21 présente la répartition de l'inventaire des déchets RNR par secteur d'activité. Elle montre que les plus grands volumes (plusieurs dizaines de millions de mètres cubes) concernent les cendres de charbon, les phosphogypses et les boues rouges. Ces dernières présentent aussi la plus grande activité radiologique.

Les déchets RNR concentrent les radioéléments des chaînes de désintégration de l'uranium 238 et du thorium 232 (celle de l'uranium 235 est très peu présente) ainsi que le potassium 40. On trouve aussi dans certains déchets de l'industrie de la papeterie et de la biomasse du césium 137.

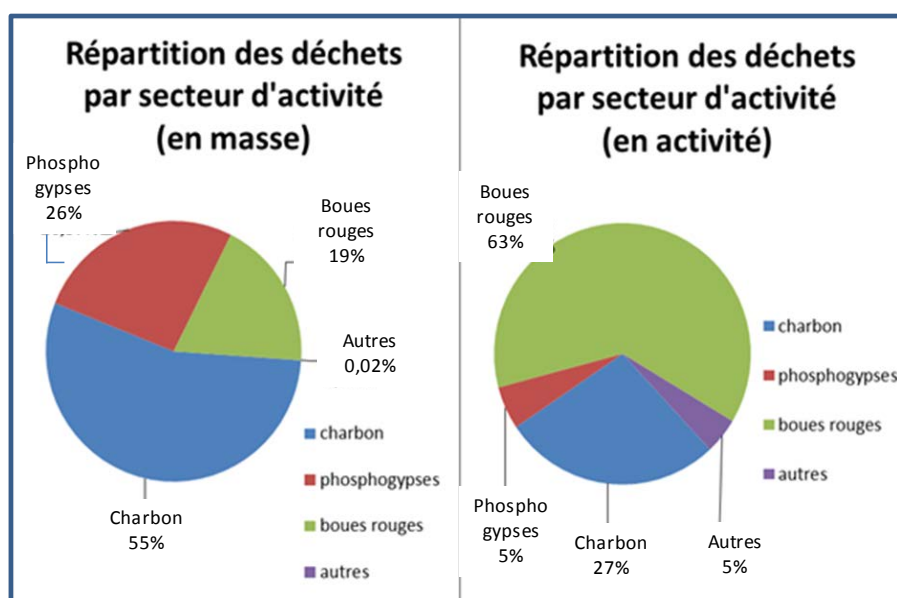


Figure 21 : Répartition des déchets RNR par secteur d'activité en France

5.4.2 Gestion à long terme des déchets RNR

Selon leurs caractéristiques, plusieurs méthodes de gestion des RNR sont pratiquées en France : la valorisation, le stockage *in situ*, conventionnel ou de déchets radioactifs.

5.4.2.1 Valorisation

Pour les cendres de charbon et celles issues de la combustion de la biomasse, une valorisation est possible (et souvent effectuée). Les plus grands volumes sont revendus aux cimenteries pour la fabrication de ciment, béton ou parpaings, et également pour de grands travaux d'infrastructures.

Les phosphogypses peuvent également être utilisés dans du béton et dans certains cas comme ballast sous des voies ferrées ou comme constituant de laine de roche.

Des utilisations des boues rouges sont en cours d'étude (matériau de couverture d'alvéole pour réhabiliter des centres de stockage conventionnels, coulis de remplissage dans des mines, utilisation dans des récifs artificiels).

5.4.2.2 Stockage *in situ*

Dans certaines activités industrielles, les déchets sont produits en très grandes quantités et sont entreposés sur site de production, en terrils ou lagunes. Il s'agit par exemple des terrils de cendres de charbon, de phosphogypses et de boues rouges. La plupart de ces sites sont classés pour la protection de l'environnement et surveillés. Ils sont parfois réhabilités et réutilisés.

Environ 40 millions de tonnes de déchets RNR (hors cendres de charbon) font l'objet de stockages historiques.

5.4.2.3 Gestion dans des centres de stockage de déchets conventionnels

La circulaire ministérielle [14] relative aux installations classées stipule les conditions d'acceptation de déchets à radioactivité naturelle renforcée ou concentrée dans les centres de stockage de déchets. Cette acceptation requiert notamment que l'impact radiologique associé à leur stockage ne dépasse pas 1 mSv / an en valeur ajoutée au rayonnement naturel. La méthodologie de l'évaluation de cet impact a été définie par l'IRSN.

5.4.2.4 Gestion dans les centres de stockage de déchets radioactifs

Lorsqu'ils présentent une activité très faible, les déchets RNR peuvent être pris en charge en stockage au Cires.

Le Centre de stockage de l'Aube ne peut pas recevoir des RNR à cause notamment de leur exhalaison du radon (cf. 2.3).

Pour les déchets RNR qui ont des activités plus importantes, un stockage en SCR peut constituer une solution de gestion à long terme. Cela est notamment le cas pour les déchets RNR qui font partie de l'inventaire des déchets radifères (cf. section 3.1). De même que pour les boues et les tartres produits lors de l'extraction de gaz du fait qu'ils présentent des activités radiologiques du même ordre de grandeur que dans les déchets radifères.

A fin 2010, environ 7 800 m³ de déchets RNR produits sont considérés dans l'Inventaire national comme relevant de la catégorie TFA (dont 400 m³ sont déjà stockés au Cires) et 17 000 m³ de la catégorie FAVL (incluant les 15 000 m³ de déchets RNR faisant partie de l'inventaire des déchets radifères décrits au chapitre 3).

5.4.3 **Perspectives**

La gestion globale des déchets RNR, de la production jusqu'à leur gestion à long terme, nécessite de poursuivre le travail sur l'inventaire et la connaissance de ces déchets. Il sera aussi nécessaire de préciser le rythme de production de ces déchets pour suivre l'évolution des quantités produites et ainsi planifier les capacités d'entreposage nécessaires à leur gestion ainsi que les installations de stockage futures ou le développement de procédés de recyclage et valorisation.

5.5 Résidus de traitement de conversion de l'uranium

Il s'agit essentiellement de résidus du traitement de conversion en tétrafluorure (UF₄) des concentrés d'uranium naturel provenant des mines, produits depuis 1964 par l'établissement de Malvési de la société Comurhex (Areva), situé sur la commune de Narbonne (Aude). Les résidus du procédé sont entreposés dans des bassins pour décantation des rejets solides (boues), puis évaporation des effluents liquides.

Les bassins B1 et B2 contenant les boues de décantation, des résidus miniers et des matériaux de couverture sont soumis au contrôle de l'ASN depuis 2009. Un dossier de demande d'autorisation de création d'une INB pour ces bassins a été déposé en décembre 2010. Ces bassins présentent une activité massique moyenne en uranium 238 d'environ 30 Bq/g et en thorium 230 pouvant aller jusqu'à 200 Bq/g.

Les boues entreposées dans les bassins B3, B5 et B6 présentent des activités massiques moyennes en uranium 238 d'environ 30 Bq/g et en thorium 230 d'environ 36 Bq/g.

Dans le cadre du PNGMDR 2010-2012, Areva a réalisé une étude sur les possibilités de stockage *in situ* de ces déchets et des terres et stériles miniers contaminés présents sur le site [15]. Areva a également présenté les prévisions de production de déchets à venir dans le cadre du projet Comurhex II, qui font apparaître un flux annuel d'environ 3 500 m³ de résidus de traitement filtrés, soit un volume à produire de l'ordre de 88 000 m³ à échéance 2030, pour lesquels Areva a étudié les possibilités de stockage sur site avec les déchets historiques déjà présents.

Pour l'entreposage de ces futurs déchets, Comurhex prévoit, à court terme, l'aménagement d'alvéoles d'entreposage dans les bassins de décantation B5 et B6 lorsque les déchets historiques s'y trouvant auront été repris.

Dans son avis du 4 octobre 2012 [16], l'ASN a indiqué qu'il convenait que Comurhex distingue la gestion des déchets historiques de celle des déchets à produire. Comurhex poursuivra la caractérisation des déchets historiques ainsi que les études de faisabilité de leur stockage *in situ*. Pour les déchets à produire, Comurhex étudiera en lien avec l'Andra les conditions de gestion de ces déchets et leur impact sur l'ensemble de la filière FAVL. L'Andra et Comurhex présenteront fin 2013 un rapport d'étape où figureront les orientations envisagées et les filières optimisées proposées pour ces déchets.

6. Orientations du projet

6.1 Déchets radifères

La majorité des déchets radifères est déjà produite et est actuellement entreposée dans l'attente d'une solution de stockage :

- les déchets générés par les opérations d'assainissement des sites historiques pollués au radium et les objets au radium collectés chez les particuliers doivent être entreposés ;
- les bâtiments d'entreposage de l'Andra et de Cezus seront saturés d'ici une dizaine d'années. Lors de l'enquête publique sur le bâtiment d'entreposage du Cires (Morvilliers), les élus ont demandé à avoir une visibilité sur le projet de stockage des déchets qui y seront entreposés.

Les études confirment la possibilité de prendre en charge les déchets radifères dans un stockage de type SCR, dans une couche géologique à dominante argileuse affleurante ou sub-affleurante présentant une épaisseur suffisante. La caractérisation de site constitue un préalable avant le passage du projet de stockage à une phase de conception industrielle. Le calendrier correspondant impactera le besoin en capacité d'entreposage supplémentaire ainsi que le calendrier des opérations d'assainissement des sites pollués.

6.2 Déchets de graphite

Concernant les déchets de graphite, 20 % des déchets en masse sont entreposés en attente d'une solution de stockage. Pour les autres déchets qui seront produits lors du démantèlement des réacteurs UNGG, le respect du calendrier de ce démantèlement suppose de disposer d'une solution de stockage pour la gestion du graphite à l'horizon 2022. Selon le calendrier de sa mise en œuvre, cette solution peut nécessiter ou non une phase d'entreposage préalable.

L'étude de scénarios de gestion à long terme des déchets de graphite exposée au chapitre 4 ouvre des perspectives sur plusieurs solutions de stockage :

- Statuer sur la prise en charge des empilements ou du graphite partiellement décontaminé le cas échéant dans le stockage SCR nécessite de disposer des caractéristiques du site et d'éléments complémentaires sur l'inventaire radiologique de ces déchets. Cela renforce la nécessité de réaliser les investigations géologiques de site(s) SCR pour disposer de résultats en 2014. Si le scénario retenu comporte le stockage d'une partie des déchets de graphite en SCR, la disponibilité au plus tôt de ce stockage favoriserait le calendrier du démantèlement et réduirait les besoins en entreposage.
- Pour le stockage des chemises et des résines échangeuses d'ions ou des résidus concentrés de traitement du graphite le cas échéant, l'Andra intégrera par précaution ces déchets dans le périmètre de la demande d'autorisation de création de Cigéo, au titre de réserves. Leur mise en stockage sera ordonnancée dans une logique d'optimisation avec les capacités d'entreposage et le stockage des autres déchets destinés à Cigéo.
- Enfin l'alternative aux scénarios de gestion articulant SCR, Cigéo et des possibilités de tri ou de traitement consiste en un stockage de type SCI.

La caractérisation de site SCR est nécessaire au choix du scénario optimal de gestion des déchets de graphite.

6.3 Fûts d'enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux actuellement entreposés sur le site de Marcoule font l'objet d'opérations de reprise/conditionnement par le CEA. Des possibilités de tri et de compléments de caractérisation pourraient conduire à en stocker une partie en SCR. Par précaution, ces déchets sont également inscrits dans les réserves du projet Cigéo.

Déterminer leur scénario de gestion à long terme nécessite de disposer des résultats de caractérisation de site SCR.

6.4 Synergies possibles entre déchets TFA et FAVL

Les études menées dans le cadre du PNGMDR 2010-2012 montrent également la nécessité de prévoir de nouvelles capacités de stockage pour les déchets TFA. En effet selon les dernières données fournies par les producteurs de déchets, les volumes prévisionnels de déchets TFA qui seront produits à fin 2030 sont de l'ordre de 1 300 000 m³.

Le PNGMDR 2010-2012 a exploré plusieurs pistes pour réduire les besoins en stockage (recyclage dans la filière nucléaire, réduction des volumes de déchets...). Ces études montrent néanmoins la nécessité de prévoir des capacités supplémentaires de stockage.

Au rythme actuel de stockage au Cires, sa capacité autorisée (650 000 m³) sera atteinte à l'horizon 2025, voire avant si le flux annuel augmente. La prise en charge des déchets TFA devrait donc nécessiter la mise en place d'une nouvelle installation de stockage ou l'extension de la capacité autorisée du centre actuel à l'horizon 2025.

Les concepts de stockage SCR et des déchets TFA sont communément fondés sur une implantation dans une couche géologique à dominante argileuse affleurante ou sub-affleurante. Ils peuvent donc être mis en œuvre sur un même site.

6.5 Propositions techniques

Les besoins en stockage précités conduisent l'Andra à proposer un programme visant à créer un centre permettant le stockage de déchets TFA et radifères. L'adjonction d'une partie des déchets de graphite et d'autres déchets FAVL sera également analysée. Les délais techniques et réglementaires nécessaires à la mise en service d'un tel centre sont estimés de l'ordre d'une dizaine d'années, une fois le site choisi.

L'ensemble de ces éléments suggère de lancer en 2013 des investigations géologiques pour l'implantation d'un centre comprenant une zone de stockage à faible profondeur (SCR) pour des déchets FAVL et une zone de stockage en surface pour des déchets TFA. Sur la base des résultats de ces investigations, de la poursuite de la caractérisation des déchets et des actions de R&D sur le traitement des déchets, l'Andra propose de remettre à l'Etat en 2015 un rapport comprenant :

- les propositions de choix de scénarios de gestion pour les déchets de graphite et les déchets bitumés avec notamment l'opportunité ou non de relancer la recherche d'un site de stockage SCI ;
- un schéma industriel pour la gestion des déchets TFA et radifères ;
- un dossier de faisabilité du projet de stockages sur le(s) site(s) investigué(s), le périmètre des déchets à y stocker et le calendrier de sa mise en œuvre.

La mise à disposition de ces éléments à l'horizon 2015 permettra à l'Etat d'établir des jalons décisionnels pour la mise en place des solutions de gestion à long terme des déchets FAVL.

Un calendrier des principales actions à mener d'ici 2015 est présenté à la Figure 22.

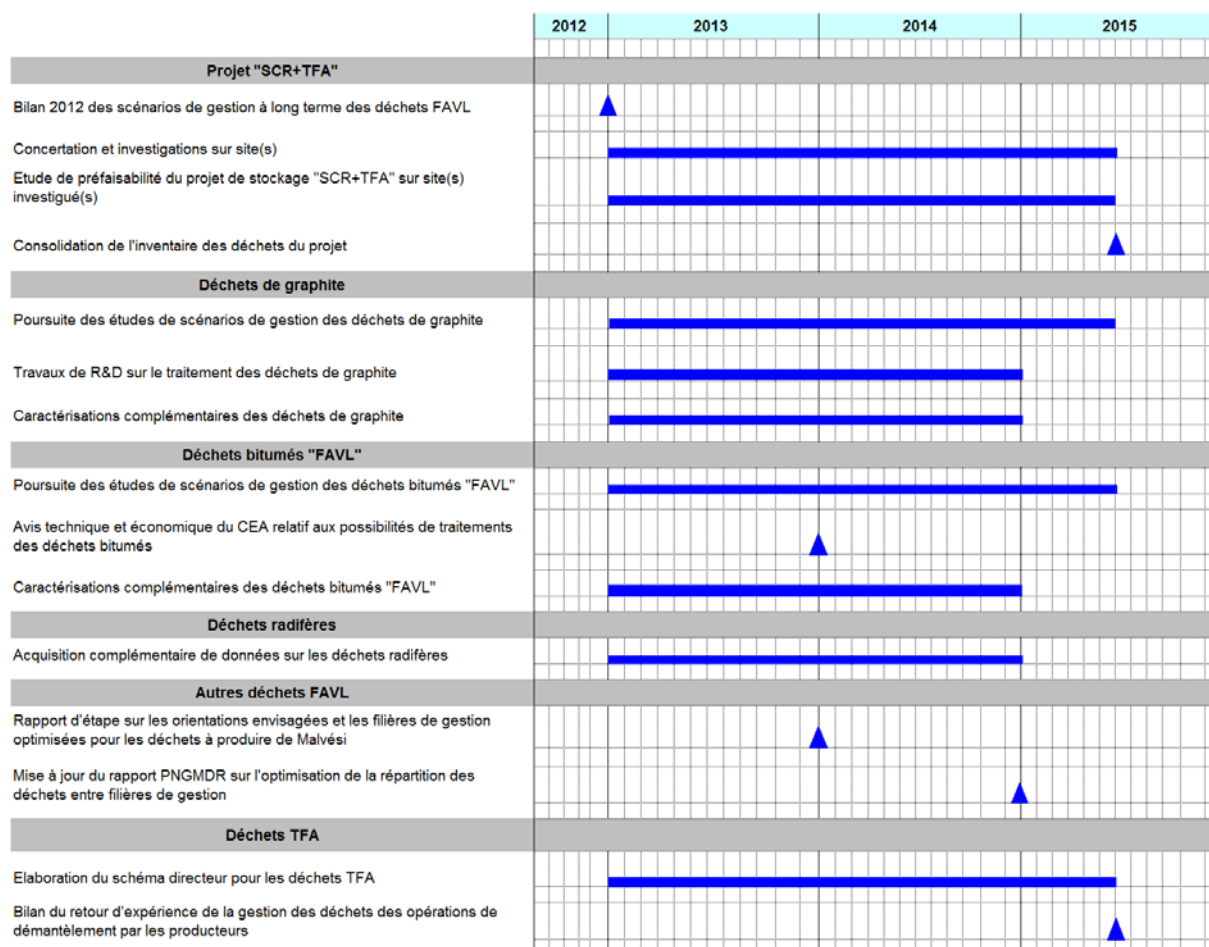


Figure 22 : Calendrier des actions à mener d'ici 2015

7. Références

- [1] GT FAVL – Rapport et recommandations – HCTISN, 7 octobre 2011
- [2] Rapport du groupe de travail « Optimisation des filières » (Andra, Areva, CEA, EDF, Rhodia) transmis le 13/01/2012 – Réf. Z RP ADMR 12-0001/A
- [3] Arrêté préfectoral n°03-2176A du 26 juin 2003 modifié par les arrêtés n°06-3056 du 21 juillet 2006, n°10-0785 du 26 mars 2010 et n°2012-040-0002 du 09 février 2012 réglementant les activités de l'Andra sur le site implanté sur le territoire des communes de Morvilliers et La Chaise
- [4] Prescriptions techniques du Centre de stockage de l'Aube - INB 149
- [5] Orientations générales de sûreté en vue d'une recherche de site pour le stockage des déchets de faible activité massique à vie longue (FAVL) – Autorité de sûreté nucléaire 2008
- [6] Rapport d'étape préalable à la recherche de site – Andra 2008 réf. F NT APRG 07.0040
- [7] Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (ASN - Indice 0 - Version du 12/02/2008) (ex-RFS III.2.f)
- [8] Experimental study of C-14 and H-3 release from irradiated graphite spigot samples in alkaline solutions - BJ. Handy - AMEC NNC, 11996/TR/001 - Issue 01 - Mars 2006
- [9] Etude de la gestion durable des sources scellées usagées - Andra 2008 - réf. Z.RP.APRG.08.0041
- [10] Etude de la possibilité de stocker d'autres types de déchets de faible activité à vie longue avec les déchets de graphite et radifères - Andra 2008 - réf. Z.RP.APRG.08.0048
- [11] Rapport Robin des bois, « radioactivité naturelle technologiquement renforcée », décembre 2005
- [12] Bilan sur la gestion des déchets contenant de la radioactivité naturelle renforcée - ASN, 20 juillet 2009
- [13] Évaluation des expositions aux rayonnements ionisants dans les industries et activités professionnelles mettant en oeuvre des matières premières contenant naturellement des radionucléides non utilisés en raison de leurs propriétés radioactives : bilan de l'application de l'arrêté du 25 mai 2005 relatif à ces activités – ASN, décembre 2009
- [14] BPSPR/2006-217/HA du 25/07/2006 – Installations classées – Acceptation de déchets à radioactivité naturelle renforcée ou concentrée dans les centres de stockage de déchets
- [15] Gestion à long terme des déchets issus des bassins du site COMURHEX de Malvési - Rapport d'étude PNGMDR - Areva, décembre 2011 – Réf. CXM-11-010845
- [16] Avis n°2012-AV-0166 du 4 octobre 2012 sur la gestion des situations temporaires ou historiques