

PNGMDR 2013-2015
**PROJET DE STOCKAGE DE DÉCHETS
RADIOACTIFS DE FAIBLE ACTIVITÉ
MASSIQUE À VIE LONGUE (FA-VL)**
RAPPORT D'ÉTAPE 2015

Identification
FRPADPG150010

Juillet 2015

Page : 1/66

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

Objet du document

Le Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs a prescrit un programme d'études et de recherches en vue de mettre en place une filière de stockage adaptée pour les déchets de faible activité à vie longue.

L'Andra a remis en 2012 un rapport sur les scénarios de gestion à long terme des déchets FA-VL [1]. Ce rapport concluait à la nécessité de lancer des investigations géologiques et de poursuivre les travaux de caractérisation et de R&D sur les déchets pour avancer dans la conception d'un projet de stockage à faible profondeur.

Le présent rapport est établi conformément à l'article 16-I du décret n°2013-1304 du 27 décembre 2013 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) :

« Les solutions de stockage mentionnées au 1° de l'article 4 de la loi 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 d'expérimentation ;

2° Les déchets radifères dont l'activité massique 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 substances contenant du radium, de l'uranium et du thorium de faible activité massique ainsi que certaines sources radioactives scellées usagées à vie longue de faible activité.

Sur la base des investigations géologiques qui pourront être réalisées sur la période 2013-2015, de la poursuite de la caractérisation des déchets des actions de recherche spécifiques sur le traitement des déchets et d'une analyse de sûreté, l'ANDRA remet aux ministres chargés de l'énergie et de la sûreté nucléaire, pour le 30 juin 2015, un rapport comprenant :

1° L'analyse de faisabilité des 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 sous couverture intacte ;

2° Un dossier de faisabilité du projet de stockage sous couverture remaniée, le périmètre des déchets à y stocker et le calendrier de sa mise en œuvre.

L'ASN et l'ASND sont saisies pour avis sur ce rapport. »

Le présent document constitue un rapport d'étape. Il permet de tirer les enseignements des investigations géologiques réalisées sur la période 2013-2015 ainsi que des avancées des études et recherches menées sur les déchets par l'Andra et les producteurs (EDF, CEA, Areva, Solvay). Des études de conception préliminaires du stockage ont été menées et ont fait l'objet d'une première évaluation de sûreté. En parallèle, l'analyse des différents scénarios de gestion des déchets de graphite et bitumés FA-VL a été poursuivie dans le cadre du groupe de travail PNGMDR sur l'optimisation des filières [2]. Sur cette base, le rapport identifie les sujets à approfondir dans la suite du programme d'études et recherches.

Une synthèse du rapport d'étape est présentée ci-après.

Projet FA-VL – Synthèse du rapport d'étape 2015

Un projet nécessaire pour compléter les filières de gestion des déchets radioactifs

De nombreuses activités utilisent les propriétés de la radioactivité et produisent des déchets radioactifs qui nécessitent une prise en charge particulière afin de protéger l'homme et l'environnement du risque qu'ils représentent. Les filières de gestion des déchets radioactifs existantes ou en projet sont adaptées à la dangerosité de chaque catégorie de déchets.

90 % du volume des déchets produits chaque année disposent d'une solution de stockage opérationnelle dans les centres de stockage en surface exploités par l'Andra. Les déchets de très faible activité et les déchets de faible et moyenne activité à vie courte sont respectivement pris en charge par le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) et par le Centre de stockage de l'Aube (CSA).

Les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) représentent environ 6 % en volume du stock de déchets existants (cf. Figure 1). Ces déchets, essentiellement historiques, sont actuellement entreposés dans l'attente d'une solution de stockage :

- les déchets radifères proviennent essentiellement de l'exploitation de minerais pour l'extraction de terres rares, de zirconium ou d'uranium ainsi que de l'assainissement d'anciens sites industriels ayant utilisé du radium ou du thorium dans les années 1900 à 1960. Ces déchets sont entreposés sur les sites de La Rochelle (Solvay), Cadarache (CEA), Jarrige (Areva), Itteville (CEA), Morvilliers (Andra).
- Les déchets de graphite proviennent de la première génération de réacteurs d'EDF et du CEA (Bugey, Saint-Laurent, Chinon, Marcoule), aujourd'hui arrêtés et pour lesquels les opérations de démantèlement sont en cours. Une partie de ces déchets, issue de l'exploitation passée de ces réacteurs, est entreposée dans des silos sur les sites de la Hague, Marcoule et Saint-Laurent. L'autre partie sera produite lors du démantèlement des blocs réacteurs.
- D'autres déchets sont également étudiés, tels que certains déchets bitumés de faible activité du CEA Marcoule, certains déchets technologiques de l'usine de La Hague (CBF-C'2), des sources scellées usagées, des objets contenant du radium collectés notamment chez des particuliers, des déchets à radioactivité naturelle renforcée.

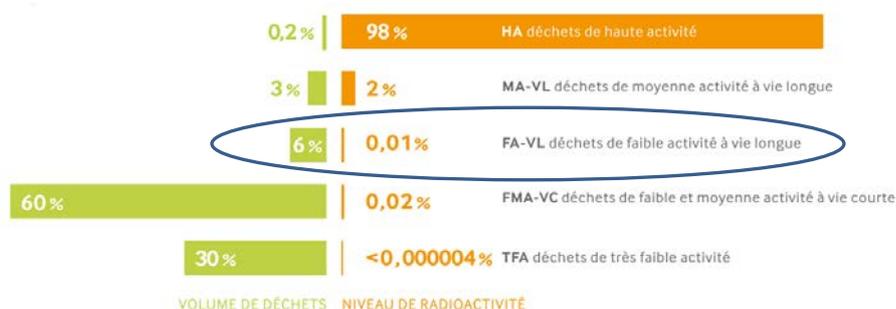


Figure 1 Répartition des volumes et des niveaux de radioactivité des stocks de déchets à fin 2013 [3]

Le projet de stockage à faible profondeur étudié par l'Andra vise à mettre en place une solution de gestion adaptée aux déchets FA-VL. En effet, ces déchets ne sont pas acceptés dans les stockages exploités en surface compte tenu de leur activité en radionucléides à vie longue. A l'inverse, leur faible activité massive ne justifie pas un stockage à 500 m de profondeur avec les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (projet Cigéo).

Le projet de création d'un nouveau centre de stockage serait également l'opportunité de créer une plateforme supplémentaire de stockage de déchets de très faible activité (TFA) pour répondre aux besoins futurs liés au démantèlement. Le stockage de déchets TFA dans la continuité du stockage des déchets FA-VL donne la perspective d'une activité industrielle du futur centre de stockage sur plusieurs dizaines d'années.

Les avancées du projet depuis 2012

- ***Un cadre géologique concret établi sur la base des investigations réalisées en 2013-2015***

La Communauté de Communes de Soulaines a donné son accord en 2013 pour la réalisation d'investigations géologiques sur son territoire, qui accueille les centres de stockage de surface exploités par l'Andra (CSA et Cires). Conformément à la demande des élus, une structure de concertation relative au développement du territoire a été mise en place par le préfet, composée des élus locaux, des producteurs de déchets, de l'Andra et des services de l'Etat concernés. L'avancement du projet est régulièrement présenté aux membres des commissions locales d'information existantes.

Les investigations géologiques ont été réalisées sur un secteur d'étude d'environ 50 km². Elles permettent de disposer d'un bon cadre de connaissances du milieu géologique à l'échelle de ce secteur.

Le milieu géologique se présente comme une succession de formations argileuses et de formations aquifères avec un faible pendage. Compte tenu de son épaisseur et de sa présence sur une partie importante du secteur d'étude, la formation des Argiles tégulines a été retenue pour mener les études. Cette formation argileuse s'est mise en place il y a environ 100 millions d'années dans un environnement marin et calme qui lui confère une lithologie et une composition minéralogique homogènes et peu contrastées. Elle s'inscrit dans le cadre général du Bassin parisien, qui est caractérisé par une activité sismique très faible. L'épaisseur de la formation varie entre 30 et 80 m sur la partie nord du secteur d'étude. Elle présente des capacités de confinement significatives (perméabilité, coefficient de diffusion, propriétés de rétention). La caractérisation des écoulements d'eau montre que le gradient hydraulique dans les Argiles tégulines est vertical, descendant et faible sur une grande partie du secteur d'étude en particulier au nord. Une première approche de l'évolution future du secteur d'étude a été effectuée en fonction de différents scénarios d'évolution climatique. Elle a permis d'évaluer l'aléa érosif à prendre en compte pour la conception du stockage (une dizaine de mètres à 50 000 ans dans le scénario le plus pénalisant).

- ***Une amélioration des connaissances sur les déchets***

En parallèle, les travaux de caractérisation menés par le CEA et EDF sur les déchets de graphite et bitumes conduisent à une réduction notable de l'inventaire radiologique en chlore 36 et en iode 129 par rapport aux hypothèses conservatives antérieures. Ces dernières avaient conduit à envisager initialement un stockage à une centaine de mètres de profondeur pour ces déchets (dénommé en 2008-2012 « stockage sous couverture intacte »). Les nouvelles données d'inventaire ouvrent aujourd'hui la possibilité d'étudier un stockage sur le site investigué, à une vingtaine de mètres de profondeur dans la couche d'argile étudiée (dénommé en 2008-2012 « stockage sous couverture remaniée »). Des travaux de R&D sont également menés pour évaluer le comportement des déchets en situation de stockage. Cela permet de mieux préciser la cinétique de relâchement des radionucléides contenus dans les déchets et les capacités de rétention des radionucléides dans l'argile et les matériaux cimentaires utilisés pour leur stockage.

EDF poursuit ses recherches sur des procédés de traitement du graphite. EDF a conclu que le traitement n'apparaît pas suffisamment performant et sélectif pour détruire le graphite par gazéification du fait des rejets atmosphériques en carbone 14 qui seraient générés. Le traitement d'extraction de certains radionucléides serait un moyen de favoriser l'acceptabilité du graphite partiellement décontaminé dans le stockage à faible profondeur si les caractéristiques de certains déchets n'étaient pas suffisantes pour les stocker en l'état. Ces procédés sont néanmoins complexes et susceptibles de générer des rejets.

Le CEA a analysé un scénario prospectif de traitement par incinération/vitrification des enrobés bitumineux¹ et a identifié des verrous technologiques majeurs. Le CEA a également comparé le scénario prospectif de traitement au scénario de stockage direct à l'aide de critères d'évaluation des meilleures techniques disponibles en matière environnementale, économique, de sécurité, de radioprotection et de sûreté. Le CEA estime que cette comparaison est en tout point défavorable au scénario prospectif de traitement. Par conséquent, le CEA en conclut qu'il est déraisonnable de

¹ Ces déchets ont déjà fait l'objet d'une opération de conditionnement.

promouvoir le traitement thermique de colis de déchets déjà conditionnés, en regard de l'option d'un stockage direct des colis de déchets enrobés bitumineux. Par ailleurs, les résultats positifs des essais réalisés dans le cadre du projet Cigéo ont montré l'absence de réaction exothermique des déchets bitumés MA-VL en situation d'incendie en plaçant ces déchets dans un conteneur de stockage en béton. Ces résultats sont transposables aux déchets bitumés FA-VL.

- **Des orientations pour la conception du stockage**

La conception du stockage est fondée sur les orientations générales de sûreté de l'ASN [4]. Des études préliminaires de conception ont été menées à partir des caractéristiques du site investigué et de l'inventaire des déchets étudiés. Une évaluation préliminaire de sûreté a été réalisée sur cette base et a permis d'identifier les enjeux pour la suite du programme d'études et de recherches.

Le concept de stockage étudié sur le site investigué consiste en une implantation des alvéoles de stockage des déchets FA-VL dans la formation des Argiles tégulines, à une vingtaine de mètres de profondeur, avec une garde inférieure d'argile de l'ordre de 30 mètres.

Les études d'ingénierie couvrent deux options de conception fondées sur des techniques de creusement éprouvées industriellement pour la réalisation d'ouvrages à faible profondeur. La première option consiste en un terrassement depuis la surface jusqu'au niveau de l'implantation du stockage. Les alvéoles de stockage sont refermées par une couverture reconstituée avec l'argile excavée. Dans la seconde option, les alvéoles de stockage sont excavées en souterrain. Lors des opérations de fermeture, les accès au stockage sont remblayés et scellés.

Pour les déchets radifères, les évaluations phénoménologiques et de sûreté confirment la possibilité de leur stockage à faible profondeur sur le site investigué. Dans la suite des études, une attention particulière sera portée sur l'influence de la chimie des déchets sur la rétention des radioéléments ainsi qu'aux modalités de gestion du radon.

Pour les déchets de graphite et les déchets bitumés FA-VL, les résultats ouvrent la perspective d'un stockage sur le site investigué. Les principaux enjeux pour les déchets de graphite sont d'une part de consolider l'inventaire et la cinétique de relâchement de la fraction organique de carbone 14, de préciser la nature des molécules organiques relâchées porteuses du carbone 14 et leur rétention éventuelle dans les matériaux cimentaires et argileux et d'autre part de consolider l'inventaire en chlore 36. Pour les déchets bitumés FA-VL, les enjeux portent sur la poursuite de l'amélioration des connaissances sur l'inventaire, en particulier en iode 129 et technétium 99, ainsi que sur l'effet de la chimie de ces déchets sur la cinétique de relâchement et sur les transferts dans les Argiles tégulines.

Pour les autres déchets FA-VL (CBF-C'2, sources scellées et objets contenant du radium, autres déchets à radioactivité naturelle renforcée), les études menées à ce stade ouvrent également la perspective d'un stockage sur le site investigué. Ces déchets feront l'objet d'études plus détaillées dans la suite.

Orientations pour la suite des études

Les évaluations réalisées conduisent à poursuivre le programme d'études et de recherches sur le site investigué et sur l'ensemble de l'inventaire des déchets FA-VL. A ce stade, l'Andra n'identifie pas d'intérêt à relancer la recherche d'un autre site de stockage.

Les études ont permis de définir une zone d'environ 10 km² au nord du secteur d'étude dont les caractéristiques géologiques apparaissent favorables à la poursuite de l'étude d'un stockage à faible profondeur (épaisseur moyenne de la couche d'Argiles tégulines d'environ 55 m avec un gradient hydraulique descendant et faible). Des investigations géologiques complémentaires sont à réaliser sur cette zone en 2016-2017 afin de préciser les connaissances sur le milieu géologique.

Les progrès réalisés dans la caractérisation des déchets graphite et bitumes FA-VL permettent de poursuivre l'étude de leur stockage sur la zone identifiée. Les enjeux pour la suite du projet portent sur la consolidation de leur inventaire radiologique et de leur comportement en situation de stockage.

Le programme s'attachera aussi à approfondir les études de conception, notamment la caractérisation du comportement de la couverture reconstituée avec des Argiles tégulines excavées dans le cas d'un stockage réalisé par terrassement depuis la surface. Les travaux de modélisation seront poursuivis, notamment la gestion des gaz dans les composants ouvragés du stockage et le milieu géologique.

La démarche de concertation avec les acteurs locaux sera poursuivie en vue de préciser les critères liés à l'insertion locale à prendre en compte dans les études de conception.

Sur cette base, l'Andra élaborera en 2018 un dossier de conception de niveau esquisse sur le site investigué. Ce dossier présentera notamment (i) les résultats des investigations géologiques détaillées, (ii) les connaissances complémentaires acquises sur les déchets, (iii) les résultats d'une analyse multicritères des deux options de conception en s'appuyant notamment sur les études à venir relatives aux performances de la couverture reconstituée, (iv) les architectures issues des études d'ingénierie et les possibilités d'implantation sur la zone de 10 km², (v) les modalités d'exploitation nucléaire et les dispositions de sûreté associées, (vi) les résultats d'une nouvelle itération de sûreté après fermeture intégrant les connaissances acquises et (vii) des premiers éléments relatifs aux critères d'acceptation des déchets dans un stockage à faible profondeur sur le site investigué.

Ce rendez-vous permettra de statuer sur le lancement des études d'un projet industriel en vue de préparer sa demande d'autorisation de création.

SOMMAIRE

1. Présentation des déchets étudiés	10
1.1 Les déchets radifères	11
1.1.1 Origine	11
1.1.2 Principales caractéristiques	13
1.2 Les déchets de graphite	14
1.2.1 Origine	14
1.2.2 Principales caractéristiques	15
1.2.3 Avancées du programme d'études et de recherches sur les déchets de graphite	15
1.3 Déchets bitumineux FA-VL de Marcoule	16
1.3.1 Origine	16
1.3.2 Principales caractéristiques	16
1.4 Autres déchets	17
2. Bilan des investigations géologiques réalisées sur la Communauté de Communes de Soulaines	19
2.1 Secteur d'étude et objectifs des investigations géologiques	20
2.2 Le cadre géologique général	22
2.3 La formation des Argiles téguilines	25
2.4 L'organisation des écoulements d'eau	27
2.5 L'évolution future du site	29
2.6 Les contraintes environnementales	33
3. Principes de sûreté pour la conception du stockage de déchets FA-VL	34
3.1 Orientations générales de sûreté	34
3.2 Fonctions de sûreté après fermeture	36
3.2.1 Isoler les déchets de l'homme et de la biosphère	37
3.2.2 Limiter la circulation de l'eau	37
3.2.3 Limiter le relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques et les immobiliser au plus près des déchets	37
3.2.4 Retarder et atténuer la migration des radionucléides et des toxiques chimiques par voie aqueuse	38
3.2.5 Limiter l'exhalaison de gaz radioactif à la surface	39
3.3 Fonctions de sûreté en exploitation	39
4. Options de conception à l'étude	40
4.1 Profondeur de stockage et techniques de creusement associées	40
4.2 Stockage avec terrassement depuis la surface	41
4.2.1 Hypothèses générales	41
4.2.2 Schéma de principe de la zone de stockage FA-VL	41
4.2.3 Dispositions envisagées pour la construction	42
4.2.4 Dispositions envisagées pour l'exploitation	44
4.2.5 Dispositions envisagées pour la fermeture	45
4.2.6 Points clés de conception	46
4.3 Stockage en galeries souterraines	47
4.3.1 Schéma de principe de la zone de stockage FA-VL	47
4.3.2 Dispositions envisagées pour la construction	47

4.3.3	Dispositions envisagées pour l'exploitation	49
4.3.4	Dispositions envisagées pour la fermeture	49
4.3.5	Points clés de conception	49
5.	Evaluation préliminaire de la sûreté du stockage	50
5.1	<i>Analyse de sûreté après fermeture</i>	51
5.1.1	Evaluation des performances de confinement des déchets après fermeture	52
5.1.2	Evaluation de situations d'intrusion humaine involontaire	60
5.2	<i>Analyse de sûreté en exploitation</i>	62
6.	Orientations pour la suite des études	62
7.	Références	66

1. Présentation des déchets étudiés

Synthèse

Les déchets classés dans la catégorie FA-VL dans l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs [3] et pris en compte dans l'étude du projet de stockage à faible profondeur sont les déchets radifères, les déchets de graphite, une partie des fûts d'enrobés bitumineux de Marcoule, une partie des déchets d'exploitation de la Hague, certaines sources scellées usagées et certains déchets à radioactivité naturelle renforcée.

Ces déchets sont principalement issus d'activités industrielles historiques. Ils représentent un volume de stockage de l'ordre de 180 000 m³. Les déchets déjà produits sont actuellement entreposés dans l'attente d'une solution de stockage. L'inventaire sera tenu à jour dans les phases suivantes du projet en lien avec les besoins exprimés par les producteurs de déchets et avec les réflexions sur l'optimisation des filières de gestion des déchets radioactifs².

Les déchets FA-VL se caractérisent par leur faible activité massique. L'activité radiologique totale est divisée par 100 à l'échelle de 50 000 ans grâce à la décroissance des radionucléides à vie courte et à la décroissance de radionucléides à vie longue tels que le carbone 14, le nickel 63, l'américium 241 et le radium 226.

Compte tenu de l'inventaire des déchets considérés, les principaux radionucléides dimensionnants du point de vue de la sûreté à long terme du stockage sont (i) le radium 226, l'uranium 238 et le thorium 232 pour les déchets radifères, (ii) le chlore 36 et le carbone 14 (sous forme organique) pour les déchets de graphite et (iii) l'iode 129, le chlore 36 et le technétium 99 pour les déchets bitumés.

L'inventaire radiologique initial des déchets de graphite et bitumés présentait un caractère majorant lié à des incertitudes sur son évaluation de par les moyens utilisés par le passé pour son estimation. Ces incertitudes ont conduit à envisager plusieurs scénarios alternatifs pour leur gestion combinant des opérations de tri et de traitement en amont du stockage. En parallèle des travaux de caractérisation complémentaires ont été engagés.

Ces travaux ont conduit EDF et le CEA à réviser l'inventaire en chlore 36 de leurs déchets de graphite. Ces estimations seront consolidées d'ici 2018 par des mesures complémentaires. EDF, le CEA et l'Andra mènent également des travaux de R&D pour préciser et quantifier les mécanismes de relâchement du carbone 14 par le graphite et sa spéciation. Le programme d'analyses radiochimiques mis en œuvre par le CEA a montré que l'inventaire des déchets bitumés en iode 129 et chlore 36 est très faible. Les teneurs de ces radionucléides sont inférieures aux limites de détection.

EDF et le CEA ont également analysé les possibilités de traitement des déchets de graphite et des déchets bitumés.

Les recherches menées par EDF sur le traitement des déchets de graphite ont montré qu'une décontamination poussée en chlore 36 pourrait être envisageable. La faisabilité d'une décontamination partielle en carbone 14 est démontrée en laboratoire. Cependant, en l'état actuel des connaissances, le traitement par gazéification n'apparaît pas suffisamment performant et sélectif pour détruire le graphite du fait des rejets atmosphériques en carbone 14 qui seraient générés. Le traitement serait ainsi un moyen de favoriser l'acceptabilité du graphite partiellement décontaminé dans le stockage à faible profondeur si les caractéristiques de certains déchets n'étaient pas compatibles pour les stocker en l'état. Ces procédés sont néanmoins complexes et susceptibles de générer des rejets.

Le CEA a analysé un scénario prospectif de traitement par incinération/vitrification des enrobés bitumineux. Le CEA conclut défavorablement au traitement thermique de colis de déchets déjà conditionnés, en regard de l'option d'un stockage direct de ces colis du fait de l'existence de verrous technologiques majeurs (maîtrise des réactions physico-chimiques entre l'enrobé bitumineux et les adjuvants de vitrification, traitement complexe des gaz et poussières de combustion, gestion de rejets radiologiques et de composés gazeux chimiques dans l'environnement...).

² Le PNGMDR a mis en place un groupe de travail qui mène des analyses sur l'optimisation des filières, sous l'angle de la bonne utilisation des différentes filières de stockage, de la maîtrise des risques liés à chaque type de déchet ainsi que de la cohérence globale du dispositif de gestion et son optimisation technique et économique.

1.1 Les déchets radifères

1.1.1 Origine

Les déchets radifères sont essentiellement des déchets historiques. Ils proviennent notamment de l'exploitation antérieure de minerais pour l'extraction de terres rares (Solvay) ou d'uranium (CEA) ainsi que de la dépollution d'anciens sites industriels ayant utilisé le radium ou le thorium dans les années 1900 à 1960 (mission de service public assurée par l'Andra). Certains déchets sont également produits par Areva dans le cadre de ses activités de production de zirconium.

- Déchets issus de l'extraction de terres rares (Solvay) :

Jusqu'en 1994, la société Solvay (préalablement Rhône-Poulenc puis Rhodia) a traité dans son usine de La Rochelle de la monazite pour en extraire des terres rares. Ces produits entrent notamment dans la fabrication de composants pour la micro-HIFI-vidéo, de catalyseurs pour l'automobile et de pigments colorés.

Cette production a généré des déchets. Les résidus radifères (RRA) sont entreposés sur le site CEA de Cadarache (5 090 tonnes) et sur le site de La Rochelle (environ 230 tonnes) où une petite production se poursuit, issue du lavage d'installations, d'opérations de reconditionnement ou de curage. Un stock de 8 400 tonnes de résidus solides banalisés (RSB) est également entreposé sur le site de La Rochelle (cf. Figure 2).

Solvay étudie des procédés de traitement des déchets RSB en vue d'une valorisation du thorium et des terres rares qu'ils contiennent et/ou d'une réduction du volume à stocker [5]. La possibilité de stocker les RSB dans une filière de type TFA est également examinée compte tenu de leur niveau d'activité.

Solvay étudie également le traitement des hydroxydes bruts de thorium (HBTh) pour valoriser le thorium, l'uranium et les terres rares contenus. Les déchets radifères qui seront produits par ce traitement sont estimés à 9 400 tonnes.



Figure 2 *Entrepôt des fûts de RRA de Solvay (Cadarache) et des résidus solides banalisés de Solvay (La Rochelle)*

- Déchets issus du traitement de minerais d'uranium (CEA) :

Les déchets du CEA résultent d'opérations d'assainissement du site de l'ancienne usine du Bouchet à Itteville (Essonne) qui traitait des minerais d'uranium et de thorium. L'usine a été exploitée de 1946 à 1970. Un terrain annexe du CEA a servi de dépôt de résidus de traitement de minerais et de bassin de décantation des boues. Une couverture d'argile a été mise en place en 1993 (cf. Figure 3). La masse totale des déchets est estimée à 40 000 tonnes.

Le CEA a mené en 2007 une campagne de caractérisation le conduisant à envisager un tri qui permettrait d'affecter une partie des déchets à la filière TFA (28 000 tonnes). Dans ces conditions, l'inventaire des déchets FA-VL est évalué par le CEA à 12 000 tonnes. L'alternative d'un stockage à faible profondeur de l'ensemble des déchets d'Itteville est également considérée.



Figure 3 Déposante d'Itteville du CEA (Essonne) - A gauche : travaux de mise en place de la couverture d'argile, à droite état actuel du site

- Déchets issus de l'assainissement d'anciens sites pollués par de la radioactivité (Andra) :

Les déchets issus des opérations d'assainissement de sites menées par l'Andra sont entreposés dans le bâtiment de regroupement et d'entreposage (cf. Figure 4) du Cires mis en service par l'Andra en 2012 à Morvilliers ainsi que sur le site CEA de Cadarache. Ils comprennent notamment les déchets issus de l'assainissement de l'ancien site horloger de Bayard et de Bandol, du démantèlement de l'ancienne fabrique de pierre à briquets Orflam-Plast ainsi que les résidus extraits de l'étang de la Gravière proche de l'usine d'Orflam Plast. D'autres déchets seront également produits par les futures opérations d'assainissement de sites. La quantité de déchets issus des opérations d'assainissement a été réévaluée à l'ordre de 1 400 tonnes à l'horizon 2030.



Figure 4 Bâtiment d'entreposage au Cires de déchets d'assainissement (Morvilliers)

- Déchets issus de l'extraction de zirconium (Areva) :

Les déchets produits par Areva dans son installation de Jarrie sont issus du procédé de fabrication d'éponges de zirconium, utilisées pour la fabrication de gaines de combustibles nucléaires. Le zirconium a été extrait à partir d'un minéral naturel (zircon). Depuis 2012, Areva extrait le zirconium à partir de zircone fondue. Les déchets produits sont entreposés, comme illustré à la Figure 5, sur le site de l'usine à Jarrie (Isère). La quantité de déchets est estimée par Areva de l'ordre de 3 700 tonnes, en diminution par rapport aux précédentes estimations suite à des évolutions du procédé de fabrication.



Figure 5 Entrepôt des fûts de déchets d'Areva (Jarrie)

1.1.2 Principales caractéristiques

Les déchets radifères contiennent des radioéléments des trois chaînes naturelles 4N (thorium 232 et ses descendants), 4N+2 (uranium 238 et ses descendants), et 4N+3 (uranium 235 et ses descendants) avec une prédominance des chaînes 4N et 4N+2. L'activité massique moyenne des déchets est de l'ordre de 20 becquerels par gramme (Bq/g) en uranium 238 ainsi qu'en thorium 232 et de l'ordre de 60 Bq/g en radium 226 (entre quelques Bq/g et quelques centaines de Bq/g selon les déchets). Après une phase de décroissance du radium initial à l'échelle de 10 000 ans, l'activité radiologique devient quasiment constante et pilotée par l'activité de l'uranium 238 et du thorium 232, radioéléments à période très longue. L'activité totale des déchets radifères diminue d'environ un ordre de grandeur à l'échelle de 10 000 ans.

Les déchets radifères exhalent du radon dû à la désintégration radioactive du radium 226.

Les déchets présentent des teneurs variables en sels solubles (nitrates, sulfates) susceptibles d'influencer la mobilité des différents radionucléides et toxiques chimiques. Le radium initial présent dans la majorité des déchets radifères se trouve sous une forme chimique peu soluble (sulfate ou phosphate). Les quantités de toxiques chimiques restent assez faibles dans l'inventaire prévisionnel. Il s'agit essentiellement de bore (2600 parties par millions, ppm), de plomb (2500 ppm), d'uranium (1 300 ppm) et de chrome (780 ppm). Des quantités limitées de nickel (120 ppm) et d'arsenic (75 ppm) peuvent aussi être observées.

Les études en cours visent notamment à préciser les cinétiques de relâchement des radioéléments et des toxiques chimiques dans des conditions géochimiques représentatives du stockage et d'évaluer les perturbations éventuelles induites par les nitrates contenus dans certains déchets.

Le conditionnement envisagé pour le stockage des déchets radifères comprend des fûts métalliques de 220 litres pour les déchets déjà conditionnés ou en cours de conditionnement ainsi que des conteneurs métalliques d'une capacité d'environ 6 m³ (cf. Figure 6).

Selon ces hypothèses, le volume conditionné des déchets radifères est estimé à ce stade de l'ordre de 45 000 m³ pour une masse de déchets d'environ 40 000 tonnes. Cette estimation sera consolidée dans la suite du projet pour intégrer les résultats des études sur la filière de gestion de certains déchets³ ainsi que les incertitudes sur les volumes de déchets qui seront produits par les opérations d'assainissement de sites.

³ En particulier Solvay étudie différents scénarios de gestion pour les RSB.

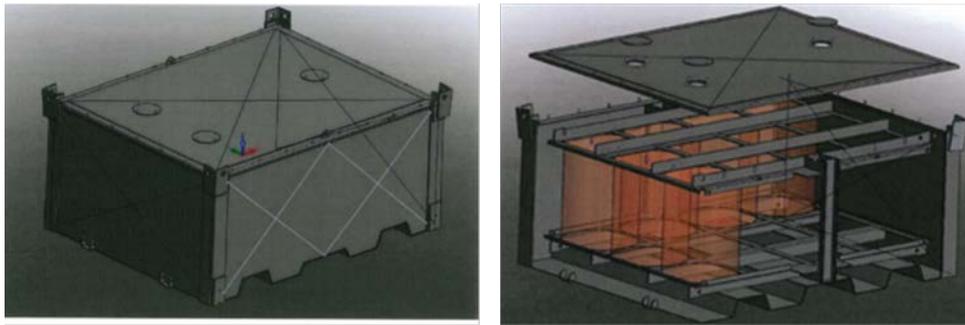


Figure 6 *Projet de conteneur pour le stockage des déchets radifères*

1.2 Les déchets de graphite

1.2.1 Origine

Les déchets de graphite proviennent majoritairement de l'exploitation et du démantèlement des réacteurs de l'ancienne filière Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG) et de certains réacteurs expérimentaux. L'exploitation de la filière UNGG a conduit à l'utilisation d'importantes quantités de graphite comme modérateur neutronique. Deux types de déchets sont issus de ces réacteurs : les chemises qui entouraient le combustible ainsi que les empilements, qui constituaient le cœur des réacteurs et les protections biologiques (cf. Figure 7).



Figure 7 *(a) Chemise graphite (à gauche) (b) Brique de graphite d'empilement (au centre), (c) empilement graphite du réacteur EDF Chinon A3 en cours de construction en 1965 (à droite)*

Les réacteurs qui ont produit les déchets de graphite sont aujourd'hui à l'arrêt :

- réacteurs G1, G2 et G3 sur le site du CEA Marcoule (dernier réacteur arrêté en 1984) ;
- réacteurs EDF de Chinon (A1, A2 et A3), de Saint-Laurent des Eaux (A1 et A2) et de Bugey 1 (dernier réacteur arrêté en 1994) ;
- réacteurs expérimentaux EL2 et EL3 du CEA à Saclay (arrêtés respectivement depuis 1965 et 1979) et Rapsodie à Cadarache (arrêté en 1983).

La masse totale des déchets de graphite est d'environ 23 000 tonnes. Environ 80 % des déchets sont constitués des empilements (modérateurs et réflecteurs) et seront produits lors du démantèlement des réacteurs. Environ 20 % sont issus de l'exploitation des réacteurs et sont entreposés dans des silos sur les sites de La Hague, Marcoule et Saint-Laurent.

Les déchets entreposés dans les silos 115 et 130 et dans des décanteurs sur le site de La Hague proviennent du traitement des combustibles UNGG entre 1966 et 1990. Ils se caractérisent par un mélange de graphite (chemises), de magnésium (gaines, bouchons, centreurs), d'acier inoxydable (fils de selle) et de résidus d'uranium.

EDF prévoit de démanteler sous eau certains réacteurs (Bugey 1, Saint-Laurent A1 et A2, Chinon A3). Les résines échangeuses d'ions (REI) utilisées pour traiter l'eau de démantèlement sont étudiées pour un stockage avec les déchets de graphite (environ 500 tonnes).

1.2.2 Principales caractéristiques

L'essentiel des radionucléides contenus dans les déchets de graphite sont des produits d'activation du graphite et de ses impuretés : c'est le cas notamment du cobalt 60, du fer 55 et du tritium pour les produits d'activation à période courte, du carbone 14, chlore 36, calcium 41, nickel 59 et 63, niobium 94 pour les produits d'activation 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. L'activité totale des déchets de graphite diminue de deux ordres de grandeur sur une période de 50 000 ans.

Le volume total de déchets de graphite et REI est d'environ 90 000 m³ avec l'hypothèse d'un conditionnement des empilements et des chemises dans des colis en béton de 10 m³ et des résines dans des colis en béton de 2 m³ (cf. Figure 8).

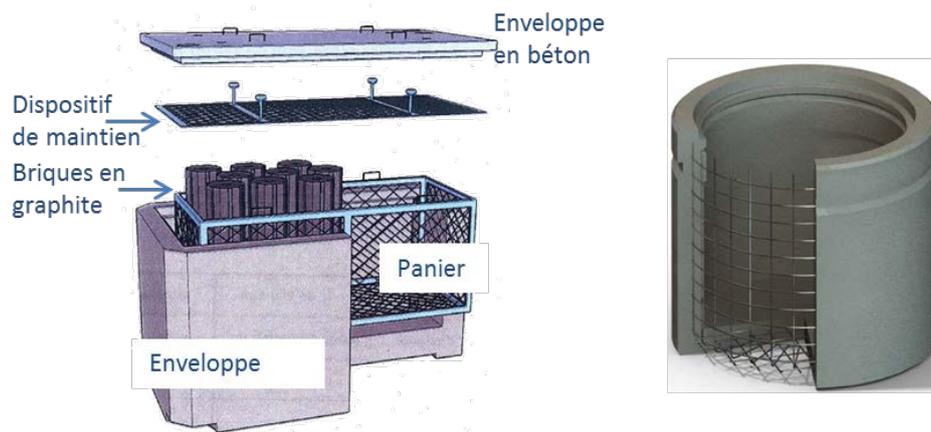


Figure 8 a) A gauche, projet de colis en béton pour les empilements et chemises en graphite
 b) A droite, projet de colis en béton (dit coque C1PG) pour les résines échangeuses d'ions

1.2.3 Avancées du programme d'études et de recherches sur les déchets de graphite

EDF, le CEA et l'Andra ont mis en place un programme d'études et de recherches pour préciser le contenu radiologique des déchets de graphite et évaluer leur comportement en stockage. Une attention particulière est portée au chlore 36 et au carbone 14, qui constituent les principaux contributeurs à l'impact radiologique à long terme.

Le procédé de fabrication du graphite utilisé dans les réacteurs UNGG a permis d'obtenir un matériau contenant très peu d'impuretés. Le chlore 36 issu de l'activation des impuretés résiduelles de chlore présente une très faible concentration dans le graphite après irradiation (de l'ordre de la dizaine de milligrammes par tonne de graphite).

EDF a constaté que les mesures réalisées sur les prélèvements d'un empilement présentent une forte variabilité. Cette variabilité est liée à la très faible concentration en impuretés dont la répartition dans le graphite présente un caractère aléatoire. Ces observations ont conduit EDF à développer une méthode statistique pour exploiter au mieux les mesures. Ces travaux ont amené une réévaluation à la baisse de l'inventaire en chlore 36 dans les empilements. Ces travaux sont poursuivis avec l'objectif de préciser également l'inventaire radiologique des chemises de graphite, en prenant en compte notamment l'amélioration des protocoles d'analyses radiochimiques.

Le CEA a engagé une démarche similaire pour préciser l'inventaire radiologique de ses déchets.

Sur cette base, EDF, le CEA [6] et Areva ont établi un inventaire radiologique prévisionnel de leurs déchets en chlore 36 de 2,2 TBq au total pour les études du projet de stockage. Les estimations antérieures, fondées sur l'extrapolation des valeurs mesurées les plus élevées à l'ensemble des déchets de graphite, conduisaient à surestimer de manière importante l'activité globale. EDF et le CEA estiment que des marges complémentaires de réduction d'activité sont attendues sur l'inventaire des

empilements graphite des réacteurs du CEA ainsi que sur l'inventaire des chemises graphite d'EDF. Ces données seront consolidées d'ici 2018 par des travaux complémentaires de caractérisation. Par ailleurs, les travaux menés par l'Andra ont montré que les matériaux cimentaires présentent une capacité de sorption du chlore 36. L'utilisation de matériaux cimentaires dans le stockage (colis, alvéoles) apparaît ainsi favorable pour limiter le relâchement de ce radionucléide hors du stockage.

Un enjeu important des études et de recherches en cours porte sur le carbone 14. Il s'agit en particulier (i) de préciser la cinétique de relâchement pour les différents déchets de graphite en intégrant les principaux paramètres susceptibles d'influer sur le relâchement (empilements/chemises, conditions de fonctionnement en réacteur, conditions géochimiques en stockage...) et (ii) de préciser la fraction de carbone 14 relâchée sous forme organique et la nature de ces molécules organiques afin d'évaluer sa rétention par les matériaux cimentaires et les Argiles tégulines.

Les tests de lixiviation menés à ce jour sur des empilements en graphite indiquent que 30 % du carbone 14 relâché en solution se trouverait sous forme organique. Ils montrent également des taux de relâchement variables en fonction des conditions expérimentales et de la nature de l'échantillon. En extrapolant un essai réalisé sur un bloc graphite de Bugey, ce taux serait d'environ 5.10^{-6} par an. Par ailleurs, des essais réalisés sur d'autres réacteurs à des fins d'études de spéciation conduisent à des valeurs comprises entre 7.10^{-4} /an à 6.10^{-3} /an. Le terme source du graphite en carbone 14 sera consolidé dans la suite du programme d'études et de recherches en s'appuyant sur des essais complémentaires avec des conditions expérimentales représentatives des conditions de stockage.

EDF mène aussi des recherches sur des procédés de traitement du graphite (décontamination thermique suivie ou non de destruction par gazéification). Ces travaux ont montré qu'une décontamination poussée en chlore 36 pourrait être envisageable. La faisabilité d'une décontamination partielle en carbone 14 est démontrée en laboratoire, accompagnée d'un départ quasi-total du tritium. Cependant, en l'état actuel des connaissances, le traitement n'apparaît pas suffisamment performant et sélectif pour détruire le graphite par gazéification du fait des rejets atmosphériques en carbone 14 qui seraient générés. Le traitement serait ainsi un moyen de favoriser l'acceptabilité du graphite partiellement décontaminé dans le stockage à faible profondeur si les caractéristiques de certains déchets n'étaient pas compatibles pour les stocker en l'état. Ces procédés sont néanmoins complexes et susceptibles de générer des rejets.

1.3 Déchets bitumineux FA-VL de Marcoule

1.3.1 Origine

Les fûts d'enrobés bitumineux de Marcoule proviennent du traitement des effluents liquides radioactifs générés par les installations du site de Marcoule. Le traitement par précipitation permet de fixer dans des boues la radioactivité contenue dans les effluents. Ces boues sont ensuite incorporées dans du bitume par un procédé d'enrobage et conditionnées dans des fûts métalliques. 60 000 fûts sont entreposés sur le site de Marcoule. La partie des fûts d'enrobés bitumineux relevant de la catégorie FA-VL représente environ 32 000 fûts produits entre 1966 et 1995.

Les fûts d'enrobés bitumineux sont entreposés dans les casemates de la station de traitement des effluents liquides de Marcoule, construites entre 1966 et 1994. Les casemates sont en cours de reprise par le CEA. Une partie des fûts en a déjà été extraite, reconditionnée et placée dans un autre entrepôt du site de Marcoule (Entreposage intermédiaire polyvalent - EIP). La reprise de l'ensemble des fûts est prévue par le CEA d'ici fin 2035.

1.3.2 Principales caractéristiques

Lors des opérations de reprise des déchets entreposés dans les casemates, les fûts primaires en acier au carbone sont reconditionnés en sur-fûts en acier inoxydable (dits « sur-fûts EIP »). Le CEA prévoit de reprendre ainsi l'ensemble des fûts primaires. Les sur-fûts EIP FA-VL seront ensuite placés par quatre dans un conteneur en béton dit CBFK-B (cf. Figure 9). Le volume de stockage est estimé à environ 42 000 m³.

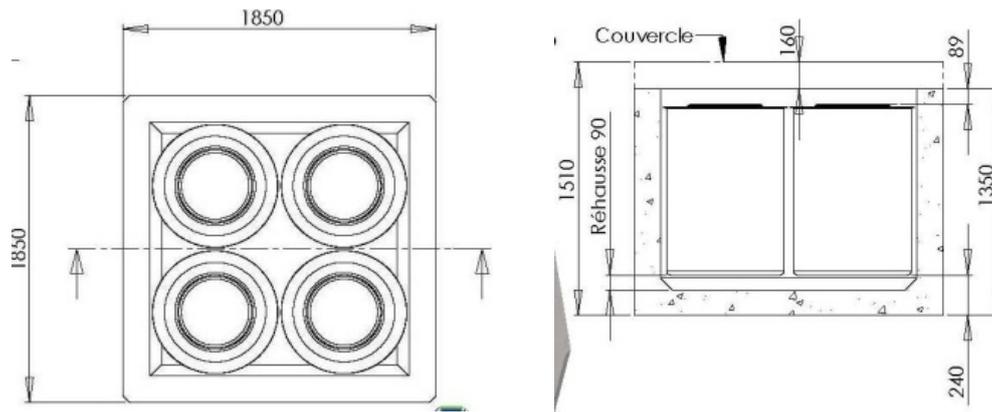


Figure 9 colis de stockage CBFK-B160 dans la configuration avec 4 fûts d'enrobé bitumineux placés en sur-fût « EIP »

Les déchets bitumés FA-VL de Marcoule présentent un spectre radiologique diversifié. Les plus grandes activités radiologiques sont représentées par le césium 137, le strontium 90, le plutonium 241 et l'américium 241. L'activité totale des déchets diminue de deux ordres de grandeur sur une période de 50 000 ans.

Une attention particulière est portée à l'iode 129, au chlore 36, au technétium 99 et aux plutoniums 239 et 240 qui constituent les principaux contributeurs à l'impact radiologique à long terme.

Le CEA met en œuvre un programme d'analyses radiochimiques lors des opérations de reprise des fûts entreposés dans les casemates. Ces analyses montrent que les teneurs en iode 129 et chlore 36 sont inférieures aux limites de détection. Cela a conduit à réévaluer les inventaires radiologiques de ces radioéléments, à un niveau très faible. Des perspectives de réévaluation à la baisse du contenu radiologique des déchets bitumés sont envisagées par le CEA avec la poursuite de son programme de caractérisation et de reprise.

La composition chimique de ces déchets présente une grande variabilité du fait des différentes familles de combustibles traitées et des procédés de traitement chimique par précipitation associés qui se sont succédés depuis 1966. Les déchets se caractérisent par la présence de substances oxydantes (sels de nitrates et sulfates) et de substances complexantes (TBP), ainsi que de faibles quantités de toxiques chimiques tels que l'uranium (environ 1 300 ppm) et le plomb (environ 500 ppm).

Ces caractéristiques seront prises en compte dans la suite des études afin d'évaluer les perturbations éventuelles induites par ces substances chimiques en situation de stockage. Les études s'appuieront également sur les résultats acquis au travers des programmes d'essais mis en place pour le projet Cigéo concernant l'absence de réactions exothermiques en cas d'élévation accidentelle de température (incendie) et les modalités de gonflement des enrobés par auto-irradiation ou en présence d'eau.

Conformément à la demande du PNGMDR, le CEA a analysé un scénario prospectif d'un traitement par incinération/vitrification des enrobés bitumineux sous l'angle technique, économique et de sûreté de l'installation [7]. En l'état actuel des connaissances, le CEA conclut à l'existence de verrous technologiques majeurs relatifs notamment (i) aux conditions de maîtrise des réactions physico-chimiques entre l'enrobé bitumineux et les adjuvants de vitrification, (ii) au traitement complexe des gaz et poussières de combustion et (iii) à la gestion de rejets radiologiques et de composés gazeux chimiques dans l'environnement. Ces éléments conduisent le CEA à conclure sur le caractère défavorable du traitement thermique de colis de déchets déjà conditionnés, en regard de l'option d'un stockage direct de ces colis.

1.4 Autres déchets

D'autres déchets sont pris en compte dans les études du projet de stockage à faible profondeur. Il s'agit en particulier de déchets d'exploitation des installations de La Hague, de sources scellées usagées (à l'américium ou au radium), d'objets de faible activité massique contenant du radium, de l'uranium et du thorium ainsi que des déchets à radioactivité naturelle renforcée.

- Les études menées dans le cadre de l'optimisation de la répartition des déchets entre filières de gestion [2] ont conduit Areva à estimer en 2011 qu'environ 30 % des colis de déchets déjà produits liés à l'usage des installations de l'usine de La Hague pourraient relever d'un stockage à faible profondeur, soit un volume d'environ 1 600 m³. Ces déchets sont générés par l'exploitation de différents ateliers et laboratoires du site et par les opérations de maintenance ou de démantèlement. Ils sont actuellement triés sur la base des critères d'acceptation du Centre de stockage de l'Aube (CSA). Les colis dépassant ces critères sont entreposés sur le site (colis de déchets CBF-C'2). Areva a donc demandé à l'Andra d'étudier le stockage à faible profondeur d'une partie des colis de déchets technologiques de La Hague déjà produits.
- Les études menées par l'Andra sur la gestion des sources scellées usagées [8] et les objets au radium, au thorium, à l'uranium [9] ont conduit à considérer la prise en charge de différentes sources à l'américium et au radium, en particulier des détecteurs de fumée (cf. Figure 10), dans le stockage à faible profondeur ainsi qu'une partie des objets au radium, au thorium ou à l'uranium. Ces déchets représentent un volume d'environ 2 200 m³.



Figure 10 Détecteur ionique de fumée démonté à l'américium 241

- Les déchets à radioactivité naturelle renforcée (RNR) sont des déchets générés par la transformation de matières premières naturellement riches en radioéléments, non utilisées pour leurs propriétés radioactives, comme c'est le cas pour certains déchets radifères. Ces déchets sont d'origines très diverses. Les plus grands volumes (plusieurs dizaines de millions de mètres cubes) concernent les cendres de charbon, les phosphogypses et les boues rouges. Selon leurs caractéristiques, plusieurs méthodes de gestion sont pratiquées en France (valorisation, stockage in situ, stockage avec des déchets conventionnels ou avec des déchets TFA). Certains déchets RNR présentant des activités plus importantes sont susceptibles d'un stockage à faible profondeur avec les déchets radifères. L'inventaire prend en compte à ce stade un volume de stockage d'environ 6 800 m³.

Par ailleurs, Areva étudie dans le cadre du PNGMDR les conditions de gestion des déchets à produire de l'installation de Malvési [10]. Ces déchets sont identifiés dans l'inventaire national sous la famille RTCU (Résidus de Traitement de Conversion de l'Uranium). Certains déchets à produire (gypses et stock de boues déshydratées) relèvent d'une filière de gestion qui reste à définir. Ces déchets ne sont pas pris en compte à ce stade dans la conception du projet de stockage à l'étude par l'Andra sur le site investigué, Areva étudiant différents scénarios de gestion de ces déchets dont un scénario de stockage sur le site de Malvési. L'étude de leur compatibilité avec un stockage à faible profondeur est menée en lien avec l'Andra. Les prévisions de production des boues déshydratées et des gypses représentent environ 88 000 tonnes à l'horizon 2035, soit un volume de colis de stockage de l'ordre de 86 000 m³.

2. Bilan des investigations géologiques réalisées sur la Communauté de Communes de Soulaines

Synthèse

Des investigations géologiques ont été engagées en 2013 sur le territoire de la Communauté de Communes de Soulaines en concertation avec les acteurs locaux. Ces investigations ont été menées à proximité des centres de stockage existants de l'Andra, sur un secteur d'étude de 50 km² où deux formations argileuses sont présentes à l'affleurement : les Argiles tégulines et les Argiles à Plicatules.

Les premiers résultats des investigations ont montré que l'épaisseur des Argiles à Plicatules est limitée (25 à 30 m) et que les zones d'affleurement sont réduites sur le secteur d'étude. Il a été ainsi décidé de focaliser les études sur la formation des Argiles tégulines ayant une épaisseur et une présence plus importantes sur le secteur d'étude.

La campagne de reconnaissance et de caractérisation menée sur la période 2013-2015 permet de disposer aujourd'hui d'une bonne représentation du milieu géologique à l'échelle du secteur d'étude.

La formation des Argiles tégulines s'inscrit dans le cadre général du Bassin parisien, zone cratonique parmi les plus stables du globe, caractérisée par une activité sismique très faible. Cette formation s'épaissit dans le sens du pendage (de l'ordre de 1°) du sud-est vers le nord-ouest. Elle a une épaisseur d'au moins 30 m sur la majeure partie du secteur d'étude et peut atteindre 80 m environ au nord. Aucune faille majeure n'affecte le secteur d'étude.

La formation des Argiles tégulines s'est mise en place il y a environ 100 millions d'années dans un environnement marin et calme qui lui confère une lithologie et une composition minéralogique homogènes et peu contrastées. Ce sont des argiles silteuses peu carbonatées. Aucune hétérogénéité (structurale ou sédimentaires) pluri-métrique n'a été détectée. Il en résulte que les propriétés intrinsèques de la formation (perméabilité, diffusion...) sont globalement peu variables à l'échelle du secteur d'étude, à l'exception d'une zone à proximité de la surface où la porosité et les propriétés mécaniques de la couche sont influencées par des effets de surface (déconfinement et altération). La perméabilité moyenne des Argiles tégulines est de $2 \cdot 10^{-11}$ m/s. Le coefficient de diffusion effectif moyen est de $5 \cdot 10^{-10}$ m²/s.

Les écoulements d'eau s'organisent principalement dans les Sables verts de l'Aptien, formation sous-jacente aux Argiles tégulines alimentée par la recharge aux affleurements vers l'est. Il s'agit d'un aquifère avec un faible débit et un gradient hydraulique de l'ordre de 1,5 ‰ orienté suivant la tendance générale des écoulements dans le Bassin parisien (sud-est vers le nord-ouest). L'écoulement au sein de la formation des Argiles tégulines est vertical ascendant ou descendant, respectivement depuis et vers les Sables verts. Au nord du secteur d'étude, le gradient hydraulique est vertical descendant. Il varie entre 0,1 et 0,3 m/m. Le transfert des solutés au sein des Argiles tégulines de ce secteur est convectif descendant, avec une vitesse de l'ordre du mètre par 1 000 ans.

Les travaux sur l'évolution future de ce secteur montrent que l'érosion attendue au cours des prochains 50 000 ans serait de quelques mètres à la dizaine de mètres selon le scénario d'évolution climatique retenu. L'écoulement resterait vertical descendant au nord du secteur d'étude.

2.1 Secteur d'étude et objectifs des investigations géologiques

La campagne de reconnaissance géologique menée par l'Andra sur la Communauté de Communes de Soulaines a porté sur un secteur de 50 km² représenté par cinq communes (Juzanvigny, Epothémont, Crespy-le-Neuf, Morvilliers et La Chaise). Deux formations argileuses, d'une épaisseur minimale de 20 mètres, y sont présentes à l'affleurement ou sous des formations superficielles de faible épaisseur (inférieure à 10 m). Elles sont représentées sur la Figure 11. La formation du Gault ou « Argiles tégulines » est présente sur l'essentiel du secteur, plus particulièrement au nord. Les « Argiles à Plicatules » sont présentes à l'affleurement ou sous faible recouvrement au sud et sud-est du secteur. Le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage Cires où sont stockés des déchets de très faible activité est implanté dans les Argiles à Plicatules.

Compte tenu des connaissances importantes déjà disponibles sur les Argiles à Plicatules, notamment celles acquises lors de l'implantation du Cires, les travaux de reconnaissance se sont attachés préférentiellement aux Argiles tégulines. Sur la base des orientations de sûreté pour l'implantation d'un stockage à faible profondeur de déchets FA-VL, trois objectifs ont été visés par le programme d'investigations géologiques : (i) vérifier l'existence de volumes d'argile suffisants avec des capacités de confinement répondant aux critères de sûreté et des propriétés mécaniques permettant de construire des ouvrages de stockage, (ii) caractériser les écoulements d'eau en profondeur et (iii) évaluer la stabilité géomorphologique du site dans le temps. A ce stade, il s'agissait de disposer d'une première représentation globale des caractéristiques du milieu géologique.

Pour ce faire, l'Andra a déployé un ensemble de travaux de terrain complémentaires comprenant :

- 7 forages carottés jusqu'à 120 m de profondeur, investigués avec un ensemble d'outils diagraphiques et des levés géologiques ;
- 120 km de mesures géophysiques légères suivant trois techniques complémentaires (levés électromagnétiques, panneaux électriques et sismique réfraction) et 10 forages carottés pour le calage des profils sismiques ;
- 11 forages hydrogéologiques avec des mesures diagraphiques in situ, des tests hydrogéologiques et la mise en place d'équipements pour un suivi piézométrique ;
- une campagne géotechnique G11 ;
- plus de 1 000 échantillons prélevés pour mesurer les propriétés de la formation argileuse et de ses encaissants ;
- une étude de cartographie géologique et d'hydrologie de surface.

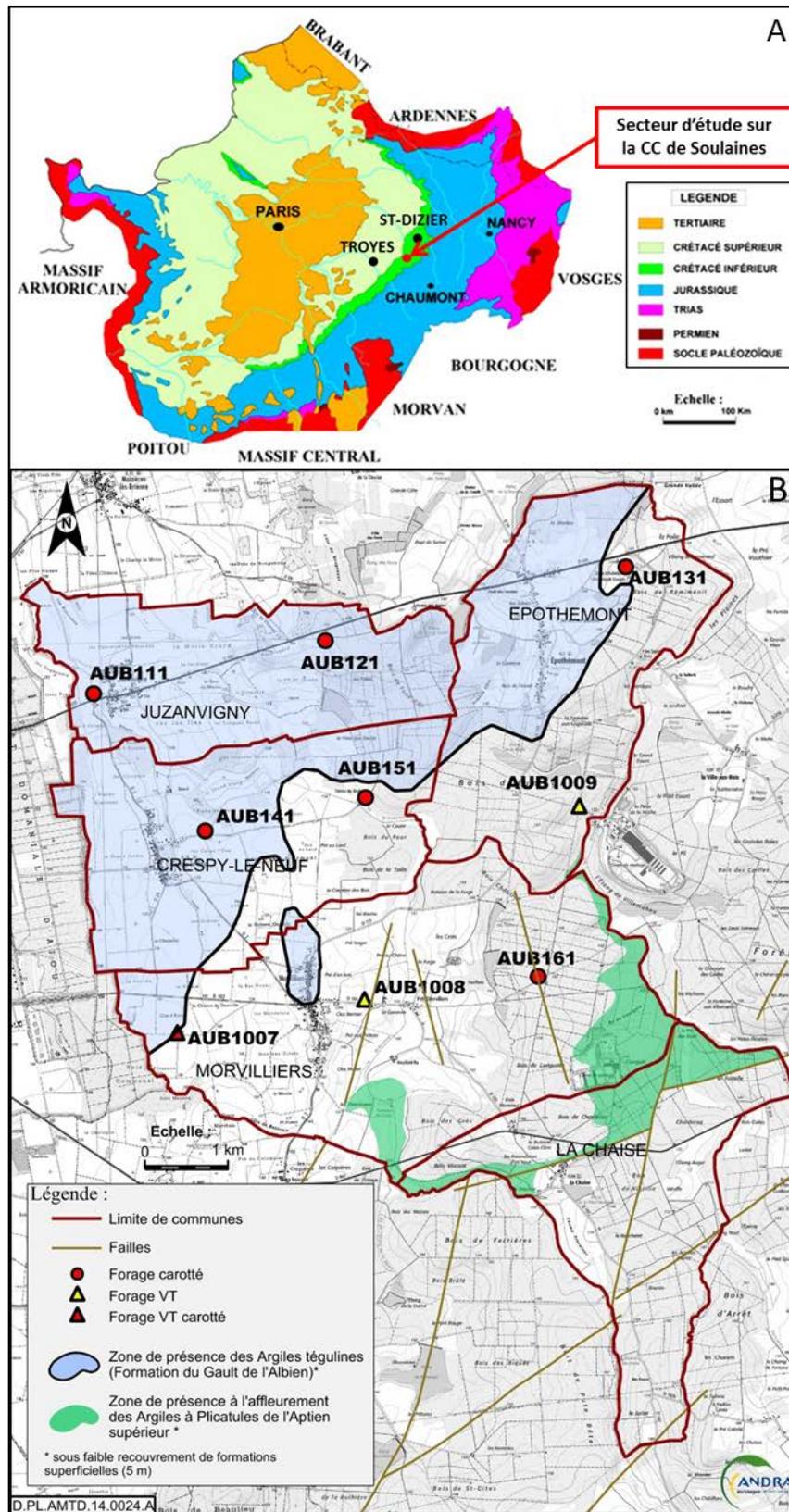


Figure 11 Localisation du secteur d'étude sur la Communauté de Communes (CC) de Soulaines (A) et présentation des zones de présence des Argiles tégulines (en bleu) et des Argiles à Plicatules (en vert) sur le secteur d'étude (B)

2.2 Le cadre géologique général

Un cadre géologique général simple et stable

Le secteur s'inscrit dans la partie orientale du bassin de Paris (Figure 11), dans une région où les formations géologiques à l'affleurement, âgées de la fin du Jurassique (environ 150 millions d'années) au début du Crétacé (environ 100 millions d'années), ont été peu affectés par les processus physiques liés à l'évolution du bassin (enfouissement, compaction, diagénèse...) [11]. La pile sédimentaire présente, faiblement inclinée vers le centre du bassin (1 à 2°), est ainsi constituée depuis la surface par les Argiles tégulines de l'Albien moyen et inférieur, la formation aquifère des Sables verts de l'Aptien supérieur et les Argiles à Plicatules de l'Aptien inférieur [12]. Des formations superficielles quaternaires, issues de l'altération sur place des formations géologiques présentes ou de dépôts et accumulations de produits d'érosion, recouvrent localement les formations jurassiques et crétacées (Figure 12).

La nature essentiellement argileuse et sableuse de ces formations engendre une topographie et une morphologie du relief peu contrastées, caractérisées par des collines, découpées par les cours d'eaux traversant des vallées évasées et des vastes plaines couvertes de formations alluviales. Les altitudes varient peu, globalement entre 130 et 160 m.

Le modèle géologique 3D réalisé à partir de l'analyse des forages de la campagne de reconnaissance et des forages déjà existants (forages pétroliers essentiellement) fournit une bonne visualisation de l'épaisseur et de l'extension latérale des deux formations argileuses sur le secteur :

- Les Argiles tégulines, affleurantes, ne sont pas présentes dans leur intégralité car elles ont été en partie érodées lors de la formation du relief actuel. Leur épaisseur (en incluant celle des formations superficielles estimée à 5 mètres en moyenne) varie de 0 à 80 m, dans le sens du pendage de la pile sédimentaire depuis le sud-est vers le nord-ouest (Figure 13 et Figure 14). Une épaisseur minimale de 25 m est présente sur tout ou partie des territoires des communes de Juzanvigny, Epthémont, Crespy le Neuf et Morvilliers. La formation des argiles tégulines est absente au sud-ouest du secteur (commune de La Chaise).
- Les Argiles à Plicatules possèdent une épaisseur variant entre 20 et 30 m (Figure 14). Elles sont essentiellement sous couverture de la formation des Sables verts et des Argiles tégulines sur la majeure partie du secteur. Elles sont affleurantes ou sous un faible recouvrement (inférieur à 20 m) au sud-est du secteur (commune de Morvilliers et nord de la commune de La Chaise).

Aucune faille majeure (faille atteignant la croûte continentale) n'a été reconnue sur le secteur. Les failles les plus proches, actives il y a environ 30 millions d'années, sont la faille de Saint-Martin de Bossenay à 60 km à l'ouest du secteur d'étude, le système des failles de la Marne à 20 km à l'est et la faille de Vittel à 4 km au sud du secteur. Le fossé de Soulaïnes, situé à l'extrême sud du secteur (Figure 12), témoigne d'une tectonique de couverture en failles et flexures (affectant uniquement les formations sédimentaires dans le bassin), qui s'est développée régionalement durant le Tertiaire. Des structures de faible extension et rejet, sont observées également au centre du secteur (les failles de Morvilliers) et une discontinuité mineure (de faible rejet < 7m et de faible extension) est supposée sur la bordure nord du secteur d'étude (Figure 12).

Ce cadre structural simple est à mettre en vis-à-vis avec le contexte géodynamique du Bassin parisien, connu comme l'une des zones cratoniques les plus stables du globe, avec une très faible activité sismique et des taux de déformations extrêmement faibles (compris entre 0,04 et 0,1 mm/an). Aucun séisme historique localisé dans la région de Soulaïnes, ou séisme qui pourrait être rattaché aux structures tectoniques régionales (fossés de Soulaïnes, faille de Saint-Dizier, failles de Vittel, faille de Saint-Martin de Bossenay...) n'est ainsi répertorié dans la base de données de sismicité historique SisFrance, qui couvre les derniers 1 000 ans. Ceci est confirmé par les observations de terrain démontrant dans la région l'absence de déformations liées à une tectonique récente dans les formations sédimentaires.

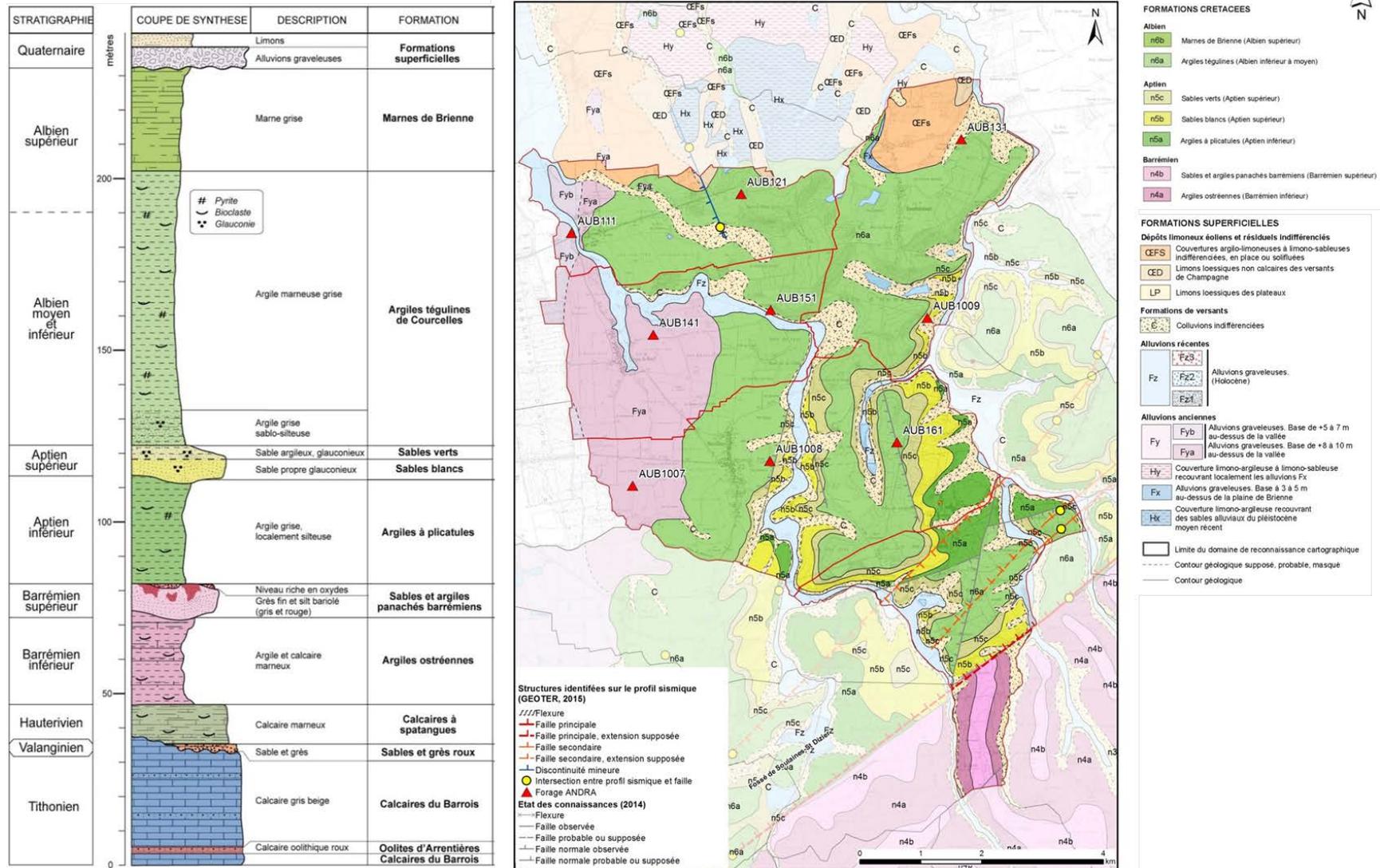


Figure 12 Log géologique synthétique des formations crétacées présentes sur la Communauté de Communes de Soulaines et carte géologique du secteur d'étude au 1/25 000^{ème}

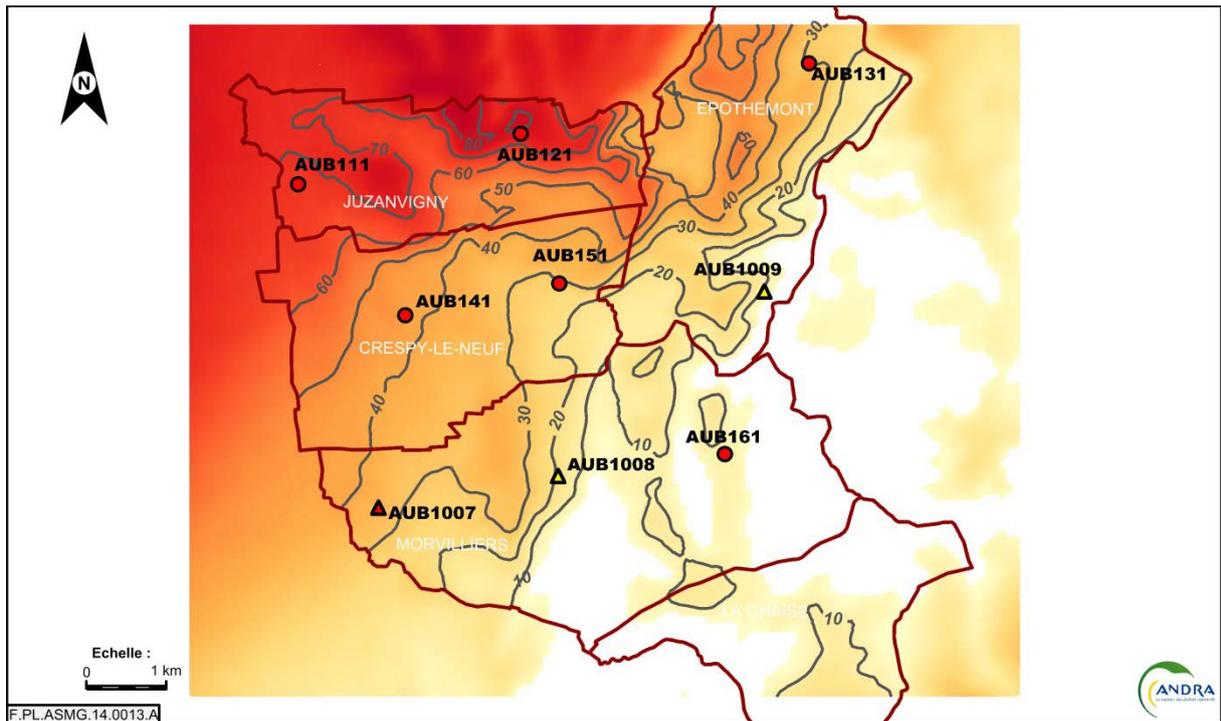


Figure 13 Carte de l'épaisseur des Argiles tégulines (en mètres), formations superficielles incluses, sur le secteur d'étude établie à partir des forages

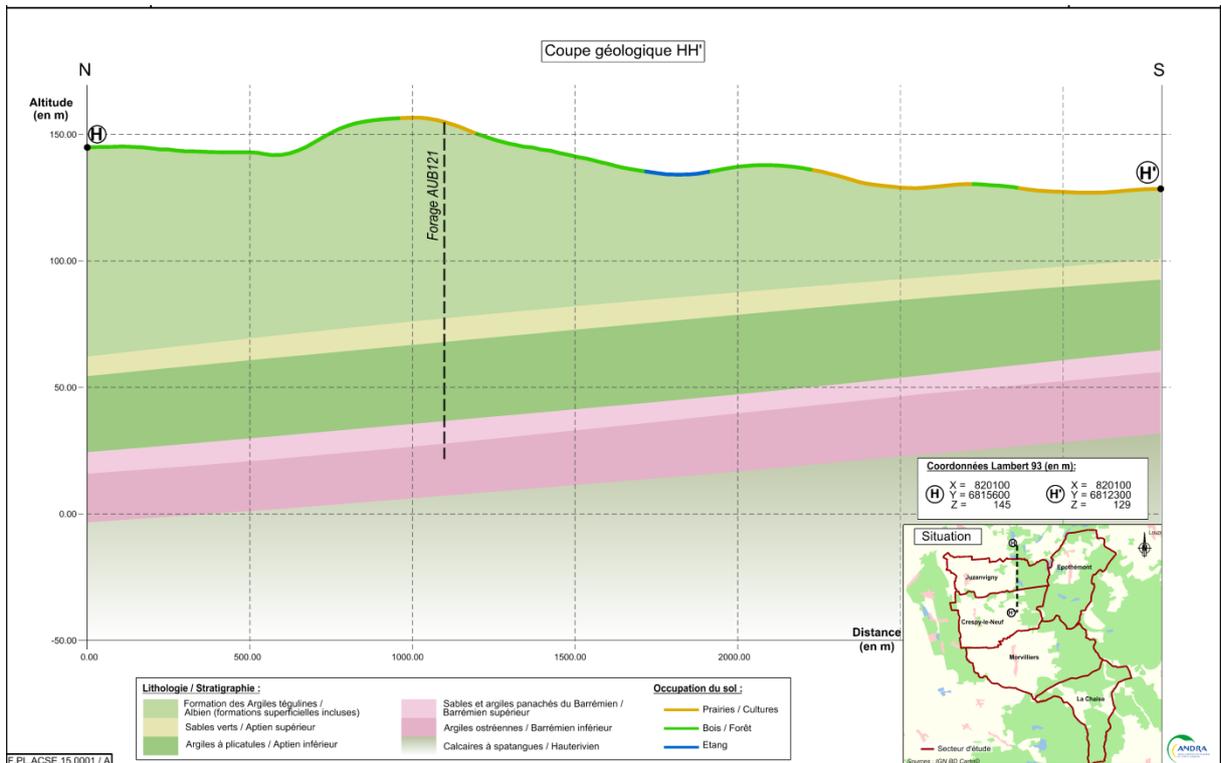


Figure 14 Coupe géologique nord-sud au nord du secteur d'étude

2.3 La formation des Argiles tégulines

Des caractéristiques minéralogiques et physiques globalement homogènes et des propriétés de confinement significatives

Déposées il y a 100 millions d'années dans des environnements marins calmes, les Argiles tégulines présentent une lithologie et une composition minéralogique relativement peu variables verticalement et latéralement [13]. Aucune hétérogénéité sédimentaire (passée sableuse notamment) de plus de quelques centimètres d'épaisseur n'est observée au droit des forages et les données de géophysique légère soulignent leur bonne continuité latérale. Les Argiles tégulines se présentent comme une roche argileuse plus ou moins silteuse et peu carbonatée, composée de trois principales phases minérales (Figure 15) : les phyllosilicates ou minéraux argileux (de 35 à 65 % en masse), les tectosilicates représentés essentiellement par des grains de quartz (de 20 à 60 % en masse) provenant de l'altération et l'érosion des roches et des sols des terres émergées, et les carbonates (< 10 % en masse). La teneur en matière organique est faible (inférieure à 1 %).

La composition minéralogique globale est peu contrastée latéralement et la variabilité verticale relativement faible. La porosité (volume de vides/volume total) présente une valeur moyenne de $30 \pm 4\%$, avec une augmentation de 5 à 10 % sur les vingt premiers mètres au maximum (Figure 16), attribuée à des processus d'altération/déconfinement. Il est à noter que l'évolution de la perméabilité sur la partie supérieure des Argiles tégulines reste limitée. En dessous, la porosité est peu variable et représentative des conditions stables de mise en place des Argiles tégulines et de son enfouissement modéré dans le passé. La dimension significativement élevée des tailles de pores des Argiles tégulines (entre 30 et 80 nm) souligne que ces argiles n'ont pas été marquées par des phénomènes physiques (compaction) et/ou chimiques (précipitation minérales) importants depuis leur dépôt.

Des mécanismes d'altération/oxydation des Argiles tégulines sont observés jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur et correspondent aux premiers stades de l'altération supergène⁴ des roches de nature argilo-marneuses. Ils se traduisent notamment par des modifications des conditions oxydo-réductrices du milieu, des transformations minéralogiques et l'augmentation (relative) de la porosité.

A l'exception de la zone superficielle altérée, et en lien avec une composition minéralogique et une porosité globalement homogènes verticalement et latéralement, les propriétés d'écoulement (perméabilité), de diffusion des solutés et de rétention des Argiles tégulines sont peu variables (Figure 16) :

- la perméabilité des Argiles tégulines, mesurée sur échantillons, est de l'ordre de $2,4 \cdot 10^{-11}$ m/s ($\pm 1,9 \cdot 10^{-11}$ m/s) avec une variabilité inférieure à un ordre de grandeur ;
- le coefficient de diffusion effectif moyen de l'eau est de l'ordre de $7,5 \cdot 10^{-11}$ m²/s ($\pm 1,6 \cdot 10^{-11}$ m²/s).

Ces valeurs faibles traduisent des propriétés de confinement significatives, en cohérence avec celles mesurées dans d'autres formations argileuses de minéralogie et porosité similaires.

Les effets d'altération de surface, observés sur les 10 à 20 mètres supérieurs, ainsi que la variabilité de la contrainte effective verticale non négligeable liée à l'épaisseur et la profondeur de la formation, conduisent à une variabilité significative des propriétés mécaniques des Argiles tégulines. On constate une dispersion importante ($\pm 75\%$) des valeurs de la résistance à la compression simple sur les 20 premiers mètres (moyenne de $6,49 \pm 4,9$ MPa)⁵. La dispersion des valeurs est en revanche limitée (25 %) en dessous de cette zone.

⁴ Supergène : terme désignant les phénomènes physiques et chimiques (érosion, dissolution, recristallisation...) qui se produisent dans la zone proche de la surface suite à l'action de l'air, des eaux, du gel...

⁵ Compte tenu des valeurs très basses et très élevées mesurées en regard de la porosité des Argiles tégulines, on ne peut pas exclure aussi une dégradation lors du prélèvement des échantillons.

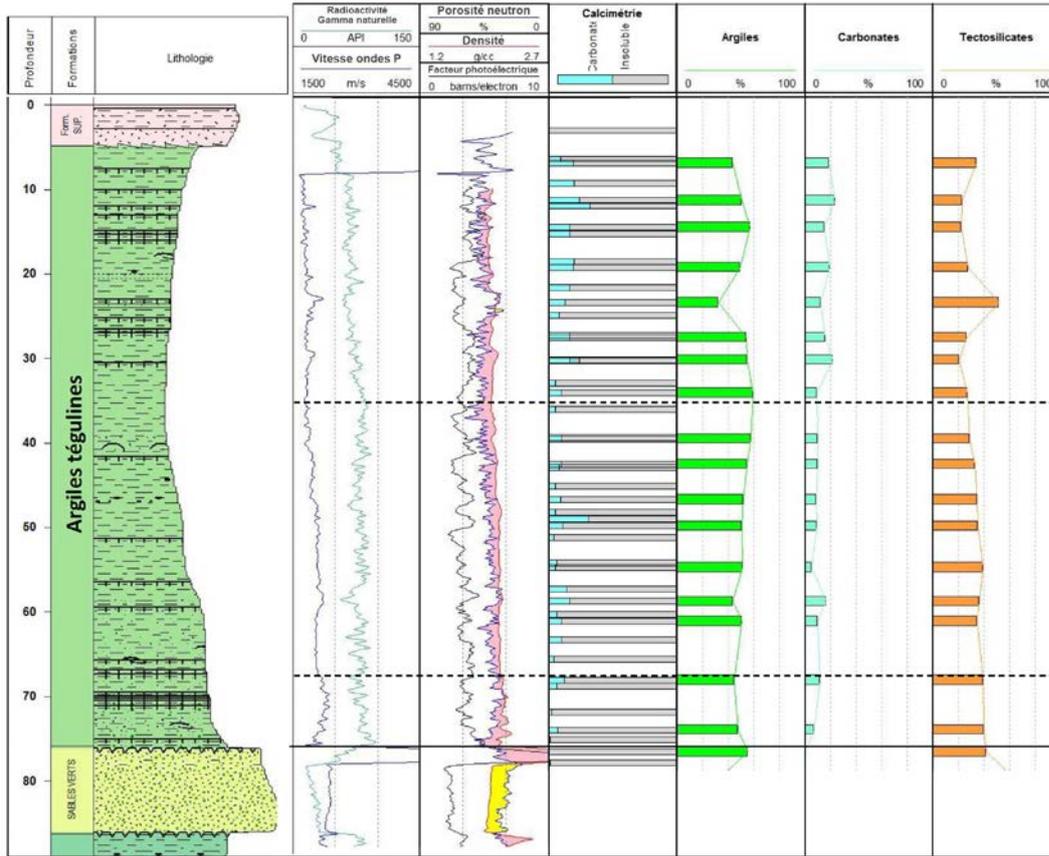


Figure 15 Evolution lithologique et minéralogique des Argiles téguilines (forage AUB121)

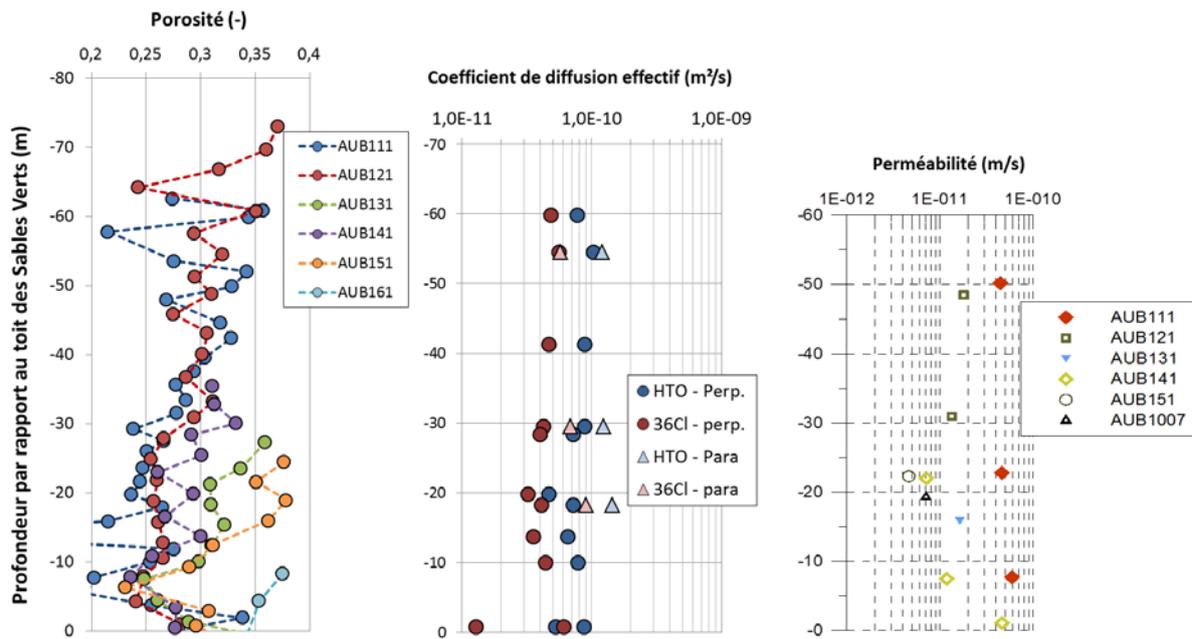


Figure 16 Profils verticaux de porosité totale, de perméabilité à l'eau et des coefficients de diffusion effectifs (eau tritiée et chlore) mesurés dans les Argiles téguilines

Une chimie des eaux marquée par une interface avec l'atmosphère

Du fait de la faible perméabilité des Argiles tégulines, l'eau interstitielle n'est pas directement accessible en forage. La composition chimique de l'eau a été déterminée par une méthodologie éprouvée couplant des caractérisations minéralogiques et physico-chimiques (mesures de pression des différents gaz, lixiviation des anions, cations échangeables...), des modélisations géochimiques et des essais de pressage (squeezing) permettant d'extraire l'eau interstitielle [14].

De manière générale, les eaux interstitielles des Argiles tégulines présentent une faible concentration en sels dissous impliquant, depuis leur mise en place, un mélange avec des eaux plus faiblement chargées, très probablement météoriques. Les mesures et modélisations menées jusqu'à présent, traduisent une distribution spatiale caractérisée par (i) des eaux profondes (au-delà de 10-20 m) en équilibre chimique avec les minéraux constitutifs et (ii) des eaux en surface influencées par les échanges atmosphériques et ses effets induits (notamment l'oxydation de la matière organique) et présentant une pression partielle de CO₂ qui n'est plus contrôlée par l'équilibre avec la calcite. Les eaux non influencées par la surface présentent un pH autour de la neutralité. Les cations majeurs sont dominés par le calcium et magnésium et les anions par les sulfates et hydrogénocarbonates. La composition chimique des eaux des Argiles tégulines n'apparaît pas influencée par la nappe des Sables verts aptiens sous-jacente, de composition différente.

Ce schéma spatial de composition chimique des eaux des Argiles tégulines est cohérent avec l'organisation des écoulements : globalement sur le secteur (cf. ci-après), l'écoulement de l'eau est vertical descendant depuis la surface, et le transport de solutés au sein des Argiles apparaît convectif dominant.

2.4 L'organisation des écoulements d'eau

Un réseau hydrographique et des écoulements en surface marqués par les formations argileuses affleurantes et les alluvions

Le département de l'Aube se situe dans le bassin hydrographique de la Seine. Il est soumis à un climat océanique, frais et humide, avec des températures moyennes hivernales de 6 à 7°C, des températures moyennes estivales de 15 à 17°C et des précipitations moyennes annuelles variant entre 750 et 850 mm/an.

Les principales rivières présentes à proximité du secteur d'étude sont l'Aube et son affluent la Voire ; le réseau secondaire est constitué de plusieurs ruisseaux s'écoulant dans une direction globalement sud-nord (la Brévonne, les Noues d'Amance et la Laines).

Le régime des cours d'eau est essentiellement conditionné par la nature des formations géologiques à l'affleurement (lien entre le réseau hydrographique et le relief) avec des différences en fonction de la nature du substratum. Les précipitations arrivant sur des formations très peu perméables telles que les formations argileuses (Argiles tégulines et Argiles à Plicatules) contribuent essentiellement aux écoulements de surface par le biais des phénomènes de ruissellement en direction du réseau hydrographique. Les débits des cours d'eau sur le secteur reflètent assez fidèlement les fluctuations des précipitations. Les précipitations arrivant sur les affleurements plus perméables des aquifères alimentent directement les nappes par infiltration. Sur le secteur, les affleurements concernés sont (i) les affleurements des aquifères superficiels du Quaternaire présents dans les vallées de la Brévonne, des Noues d'Amance et dans la plaine de Brienne, (ii) les Sables verts Albo-aptien répartis sur les communes d'Epothémont et de Morvilliers, et (iii) les affleurements de l'aquifère du Barrémien au sud du secteur. Une part des ruissellements de surface est également interceptée par ces formations perméables à l'affleurement.

Une organisation des écoulements en profondeur de type système multi-couches

Le système hydrogéologique régional et local a une structure typique de bassin sédimentaire multi-couches (Figure 12), alternant entre formations aquifères (Sables verts de l'Aptien supérieur, Sables du Barrémien) et formations peu perméables (Argiles tégulines et Argiles à Plicatules).

L'aquifère des Sables verts de l'Aptien supérieur est un niveau de sables meubles fins à grossiers, de 5 à 10 mètres d'épaisseur, inséré entre les formations argileuses très peu perméables des Argiles tégulines et des Argiles à Plicatules (Figure 17). La nappe est libre au sud-est du secteur où elle

représente les aires de recharges, puis elle devient captive lorsqu'elle s'enfonce sous les Argiles tégulines vers le nord-ouest [15]. L'origine des eaux est principalement souterraine avec quelques contributions des cours d'eau environnants en période de basses eaux. L'évolution piézométrique de l'aquifère, construite par interpolation des charges mesurées au droit des forages de la campagne de reconnaissance, indique un écoulement dirigé vers le nord, cohérent avec le modèle hydrogéologique régional, avec un gradient hydraulique horizontal d'environ 1,5 ‰ et des transmissivités mesurées entre $2 \cdot 10^{-5}$ m²/s et 10^{-3} m²/s. Localement, en fonction de l'épaisseur des Argiles tégulines et de la topographie, l'aquifère peut présenter un léger artésianisme (moins de 2 mètres). Les directions d'écoulement traduisent la prépondérance de son alimentation par infiltration au niveau des zones d'affleurement, mais une alimentation par drainance verticale ascendante depuis l'aquifère du Barrémien ne peut être complètement exclue. Les eaux des Sables verts, analysées à partir de prélèvements réalisés en forage, montrent que ce sont des eaux météoriques et peu minéralisées (moins d'un gramme par litre de solutés), « récentes » ou renouvelées. La composition géochimique des eaux des Sables verts varie localement, traduisant des différences dans leur vitesse de renouvellement.

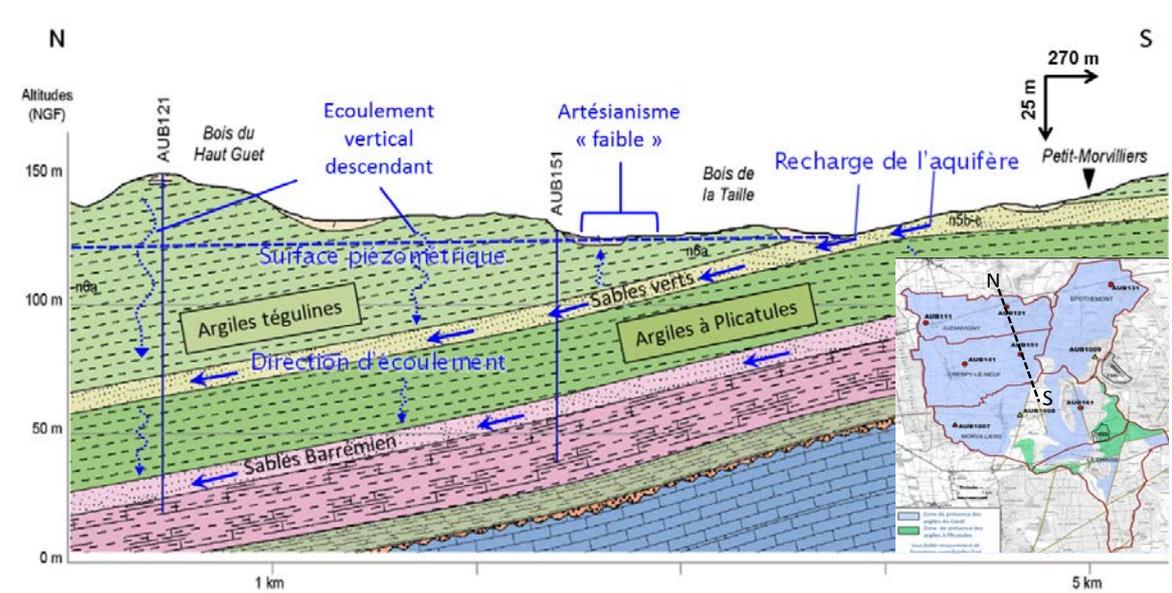


Figure 17 Coupe hydrogéologique interprétative nord-sud de l'aquifère des Sables verts sur le secteur d'étude (modifié d'après Kaelin et al., 1990)

L'aquifère du Barrémien est présent à l'affleurement à l'extrême sud du secteur puis il s'enfonce rapidement vers le nord-ouest sous les formations albo-aptiennes où il devient captif. Il est constitué d'un horizon irrégulier de sables fins souvent grésifiés dont l'épaisseur varie de 4 à 25 m, inséré entre les Argiles à Plicatules et les Argiles ostréennes du Barrémien (Figure 12) [15]. Sans exutoire permettant la vidange de débits notables dans le secteur, la nappe barrémienne reste quasiment confinée entre les deux formations argileuses qui l'encadrent avec un gradient hydraulique horizontal de l'ordre de 0,5 ‰. Les faibles gradients hydrauliques de l'aquifère du Barrémien sont caractéristiques d'une nappe pour laquelle la recharge (ou la vidange) est très faible mais sans pouvoir définir précisément une direction d'écoulement et donc identifier clairement ses zones d'alimentation. Les eaux du Barrémien, comme celle de l'aquifère des Sables verts sont météoriques et peu minéralisées, « récentes » ou renouvelées. Elles sont cependant plus anciennes que celles des Sables verts et présentent des compositions chimiques homogènes, avec un indice d'ancienneté plus élevé au nord du secteur. Leurs compositions chimiques et isotopiques sont différentes de celles des Sables verts.

Du fait des différences de charge hydraulique entre la nappe des Sables verts de l'Aptien et les formations superficielles, le gradient hydraulique vertical est descendant (valeur maximum de 0,5 m/m) sur une majeure partie du secteur, en particulier au nord, et ascendant à l'ouest (Figure 18). Là où il est ascendant, la nappe des Sables verts peut être faiblement artésienne suivant la topographie. A l'échelle du secteur d'étude, les écoulements sont donc globalement verticaux

descendants. Les nombres de Péclét⁶ estimés pour ces différents gradients de charge (entre 3 et 10) traduisent un transport de solutés plutôt convectif dominant. Toutefois, compte tenu de l'épaisseur des Argiles tégulines et de leur faible perméabilité, les flux d'eau et les vitesses d'écoulement sont faibles. Ainsi sur le plan hydraulique, les volumes d'eau échangés verticalement sont probablement insuffisants pour alimenter significativement la nappe des Sables Verts par rapport à la recharge au niveau des affleurements (Figure 17).

Aucune relation directe entre les deux aquifères n'a pu être mise en évidence à ce stade au cours des essais hydrogéologiques. Cependant, au vu des gradients hydrauliques verticaux estimés, une recharge limitée de la nappe des Sables verts par la nappe du Barrémien n'est pas à exclure.

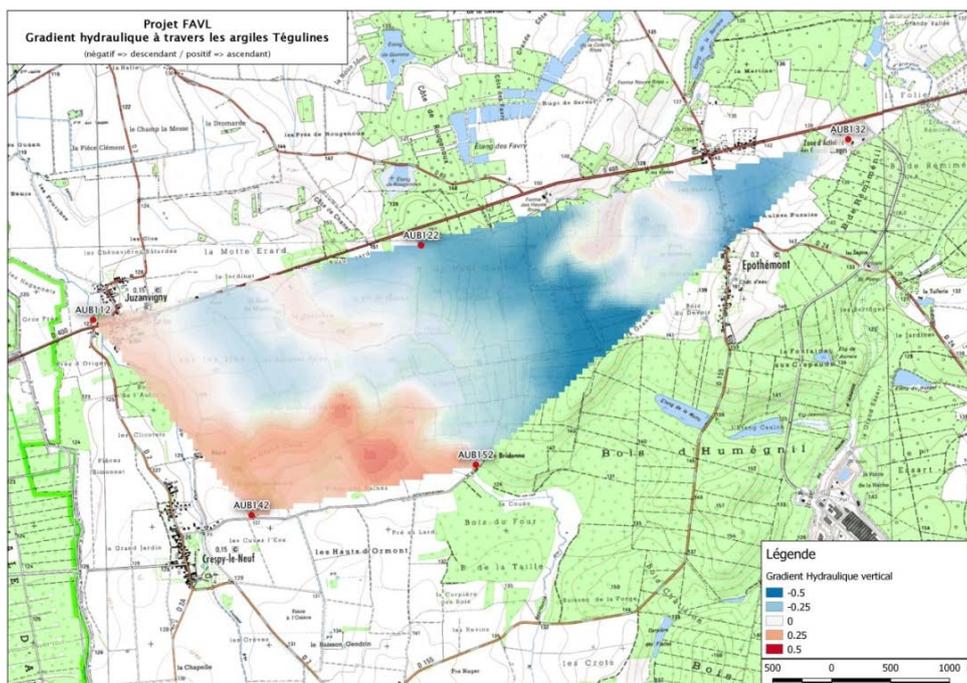


Figure 18 Carte de distribution spatiale du gradient hydraulique vertical à travers les Argiles tégulines au nord du secteur d'étude

2.5 L'évolution future du site

L'évaluation de l'évolution géomorphologique et hydrogéologique régionale et de l'aléa érosif futur repose sur la compréhension de l'évolution passée et sur l'estimation de la dynamique et la variabilité spatiale de cette évolution d'après les âges des formations sédimentaires. Elle associe des études de terrain (datations et caractérisations des formations superficielles, observations géomorphologiques...) et des travaux de simulation permettant des projections dans le futur.

Deux scénarios climatiques ont été considérés pour couvrir le domaine du possible en matière d'évolution climatique, et in fine géomorphologique :

- un scénario d'évolution climatique naturelle : il prévoit la poursuite de la période interglaciaire actuelle sur la durée des prochains 50 000 ans du fait des gaz à effet de serre déjà rejetés à ce jour ;
- un scénario d'évolution climatique perturbée, où il y aurait dès les prochains siècles un réchauffement rapide et la mise en place d'un climat de type subtropical en relation avec un pic de CO₂ atmosphérique lié aux activités humaines.

⁶ Nombre de Péclét : notamment utilisé pour le transfert de soluté en milieu poreux ; dans ce cas, il représente le rapport entre le temps caractéristique du transfert par diffusion (déplacement du soluté par gradient de concentration) et celui du transfert par convection (entraînement du soluté par l'écoulement de l'eau).

Le cas du scénario d'évolution climatique naturelle

L'évolution géomorphologique du secteur, sur la durée des prochains 10 000 ans et jusqu'à 50 000 ans, resterait faible du fait de la persistance d'un climat de type tempéré permettant le maintien d'une couverture végétale dense qui limite les ruissellements. L'érosion des terres sur cette durée pourrait être de l'ordre de quelques mètres. Au-delà de 50 000 ans, un climat boréal s'installerait marquant l'entrée en période de glaciation. L'érosion deviendra active et l'épaisseur des terrains érodés à 100 000 ans serait inférieure à 10 mètres.

L'évolution climatique impliquerait aussi le développement d'altérations mécaniques et physico-chimiques pénétrant en profondeur les formations de surface. Les processus d'altération chimique des sols actuels se poursuivraient. Les phénomènes d'altération les plus marquées se produiraient au-delà de 50 000 ans avec l'entrée en climat froid, à l'aplomb des vallons et sur la bordure ouest du secteur. Des processus déstructurant les matériaux se développeraient, comme la gélifraction⁷, la cryoturbation⁸ ou encore la création de réseaux de fentes en coins affectant les argiles altérées du fait des cycles gel-dégel avec croissances et fonte de lentilles de glace. Au-delà de 70 000 ans, sur tout le secteur, interviendrait la possibilité du développement d'un pergélisol pouvant pénétrer la couche argileuse sur toute son épaisseur jusqu'à l'aquifère des Sables verts sous-jacent.

L'évolution hydrogéologique modélisée pour l'est du bassin de Paris indique que les directions d'écoulement et les gradients associés des aquifères présents sur le secteur (formations des Sables verts et Sables du Barrémien) ne seraient pas significativement influencés par l'évolution géomorphologique au cours des prochains 100 000 ans. Sur les prochaines 50 000 ans, le gradient hydraulique vertical évoluerait peu à l'exception de l'apparition d'une zone à gradient hydraulique ascendant dans la partie orientale du secteur (secteur d'Epothémont voir sur Figure 19B) car l'évolution géomorphologique et l'aléa érosif sur le secteur resteraient faibles, du fait de la persistance d'un climat de type tempéré.

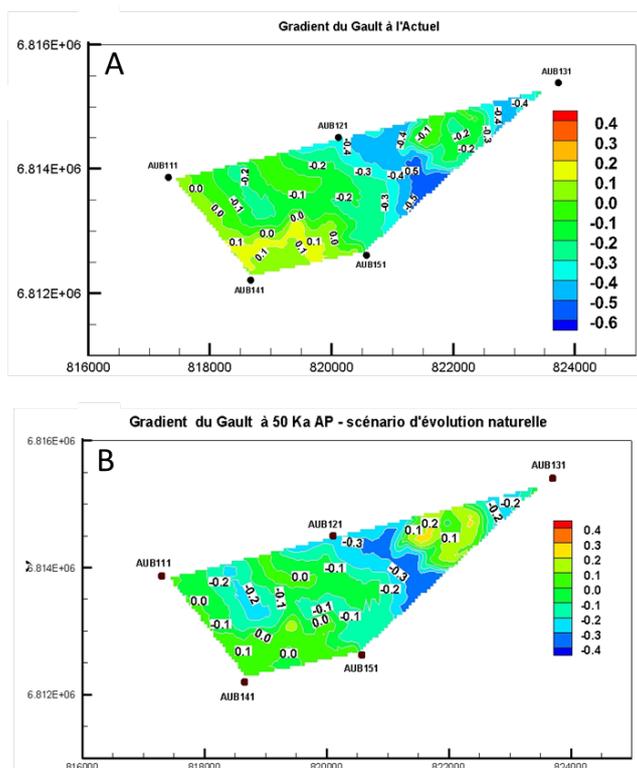


Figure 19 Evolution du gradient hydraulique vertical dans les Argiles tégulines sur la partie nord du secteur, pour le scénario d'évolution climatique naturelle : (A) gradient hydraulique vertical à l'actuel ; (B) gradient hydraulique vertical à 50 000 ans

⁷ Fragmentation des roches causée par les effets du gel et du dégel.

⁸ Phénomène géomorphologique affectant les couches superficielles du sol soumises à des alternances de gel et de dégel.

Le cas du scénario d'évolution climatique perturbée

Dès les prochains siècles, l'érosion serait active sur les zones de relief, du fait de l'installation d'un climat de type subtropical (caractérisé par des pluies méditerranéennes concentrées en automne et en hiver et de fortes sécheresses d'été) et de la déstabilisation du couvert végétal.

Durant les prochains 10 000 ans, des ravinements sur les versants et les zones à pente faible de la topographie actuelle au nord et nord-est du secteur, se développeraient avec des profondeurs pouvant atteindre 5 m. Jusqu'à 50 000 ans, le développement des ravinements se poursuivrait et pourrait atteindre localement 10 à 15 m de profondeur (par rapport à la surface actuelle). Ces ravinements affecteraient également les zones de plateau elles-mêmes abaissées de plusieurs mètres (de l'ordre de 5 à 10 mètres) par une érosion diffuse. Les vallées et vallons, ainsi que la plaine alluviale de Brienne en bordure ouest du secteur ne seraient pas soumises à l'érosion, mais à un alluvionnement. Au-delà de 50 000 ans, jusqu'à 100 000 ans, l'érosion resterait active. Elle se localiserait principalement à l'emplacement des zones formant encore des reliefs notables à cette époque, et correspondant aux points hauts du paysage actuel (situés au nord du secteur). En périphérie de ces zones, les zones basses actuelles resteraient des lieux de transit et de dépôt des produits de l'érosion. Sur cette période, les taux d'érosion cumulés sur 100 000 ans varieraient de 0 m dans les zones basses à plus de 15 m sur les points hauts du paysage actuel.

Des phénomènes d'altérations mécaniques et physico-chimiques très marqués se produiraient aussi du fait de la persistance de climats subtropicaux caractérisés par des forts contrastes hydriques saisonniers, des processus de dessiccation/ré-humidification et des processus de retrait-gonflement qui affecteraient la partie sommitale de la formation argileuse.

A 50 000 ans, la distribution du gradient hydraulique vertical dans les Argiles tégulines serait modifiée dans les zones où l'érosion est relativement importante comme au centre et au nord du secteur d'étude. Elle se caractériserait par une réduction de gradient dans les zones où l'écoulement est descendant (Figure 20).

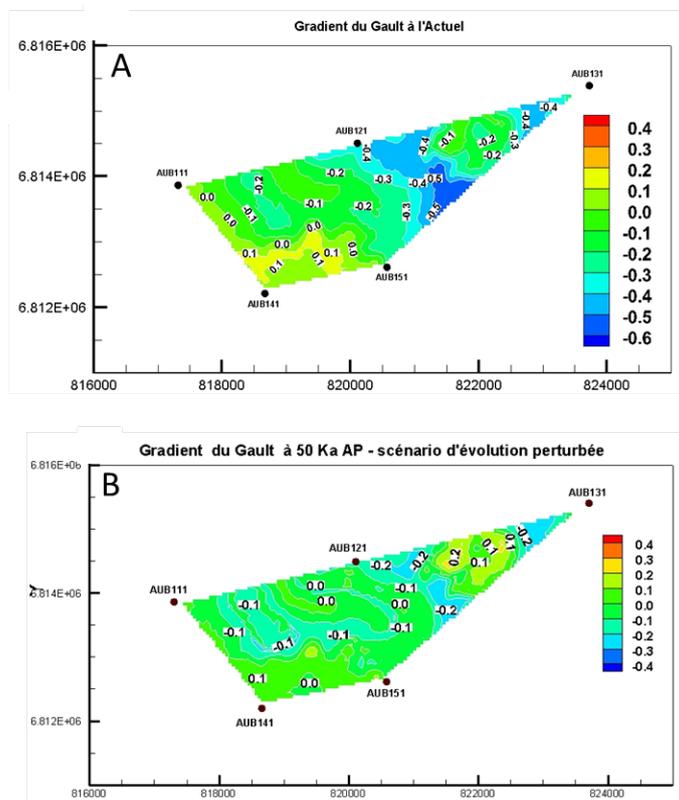


Figure 20 Evolution du gradient hydraulique vertical dans les Argiles tégulines sur la partie nord du secteur d'étude pour le scénario d'évolution climatique perturbée. (A) Gradient hydraulique vertical actuel (B) Gradient hydraulique vertical à 50 000 ans

L'évaluation de l'aléa érosif

Les estimations portant sur l'évolution future du secteur prennent en compte l'ensemble des modifications possibles avec chacun des deux scénarios climatiques, pour définir l'« enveloppe » des érosions et des altérations possibles aux dates de fin des situations considérées.

L'évolution géomorphologique produite dans le cas du scénario d'évolution climatique perturbée détermine l'aléa érosif sur l'ensemble du secteur durant les prochains 50 000 années, ainsi que sur les aires en relief pour la période 50 000 ans à 100 000 ans. Le scénario d'évolution climatique naturelle détermine quant à lui l'érosion possible dans les zones basses, fonds de vallées et vallons, à partir de 50 000 ans du fait de la phase d'érosion fluviale qui interviendra à cette époque.

L'aléa érosif sur le secteur d'étude se caractérise par sa variabilité spatiale et temporelle. La cartographie des taux d'érosion est en relation avec la topographie (Cf. Figure 21) :

- dans les vallées et vallons, jusqu'à 50 000 ans, l'aléa érosif resterait nul sur les zones basses du paysage actuel, et n'interviendrait ensuite qu'avec une amplitude limitée, de l'ordre de 1 à 5 mètres ;
- sur les zones les plus hautes du paysage actuel, les épaisseurs de terrains pouvant être affectées par l'érosion augmenteraient tout au long des prochains 100 000 ans jusqu'à atteindre plus de 15 m à l'emplacement des plus hauts reliefs actuels, notamment ceux en partie nord du secteur.

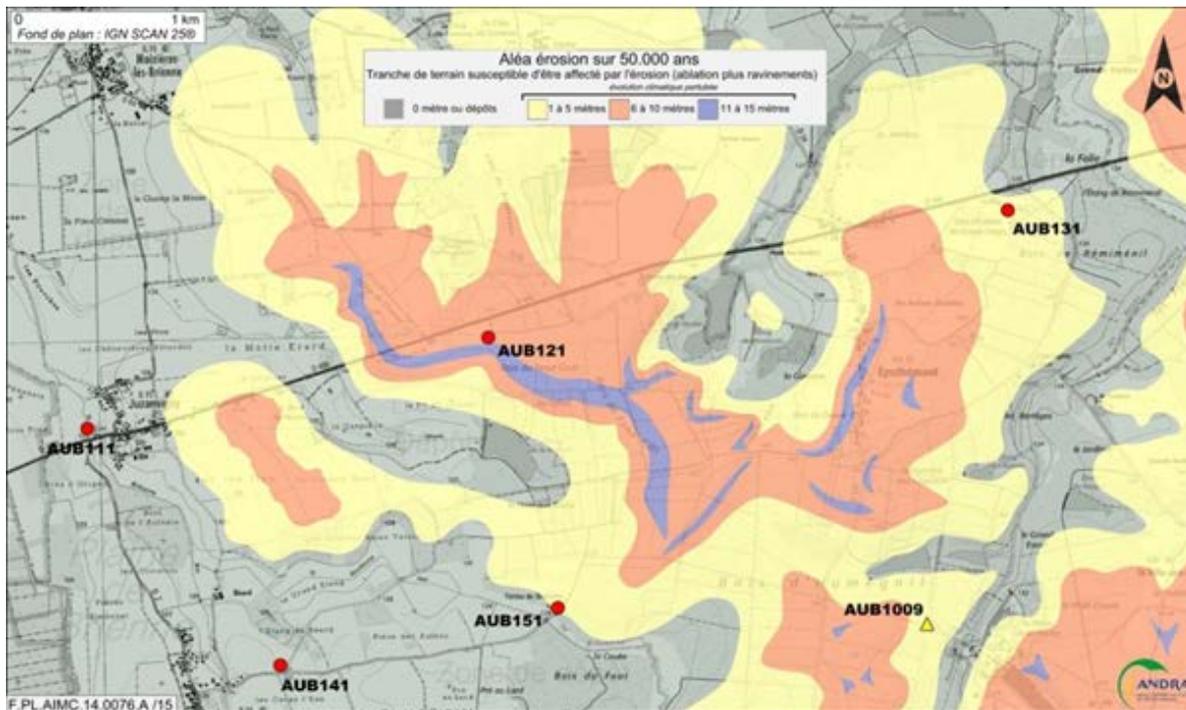


Figure 21 Carte de l'aléa érosif à 50 000 ans, considérant l'enveloppe des modifications prévues pour les deux scénarios d'évolution climatique, naturelle et perturbée

2.6 Les contraintes environnementales

Le secteur d'étude présente des contraintes environnementales liées majoritairement à la présence de zones naturelles sensibles. Celles-ci concernent principalement le sud de la commune d'Epothémont avec un classement du Bois d'Humégnil comme zone Natura 2000 et comme zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique de type 1 (ZNIEFF). La commune de Morvilliers, dans le cadre de l'élaboration de son plan local d'urbanisme (PLU), a un projet de classement d'une grande partie de ses espaces boisés. Une partie de ces espaces boisés, au nord du Cires, est classée en ZNIEFF de type 1. Le nord des communes de Juzanvigny et Epothémont sont recensées comme une zone importante pour la conservation des oiseaux.

3. Principes de sûreté pour la conception du stockage de déchets FA-VL

Ce chapitre rappelle les points fondamentaux des orientations générales de sûreté, identifie les fonctions de sûreté du stockage à faible profondeur pour satisfaire l'objectif précité, puis présente les principales caractéristiques du stockage permettant de les réaliser. Elles sont déclinées en fonctions de sûreté en exploitation et après fermeture.

Synthèse

La conception du stockage de déchets FA-VL à faible profondeur est fondée sur les orientations générales de sûreté émises par l'ASN en 2008 [4] qui précisent les objectifs de sûreté et les échelles de temps associées compte tenu (i) de la sensibilité d'un stockage à faible profondeur aux évolutions géodynamiques et climatiques et (ii) de la décroissance de la radiotoxicité des déchets envisagés. Elle prend également en compte le principe de défense en profondeur appliqué à toute installation nucléaire de base, conformément à l'arrêté du 7 février 2012 [18].

Compte tenu des résultats des études d'évolution prospective du site, le stockage est conçu pour satisfaire les fonctions de sûreté après fermeture suivantes sur au moins 50 000 ans : (i) isoler les déchets des activités humaines banales et des phénomènes d'érosion, (ii) limiter la circulation de l'eau, (iii) limiter le relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques et les immobiliser au plus près des déchets et (iv) retarder et atténuer la migration des substances relâchées hors des alvéoles de stockage. Au-delà de cette période, l'activité contenue dans les déchets devra avoir atteint un niveau résiduel tel que les expositions potentielles ne soient pas inacceptables même en cas de perte significative des propriétés de confinement du stockage.

Les caractéristiques du site en termes de fonctionnement hydraulique (faible gradient hydraulique descendant sur la partie nord du secteur d'étude) et les propriétés de rétention géochimique de l'argile hôte, la profondeur du stockage ainsi que les différents leviers de conception (matériaux, architecture, répartition des déchets dans les alvéoles...) sont mobilisés pour satisfaire les fonctions de sûreté attendues pour le stockage des déchets FA-VL à faible profondeur.

L'enjeu de sûreté après fermeture associé à ce stockage est sa capacité à confiner des radionucléides peu mobiles (vies courte et longue) et présentant une décroissance de leur radiotoxicité à l'échelle de 50 000 ans. L'activité résiduelle devant rester suffisamment faible pour ne pas induire d'impacts inacceptables, la gestion des radionucléides mobiles ou ne décroissant pas à l'échelle de 50 000 ans intégrera une limitation de la radioactivité introduite dans le stockage.

Les fonctions de sûreté en phase d'exploitation sont similaires à celles d'autres installations nucléaires, en prenant en compte les caractéristiques des déchets FA-VL. Les dispositions de conception mises en œuvre pour assurer ces fonctions seront précisées dans les phases suivantes de conception, en s'appuyant notamment sur le retour d'expérience des centres de stockage exploités par l'Andra.

3.1 Orientations générales de sûreté

Les orientations générales de sûreté de l'ASN rappellent l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage de déchets FA-VL :

« La protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage de déchets FA-VL. Elle doit être assurée envers les risques liés à l'exploitation et les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques pendant la phase d'exploitation, puis après la fermeture de l'installation de stockage.

Après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée.

En conséquence, le milieu géologique est choisi et l'installation de stockage est conçue de telle sorte que sa sûreté après fermeture soit assurée de façon passive afin de protéger les personnes et l'environnement des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir.

A cet égard, le concept retenu pour le stockage devra permettre de maintenir l'impact radiologique au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de la connaissance scientifique acquise, de l'état des techniques et des facteurs économiques et sociaux.

Les caractéristiques du site retenu, l'implantation de l'installation de stockage, la conception des composants artificiels (colis, composants ouvragés) et la qualité de leur réalisation constituent le fondement de la sûreté du stockage. Il convient donc de s'assurer de leur adéquation à l'objectif fondamental. Dans ce cadre, des évaluations de l'impact radiologique et chimique seront effectuées pour vérifier que l'objectif est bien atteint ».

Leur préambule souligne les spécificités de l'installation compte tenu des caractéristiques des déchets FA-VL :

« (...) La conception d'une installation de stockage de déchets FA-VL devra donc principalement viser à confiner les déchets efficacement pendant la durée de décroissance précitée (quelques 10^e ans). Au terme de cette durée, l'activité contenue dans les déchets devrait 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. Une installation de surface faisant l'objet d'une surveillance institutionnelle ne peut apporter de garantie suffisante de confinement des déchets sur une telle durée. Aussi, une installation de stockage de déchets FA-VL devra être conçue en cohérence avec la plupart des objectifs généraux et des principes de sûreté à long terme retenus pour le stockage de déchets de moyenne et haute activité à vie longue (MA-VL/HA) en couche géologique profonde. Une installation de stockage de déchets FA-VL 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 FA-VL 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 limites d'activité seront donc des éléments fondamentaux pour définir les catégories de déchets susceptibles d'être acceptées dans un stockage de déchets FA-VL, au vu du site et du concept retenu. »

Les orientations générales de sûreté soulignent que la stabilité du site devra être démontrée pendant une période d'au moins 10 000 ans selon l'évolution de la nocivité des déchets stockés et que le milieu géologique devra assurer l'isolement des colis de déchets face aux activités humaines banales et aux perturbations géologiques attendues :

« La stabilité du milieu géologique devra être telle que les éventuelles modifications des conditions initiales dues aux phénomènes géologiques qui peuvent survenir (glaciation, sismicité, mouvements néotectoniques) restent acceptables pour la sûreté du stockage. Il est recommandé que le choix du site et que la conception de l'installation de stockage soient tels que l'on puisse déterminer l'évolution de l'installation de stockage sur une période de temps suffisante au regard de l'évolution de la nocivité des déchets stockés. En particulier, la stabilité du milieu géologique (qui englobe une évolution limitée et prévisible) devra être démontrée pour une période qui doit être égale au moins à 10 000 ans.

La profondeur de l'installation de stockage doit être telle que la sûreté du stockage ne puisse être affectée de façon significative par les phénomènes naturels externes attendus (érosion, séismes ...) ou par les activités humaines banales au moins jusqu'à ce que l'activité contenue dans l'installation ait atteint un niveau tel que les expositions de l'homme et de l'environnement demeurent acceptables, même en cas de perte de la fonction d'isolement assurée par le milieu géologique ou la couverture.

La profondeur d'implantation des déchets dans la formation géologique dépend des caractéristiques radioactives des différentes catégories de déchets à stocker. Le concepteur devra justifier la profondeur retenue en fonction de ces catégories. »

Elles rappellent également que le stockage doit être conçu selon une approche relevant du principe de défense en profondeur, qui est retenu pour la conception et l'exploitation des installations nucléaires :

« Le principe de défense en profondeur, pour les installations nucléaires, conduit à la mise en place de lignes de défense successives aptes à prévenir l'apparition ou, le cas échéant, à limiter les conséquences de défaillances techniques, humaines ou organisationnelles susceptibles de conduire à des situations accidentelles pouvant affecter la protection de l'homme ou de l'environnement. ».

3.2 Fonctions de sûreté après fermeture

Les travaux de reconnaissance et les études prospectives d'évolution du site qui ont été menés conduisent à considérer que des évolutions géomorphologiques majeures peuvent intervenir à l'échelle de 50 000 à 100 000 ans selon le scénario d'évolution climatique considéré (cf. chapitre 2).

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, d'au moins 50 000 ans (échelle conservative), 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 évolution plus rapide du site de stockage liée aux évolutions climatiques et à l'aléa érosif, par exemple la formation d'un pergélisol, voire une érosion totale de la couverture argileuse (reconstituée ou naturelle) pouvant conduire à une mise à nu des déchets.

Les fonctions de sûreté après fermeture identifiées dans les orientations générales de sûreté de l'ASN sont déclinées en prenant en compte les différentes voies de transfert. Conformément au principe de défense en profondeur, la complémentarité des fonctions de sûreté allouées à chaque composant du stockage est recherchée. Les études de conception du stockage permettent de caractériser et d'évaluer ces fonctions ainsi que d'identifier les dispositions à mettre en œuvre pour respecter les objectifs de sûreté en tenant compte des spécificités des différents types de déchets FA-VL et des caractéristiques du site étudié.

La première fonction consiste à isoler les déchets des phénomènes naturels (aléa érosif) 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 des conditions de transfert des solutés (flux d'eau, convection et/ou diffusion), de la cinétique de libération des substances radioactives et chimiques contenues dans les déchets (terme source) et des mécanismes d'interaction qui ralentissent leur déplacement (sorption/précipitation de ces substances pendant leur transfert). Cela implique les fonctions suivantes :

- limiter la circulation de l'eau ;
- 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) ;
- retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques relâchées hors des alvéoles de stockage⁹.

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

Au-delà de 50 000 ans, la protection de l'homme et de l'environnement à très long terme repose en premier lieu sur la limitation de l'activité dans le stockage. Si nécessaire des règles de répartition de l'activité seront définies sur la base d'évaluations de l'impact du stockage aux grandes échelles de temps, en adoptant l'hypothèse extrême d'une érosion totale de la couverture.

⁹ « 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.

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

Conformément aux pratiques internationales, la nature du site et la profondeur d'implantation considérées préservent le stockage d'activités humaines banales et des phénomènes d'érosion. Pour réduire la possibilité d'une intrusion humaine 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 au bout d'une durée, considérée à ce jour, de l'ordre de 500 ans. Au-delà de cette durée, des intrusions humaines involontaires dans le stockage sont donc considérées comme possibles. Les scénarios de sûreté exploratoires examinés dans le cadre de l'évaluation de la faisabilité du stockage prennent en compte de tels évènements.

3.2.2 Limiter la circulation de l'eau

L'implantation du stockage à faible profondeur dans une couche d'argile de faible perméabilité permet de limiter la circulation de l'eau.

Les études menées montrent que la perméabilité des Argiles tégulines hôtes, le contraste de perméabilité entre ces argiles hôtes et la couverture (dans le cas d'une couverture reconstituée), la charge hydraulique de la nappe sous-jacente et la topographie déterminent le sens et la nature des transferts par l'eau verticaux.

Sur la base des résultats des investigations géologiques du site menées, l'Andra a étudié le fonctionnement hydraulique du stockage à partir de simulations numériques d'écoulement pour déterminer les modalités de transfert des solutés dans l'argile. La présence d'un gradient hydraulique faible (cf. chapitre 2) favorise la limitation de la circulation de l'eau.

3.2.3 Limiter le relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques et les immobiliser au plus près des déchets

La fonction de sûreté précédente limite le débit d'eau atteignant les déchets, induisant une mise en équilibre des conditions aqueuses au sein du stockage avec ses composants (déchets et matériaux mis en œuvre pour réaliser le stockage).

La stabilité chimique des déchets définit la fraction hydrosoluble des éléments radioactifs et toxiques pouvant migrer sous eau en fonction du temps et des conditions physico-chimiques régnant dans le stockage. Cette fraction correspond au terme source des déchets.

Les matériaux du stockage peuvent également contribuer à limiter le relâchement des éléments par les déchets puis les immobiliser dans le stockage par précipitation et sorption lorsqu'ils sont relâchés. La connaissance du comportement des déchets en conditions de stockage est ainsi liée au comportement physico-chimique des matériaux dans les ouvrages de stockage.

Pour les déchets radifères, les radioéléments contenus restent de manière générale peu solubles, les différents composés d'insolubilisation (barytine, phosphates...) présentant une grande stabilité chimique sur une large gamme de conditions physico-chimiques. A titre d'illustration, l'insolubilisation du radium initial sous forme de solution solide avec la barytine présente une stabilité avérée depuis les conditions argileuses jusqu'aux conditions alcalines imposées par des matériaux cimentaires. Pour les déchets dans lesquels le radium initial ne ferait pas l'objet d'un traitement d'insolubilisation, l'utilisation de matériaux cimentaires dans le stockage peut contribuer à piéger le radium au plus près des déchets. Des travaux sont menés pour évaluer et caractériser les processus de piégeage du radium dans des matrices cimentaires.

Le thorium contenu dans les déchets radifères est un élément peu sensible aux conditions d'environnement, tant d'un point de vue acido-basique que redox. Sa mobilité est extrêmement limitée, avec une faible solubilité et une forte sorption tant sur les matériaux argileux que cimentaires. Il est néanmoins nécessaire de vérifier que la mobilité des descendants du thorium 230 notamment le radium 226 reste aussi limitée et d'évaluer l'impact potentiel de la formation de colloïdes sur la mobilité du thorium.

La mobilité de l'uranium est sensible aux conditions physico-chimiques dans le stockage, en particulier vis-à-vis du redox. Des études sont menées afin d'évaluer les transitoires d'oxydo-

réduction au sein du stockage. Plusieurs dispositions de conception peuvent être considérées pour favoriser un retour vers des conditions réductrices :

- une implantation du stockage (et de la partie confinante de la couverture) sous la limite séculaire entre zone saturée et zone non saturée sera étudiée pour favoriser le maintien de conditions anoxiques ;
- 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 un retour vers des conditions anoxiques ;
- des matériaux cimentaires pourront être utilisés au sein du stockage, limitant la mobilité de l'uranium (VI) (forme dans laquelle se trouve l'uranium en conditions oxydantes), tout autant que celle de l'uranium (IV) (forme dans laquelle se trouve l'uranium en conditions réductrices).

L'influence des conditions salines est à l'étude, en particulier sur la capacité de rétention de l'uranium au sein du ciment. Cette étude permettra notamment d'évaluer si la limitation des nitrates présents dans certains déchets radifères est nécessaire.

Les conditions de relâchement des toxiques chimiques présents dans les déchets radifères sont également à l'étude.

Pour les déchets de graphite, les principales contraintes que suscite leur stockage à ce stade de la conception sont liées à leurs activités en chlore 36 et en carbone 14. La fonction de limitation du relâchement renvoie à la cinétique de relâchement par le graphite et aux possibilités de rétention par les matériaux cimentaires introduits dans le stockage (colis et alvéoles).

L'état actuel des connaissances conduit à considérer un terme source du chlore 36 sous eau entièrement labile¹⁰. Des recherches sont en cours pour en caractériser la part non labile éventuelle (incorporée au cœur du graphite) ainsi que la vitesse de relâchement associée. Par ailleurs, il a été établi que les matériaux cimentaires présentent des capacités de retard du chlore 36.

Le carbone 14 inorganique (gaz ou dissous) 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. Concernant le carbone 14 organique, l'état actuel des connaissances conduit à le considérer comme mobile. Le graphite permet néanmoins de limiter son relâchement. Les études et recherches à venir permettront de conforter les taux de relâchement attendus par le graphite et d'identifier les mécanismes de rétention possibles dans des matériaux cimentaires et les Argiles téglines.

Pour les déchets bitumés, la présence d'iode 129 renvoie à la même problématique que le chlore 36. Les déchets bitumés contiennent également du technétium 99 qui est mobile en conditions oxydantes. A l'instar des déchets radifères, cela conduit à mettre en œuvre des dispositions pour favoriser un retour vers des conditions réductrices dans le stockage et les préserver.

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

La migration de la fraction de radionucléides relâchés dans l'eau est retardée et atténuée dans la garde d'argile hôte et la couverture respectivement par les conditions géochimiques et par les distances de transfert.

Sur la base des données de site acquises, l'adéquation de la couche d'argile et de l'implantation des alvéoles de stockage à la réalisation de cette fonction (épaisseur d'argile, perméabilité, propriétés géochimiques...) est vérifiée à travers les évaluations de performances du stockage vis-à-vis des transferts par la voie eau, explicités au chapitre 5.

La période radioactive du carbone 14, son inventaire et sa cinétique de relâchement par le graphite ainsi que la limitation de la migration de sa forme inorganique par l'argile permettent de bénéficier de sa décroissance radioactive avant qu'il n'atteigne la biosphère.

¹⁰ Soit un taux de relâchement de 1 an⁻¹

Pour le radium 226, sa période radioactive et la limitation de sa migration par l'argile permettent de bénéficier de sa décroissance radioactive avant qu'il n'atteigne la biosphère.

Retarder et atténuer la migration des toxiques chimiques repose sur les mêmes mécanismes que ceux mobilisés pour les radionucléides, en prenant en compte leur forme chimique et les conditions d'oxydo-réduction.

3.2.5 Limiter l'exhalaison de gaz radioactif à la surface

Limiter l'exhalaison de gaz radioactif à la surface repose sur la maîtrise du dégazage par les colis de déchets et sur le confinement des gaz par les composants ouvragés et le milieu géologique, permettant de bénéficier de leur décroissance avant l'atteinte de l'environnement.

Dans le cas des déchets radifères, cela concerne la migration du radon (particulièrement le radon 222 de période d'environ 3,8 jours issu du radium 226) qui doit être suffisamment retardée pour bénéficier de sa décroissance radioactive avant qu'il ne parvienne à 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 l'exhalaison de radon 222 est également favorisé par la limitation du relâchement de son ascendant, le radium 226, au plus près des déchets.

Pour les déchets de graphite, cette fonction concerne le tritium et la fraction éventuelle du carbone 14 organique relâché sous forme gazeuse. Les études et recherches sur la caractérisation des déchets permettront de quantifier cette fraction.

En fonction de l'inventaire en radionucléides gazeux, une implantation des alvéoles de stockage et des premiers mètres de couverture au-dessus des alvéoles sous la limite séculaire entre zone saturée et zone non saturée permettrait de limiter leur migration sous forme dissoute. En effet plus l'espace poral des matériaux traversés est saturé en eau, plus la vitesse de propagation du gaz est lente.

3.3 Fonctions de sûreté en exploitation

Sur la base de la démarche ALARA¹¹, l'étude de sûreté en exploitation s'attachera à vérifier que les dispositions de maîtrise des risques retenues sont suffisantes pour prévenir et détecter les aléas internes et externes et protéger les installations, les personnes et l'environnement des conséquences potentielles des risques identifiés. Ces dispositions seront adaptées au niveau de dangerosité des déchets FA-VL.

Le principe de défense en profondeur conduit à retenir un ensemble de barrières de confinement, efficaces pendant toute la phase d'exploitation de l'installation de stockage. Ainsi, la conception des colis de déchets, les installations et le processus d'exploitation doivent permettre de maintenir un niveau de contamination aussi faible que possible dans les différents locaux du site et limiter les rejets de substances radioactives dans l'environnement, sur la base d'un confinement statique réalisé par les colis de déchets FA-VL et d'un confinement statique et dynamique (ventilation nucléaire) des locaux, le cas échéant.

Pour les installations de surface et de subsurface, les principales fonctions de sûreté en exploitation sont de confiner la radioactivité, de protéger les personnes contre l'irradiation, de rester sous-critique et d'évacuer les gaz formés par radiolyse.

¹¹ As low as reasonably achievable

4. Options de conception à l'étude

Synthèse

Des études préliminaires de conception ont été réalisées sur la base des caractéristiques du site investigué. Les alvéoles de stockage des déchets seraient implantées à une vingtaine de mètres de profondeur dans la formation des Argiles téglines. Il est à noter que la profondeur d'implantation pourra être adaptée dans la suite des études selon la typologie des déchets. Elle est analysée au regard de l'épaisseur totale de la formation hôte, de la garde inférieure nécessaire (distance entre le fond du stockage et l'aquifère) pour assurer le confinement des radionucléides, de la profondeur minimale pour favoriser des conditions anoxiques, de l'évolution géomorphologique du site, de son fonctionnement hydraulique et des scénarios d'intrusion humaine involontaire.

Les études d'ingénierie couvrent deux options de conception fondées sur des techniques de creusement éprouvées industriellement pour la réalisation d'ouvrages à faible profondeur (terrassement depuis la surface et creusement de galeries souterraines).

Dans la première option de conception, le niveau d'implantation serait atteint par un terrassement depuis la surface. Les colis de déchets seraient stockés dans des alvéoles creusées dans l'argile hôte, les vides entre colis sont comblés par un coulis de ciment. Après exploitation, les alvéoles de stockage seraient refermés par une couverture homogène de faible perméabilité, reconstituée avec de l'argile excavée.

La seconde option de conception consisterait en un stockage des colis de déchets dans des galeries souterraines. Une fois exploitées, les galeries seraient remblayées avec des Argiles téglines excavées et le stockage serait refermé avec des scellements.

Une première estimation des emprises nécessaires pour l'implantation d'un futur centre de stockage de déchets FA-VL intégrant la création de capacité supplémentaire de stockage pour les déchets TFA. Cette emprise serait de l'ordre de 200 hectares (2 km²).

Ces deux options sont prises en compte dans les études de sûreté décrites au chapitre 5.

4.1 Profondeur de stockage et techniques de creusement associées

Tenant compte de la connaissance actuelle du site, l'analyse préliminaire qui a été menée montre qu'une profondeur d'implantation entre 20 et 30 m est compatible avec le niveau de dangerosité de l'ensemble des déchets étudiés. Cette profondeur d'implantation permet de disposer d'une garde inférieure d'au moins 20 à 30 m.

Cette plage de profondeurs permet de réduire le risque d'une intrusion humaine, préservant ainsi les fonctions de confinement du stockage sur 50 000 ans (il est supposé une érosion maximale d'une dizaine de mètres à 50 000 ans).

Au regard des profondeurs visées, différentes techniques de creusement sont étudiées : excavation à ciel ouvert et creusement de galeries. Ces options offrent une flexibilité vis-à-vis des exigences futures de conception qui seront précisées au fur et à mesure du développement du projet et de l'acquisition des connaissances sur la zone restreinte et sur les déchets.

Dans la première option, le niveau d'implantation des ouvrages de stockage serait atteint par un terrassement des Argiles téglines depuis la surface. Les colis de déchets seraient disposés dans des alvéoles et les vides entre colis comblés par un coulis de ciment. Après exploitation, les alvéoles de stockage seraient refermés par une couverture de faible perméabilité, constituée avec des Argiles téglines excavées, et recouverte par une couche de terres végétales de 2 m environ reconstituant le niveau naturel du site.

La seconde option consiste en un stockage des colis de déchets dans des galeries creusées à partir d'un accès depuis la surface (descenderies). Une fois exploitées, les galeries seraient remblayées avec des Argiles téglines excavées et le stockage serait refermé avec des scellements.

Les sections suivantes présentent un point d'avancement des études techniques menées sur ces deux options.

4.2 Stockage avec terrassement depuis la surface

4.2.1 Hypothèses générales

Le futur centre de stockage serait composé de différents ensembles dont des zones de stockage et des installations de soutien en surface tels que des locaux d'accueil, d'entreposage de transit des colis livrés, de contrôle commande et surveillance, des aires de gestion des déblais et des eaux. A ce stade, il est supposé que les colis livrés ne nécessitent pas de compléments de colisage sur site avant leur stockage. L'opportunité de réaliser certaines opérations sur le site de stockage (injection, compactage...) sera examinée en lien avec les producteurs dans une logique d'optimisation d'ensemble.

Le futur centre comporterait une zone d'exploitation pour les déchets FA-VL et une zone pour les déchets TFA. L'hypothèse retenue est de considérer une séparation entre les zones d'exploitation des déchets FA-VL et TFA. Seules les installations associées aux déchets FA-VL relèvent du régime des installations nucléaires de base¹².

Les descriptions ci-après sont relatives aux installations accueillant des déchets FA-VL. La conception des installations accueillant des déchets TFA est supposée, à ce stade des études, similaire à celle du Cires. Une adaptation à la configuration du site d'implantation et au volume des déchets TFA à venir sera étudiée dans les phases suivantes du projet.

A ce stade des études, les différentes familles de déchets FA-VL sont supposées regroupées par plateforme de stockage en tenant compte de la nature physico-chimique et des inventaires radiologiques de chaque typologie de déchets. Cela laisse également la possibilité d'adapter si nécessaire la conception des zones et alvéoles de stockage aux caractéristiques de chaque catégorie de déchets. Trois plateformes de stockage distinctes sont ainsi considérées :

- Plateforme de stockage 1 : déchets radifères et à radioactivité naturelle renforcée ;
- Plateforme de stockage 2 : déchets de graphite (empilements, chemises et déchets UNGG de la Hague) ;
- Plateforme de stockage 3 : déchets bitumés, CBF-C'2 et REI.

Sur la base de ces hypothèses, un premier dimensionnement a conduit à estimer une emprise du centre de l'ordre de 200 hectares (2 km²).

Il est à noter que le dépôt de munitions du camp militaire de Brienne-le-Château engendre une servitude d'utilité publique, en limite ouest des communes de Crespy-le-Neuf, Juzanvigny et Morvilliers.

4.2.2 Schéma de principe de la zone de stockage FA-VL

Dans l'option d'un stockage avec terrassement depuis la surface, le futur centre comprendrait quatre aires principales présentées à la Figure 22 et explicitées ci-après.

L'aire de stockage

Cette aire comprendrait les plateformes excavées à -20 m de profondeur à partir desquelles seraient creusés les alvéoles de stockage ainsi que des voieries d'accès au fond des plateformes, des réseaux de drainage et diverses emprises dédiées à la construction et au soutien logistique. La Figure 23 illustre la géométrie d'une plateforme de stockage.

La forme de la plateforme du stockage est contrainte par les caractéristiques géologiques et géomécaniques de l'argile hôte. Le travail de définition de l'architecture des plateformes de stockage sera poursuivi dans la suite du projet, en intégrant les contraintes identifiées liées à l'interaction avec le fonctionnement hydraulique du stockage et les performances de sûreté après fermeture.

¹² Les installations relatives aux déchets TFA, classées ICPE à l'instar du Cires, seront situées à l'extérieur du périmètre de l'INB

L'aire de gestion des terres

Cette aire renfermerait l'ensemble des stocks de terres (verses) issues des terrassements initiaux (terre végétale, déblais de réglage des plateformes, de creusement des bassins,...) et de l'excavation des plateformes et alvéoles ainsi que les voiries et divers dispositifs de drainage et d'étanchéité de cette aire. Une partie des terres serait réutilisée notamment pour la réalisation de la couverture du stockage.

L'aire de gestion des eaux pluviales

Outre des voiries et réseaux divers, cette aire comprendrait principalement les divers bassins de décantation et d'orage recueillant l'ensemble des eaux pluviales non contaminées drainées sur le centre avant remise des eaux dans l'environnement. Ces bassins ont notamment pour fonction la régulation des débits et de la qualité des eaux (matières en suspension...).

L'aire d'accueil et des installations de surface

Cette aire contiendrait tous les bâtiments, équipements, voiries, et servitudes nécessaires aux travaux et à l'exploitation du site (bureaux, magasins, entreposage de matériel...). Elle serait structurée en (i) une zone conventionnelle (accueil du personnel et fonctions support de maintenance, gardiennage, accueil des entreprises, entreposage des matériaux) et (ii) une zone nucléaire comprenant les installations et équipements nécessaires à la prise en charge des déchets et aux différentes opérations (contrôles en ligne, déchargement des emballages de transport, entreposage tampon des colis, éventuel traitement, et chargement des colis de déchets sur les moyens de transport avant leur mise en alvéole).

A ces zones s'ajouteraient les installations et équipements transverses tels que clôtures, voiries et réseaux divers, utilités, collecte des déchets induits et des eaux à contrôler ...

4.2.3 Dispositions envisagées pour la construction

L'excavation des plateformes et alvéoles à ciel ouvert se ferait au moyen de procédés classiques (terrassement grande masse, transport en tombereaux...).

Les modalités de gestion des eaux constituent un élément important dans la réalisation d'une l'installation de stockage par excavation à ciel ouvert. Elles influent sur la bonne tenue des talus des plateformes de stockage, des ouvrages de stockage et sur la protection des colis de déchets vis-à-vis d'une arrivée d'eau. Le besoin de collecter l'eau au fond des plateformes nécessiterait la mise en place d'infrastructure et d'équipements d'exhaure de l'eau. Une alternative serait de protéger les plateformes de stockage au moyen d'un bâtiment abri de grande portée.

Les dimensions des alvéoles de stockage, leur nombre et leur disposition sont déterminés en tenant compte (i) des volumes de déchets à stocker, (ii) de contraintes d'exploitation telles que la hauteur admissible de gerbage des colis de déchets, des dimensions des équipements d'exploitation et (iii) des caractéristiques géotechniques des Argiles tégulines.

Les dimensions envisagées à ce stade pour les alvéoles seraient de 20 mètres de largeur et de 80 mètres de longueur en tête pour une profondeur de 6 mètres avec des talus auto-stables pentés à 45°. Ces dimensions seraient adaptables pour optimiser le remplissage des alvéoles en fonction des dimensions des colis et de leur agencement dans l'alvéole.

D'autres techniques de stabilité des talus des alvéoles sont explorées, notamment l'utilisation de parois moulées (cf. Figure 24).

Les études à venir intégreront l'analyse de cette technique en termes de faisabilité et de sûreté à long terme.

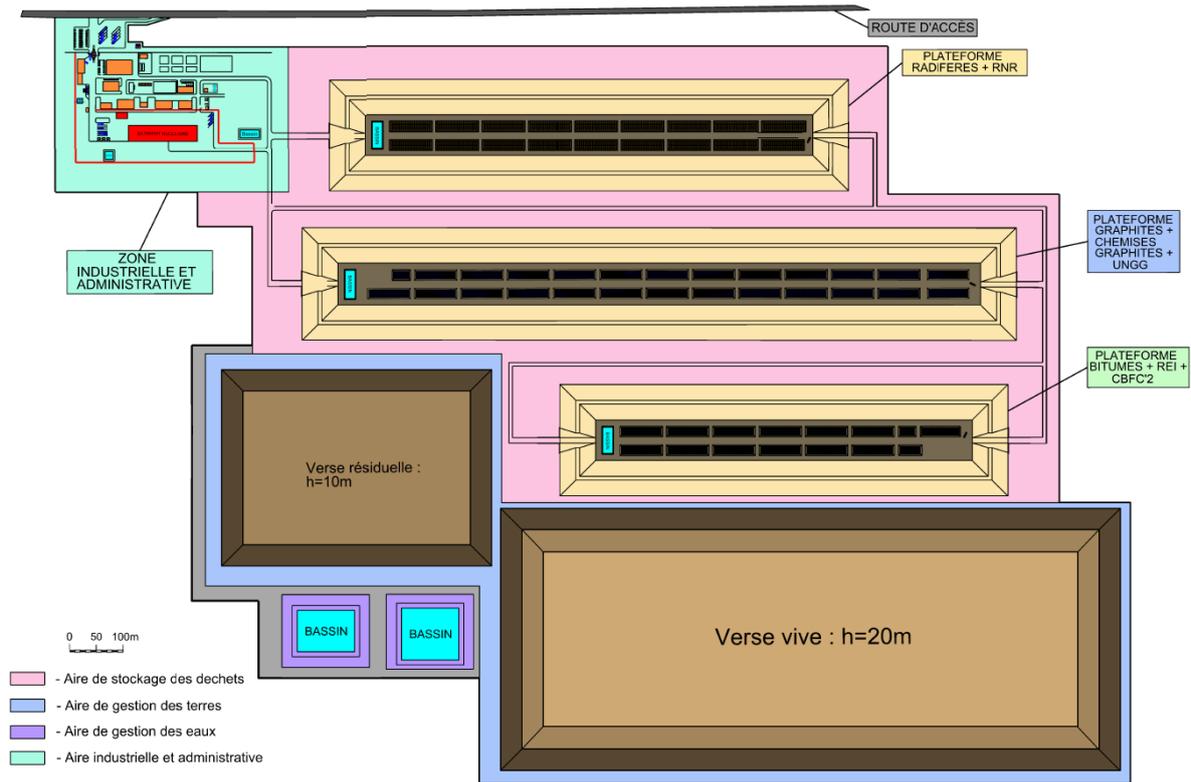


Figure 22 Illustration de la zone de stockage FA-VL dans le cas d'un stockage avec terrassement depuis la surface

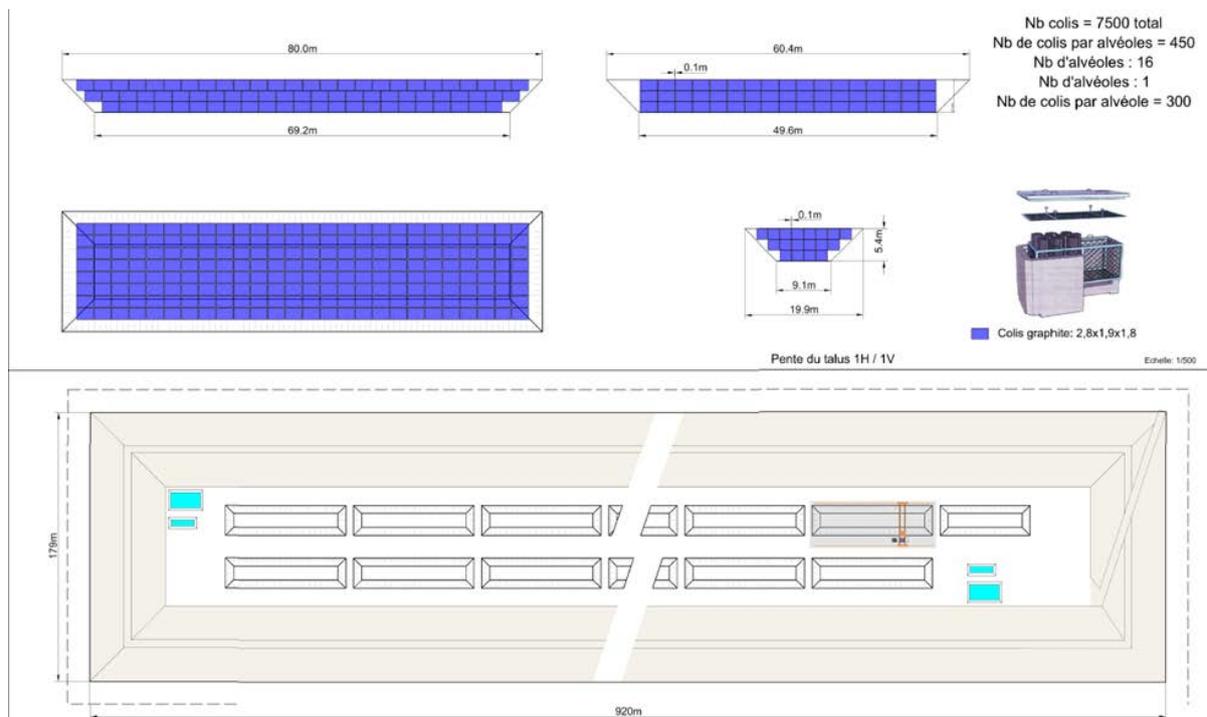


Figure 23 Illustration d'une plateforme de stockage contenant des alvéoles de déchets graphite

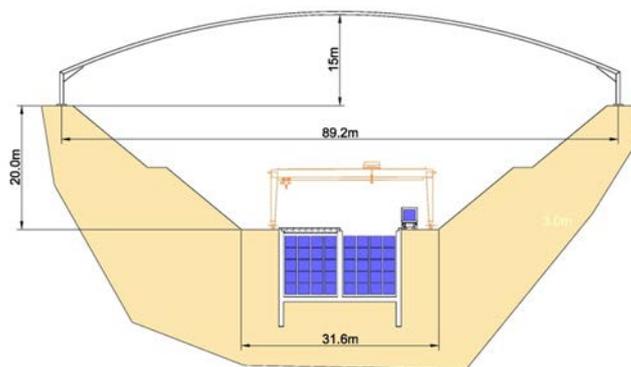


Figure 24 Coupe type d'une plateforme sous abri avec alvéoles en parois moulées

4.2.4 Dispositions envisagées pour l'exploitation

Le process d'exploitation démarrerait, en zone conventionnelle par l'accueil des camions (vérifications des documents de transport) et leur contrôle radiologique. Arrivés en zone nucléaire de surface, les emballages de transports seraient déchargés et contrôlés. La gestion des colis de déchets (hors colis de type fûts¹³) s'effectuerait au travers des opérations de déchargement, transfert, entreposage tampon, contrôle et chargement sur le véhicule de transfert vers l'aire de stockage.

La manutention de mise en stockage comprendrait :

- le déchargement des véhicules et la mise en alvéole des colis de déchets par couches ;
- le comblement des espaces entre colis et la mise en place d'une couche de forme en matériau cimentaire ;
- la fermeture des alvéoles remplis, par une dalle de protection biologique à base de liant hydraulique.

Pour les abriter des eaux de pluies, les alvéoles seraient protégés, en phase de creusement, d'exploitation et de fermeture, par un bâtiment abri sous lequel circulerait un pont roulant comme pratiqué sur les centres de stockage de surface de l'Andra (voir Figure 25).

¹³ Les fûts tels que utilisés pour le stockage des déchets radifères peuvent être transférés dans leur emballage de transport jusqu'aux alvéoles

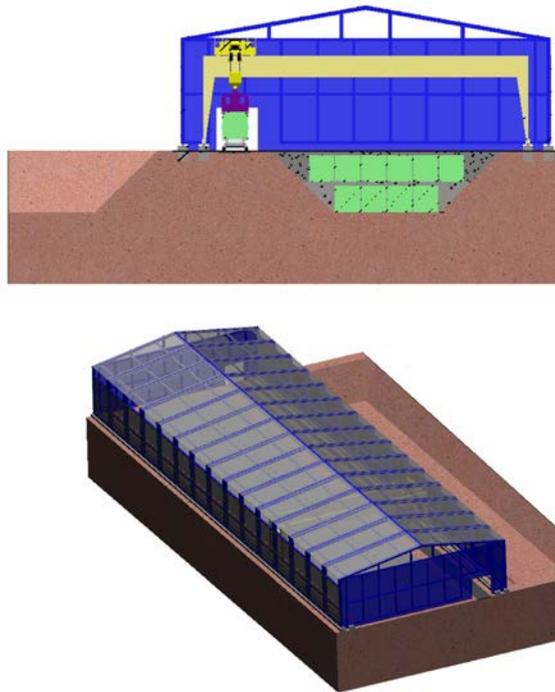


Figure 25 Exemple d'exploitation d'alvéole sous abri avec pont

Les alvéoles exploitées seraient couvertes par une couverture provisoire. A la fin de l'exploitation de la plateforme les opérations de fermeture pourraient être réalisées avec notamment la réalisation de la couverture définitive.

Le process d'exploitation offrirait une capacité opérationnelle moyenne d'environ 15 colis stockés par jour (exploitation sur un poste). Selon l'ordonnancement des colis livrés et les plateformes réalisés en premier investissement, une co-activité peut avoir lieu entre l'exploitation nucléaire et des travaux de creusement et d'équipement des alvéoles suivants. Ces éléments seront analysés dans la suite du projet en lien avec les besoins des producteurs en termes de délais de désentreposage et de démantèlement pour l'expédition des colis vers le centre de stockage.

4.2.5 Dispositions envisagées pour la fermeture

En fin d'exploitation, les dispositions et équipements liés à l'exploitation (pont, bâtiment abri, chaussées...) et à la gestion des eaux (dispositifs de drainage, bassins, protection des talus...) seraient ôtés des fonds et talus de plateformes. L'argile mise en stock serait reprise pour reconstituer la couverture de la zone de stockage jusqu'au niveau naturel du terrain initial avec une couche de terre végétale en partie supérieure (cf. Figure 26).

L'argile serait remise en place par couche successives de 20 à 30 cm d'épaisseur dans des conditions de mise en œuvre apportant les meilleurs résultats de compacité et d'imperméabilité.

La couverture argileuse est sensible aux tassements différentiels pouvant apparaître au sein du massif de déchets sous-jacent et aux interfaces avec l'argile hôte. Pour maîtriser ces tassements, différentes pistes seront explorées dans la suite des études notamment :

- limiter au maximum les déformations au sein des alvéoles et des colis ;
- utiliser un matériau répartissant les déformations éventuelles en base de couverture ;
- réaliser la couverture en deux temps. Une première partie permettant de suivre la phase transitoire de stabilisation des tassements dans le massif de déchets et dans la couverture et de vérifier l'absence de cheminement préférentiel de l'eau à la jonction avec l'argile hôte. La deuxième phase permettrait de mettre en place une couverture supplémentaire constituée de matériaux durables de protection résistant à l'érosion et aux intrusions animales et végétales. Elle offrirait aussi la possibilité de réutiliser les versées résiduelles au droit des plateformes ;

- mettre en place des dispositions passives permettant l'observation et la surveillance de la couverture pour vérifier son bon comportement et pour effectuer, au cours de la phase transitoire de stabilisation des tassements de la couverture, d'éventuelles réparations en tant que de besoin (retour d'expérience des couvertures industrielles (CSM, Cires, installations de stockage de déchets conventionnels, noyaux d'étanchéité de barrage...) et expérimentales (SEC du CSA)) ;
- structurer la couverture en forme de toit appuyé sur les talus latéraux de façon à favoriser la stabilité mécanique et un fonctionnement en compression favorable à la préservation des performances de la couverture dans le temps.

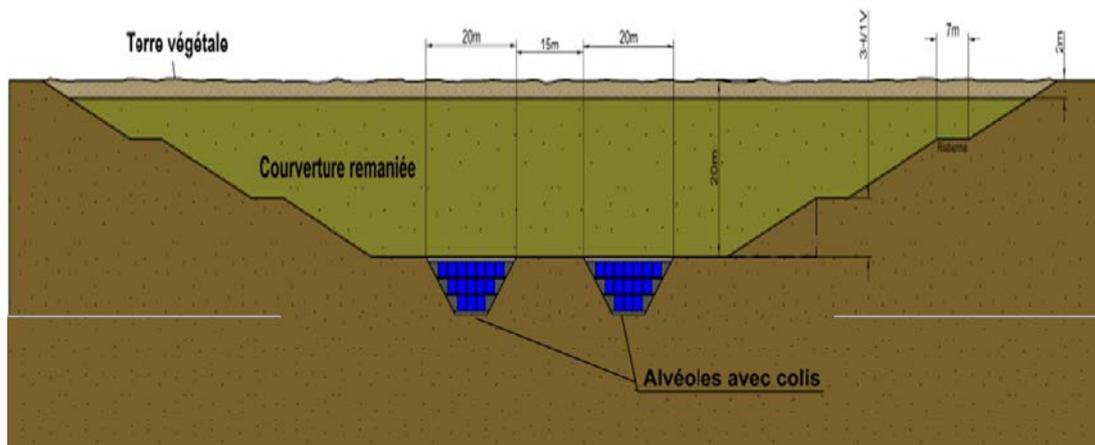


Figure 26 Coupe type de la plateforme de stockage couverte dans l'option de terrassement depuis la surface

4.2.6 Points clés de conception

L'option de stockage avec terrassement depuis la surface implique de réaliser une couverture de grandes dimensions. Ses performances en termes de propriétés hydro-dispersives (perméabilité, diffusion, porosité) et géochimiques (redox) constituent un point clé de la conception du stockage. L'homogénéité de la couverture contribue à la pérennité de ses performances dans le temps.

Les études menées à ce stade montrent que les propriétés hydro-dispersives de la couverture sont liées à son comportement hydromécanique, lui-même influencé par les paramètres suivants :

- les propriétés intrinsèques de l'argile de site excavée ;
- les dimensions et les conditions d'exécution de la couverture ;
- la présence de vides résiduels dans les colis de déchets, leur dégradation et le tassement qui en résulte ;
- les déformations différées des matériaux de remplissage introduits dans les ouvrages de stockage.

Les essais menés sur des échantillons remaniés d'Argiles tégulines montrent un caractère favorable à la compaction et la possibilité d'atteindre des perméabilités faibles. Il est par ailleurs possible d'adapter la configuration des ouvrages de stockage de manière à réduire la largeur et la longueur de la couverture et corollairement sa sollicitation mécanique. La réalisation de la couverture en plusieurs phases permettrait de reprendre des tassements éventuels et de mettre en place des dispositifs de surveillance et les moyens curatifs associés pendant la phase de surveillance du stockage. Cette couverture présente une similitude avec des ouvrages existants (centres de stockage de surface de l'Andra, installations de stockage de déchets conventionnels, barrages, etc.) sur lesquels l'Andra peut s'appuyer pour sa conception.

Afin de conforter cette option de conception, les études et recherches à venir s'attacheront à (i) justifier les performances attendues de la couverture au regard des caractéristiques du site et des déchets, (ii) accéder à un bon niveau de compréhension des phénomènes impactant les performances de la couverture et (iii) identifier les éléments de conception et les dispositions constructives permettant d'obtenir et de maintenir dans le temps les performances attendues. Les études de

conception à venir approfondiront également les modalités de gestion des eaux en construction et en exploitation ainsi que les modalités de gestion des gaz radioactifs en exploitation et après la fermeture.

4.3 Stockage en galeries souterraines

Les hypothèses explicitées pour l'option de stockage en excavation à ciel ouvert restent applicables à la présente option.

4.3.1 Schéma de principe de la zone de stockage FA-VL

Une illustration du plan masse est présentée à la Figure 27.

Les alvéoles de stockage seraient des galeries horizontales dans lesquelles sont disposés les colis de déchets. A ce stade un diamètre utile de 4 à 5 mètres et une longueur de 400 m sont considérés (cf. Figure 28). Un soutènement/revêtement en béton assure la stabilité mécanique des alvéoles.

Deux ouvrages de liaison surface-fond assureraient le transfert des colis et la ventilation en souterrain. D'autres ouvrages pourraient être envisagés pour permettre la construction de nouveaux alvéoles simultanément à la mise en stockage de colis de déchets.

Les ouvrages de liaison consisteraient en des galeries pentées à 10 % sur une longueur de 350 m pour atteindre le niveau d'implantation du stockage. Ces galeries seraient prolongées par des galeries horizontales ou à faible pente pour desservir les alvéoles de stockage.

Au stade actuel des études, l'hypothèse retenue pour le diamètre utile des galeries de liaison est de 8 m. Cette configuration intégrerait les volumes nécessaires à la ventilation et aux réseaux.

La distance entre axes de deux galeries de liaison parallèles est prise, à ce stade, de l'ordre de 50 m (5 fois le diamètre excavé des ouvrages). Des recoupes placées tous les 400 m environ permettent l'évacuation des personnels et l'intervention des secours en cas d'incendie.

4.3.2 Dispositions envisagées pour la construction

La méthode de creusement des alvéoles de stockage doit préserver les propriétés de confinement favorables de la formation des Argiles téglines. Elle doit donc limiter les déformations du terrain sus-jacent et limiter l'endommagement de la roche. Pour cela les solutions de creusement adaptées aux propriétés géo-mécaniques des Argiles téglines et aux profondeurs d'implantation étudiées sont (i) le creusement au tunnelier pleine face à pression, qui assure un soutien des terrains et limite ainsi leur déconfinement lors du creusement et (ii) le creusement à la machine à attaque ponctuelle sous bouclier, avec voûte parapluie et boulonnage du front. Ces techniques conditionnent l'architecture du stockage et son emprise souterraine.

A l'instar de l'option avec terrassement depuis la surface, un travail d'implantation des alvéoles de stockage sera mené en recherchant une optimisation entre l'utilisation de l'épaisseur d'argile disponible, le choix de favoriser la garde inférieure ou supérieure en tenant compte de l'aléa érosif et des performances de sûreté à long terme, un déploiement réaliste du stockage et des données économiques. Ces éléments permettront au final de définir des moyens de creusement et un plan d'architecture.

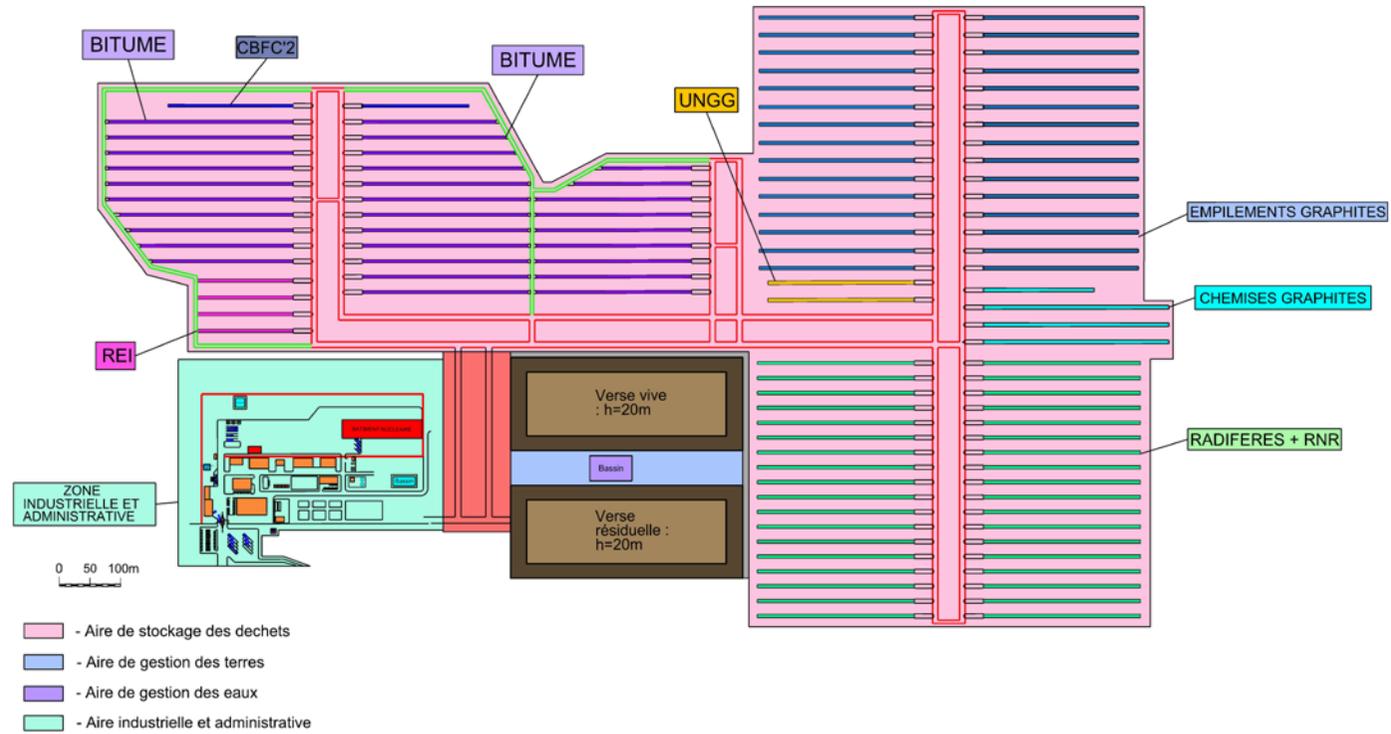


Figure 27 Illustration de la zone de stockage FA-VL dans le cas d'un stockage en galeries souterraines

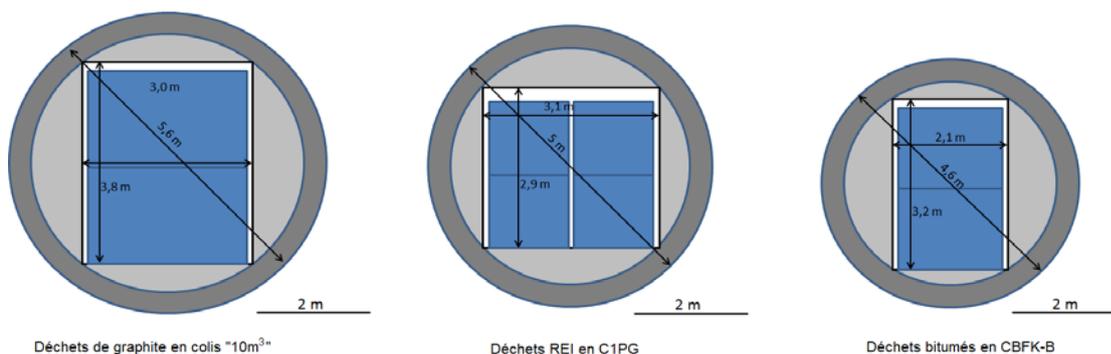


Figure 28 Illustration d'une coupe des alvéoles de stockage

4.3.3 Dispositions envisagées pour l'exploitation

Le processus de mise en stockage serait analogue à celui présenté pour l'option de stockage avec terrassement depuis la surface. La zone nucléaire est similaire avec toutefois deux points spécifiques :

- la tête de l'ouvrage de transfert des colis en souterrain serait intégrée dans la ligne de maintenance ;
- des unités de ventilation pour le souterrain seraient implantées en surface.

Les moyens de maintenance et les dispositifs de sûreté en exploitation seront définis en les adaptant à la spécificité des déchets FA-VL et à la faible profondeur de leur stockage.

A l'instar de l'option de stockage avec excavation à ciel ouvert, si l'étude à venir sur l'ordonnancement des colis livrés conduit à une nécessité de co-activité entre l'exploitation et des travaux de creusement de nouveaux alvéoles, des ouvrages de liaisons supplémentaires et une séparation physique de ces deux activités seraient nécessaires.

4.3.4 Dispositions envisagées pour la fermeture

La fermeture du stockage comprendrait le remblayage des galeries de liaison avec l'argile excavée suffisamment compactée pour limiter les déformations à long terme de la formation des Argiles téglines au droit du stockage, ainsi que la réalisation de scellements à base de bentonite (argile gonflante) pour limiter les circulations d'eau.

4.3.5 Points clés de conception

Les points clés de conception pour l'option de stockage en galeries souterraines comprennent la préservation des caractéristiques de l'argile hôte¹⁴ lors du creusement, la gestion des risques en exploitation en milieu souterrain confiné (incendie, gestion des gaz radioactifs et produits par radiolyse...), la gestion de la co-activité éventuelle entre creusement et mise en stockage des colis de déchets.

¹⁴ La caractérisation d'une zone endommagée (par creusement) éventuelle devra être réalisée sur la base des argiles de site

5. Evaluation préliminaire de la sûreté du stockage

Ce chapitre présente une première évaluation de sûreté en exploitation et après fermeture en s'appuyant sur l'état actuel des connaissances relatives aux caractéristiques des colis de déchets et du site investigué ainsi que sur les options de conception étudiées pour le projet de stockage et les modes d'exploitation associés.

Les évaluations de sûreté visent à apprécier la réalisation des fonctions de sûreté (cf. chapitre 3) et le respect des critères de protection radiologique. Elles sont fondées sur des analyses qualitatives d'incertitudes et de risques ainsi que sur des évaluations quantitatives de performances.

Dans le cadre d'une démarche itérative, l'analyse de sûreté sera approfondie à chaque étape de la conception, en intégrant les nouvelles connaissances acquises.

Synthèse des résultats

A ce stade des études, les évaluations préliminaires de sûreté montrent que les caractéristiques des déchets considérés ne sont pas rédhibitoires à la poursuite de l'étude de leur stockage à faible profondeur dans les Argiles tégulines sur le site investigué.

- Evaluation de sûreté après fermeture

Vis-à-vis des transferts par l'eau, les évaluations ont porté sur les indicateurs de débits molaires en sortie d'argile hôte et de couverture ainsi que sur les indicateurs d'impact radiologique aux exutoires, en explorant différentes performances des composants du stockage (déchets, matériaux ouvragés cimentaires, formation des Argiles tégulines, couverture reconstituée) pour les deux options de conception étudiées.

Dans le cas d'un stockage en galeries souterraines, le gradient de charge hydraulique descendant conduit à favoriser un transfert des solutés dans la formation argileuse dominé par une convection descendante.

Dans le cas d'un stockage avec couverture reconstituée (excavé à ciel ouvert), il peut exister un contraste de perméabilité entre les Argiles tégulines en place et la couverture reconstituée à base d'Argiles tégulines excavées. Avec l'hypothèse d'un niveau de perméabilité d'une couverture classique¹⁵ (environ 10^{-9} m/s), la voie de transfert ascendante par la couverture peut devenir significative, avec un régime diffusif dominant. Le gradient hydraulique dans l'argile hôte est descendant et conduit à un transfert des solutés dans la garde inférieure d'argile dominé par une convection descendante.

Pour les déchets radifères, les radioéléments contenus présentent des propriétés de sorption élevées dans les Argiles tégulines et les matériaux cimentaires. De ce fait, leur transfert est très limité et leur flux molaire en sortie d'argile hôte ou de couverture est négligeable. Cette évaluation confirme la possibilité de leur stockage à faible profondeur sur le site investigué. Pour conforter les propriétés de rétention retenues, les études et recherches à venir s'attacheront à évaluer l'influence de la chimie des déchets sur la mobilité des radioéléments.

Pour les déchets de graphite, les principaux radionucléides à enjeu vis-à-vis des transferts par l'eau sont le carbone 14 (du fait de sa fraction relâchée en solution sous forme organique) et le chlore 36. Les empilements (blocs), qui comprennent plus de 90 % de l'inventaire en carbone 14 des déchets de graphite, contribuent à limiter le relâchement du carbone 14 ce qui permet de bénéficier de sa décroissance radioactive. Des compléments de R&D sont néanmoins nécessaires pour consolider la cinétique de relâchement de ce radionucléide dans des conditions représentatives du stockage. Concernant le chlore 36, son inventaire est limité. La sorption dans les matériaux cimentaires atténue d'un ordre de grandeur son transfert vers les exutoires. La majorité de l'inventaire en chlore 36 reste ainsi confinée dans le stockage à l'horizon de 50 000 ans. Les études à venir s'attacheront à consolider cette capacité de rétention en lien avec l'altération des matériaux cimentaires.

¹⁵ Cf. réglementation pour les installations de stockage de déchets conventionnels

Pour les déchets bitumés FA-VL, les principaux radionucléides à enjeu vis-à-vis des transferts par l'eau sont l'iode 129 et le technétium 99. L'impact radiologique de l'iode 129 est limité du fait de son faible inventaire. Il est à noter que des perspectives de baisse de cet inventaire sont envisagées par le CEA car les mesures effectuées à ce jour sont systématiquement inférieures aux limites de détection. La mobilité du technétium 99 est sensible aux conditions redox (radionucléide non sorbé en conditions oxydantes). La maîtrise du transitoire redox au sein du stockage et notamment de la couverture constitue ainsi un enjeu pour la suite des études. La prise en compte de conditions réductrices dans la couverture conduirait à atténuer fortement sa mobilité par rétention dans l'argile.

Les performances du stockage en matière de limitation de l'exhalaison de gaz radioactifs seront évaluées dans la suite des études après consolidation des données sur le dégazage des colis de déchets.

Vis-à-vis des scénarios d'intrusion humaine involontaire, l'analyse de sûreté a été réalisée en considérant des scénarios conventionnels, de type forage de reconnaissance géotechnique, chantier routier et implantation d'une résidence sur le stockage après érosion totale de la couverture. Les évaluations montrent que, pour les deux options de conception étudiées, les impacts radiologiques de ces scénarios altérés restent suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes. Par ailleurs, certaines dispositions constructives (répartition de colis de déchets dans le même alvéole, architecture des plateformes de stockage...) pourront contribuer à limiter ces impacts. Ces dispositions seront approfondies dans la suite des études.

- Evaluation de sûreté en exploitation

L'analyse préliminaire de sûreté en exploitation a permis d'identifier les familles de déchets dimensionnantes pour lesquelles des dispositions spécifiques de conception seront développées. Il s'agit à ce stade des colis CBF-C'2, des fûts d'enrobés bitumineux et les colis de déchets UNGG de la Hague.

Les déchets radifères et de graphite présentent un enjeu de caractérisation des colis vis-à-vis du dégazage respectivement du radon et du tritium et carbone 14. Ces éléments sont dimensionnants pour les modalités de gestion des rejets gazeux en exploitation.

Dans la suite des études et les itérations de sûreté à venir, les résultats et les conclusions d'analyses de risques en exploitation seront pris en compte pour l'élaboration des critères d'acceptation en stockage des colis de déchets.

Les études menées à ce stade conduisent à poursuivre l'analyse des deux options de conception étudiées. Elles feront l'objet d'une analyse multicritères plus approfondie qui s'attachera aux avantages et inconvénients de chaque option pour les différentes phases de vie du stockage notamment vis-à-vis de la construction (coût, délais de réalisation...), de l'exploitation (sûreté en exploitation, gestion des rejets, performance industrielle...) et après fermeture (sûreté après fermeture, performance de réalisation des ouvrages de fermeture...). Sur cette base, les techniques de réalisation optimales seront choisies.

5.1 Analyse de sûreté après fermeture

La sûreté après fermeture d'une installation de stockage à faible profondeur dépend notamment des propriétés favorables de la formation des Argiles tégulines, de la profondeur d'implantation du stockage, du rôle complémentaire des composants ouvrages (colis, ouvrages, couverture ou scellements) et de la limitation de l'activité radiologique stockée.

Pour évaluer les performances du système de stockage en matière de confinement vis-à-vis des transferts par l'eau, les évaluations menées à ce stade ont visé à préciser la contribution des différents composants du stockage à la réalisation des fonctions de sûreté. Des études de sensibilité ont permis de préciser les paramètres à enjeu qui devront être consolidés dans la suite du programme d'études et de recherches. Ces évaluations constituent une première étape dans le travail itératif qui permettra dans la suite des études de définir un domaine de fonctionnement représentatif de l'évolution probable du stockage (situation de référence) et des situations altérées correspondant à l'occurrence d'événements incertains, mais plausibles. A ce stade, les évaluations se sont fondées sur des situations exploratoires décrivant le relâchement de radionucléides et toxiques chimiques et leur migration jusqu'à l'environnement accessible à l'homme. Les performances du stockage en

matière de limitation de l'exhalaison des gaz radioactifs seront évaluées dans les phases suivantes du projet lorsque les données nécessaires sur le dégazage des colis de déchets auront été consolidées.

A ce stade, des situations d'intrusion humaine involontaire ont été identifiées en tenant compte de la profondeur du stockage et de l'évolution géodynamique. L'impact radiologique potentiel sur l'homme de ces situations altérées a été évalué.

5.1.1 Evaluation des performances de confinement des déchets après fermeture

5.1.1.1 Le cadre des évaluations

Pour évaluer les performances du stockage en matière de confinement vis-à-vis des transferts par l'eau, une modélisation préliminaire de l'évolution du stockage, de la circulation des eaux souterraines et de la migration des substances radioactives a été réalisée. En cohérence avec les fonctions de sûreté après fermeture attendues (cf chapitre 3.2), l'approche permet d'apprécier les contributions des différents composants du stockage et du milieu géologique à la limitation des relâchements dans l'environnement. Des indicateurs de performances et de sûreté tels que les débits molaires de radionucléides en sortie d'un composant du stockage et les impacts radiologiques aux exutoires permettent d'analyser le fonctionnement du stockage selon les différentes options étudiées.

Les évaluations réalisées à ce stade se fondent sur des analyses exploratoires. Elles constituent une première étape avant de définir dans la suite des études une situation de référence et des situations altérées. Ces évaluations sont mises en regard des critères de protection définis par les orientations générales de sûreté de l'ASN [4], qui distinguent différentes périodes temporelles pour l'évaluation :

« Pour la situation de référence après la fermeture de l'installation de stockage, les doses efficaces individuelles calculées ne devront pas excéder la valeur de 0,25 mSv/an pour des expositions prolongées liées à des événements certains ou très probables.

Les évaluations des expositions individuelles seront fondées sur une modélisation de l'évolution de l'installation de stockage, en particulier des colis et des composants ouvragés, ainsi que sur une modélisation de la circulation des eaux souterraines et de la migration des substances radioactives en solution et sous forme gazeuse.

Les événements à considérer sont :

- *les événements liés à la présence de l'installation de stockage, aux défauts de réalisation et à l'ensemble des processus de dégradation progressive des colis et des composants ouvragés,*
- *un ensemble d'événements naturels probables.*

La stabilité (qui englobe une évolution limitée et prévisible) du milieu géologique devant, selon les critères du chapitre 5 [Bases de conception liées à la sûreté], être démontrée pour une période d'au moins 10 000 ans, la valeur des résultats des prévisions portant sur cette période devrait pouvoir être attestée de façon objective, notamment sur la base d'études d'incertitudes explicites. La contrainte de dose de 0,25 mSv/an sera retenue pour vérifier que la conception du stockage satisfait l'objectif fondamental de sûreté.

Au-delà de cette période, les incertitudes sur l'évolution de l'environnement de l'installation de stockage augmentent progressivement. Des estimations quantifiées majorantes des expositions individuelles devront néanmoins être faites, éventuellement complétées par des appréciations qualitatives des résultats de ces estimations compte tenu des facteurs d'évolution du milieu géologique, de façon à vérifier que le relâchement des substances radioactives ne conduit pas à des doses inacceptables. Lors de cette vérification, la valeur de 0,25 mSv/an précédemment citée sera conservée comme référence. »

Sur ces bases et en tenant compte des résultats des études sur l'évolution géodynamique et climatique du site (cf. chapitre 2.5), l'Andra distingue les périodes successives suivantes. Ces périodes sont associées à des critères de protection radiologique :

- jusqu'à 10 000 ans : la définition des scénarios s'appuie sur un choix déterministe des paramètres de sûreté, fondé sur une analyse des connaissances incluant les études prospectives

d'évolution du stockage et de leurs incertitudes. Les évaluations d'impact en scénario d'évolution normale doivent respecter la contrainte de dose de 0,25 mSv/an.

- De 10 000 à 50 000 ans : la définition des scénarios s'appuie sur un choix conventionnel des paramètres de sûreté sur la base des études prospectives d'évolution du stockage et des incertitudes associées. Les impacts obtenus seront appréciés en référence à la valeur de 0,25 mSv/an.

A ce stade, les hypothèses et les résultats des évaluations exploratoires des transferts par l'eau, correspondent à l'intervalle temporel de 0 à 50 000 ans. Au-delà de 50 000 ans, la définition des scénarios s'appuiera sur un choix conventionnel des paramètres en privilégiant des choix de valeurs pénalisantes.

Les critères de protection pour les toxiques chimiques ont été définis par analogie avec la démarche d'évaluation des risques sanitaires associés aux substances chimiques définie pour les études d'impact des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). A titre indicatif, l'approche utilisée met en œuvre les valeurs toxicologiques de référence (VTR), telles que décrites par le guide INERIS [20]. Elle exprime l'impact chimique en termes (i) d'excès du risque individuel (ERI)¹⁶ pour les éléments à effet sans seuil et (ii) de quotient de danger (QD)¹⁷ pour les éléments à effets à seuil. Cette approche s'applique aux scénarios d'exposition chronique.

5.1.1.2 Paramètres considérés

Propriétés du milieu géologique

Pour l'option de stockage en galeries, une implantation en milieu de la couche d'Argiles tégulines a été considérée, avec l'hypothèse d'une épaisseur de formation argileuse de 60 m et d'une garde de 27 m de part et d'autre du stockage (6 m). Pour l'option de stockage réalisée par terrassement depuis la surface, il a été considéré une épaisseur de couverture reconstituée de 20 m (formation superficielle comprise), des alvéoles de 6 m de hauteur et une garde inférieure d'argile de 34 m. Des études de sensibilité à ces paramètres ont également été réalisées.

Les propriétés hydro-dispersives et géochimiques du milieu géologique ont été calées sur la base des résultats des différentes mesures réalisées dans le cadre de la campagne d'investigations géologiques (cf. chapitre 3) et sur des calculs de spéciation. La formation des Argiles tégulines a été considérée avec des propriétés hydro-dispersives et géochimiques homogènes sur son épaisseur en retenant des valeurs moyennes pour les différents paramètres associés. Des conditions réductrices ont été considérées dans l'argile naturelle. Un gradient de charge hydraulique vertical descendant de -0,3 m/m a été retenu.

L'aléa érosif a été pris en compte avec l'hypothèse d'une épaisseur érodée de 5 m à 10 000 ans et de 10 m à 50 000 ans ainsi que d'une évolution spatio-temporelle des valeurs de certains paramètres d'écoulement et de transfert des radionucléides (évolution progressive du gradient de charge hydraulique dans les Argiles tégulines, évolution de la perméabilité, de la diffusion, de la porosité et du coefficient de retard dans la couverture). Il est à noter que la prise en compte de l'aléa érosif ne conduit pas à modifier le sens des écoulements dans l'argile hôte qui restent verticaux descendants.

Couverture d'argile au-dessus des alvéoles de stockage

Dans le cas d'un stockage réalisé par excavation à ciel ouvert, les alvéoles de stockage seront recouvertes après leur fermeture par une couverture reconstituée à partir des Argiles tégulines excavées. Les hypothèses suivantes ont été considérées à ce stade des études : la couverture est constituée (i) d'une première couche de 6 m avec une perméabilité de 10^{-9} m/s (ces performances sont étayées par le retour d'expérience d'ouvrages analogues), (ii) d'une deuxième couche de 12 m

¹⁶ L'excès du risque individuel. Traduit la probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé qu'un individu a de développer un cancer associé à la substance pendant sa vie du fait de l'exposition considérée. L'ERI correspond au produit du niveau d'exposition à la substance chimique (concentration dans l'eau, concentration dans l'air, dose journalière d'exposition dans le cas des transferts à la biosphère) par la valeur toxicologique de référence caractéristique de l'effet considéré et de la voie d'atteinte considérée.

¹⁷ QD : Quotient de Danger. Il correspond au rapport du niveau d'exposition à la substance chimique (concentration dans l'eau, dans l'air ou dose journalière d'exposition dans le cas des transferts dans la biosphère) sur la valeur toxicologique de référence (valeur en dessous de laquelle les effets systémiques ne se manifestent pas). *L'INERIS utilise la terminologie IR (Indice de Risque) à la place de la terminologie QD.*

d'argile avec une perméabilité de 10^{-8} m/s et (iii) d'une couche de terre végétale (épaisseur 2 m, perméabilité de 10^{-6} m/s). Dans le cas d'un stockage en galeries, la garde supérieure d'Argiles tégulines a été considérée avec les mêmes caractéristiques que les Argiles tégulines en place. L'endommagement lié au creusement n'a pas été pris en compte à ce stade.

Composants cimentaires

Des matériaux cimentaires sont mis en place dans le stockage au niveau des colis (conteneur en béton pour les déchets de graphite, bitumes et CBF-C'2) et des alvéoles (remplissage des vides, dalle de pose des colis et de fermeture pour l'option à excavation à ciel ouvert, soutènement/revêtement des alvéoles de stockage pour l'option en galeries). Ces matériaux contribuent au confinement par une rétention géochimique de radionucléides en particulier le chlore 36 et le carbone 14 inorganique des déchets de graphite ainsi que les actinides de la chaîne 4N+2 pour les déchets radifères. Leur performance hydraulique n'est pas prise en compte. Ces composants sont considérés comme des milieux poreux avec une perméabilité élevée.

Cinétique de relâchement des radionucléides par les déchets (terme source)

Pour les déchets radifères, un relâchement labile sous forme aqueuse des radionucléides et des espèces chimiques a été retenu. Cette hypothèse ne tient pas compte de la forme insolubilisée du radium initial dans certains déchets qui permettrait de considérer un taux de relâchement plus faible.

Pour les empilements en graphite, sur la base de résultats de mesures décrites dans la section 1.2, différentes hypothèses de cinétique de relâchement de carbone 14 ont été considérées à ce stade. Pour les autres radionucléides contenus dans les empilements en graphite, le relâchement a été considéré labile. Pour les chemises graphite et les déchets UNGG de La Hague, il a été retenu à ce stade un relâchement labile pour tous les radionucléides.

Le relâchement des radionucléides contenus dans les déchets bitumés et CBF-C'2 a été considéré labile. La matrice bitume peut jouer un rôle de retard au relâchement des radionucléides, qui n'a pas été pris en compte à ce stade.

Exutoires

Trois exutoires vers la biosphère ont été considérés : un exutoire conventionnel de type puits de pompage dans la formation aquifère des Sables verts située sous la couche d'Argiles tégulines, pour l'exploitation d'eau à usage domestique et deux exutoires en surface (exutoires rivière et sols contaminés).

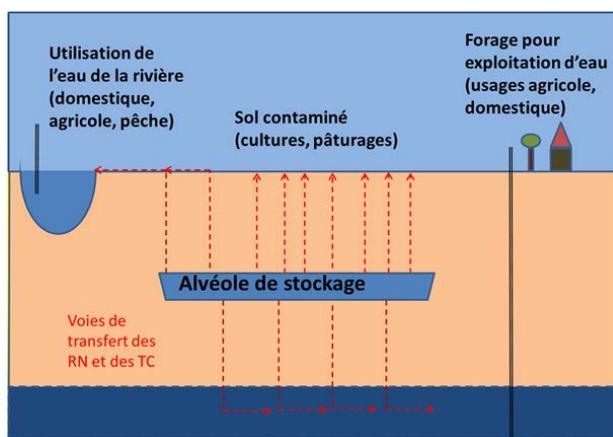


Figure 29 Illustration des voies de transfert potentielles et des exutoires retenus

Les calculs d'exposition radiologique individuelle se fondent sur la définition de groupes de référence hypothétiques en prenant en compte les habitudes locales en matière d'activités agricoles et de pratiques alimentaires ainsi que la disponibilité de la ressource en eau à chaque exutoire. A partir des flux (débits molaires) et des facteurs de conversion biosphère (évalués pour une biosphère tempérée avec une période d'accumulation continue sur 10 000 ans), des calculs de dose efficace individuelle aux différents exutoires ont été réalisés, en cumulant les effets des voies d'atteinte par ingestion, inhalation et exposition externe.

5.1.1.3 Résultats

Fonctionnement hydraulique du stockage

Dans l'option d'un stockage en galeries, le caractère descendant du gradient de charge hydraulique vertical de la formation des Argiles tégulines conduit à un transfert des solutés dans l'argile dominé par une convection descendante et orienté vers les sables de l'Aptien quelle que soit la profondeur d'implantation du stockage. Sur les prochains 50 000 ans, le transfert reste descendant et convectif dominant. La voie de transfert par diffusion depuis le stockage vers le toit de la formation argileuse est négligeable. Cette option de stockage tend donc à mobiliser la garde inférieure des Argiles tégulines pour assurer le confinement.

Dans l'option d'un stockage avec terrassement depuis la surface, le gradient de charge hydraulique vertical est piloté par la garde inférieure des Argiles tégulines où il est descendant. Cela conduit à un transfert des solutés dans la garde inférieure de la formation des Argiles tégulines dominé par une convection descendante. Vis-à-vis de la couverture reconstituée, un contraste de perméabilités entre cette dernière et l'argile en place d'un ordre de grandeur ou plus conduit à augmenter le gradient de charge hydraulique dans la garde inférieure, et par conséquent la vitesse de transport. Le régime de transport dans la couverture reconstituée est alors co-dominant convectif descendant et diffusif avec une composante ascendante. Le transfert des solutés dans la couverture reconstituée est alors diffusif ascendant, avec une très faible convection en sens inverse induit par le gradient descendant dans l'argile hôte.

Déchets radifères

Les déchets radifères contiennent des radioéléments (actinides de la chaîne 4N+2) présentant des niveaux de sorption très élevés à la fois dans les Argiles tégulines hôtes, les matériaux cimentaires et la couverture. Le radium initial est retardé suffisamment pour pouvoir bénéficier de sa décroissance au sein du système de stockage avant qu'il n'atteigne la biosphère. Les débits molaires des actinides en sortie d'argile hôte ou de couverture sont négligeables à l'échelle de 50 000 ans. Avec les hypothèses retenues pour évaluer le transfert des radionucléides de l'exutoire jusqu'à l'homme, la dose maximale due aux radioéléments de la chaîne 4N+2 serait inférieure à 0,01 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ à l'échelle de 50 000 ans.

A ce stade des études, l'influence de la chimie des déchets radifères dans le transfert des radionucléides et des toxiques n'a pas été prise en compte. L'influence notamment des sels contenus dans les déchets sur les propriétés de transfert des matériaux traversés feront l'objet d'études complémentaires.

La plupart des toxiques chimiques contenus dans les déchets radifères présentent également des propriétés de sorption élevées dans les argiles et les matériaux cimentaires. De ce fait, leur transfert est très limité. Il en résulte des quotients de dangers et des excès de risques individuels faibles ($\text{QD} < 1$, $\text{ERI} < 10^{-5}$). C'est le cas pour le sélénium (Se), le bore (B), l'antimoine (Sb), l'uranium (U), le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le nickel (Ni) et le chrome (Cr). Les évaluations exploratoires réalisées pour l'arsenic (As) présentent pour l'exutoire « rivière », vis-à-vis de la voie « ingestion », un quotient de danger faible (de l'ordre de 1 à partir de 50 000 ans).

Ces évaluations seront consolidées dans la suite des études notamment vis-à-vis des valeurs toxicologiques de référence à prendre en compte.

Déchets de graphite

Les principaux contributeurs à l'impact radiologique des déchets de graphite sont la fraction organique du carbone 14 en solution et dans une moindre mesure le chlore 36. Les résultats présentés ci-après portent sur les performances du stockage vis-à-vis de ces deux radionucléides et les paramètres à confirmer dans la suite des études.

La fraction inorganique du carbone 14 en solution est peu mobile du fait des capacités importantes de sorption dans les matériaux cimentaires et dans les Argiles tégulines.

En l'état actuel des connaissances, le carbone 14 sous forme organique en solution a été considéré comme mobile dans les différents composants du stockage et dans l'argile. Une fraction de 30 % de l'inventaire en carbone 14 relâché par les empilements a été considérée sous forme organique.

Les graphiques de la Figure 30 présentent les débits molaires du carbone 14 organique aux différentes interfaces pour les deux options de stockage étudiées¹⁸, en retenant un terme source des empilements de graphite de 5.10^{-6} /an. Cette valeur, qui reste à confirmer, est extrapolée de l'essai réalisé sur un bloc graphite de Bugey qui tend à indiquer que la forme du graphite contribue à limiter le relâchement du carbone 14⁽¹⁹⁾ pour bénéficier de sa décroissance radioactive.

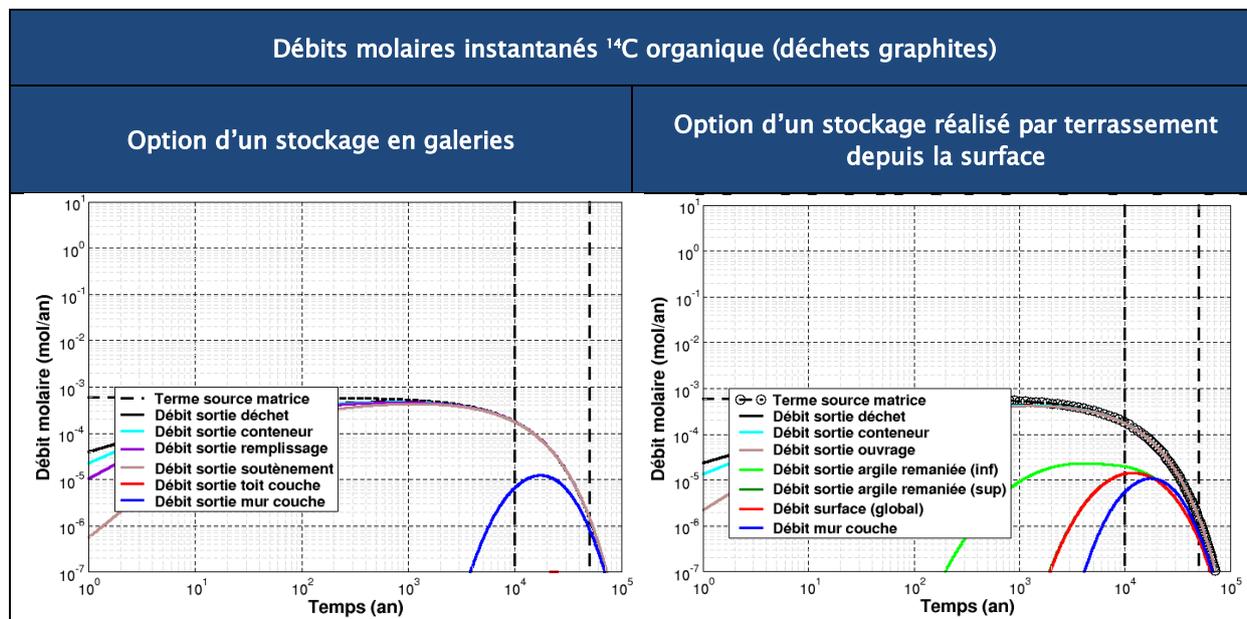


Figure 30 Cas du ^{14}C organique des déchets graphites : débits molaires instantanés aux différentes interfaces pour les deux options de stockage étudiées et dans le cas d'un terme source ^{14}C de 5.10^{-6} par an

Dans les deux options de stockage étudiées, l'impact radiologique du carbone 14 est majoritairement associé à l'exutoire « puits de pompage ». Avec les hypothèses retenues pour évaluer le transfert du radionucléide de l'exutoire jusqu'à l'homme, la dose maximale due au carbone 14 serait de l'ordre de 0,01 mSv/an à environ 15 000 ans.

Les études de sensibilité ont montré l'importance de consolider un ensemble de paramètres pour confirmer les performances de confinement du carbone 14 :

- la cinétique de relâchement des empilements et des chemises : un taux de relâchement de l'ordre de 5.10^{-6} /an (correspondant à des essais sur bloc) conduit à réduire d'un facteur 50 les débits molaires en sortie du stockage par rapport à un relâchement de 7.10^{-4} /an à 6.10^{-3} /an (correspondant à des essais réalisés sur poudre et avec agitation à des fins d'évaluation de la spéciation).
- La part de carbone 14 relâché en solution sous forme organique : les impacts radiologiques sont directement proportionnels à cette fraction de l'inventaire.
- La nature des molécules organiques : leur rétention éventuelle par les matériaux du stockage et les Argiles tégulines n'a pas été prise en compte à ce stade.
- L'épaisseur de garde inférieure d'Argiles tégulines : une augmentation de 10 m de garde d'argile inférieure conduirait à réduire d'un facteur quatre le débit molaire instantané par la voie de transfert vers les Sables verts.

¹⁸ Avec les hypothèses considérées, l'option d'un stockage réalisé par terrassement depuis la surface offre 7 m de garde inférieure de plus que l'option en galeries mais présente un gradient hydraulique plus important. L'effet combiné de ces deux aspects conduit à des débits molaires maximum et des dates d'occurrence similaires dans les deux options

¹⁹ Un terme source de 5.10^{-6} /an conduit à répartir le relâchement sur une période de 190 000 ans.

- Les paramètres convectifs de la couche d'argile (perméabilité, gradient hydraulique) : une variation d'un facteur 3 sur la perméabilité conduirait à une variation d'un facteur 10 sur le débit molaire instantané au mur de la couche.
- Les paramètres diffusifs dans la couverture reconstituée : les débits molaires vers la surface seraient réduits d'un facteur 2 à 5 en appliquant les propriétés hydro-dispersives des Argiles téglines dans tout ou partie de l'épaisseur de la couverture reconstituée.

Concernant le chlore 36, les graphiques de la Figure 31 présentent ses débits molaires instantanés aux différentes interfaces pour les deux options de stockage étudiées.

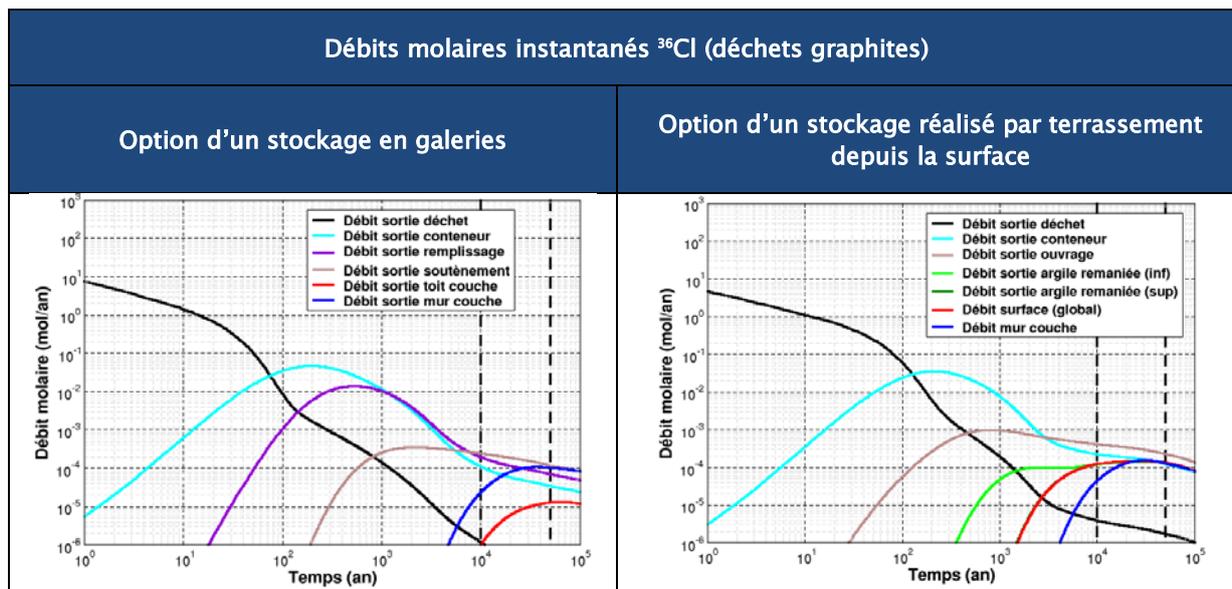


Figure 31 Débits molaires instantanés du ³⁶Cl des déchets de graphite aux différentes interfaces pour les deux options de stockage étudiées

Pour l'option de stockage en galeries, le débit molaire instantané en sortie inférieure de la couche d'argile (« mur » de la couche) est supérieur d'environ un ordre de grandeur à celui en partie supérieure de la couche (« toit » de la couche) ; le transfert est convectif dominant vers le bas. Pour l'option de stockage réalisé par terrassement depuis la surface, le débit molaire instantané maximum au mur de la couche est du même ordre de grandeur que celui en surface avec une date d'occurrence plus précoce du fait d'une plus courte distance de migration et l'hypothèse d'une diffusion effective plus importante (~1,5. 10⁻¹⁰ m²/s) dans la couverture reconstituée.

La sorption dans les matériaux cimentaires atténue d'environ un ordre de grandeur le débit molaire instantané du chlore 36 au toit (surface) et au mur de la couche. La majorité de l'inventaire initial en chlore 36 reste confinée dans le stockage à 50 000 ans.

Dans les deux options de stockage étudiées, l'impact radiologique du chlore 36 est majoritairement associé à l'exutoire « puits de pompage ». Sur la base des hypothèses retenues pour évaluer le transfert des radionucléides de l'exutoire jusqu'à l'homme, la dose maximale due au chlore 36 serait de l'ordre de 0,04 mSv/an à environ 30 000 ans.

Les études de sensibilité montrent que les performances de confinement du chlore 36 sont sensibles aux paramètres suivants :

- l'inventaire radiologique : les impacts aux exutoires sont directement proportionnels à l'activité en chlore 36.
- La sorption du chlore dans les matériaux cimentaires. Les valeurs retenues permettent de bénéficier d'une atténuation d'environ un ordre de grandeur des impacts radiologiques aux exutoires par rapport au cas sans sorption.

- Les paramètres convectifs de la formation hôte (perméabilité et gradient de charge) : une variation d'un facteur 3 sur la perméabilité conduirait à la même variation sur le débit molaire instantané au mur de la couche.
- Les paramètres diffusifs dans la couverture reconstituée : les débits molaires maximum vers la surface seraient réduits d'un facteur 2 à 3 en appliquant les propriétés hydro-dispersives des Argiles tégulines dans tout ou partie de l'épaisseur de la couverture reconstituée.

Déchets bitumés FA-VL

Les principaux radionucléides à vie longue mobiles sont l'iode 129 ainsi que le technétium 99 en conditions oxydantes.

La Figure 32 présente les débits molaires de l'iode 129 aux différentes interfaces pour les deux options de stockage étudiées.

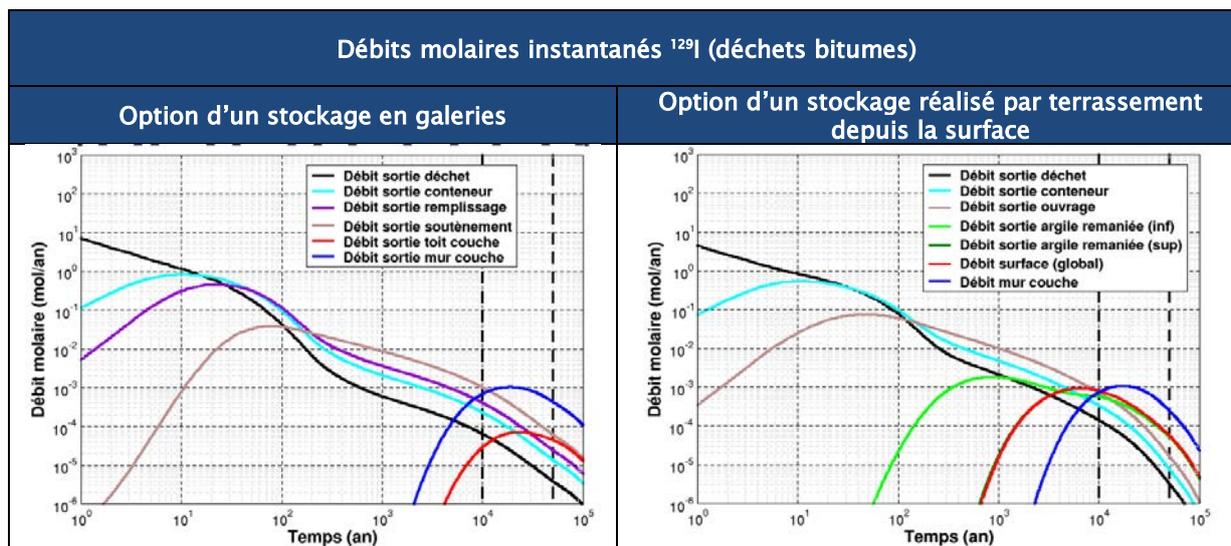


Figure 32 Cas de ^{129}I des déchets bitumés : débits molaires instantanés aux différentes interfaces pour les deux options de stockage étudiées

Pour l'option de stockage en galeries, le débit molaire instantané de l'iode 129 au mur de la couche est supérieur à celui au toit de la couche (environ un ordre de grandeur d'écart sur les débits maximum). Pour l'option de stockage avec terrassement depuis la surface, le débit molaire instantané de l'iode 129 est du même ordre de grandeur en surface et au mur de la couche avec une date d'occurrence un peu plus précoce du fait d'une plus courte distance de migration (20 m) et d'une diffusion effective plus importante ($\sim 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) dans la couverture.

Compte tenu de son faible inventaire, l'impact radiologique en iode 129 est limité. Dans les deux options de stockage étudiées, l'impact radiologique de l'iode 129 est majoritairement associé à l'exutoire « puits de pompage ». Sur la base des hypothèses retenues pour évaluer le transfert des radionucléides jusqu'à l'homme, la dose maximale due à l'iode 129 serait de l'ordre de 0,05 mSv/an à 15 000 ans.

Les études de sensibilité montrent que les performances de confinement de l'iode 129 sont sensibles aux paramètres suivants :

- L'inventaire radiologique : les impacts aux exutoires sont directement proportionnels à l'activité en iode 129. Les mesures des teneurs en iode 129 effectuées à ce jour par le CEA sont systématiquement inférieures aux limites de détection. Le CEA estime que des perspectives d'une baisse supplémentaire de l'inventaire seraient envisageables par la mise en œuvre de techniques analytiques en spectrométrie de masse par accélération.

- Les paramètres convectifs des Argiles tégulines (perméabilité et gradient de charge) : une variation d'un facteur 3 sur la perméabilité conduirait à une variation d'un facteur 5 sur le débit molaire instantané au mur de la couche. La sensibilité est plus prononcée pour l'iode 129 que pour le chlore 36 du fait d'une absence de sorption de l'iode dans les matériaux cimentaires.

Pour le technétium 99, sa mobilité est sensible aux conditions redox. Pour l'option de stockage en galeries, des conditions réductrices dans la formation des Argiles tégulines ont été considérées. Elles sont favorables à une forte sorption du technétium 99. A ce stade, l'influence de la chimie des déchets bitumés dans le transfert des radionucléides et des toxiques n'a pas été prise en compte. L'influence des sels contenus dans les déchets et des produits de dégradation de la matrice bitume sur les propriétés de rétention des matériaux du stockage feront l'objet d'études complémentaires.

Pour l'option de stockage avec terrassement depuis la surface, il a été considéré des conditions réductrices dans la garde inférieure d'Argiles tégulines et des conditions oxydantes dans la couverture. La principale voie de transfert du technétium 99 est alors la couverture par diffusion (cf. Figure 33). Dans cette option de stockage, l'impact radiologique du technétium 99 est majoritairement associée à l'exutoire « sols contaminés ». Sur la base des hypothèses retenues pour évaluer le transfert des radionucléides jusqu'à l'homme, la dose maximale due au technétium 99 à cet exutoire serait de l'ordre de 0,01 mSv/an à 5 000 ans.

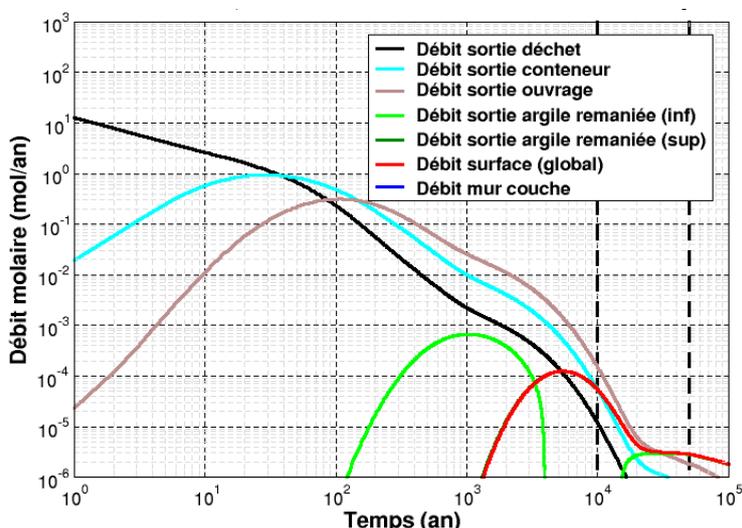


Figure 33 Cas du ^{99}Tc des déchets bitumés : débits molaires instantanés aux différentes interfaces avec l'option d'un stockage réalisé par terrassement depuis la surface et l'hypothèse de conditions oxydantes dans la couverture reconstituée

Les performances de confinement du technétium 99 sont sensibles aux paramètres suivants :

- l'inventaire radiologique en technétium 99 : les impacts potentiels aux exutoires sont directement proportionnels à l'activité en technétium 99. Les mesures des teneurs en technétium 99 effectuées à ce jour par le CEA sont systématiquement inférieures aux limites de détection.
- La maîtrise du transitoire redox dans la couverture : la prise en compte de conditions réductrices dans une partie de la couverture reconstituée conduit à atténuer très fortement le débit molaire instantané en sortie de la couverture.
- Les propriétés hydro-dispersives de la couverture : une variation d'un facteur 10 de la diffusion effective dans la couverture reconstituée conduirait à une variation d'un facteur 40 du débit molaire instantané maximum vers la surface.

Autres déchets

Compte tenu de leur inventaire radiologique, les impacts associés aux autres déchets (résines échangeuses d'ions, CBF-C'2 FA-VL) sont couverts par l'analyse des familles de déchets précédentes.

5.1.2 Evaluation de situations d'intrusion humaine involontaire

5.1.2.1 Scénarios étudiés

Le contrôle institutionnel et le maintien de la mémoire du stockage conduisent à considérer comme peu vraisemblable une situation d'intrusion humaine involontaire avant 500 ans. Au-delà de cette durée et conformément aux orientations générales de sûreté de l'ASN, une telle situation correspond à l'occurrence d'événements incertains, mais plausibles, et est considérée comme une situation altérée.

Les scénarios étudiés ont été définis selon les orientations générales de sûreté de l'ASN :

« La définition des caractéristiques des situations d'intrusion humaine retenues est fondée notamment sur les hypothèses suivantes :

- *la connaissance de l'existence du stockage et de son emplacement est oubliée,*
- *le niveau de technologie qui est employé est le même qu'aujourd'hui.*

La liste et la pertinence des intrusions retenues devront être justifiées et pourront être classées selon les catégories suivantes :

- *fouilles archéologiques : archéologies classique et minière,*
- *réalisation de forages ou de sondages de reconnaissance, d'exploitation d'eau, ...,*
- *réalisation de chantiers routiers ou de tunnels, de construction de résidences ou d'immeubles...*

La définition des scénarios puis leur évaluation se feront en tenant compte des caractéristiques du site envisagé, du concept de stockage retenu (notamment de la profondeur d'implantation des déchets), de la période de temps considérée, ainsi que de la spécificité des déchets stockés. »

Compte tenu de l'évolution géodynamique du site étudié, un aléa érosif progressif de la couverture des déchets a été pris en compte dans la définition des scénarios d'intrusion à considérer. Il a été supposé de manière conservatrice que ce processus pourrait conduire à long terme à un scénario de mise à nu des déchets.

Pour chaque type d'évènement entraînant une remontée en surface de matériaux radioactifs, plusieurs situations conventionnelles d'expositions radiologiques ont été étudiées :

- un forage géotechnique réalisé à partir de 500 ans, suivi de l'implantation d'une résidence sur le terrain contaminé par les déblais du forage.
- Un chantier routier traversant le stockage et ramenant en surface un mélange homogène de déchet et de couverture, suivi de l'implantation d'une résidence. Cet évènement a été supposé intervenir de manière conservatrice à partir de 10 000 ans.
- Une érosion totale de la couverture mettant à nu le stockage, associée à l'implantation d'une résidence. De manière conservatrice, cet évènement a été supposé intervenir dès 50 000 ans. Il est à noter que ce scénario ne prend pas en compte la dispersion de l'activité par l'érosion qui limiterait l'impact d'un tel scénario.

Les différentes voies d'exposition potentielle des individus sont évaluées : exposition externe, exposition interne par inhalation de poussières, exposition interne par ingestion de sol par inadvertance. La concentration volumique en radon dans les habitations est également évaluée.

5.1.2.2 Critères d'évaluation

Conformément aux orientations générales de sûreté de l'ASN, les impacts potentiels associés à ces situations altérées *« doivent être maintenus suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes. »*

Les recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique [16] indiquent par ailleurs que *« il est prudent de prendre en compte les incertitudes sur les estimations actuelles des seuils pour les effets déterministes, en particulier dans les situations impliquant des expositions prolongées. En conséquence, des doses annuelles à hauteur de 100 mSv justifieront presque toujours l'introduction d'actions de protection. »*

Conformément aux normes de sûreté de l'AIEA [19], l'Andra a évalué l'impact potentiel des situations d'intrusion humaine involontaire au regard des valeurs figurant dans le Tableau 1.

Tableau 1 Valeurs considérées pour l'analyse des résultats des calculs de doses efficaces en scénario altéré d'intrusion humaine involontaire

Niveau de doses efficaces	
De 0 à 1 mSv/an	Déchets acceptables dans la filière envisagée sans nécessité de mesure particulière.
De 1 à 20 mSv/an	Déchets compatibles avec la filière envisagée sous réserve de montrer que tous les efforts raisonnables ont été mis en œuvre pour réduire la probabilité d'occurrence et limiter les conséquences.

Dans le cadre des études préliminaires de conception, des déchets qui présenteraient un impact potentiel légèrement supérieur à 20 mSv/an (tout en restant en dessous de 100 mSv) peuvent néanmoins être considérés, sous réserve de définir des dispositions d'optimisation de conception et/ou d'améliorer la caractérisation des déchets permettant de ramener l'impact en deçà de 20 mSv/an. Il faudra ensuite montrer que tous les efforts raisonnables ont été mis en œuvre pour réduire la probabilité d'occurrence du scénario et d'en limiter les conséquences.

Une approche spécifique est à mettre en place concernant la prise en compte du radon. Son impact potentiel a été estimé sur la base d'un calcul d'activité volumique dans une habitation hypothétique par analogie avec la méthodologie préconisée pour la gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives [17].

A titre indicatif, les textes réglementaires actuels relatifs à la gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public définissent un seuil de 400 Bq/m³ au-delà duquel des actions correctrices doivent être mises en œuvre pour abaisser les activités volumiques du radon. Lorsque les mesures révèlent une activité volumique annuelle supérieure à 1 000 Bq/m³, des mesures de protection des travailleurs, applicables aux activités nucléaires, doivent être prises.

Il est à noter que, dans le cadre d'un scénario d'intrusion humaine involontaire qui interviendrait à long terme, les calculs d'activité volumique et leur évaluation présentent un caractère conventionnel compte tenu des hypothèses à considérer pour l'habitation retenue (ventilation, présence ou non d'un radier en béton...).

5.1.2.3 Résultats

Les principaux paramètres de conception intervenant dans l'évaluation de ces scénarios sont la profondeur du stockage, les activités massiques dans les alvéoles de stockage et la géométrie des plateformes ou galeries de stockage.

L'évaluation des scénarios d'intrusion humaine involontaire a été réalisée pour les déchets radifères et les déchets à radioactivité naturelle renforcée en considérant un mélange des différentes familles de déchets dans le même alvéole. Les impacts potentiels maximaux évalués sont de l'ordre du milliSievert par an (mSv/an). Les concentrations volumiques en radon restent inférieures à 300 Bq/m³ (inférieures à 500 Bq/m³ en cas de non prise en compte d'un radier en béton pour les fondations de la résidence). Les radionucléides contributeurs sont notamment, le radium 226, le radium 228 et le thorium 232 pour les expositions externes et l'actinium 227 pour l'exposition interne par inhalation (présent initialement puis produit par filiation de l'uranium 235).

Pour les empilements et les chemises en graphite, les impacts potentiels resteraient très faibles (inférieurs à 1 mSv/an). Le contributeur principal est le niobium 94 (exposition externe). Les déchets UNGG de la Hague entraînent des impacts potentiels pouvant atteindre une dizaine de mSv/an. Les contributeurs principaux sont les plutoniums 239 et 240, le neptunium 237 et dans une moindre mesure l'actinium 227 (produit par filiation de l'uranium 235). La possibilité de répartir les colis de ces déchets avec les autres colis de déchets de graphite pour réduire leur impact sera examinée dans la suite des études. Les résines échangeuses d'ions génèrent des impacts potentiels négligeables (de l'ordre du µSv/an).

Pour les déchets bitumés, l'impact potentiel maximal serait de l'ordre de la dizaine de mSv/an. Les concentrations volumiques en radon restent inférieures à 300 Bq/m³ (inférieures à 500 Bq/m³ en

cas de non prise en compte d'un radier en béton). Les contributeurs principaux sont les plutoniums 239 et 240 pour l'exposition interne par inhalation. La consolidation de l'inventaire et la mise en place de dispositions constructives visant à limiter les activités massiques dans les alvéoles de stockage et à adapter la géométrie des plateformes ou galeries de stockage permettront de limiter l'impact potentiel associé à ces déchets.

Du fait de leur teneur en américium 241 et en plutoniums 239 et 240, les colis CBF-C'2 FA-VL les plus actifs entraîneraient un impact potentiel de l'ordre de la dizaine de mSv/an. Les concentrations volumiques en radon sont faibles (inférieures à 100 Bq/m³). Pour limiter l'impact potentiel des colis CBF-C'2, un mélange dans le même alvéole avec les déchets de graphite sera analysé. Si nécessaire, un tri (pour la répartition dans le stockage ou pour l'acceptation) sur la base d'un seuil d'activité massique en américium et en plutonium pourra être envisagé.

5.2 Analyse de sûreté en exploitation

L'analyse préliminaire de risques se fonde sur les principes de conception à l'étude et les caractéristiques des déchets considérés. Elle a été focalisée à cette étape du projet sur les fonctions de sûreté de confinement de la radioactivité et de protection des personnes contre l'irradiation.

Cette analyse a permis d'identifier les familles de déchets dimensionnantes pour lesquelles des dispositions spécifiques de conception du stockage et du colis seront développées. Il s'agit à ce stade des colis CBF-C'2, des fûts d'enrobés bitumineux et les colis de déchets UNGG de la Hague. Ces dispositions contribueront à définir des critères d'acceptation en stockage des colis de déchets. Les déchets radifères et de graphite présentent un enjeu de caractérisation des colis vis-à-vis du dégazage respectivement du radon et du tritium et carbone 14. Ces éléments sont dimensionnants pour les modalités de gestion des rejets gazeux en exploitation.

Les résultats de l'analyse préliminaire de risque ne font pas apparaître d'élément rédhibitoire à la poursuite des études de conception pour le stockage de ces déchets au regard de la sûreté en exploitation.

6. Orientations pour la suite des études

La mise en service d'un stockage pour les déchets FA-VL permettrait de répondre aux besoins de Solvay, d'EDF, du CEA et d'Areva pour la gestion de leurs sites industriels et les opérations de démantèlement, ainsi qu'aux besoins de l'Andra pour sa mission de service public d'assainissement de sites historiques ayant abrité il y a plus de 50 ans des activités utilisant du radium ou du thorium. Par ailleurs, la création de capacités de stockage de déchets TFA sur le même site pour répondre aux enjeux du démantèlement assurerait des opportunités d'activité industrielle sur plusieurs dizaines d'années.

La conception du projet de stockage s'inscrit dans un processus itératif. Sur la période 2013-2015, les principales avancées du projet sont les suivantes :

- Les investigations géologiques réalisées sur le territoire de la Communauté de communes de Soulaines, à proximité des centres de stockage existants, ont montré le caractère favorable du site pour poursuivre l'étude d'un stockage à faible profondeur.
- Les producteurs ont établi une liste de déchets candidats à étudier pour un stockage à faible profondeur sur le site investigué. Ils mènent des travaux de caractérisation afin d'en améliorer la connaissance. Ces travaux ont notamment conduit à une réduction notable de l'inventaire radiologique en chlore 36 et en iode 129 des déchets de graphite et des déchets bitumés FA-VL par rapport aux hypothèses conservatives antérieures. Cela conforte l'étude de leur stockage à faible profondeur. Un enjeu dans la suite du projet est de consolider les connaissances sur les déchets.
- L'Andra, EDF et le CEA mènent des travaux de R&D pour évaluer le comportement des déchets en situation de stockage dans des milieux cimentaires et argileux. Ces travaux ont contribué aux choix de conception notamment en termes de recommandations de matériaux à introduire dans le stockage, de définition des composants ouvragés, d'exigences sur les architectures des alvéoles de stockage...

- L'Andra a étudié des options de stockage fondées sur des techniques de creusement éprouvées industriellement pour la réalisation d'ouvrages à faible profondeur. Ces études ont permis de disposer de premières représentations des architectures et des emprises des zones de stockage.
- Des études de sûreté ont été menées en vue d'évaluer les performances de sûreté du stockage, sur la base des données de site, des options de conception étudiées et de chaque typologie de déchets. Ces études ont montré la capacité du stockage à isoler et confiner les déchets sur de longues durées.

Ces résultats permettent de définir une zone d'environ 10 km² au nord du secteur d'étude (cf. Figure 34) dont les caractéristiques géologiques sont favorables à la poursuite de l'étude d'un stockage à faible profondeur (épaisseur moyenne de la couche d'argile d'environ 55 m et gradient hydraulique descendant faible) avec l'ensemble des déchets FA-VL étudiés.

Pour la période 2016-2018, le programme d'études et de recherches continuera à s'articuler autour des axes suivants : connaissance du site, connaissance des déchets, développement de la conception et poursuite des actions d'insertion territoriale et de dialogue.

- Des investigations géologiques complémentaires sont à réaliser pour disposer d'un niveau de connaissances plus détaillé à l'échelle de la zone de 10 km². Les objectifs de cette 2^{ème} campagne de reconnaissance seront (i) d'affiner la représentation du modèle géologique en confirmant la géométrie et l'homogénéité des Argiles tégulines avec une maille de reconnaissances plus fine, (ii) de préciser l'évolution et la variabilité des propriétés pétrophysiques (minéralogie, porosité...), hydrodispersives (perméabilité, propriétés de diffusion...) et mécaniques des Argiles tégulines, (iii) de caractériser les phénomènes d'altération impactant les formations superficielles et la formation argileuse sur les 20 premiers mètres et (iv) de consolider les connaissances sur l'organisation et les propriétés des écoulements hydrogéologiques (principalement la formation des Sables verts) et préciser les écoulements de surface (formations superficielles).
- Le programme de caractérisation des déchets sera poursuivi (inventaire radiologique et chimique, spéciation du carbone 14 dans les déchets, mécanismes de relâchement...). Le programme de travail mis en place par EDF et le CEA pour leurs déchets de graphite a pour objectif de consolider l'inventaire à l'horizon 2018. Pour les déchets bitumés, le CEA poursuivra ses travaux pour améliorer encore les limites de détection de certains radionucléides. La caractérisation chimique des déchets bitumés et des déchets radifères sera poursuivie. Une meilleure estimation du dégazage des colis de déchets (radon, tritium, carbone 14) permettra d'approfondir l'étude des modalités de gestion des rejets gazeux.
- L'analyse des deux options de stockage sera poursuivie pour choisir les techniques de réalisation optimales sur la base d'une analyse multicritères, en intégrant notamment les enjeux liés aux performances industrielles et à la sûreté.

Dans l'option d'un stockage terrassé depuis la surface, la conception de la couverture reconstituée s'appuiera d'une part sur la caractérisation des propriétés physico-chimiques des argiles excavées et l'étude de son comportement hydromécanique, et d'autre part sur les dispositions constructives permettant d'obtenir et de maintenir durablement les performances attendues. Dans l'option d'un stockage en galeries, les techniques de réalisation seront analysées au regard de leur capacité à préserver les propriétés favorables de la roche.

Les autres aspects de conception tels que l'implantation optimale des ouvrages sur la zone étudiée, le dimensionnement de l'installation et les modalités d'exploitation seront également poursuivis.

- Une nouvelle itération de sûreté sera réalisée sur la base de ces développements. Elle contribuera à élaborer des critères d'acceptation des colis dans un stockage à faible profondeur sur le site investigué.

L'Andra propose un nouveau point d'étape en 2018 où un dossier de conception du projet sur le site investigué, de niveau « esquisse » sera remis. Il comportera les résultats de la deuxième phase de caractérisation de site, les connaissances complémentaires acquises sur les déchets, les options de conceptions retenues, les modalités d'exploitation nucléaire et les résultats de l'itération de sûreté. Ce dossier permettra de préciser les éléments de conception pour décider du lancement d'un projet industriel de stockage. Les résultats de ces études ainsi que la suite des échanges avec les acteurs

locaux permettront également de préciser l'implantation du projet de stockage sur la zone investiguée.

Sous réserve des orientations qui seront retenues en 2018, les études ultérieures d'avant-projet permettront de préparer le cas échéant la demande d'autorisation de création d'un stockage. Une itération de sûreté intermédiaire est prévue avec l'élaboration d'un dossier d'options de sûreté suite aux études d'avant-projet sommaire. La durée prévisionnelle des études d'avant-projet sommaire et détaillé est de 5 ans.

Le calendrier indicatif des différentes étapes de développement du projet industriel est présenté à la Figure 35. Il retient l'hypothèse d'une durée d'instruction de la demande d'autorisation de création de 3 ans (y compris l'enquête publique associée), de la réalisation des acquisitions foncières à l'amiable et d'une durée des travaux de 3 ans pour la mise en service.

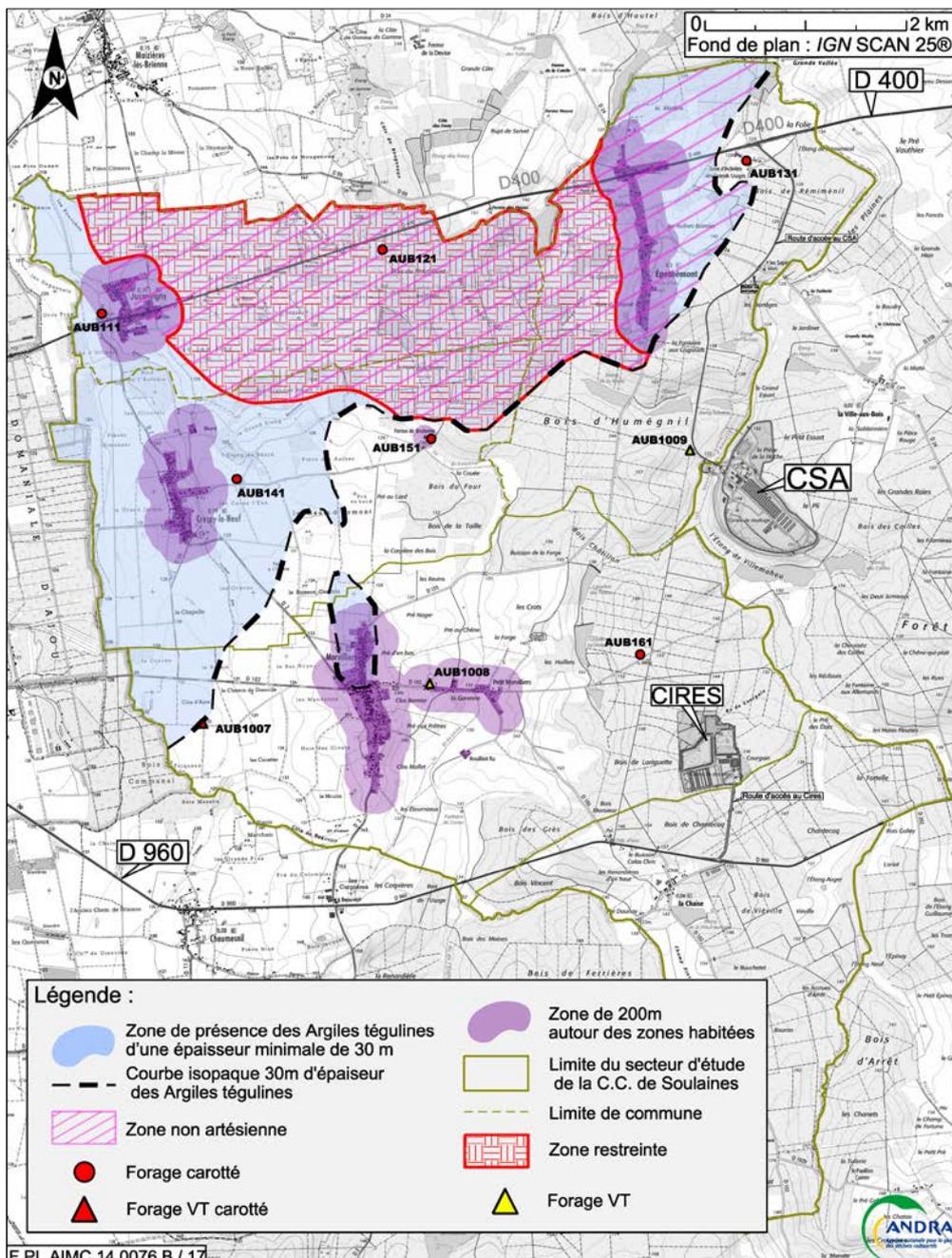


Figure 34 Périmètre de la zone de 10 km² favorable pour la suite des études

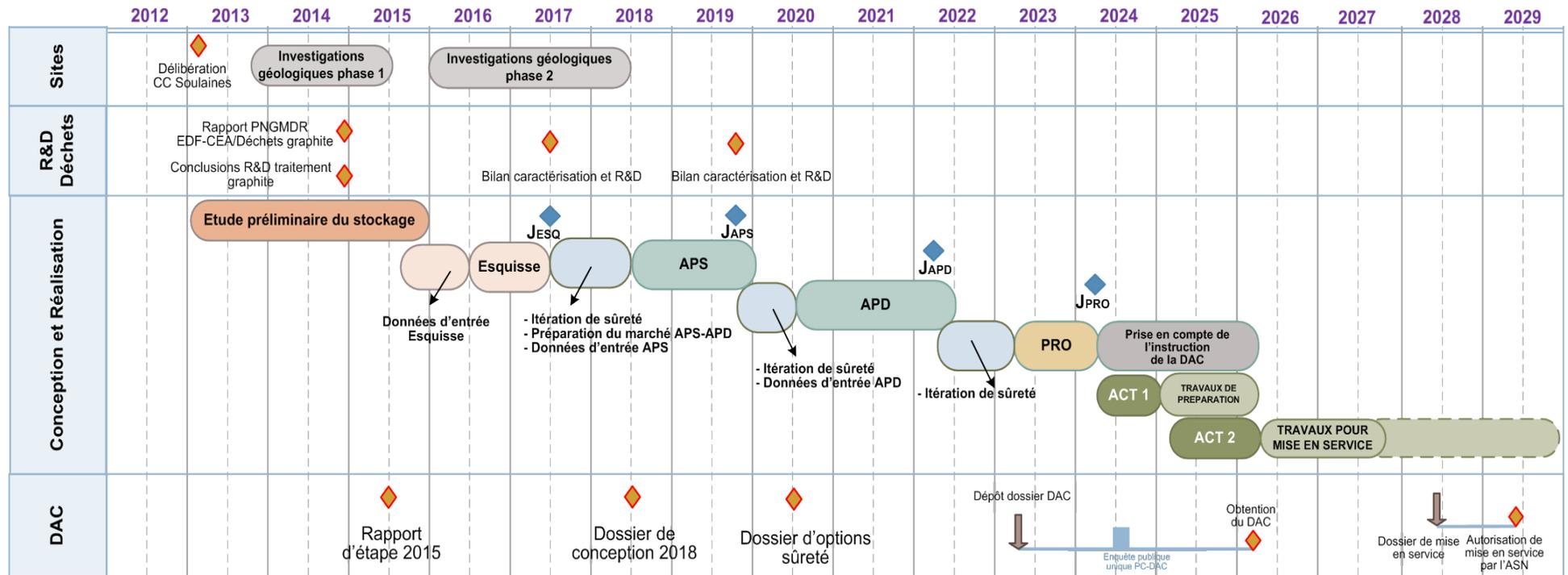


Figure 35 Calendrier indicatif des étapes de développement du projet industriel

- APS : Etudes d'avant-projet sommaire
- APD : Etudes d'avant-projet détaillé
- PRO : Etudes de projet
- ACT : Passation des contrats de travaux
- DAC : Demande d'autorisation de création

7. Références

- [1] Etude des scénarios de gestion à long terme des déchets de faible activité massique à vie longue – Andra 2012.
- [2] PNGMDR 2013-2015 - Rapport 2015 du groupe de travail « Optimisation de la répartition des déchets entre filières de gestion » - Areva, CEA, EDF, Solvay, Andra.
- [3] Inventaire national des matières et déchets radioactifs – Andra – Edition 2015.
- [4] Orientations générales de sûreté de l'ASN en vue d'une recherche de site pour le stockage des déchets de faible activité massique à vie longue – ASN 2008.
- [5] PNGMDR 2013-2015 Evaluation technico-économique des modes de gestion des Résidus Solides Banalisés- Solvay 2013.
- [6] Rapport PNGMDR 2013-2015 - Etat des connaissances sur le contenu radiologique des déchets de graphite du CEA et de EDF relevant du stockage en subsurface FAVL. Focus particulier sur le chlore 36 – CEA, EDF 2015.
- [7] Rapport PNGMDR 2013-2015 : Evaluation technico-économique d'un procédé de traitement d'enrobés de boues bitumées par incinération/vitrification – CEA 2015.
- [8] Etude de la gestion durable des sources scellées usagées – Andra 2008.
- [9] 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.
- [10] Rapport d'étude PNGMDR 2013-2015 : Gestion à long terme des déchets à produire du procédé de conversion – Areva, Andra 2015.
- [11] Guillocheau F. et al. (2000) Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin : a 3D stratigraphic constraints. *Geodynamica Acta* 13, p. 189-246.
- [12] Hatrival JN., Ménillet FG. (2002) avec la collaboration de Bourdillon C., Duermel, G. Morfaux P., Tomasson R. Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Brienne-le-Château (299). Orléans : BRGM, 82 p. Carte géologique par Hatrival JN (2000).
- [13] Amedro F. et Matrimon B. (2014) L'étage Albien dans sa région-type (Aube, France) : une synthèse dans un contexte sédimentaire global. *Carnets de géologie*. Vol. 14, n°5, p. 69-128.
- [14] Gaucher E. C., Tournassat C., Pearson F. J., Blanc P., Crouzet C., Lerouge C., Altmann S. (2009) A robust model for pore-water chemistry of clayrock. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(21), 6470-6487.
- [15] Kaelin J-L. (1990) Région de Soulaines (Aube, France). *Géologie, hydrogéologie et géotechnique*. Synthèse des connaissances, 161 p.
- [16] Recommandations de la commission internationale de protection radiologique - Publications 60 et 103 de la CIPR, 2007.
- [17] Guide méthodologique – Gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives - Ministère de l'écologie du développement durable, des transports et du logement, IRSN, ASN, 2011.
- [18] Arrêté du 7 février 2012 modifié fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base.
- [19] Prescriptions de sûreté particulières – Prescription 9 – SSR-5, AIEA, 2011
- [20] Guide INERIS 2013 - Evaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires. Démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées.



AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION
DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex

www.andra.fr