RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANDRA
Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

DOCUMENT TECHNIQUE

PNGMDR 2022-26

DOSSIER D'OPTIONS TECHNIQUES ET DE SÛRETÉ

Évaluation de la faisabilité d'un stockage à faible profondeur de déchets de faible activité à vie longue dans la formation argileuse du site de la Communauté de Communes de Vendeuvre-Soulaines

(Article 33 de l'arrêté PNGMDR du 9 décembre 2022)

Identification
F.RP.ASFP.24.0001/A

Mars 2024

Sommaire

1. Objet du rapport 11

1.1 Cadre du rapport donné par le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 12

1.2 Objectifs du rapport 12

2. Enjeux associés à la gestion des déchets FA-VL 15

2.1 Enjeux liés à la gestion des déchets de faible activité à vie longue 16

2.2 Concept de stockage à faible profondeur en milieu « confinant » 19

2.3 Alternatives au concept de stockage à faible profondeur en formation argileuse 20

2.4 Rappel des études menées par l'Andra sur le stockage à faible profondeur en formation argileuse 21

2.4.1 Premières études menées sur site générique 21

2.4.2 Études sur le site de la Communauté de Communes de Vendeuvre-Soulaines 22

3. Présentation des déchets étudiés 29

3.1 Déchets radifères et déchets contenant des substances radioactives naturelles (SRON) 30

3.1.1 Déchets issus de l'extraction de terres rares produits par la société Solvay 31

3.1.2 Déchets issus du traitement de minerais d'uranium produits par le CEA 31

3.1.3 Déchets issus de l'extraction de zirconium produits par Framatome 32

3.1.4 Déchets issus de l'assainissement d'anciens sites pollués, dont la gestion est confiée à l'Andra 33

3.1.5 Autres déchets radifères : SRON et déchets issus des petits producteurs non électronucléaires (PNE) 33

3.2 Déchets de graphite 33

3.2.1 Empilements et chemises de graphite des réacteurs de la filière UNGG du CEA et d'EDF 34

3.2.2 Déchets de graphite d'Orano produits par les opérations de traitement des combustibles UNGG 35

3.3 Déchets bitumés des sites CEA de Marcoule et Orano de La Hague 35

3.4 Déchets technologiques 37

3.4.1 Déchets technologiques du site d'Orano de La Hague 37

3.4.2 Déchets technologiques des sites du CEA de Marcoule et de Cadarache 37

3.5 Évolutions de l'inventaire des déchets étudiés par rapport aux études de 2015 38

3.6 Synthèse de l'inventaire des déchets étudiés 38

4. État des connaissances sur le milieu géologique du site de la CCVS 41

4.1 Introduction 42

4.2 Présentation des campagnes d'investigations de terrain 42

4.2.1 Première campagne d'investigation (2013-2015) 42

4.2.2 Seconde campagne d'investigation (2016-2019) 44

4.3 Le cadre géologique – Description des formations 46

4.4 Le cadre structural 50
4.5 Les caractéristiques des Argiles tégulines 52
4.5.1 Les caractéristiques lithologiques et minéralogiques 52
4.5.2 Les caractéristiques microstructurales 55
4.5.3 Chimie des eaux interstitielles et régulation du système solides-fluides 57
4.5.4 Les propriétés hydro-dispersives et de rétention des radionucléides et des substances toxiques chimiques 58
4.5.5 Les propriétés géomécaniques 60
4.6 L'organisation des écoulements 60
4.6.1 Le réseau hydrographique et des écoulements en surface 60
4.6.2 L'organisation des écoulements en profondeur 62
4.7 L'évolution future du site 64
4.7.1 L'évolution climatique future 64
4.7.2 L'évolution géomorphologique 65
4.7.3 L'évolution hydrogéologique 68
4.8 Conclusion 68

5. Analyse des principales règles et enjeux juridiques applicables au territoire de la zone de l'étude 71
5.1 Enjeux liés à la présence humaine actuelle et passée de la zone d'étude 72
5.2 Enjeux liés aux documents d'urbanisme applicables à la zone d'étude 73
5.3 Enjeux liés aux zonages environnementaux 74

6. Étude des enjeux environnementaux sur la zone d'étude du site de la CCVS 75
6.1 Évitement des enjeux les plus forts lors de la définition de la zone d'étude 77
6.2 Facteurs susceptibles d'être discriminants pour l'implantation du projet et/ou le choix de la technique constructive 78
6.2.1 Sous-sol 78
6.2.2 Sol 78
6.2.3 Eaux 81
6.2.4 Biodiversité 85
6.2.5 Population, habitat, air, cadre de vie 89
6.2.6 Activités agricoles et sylvicoles 90
6.2.7 Paysage 91
6.2.8 Infrastructures et réseaux 93
6.2.9 Déchets et gestion des déblais 94
6.2.10 Consommation de ressources 94
6.3 Facteurs considérés comme peu discriminants dans l'implantation du projet et/ou le choix de la technique constructive 94
6.4 Conclusion 95

7. État des lieux des techniques constructives 97
7.1 Revue des techniques constructives 99
7.1.1 Stockage « à ciel ouvert » 99
7.1.2 Stockage en galeries souterraines 103
7.2 Analyse comparative des techniques constructives du point de vue de la faisabilité technique 106
7.2.1 Complexité technique de mise en œuvre 106
7.2.2 Faisabilité de la fermeture des modules ou alvéoles de stockage 107

7.2.3 Flexibilité de la géométrie des alvéoles de stockage 108
7.2.4 Emprise et capacité de stockage 109
7.3 Analyse préliminaire des dispositions à mettre en œuvre en phase d'exploitation pour les différents types d'ouvrage de stockage à l'étude 109
7.3.1 Dispositions de maîtrise des risques d'inondation d'origine externe 110
7.3.2 Dispositions de maîtrise des risques dus à la production de gaz 110
7.3.3 Dispositions de maîtrise des risques d'incendie et d'explosion 110
7.3.4 Manutention des colis 111
7.4 Analyse comparative des techniques constructives du point de vue de leur impact sur les enjeux du stockage à long terme 111
7.4.1 Impact de la construction sur les propriétés des argiles en place 111
7.4.2 Perturbations induites à long terme par les vides résiduels dans les alvéoles à la fermeture 112
7.5 Choix et hypothèses prises pour les architectures de stockage étudiées pour les évaluations de sûreté après-fermeture 112
7.6 Conclusion 114

8. Évaluations de sûreté après-fermeture 117

8.1 Démarche de sûreté après-fermeture 118
8.1.1 Principes et fonctions de sûreté pour un stockage à faible profondeur de déchets FA-VL 118
8.1.2 Prise en compte de l'évolution géomorphologique du stockage dans la démonstration de sûreté 119
8.1.3 Établissement de la démonstration de sûreté du stockage en fonction des échelles de temps 119
8.1.4 Les indicateurs de protection en fonction des échelles de temps 120
8.1.5 Synthèse des évaluations de sûreté après-fermeture réalisées 121
8.2 Évaluations de sûreté sur la période allant jusqu'à 50 000 ans 122
8.2.1 Évaluation des transferts par l'eau pour une évolution normale du stockage (SEN) 122
8.2.2 Évaluation de situations d'intrusion humaine involontaire dans le stockage 147
8.2.3 Analyse des résultats des évaluations pour la période 0-50 000 ans 157
8.3 Évaluations de sûreté sur la période au-delà de 50 000 ans : évaluations de situations conventionnelles 160
8.3.1 Description des situations conventionnelles 160
8.3.2 Résultats des situations conventionnelles 161
8.3.3 Analyse des évaluations post 50 000 ans 173

9. Enseignements tirés des différentes études en vue de la poursuite du projet 175

9.1 Rappel du cadre de l'étude 176
9.2 Principaux déterminants phénoménologiques et de conception pilotant les indicateurs de performance et de sûreté en après-fermeture 176
9.3 Secteurs géographiques de la zone d'étude à conserver pour étudier l'implantation d'un stockage 182
9.4 Enseignements sur les architectures de stockage 184
9.5 Enseignements sur les inventaires de déchets et sur leur conditionnement 187
9.5.1 Déchets radifères et déchets contenant des substances radioactives d'origine naturelle 188
9.5.2 Déchets de graphite 190
9.5.3 Déchets bitumés 192

9.5.4 Déchets technologiques 194
9.5.5 Ensemble des déchets étudiés 195
9.6 Enseignements concernant un site complémentaire adapté à un autre stockage à faible profondeur 196
9.7 Synthèse des enseignements appliquée à la poursuite du projet 198

10. Perspectives 201
10.1 Besoin de connaissances complémentaires sur la zone d'étude 202
10.2 Caractérisation des aléas naturels 203
10.3 Perturbations mécaniques dues à la réalisation des ouvrages de stockage 203
10.4 Évolution dans le temps de la couverture du stockage 203
10.5 Comportement hydraulique du système de stockage et de son environnement 203
10.6 Comportement géochimique du système de stockage 204
10.7 Relâchement du carbone 14 des déchets de graphite 204
10.8 Études particulières à mener pour les architectures 204
10.9 Comportement au cours du temps des déchets bitumés en conditions de stockage 205
10.10 Études prospectives sur le conditionnement de certains déchets 205

11. Conclusion générale 207

Tables des illustrations 211

Références bibliographiques 215

Acronymes et glossaire

Acronymes

Acronyme	Signification
ASN	Autorité de sûreté nucléaire
CAC	Coque amiante ciment
CBF-C'2	Colis béton fibre- cylindrique
CCVS	Communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines
Cires	Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage dédié au stockage des déchets TFA
CPP	Caisson métallique pré-bétonné à parois planes
CSA	Centre de stockage de l'Aube
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
DOS	Dossier d'options de sûreté
ERI	Excès de risque individuel
FA-VL	Déchets de faible activité à vie longue
FMA-VC	Déchets de faible et moyenne activité à vie courte
GPD	Groupe permanent d'experts pour les « déchets »
HA	Déchets de haute activité
HBTh	Hydroxyde brut de thorium
HCTISN	Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire
IN	Inventaire national
INB	Installation nucléaire de base
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
MA-VL	Déchets de moyenne activité à vie longue
NQE	Normes de qualité environnementale
PLUi	Plan local d'urbanisme intercommunal
PNGMDR	Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs

Acronyme	Signification
QD	Quotient de danger
RRA	Résidus radifères
RSB	Résidus solides banalisés
RTCU	Résidus de traitement de conversion de l'uranium
SCOT	Schéma de cohérence territoriale
SEA	Scénario d'évolution altérée
SEN	Scénario d'évolution normale
SIHI	Scénario d'intrusion humaine involontaire
SRON	Substances radioactives d'origine naturelle
TFA	Déchets de très faible activité
UNGG	Uranium naturel-graphite-gaz
ZE	Zone d'étude sur le site de la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines
ZICO	Zone importante pour la conservation des oiseaux
ZNIEFF	Zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique

Glossaire

Terme	Définition
Déchets « candidats »	Déchets étudiés dans le cadre du présent rapport, définis par (i) les déchets FA-VL étudiés en 2013-2015 (pour le rapport d'étape de 2015 (1)) et qui sont qualifiés de déchets FA-VL « historiques » dans la suite du document, (ii) les déchets bitumés produits pas le CEA et catégorisés FA-VL dans l'Inventaire national 2023[1] et (iii) des déchets catégorisés MA-VL dans l'Inventaire national 2023 par les producteurs mais qui pourraient relever de la catégorie FA-VL compte tenu de leurs caractéristiques radiologiques.
Détenteur de déchets	Producteur des déchets ou toute autre personne qui se trouve en possession des déchets (cf. Article L. 541-1-1 du code de l'environnement). Un déchet radioactif peut avoir plusieurs détenteurs entre le moment où il est produit et le moment où il est éliminé (successivement le détenteur-producteur, puis le transporteur, l'exploitant de l'entreposage, l'exploitant du stockage).
Intrusions humaines banales	Selon le groupe permanent chargé des déchets (GPD) (6), le terme « banal » qualifiant l'intrusion humaine englobe tous les types de scénarios liés à une intrusion limitée en profondeur (*e.g.* résidence, chantier routier, jeux d'enfants)
Scénarios d'évolution altérée	Scénarios représentatifs d'événements ou processus jugés peu vraisemblables sur la base des connaissances acquises mais susceptibles d'entraîner la perte d'une fonction de sûreté du stockage ou d'une forte dégradation des performances des composants qui contribuent à sa réalisation. Ces évènements peuvent être d'origine naturelle ou résulter d'une action humaine. Se rangent dans cette catégorie, les scénarios de dysfonctionnement des composants contribuant aux fonctions de sûreté après fermeture identifiés par l'analyse des risques et incertitudes.
Scénario d'évolution normale	Scénario visant à représenter le système de stockage tel qu'envisagé par le concepteur en considérant que toutes les fonctions de sûreté après fermeture sont réalisées. Ce scénario est défini sur la base des connaissances pour représenter l'évolution attendue (ou normale) sur le long terme du système de stockage en considérant : (cf. Note d'orientation de l'ASN (2)) • les évènements liés à la présence de l'installation de stockage, aux défauts de réalisation et à l'ensemble des processus de dégradation des colis et des composants ouvragés, • un ensemble d'évènements naturels probables.
Scénarios d'intrusion humaine involontaire	*« Au-delà d'une phase de conservation de la mémoire du stockage, des scénarios d'intrusion à l'intérieur du stockage deviennent plausibles »* tel qu'indiqué dans la note d'orientation de l'ASN de 2008. Ces scénarios traitent d'une chaine d'événements impliquant *a minima* une intrusion humaine involontaire conduisant à la défaillance de la fonction « isoler les déchets ». Le SIHI a des conséquences sur l'Homme, de manière directe et/ou *via* des perturbations du fonctionnement du stockage.

[1] Page d'accueil | Andra Inventaire

1

Objet du rapport

1.1 Cadre du rapport donné par le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs *12*

1.2 Objectifs du rapport *12*

1.1 Cadre du rapport donné par le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs

Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) couvrant la période 2022-2026 (3) fixe, dans son chapitre 7 consacré aux déchets de faible activité à vie longue (FA-VL), l'objectif de stabiliser une stratégie de gestion globale des déchets FA-VL.

L'action FA-VL.4 du Plan porte en particulier sur la caractérisation des enjeux de sûreté liés à un stockage à faible profondeur de déchets FA-VL sur le site de la Communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines (CCVS) dans l'Aube (dép. 10). Le Plan rappelle que des réflexions ont été menées dans le cadre d'un groupe de travail conduit par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en 2018 pour mettre à jour les exigences de sûreté pour le stockage de déchets FA-VL, en particulier sur les sujets relatifs à « *l'équilibre entre isolement et confinement, scénario d'intrusion, préservation des ressources naturelles…* ». Il est ainsi demandé à l'Andra, en se fondant notamment sur les réflexions du groupe de travail, de déposer un dossier présentant les options techniques et de sûreté d'un stockage de déchets FA-VL sur le site de la CCVS.

Dans ce cadre, l'arrêté du 9 décembre 2022, pris en application du décret n° 2022-1547 du 9 décembre 2022 prévu par l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du PNGMDR (4), notifie par l'article n° 33 :

« *Pour l'application des dispositions de l'article D. 542-88 du code de l'environnement et de l'action nommée FA-VL.4 du PNGMDR, l'Andra remet, avant le 31 décembre 2022 une feuille de route explicitant les étapes d'élaboration d'un dossier présentant les options techniques et de sûreté retenues, d'un niveau de maturité correspondant à un avant-projet sommaire, pour le stockage sur le site de la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines d'un inventaire de déchets que l'agence propose. Cette feuille de route vise à ce que ce dossier puisse être déposé d'ici le 30 juin 2023*[2].

L'Autorité de sûreté nucléaire est saisie pour avis sur ce dossier.

L'Andra remet un dossier d'options de sûreté pour le déploiement d'un stockage de déchets de faible activité à vie longue sur ce site, d'un niveau de maturité correspondant à un avant-projet détaillé, cinq ans après l'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire susmentionné. »

En réponse à la première partie de l'article, l'Andra a remis la feuille de route présentant la démarche de l'Andra pour établir le dossier demandé, ainsi que les études qu'elle mène pour cela (5).

Le présent rapport constitue le dossier d'options techniques et de sûreté demandé par le premier paragraphe de l'article n° 33. Il explicite les études menées sur le site de la CCVS et les enseignements qui en sont tirés sur la faisabilité technique et sur le plan de la sûreté après-fermeture d'un stockage de déchets FA-VL à faible profondeur sur le site de la CCVS, ainsi que la façon dont un tel stockage s'intègrerait dans la stratégie globale de la gestion des déchets FA-VL.

Ainsi, ce rapport apporte un éclairage sur la contribution de ce site dans le schéma global de gestion de ces déchets. Il doit notamment permettre, à l'issue de son instruction par l'Autorité de sûreté nucléaire, une prise de décision de l'ensemble des parties prenantes sur la poursuite des études de conception par l'Andra d'une installation de stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS, pour tout ou partie des déchets FA-VL, et sur l'élaboration du dossier d'options de sûreté (DOS) associé (objet de la dernière partie de l'article n° 33).

1.2 Objectifs du rapport

À ce stade, l'Andra a centré les études de sûreté sur la période d'après fermeture, en considérant toutefois les aspects d'implantation du stockage en regard des enjeux environnementaux, de construction et de caractéristiques du site géologique de la CCVS. Dans ce cadre, deux types d'architectures de stockage sont étudiées.

[2] L'Andra a sollicité, auprès de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), un report de ce délai au premier trimestre 2024 en raison du calendrier de réalisation des études, qui a été accepté.

Compte tenu des enjeux associés, d'une part à la gestion des déchets FA-VL, d'autre part au concept de stockage à faible profondeur en formation argileuse, présentés dans le chapitre 2 du présent rapport, les principaux objectifs de ce rapport sont :

- d'apprécier la compatibilité des familles de déchets « candidats » au stockage sur le site de la CCVS avec un stockage à faible profondeur, en présentant des évaluations de sûreté après-fermeture. Les déchets « candidats », présentés de façon détaillée dans le chapitre 3 du présent rapport, sont les déchets catégorisés FA-VL, à l'exception des déchets FA-VL produits par l'usine Orano de Malvési pour lesquels un projet de stockage est à l'étude par Orano, et des déchets MA-VL qui pourraient relever de la catégorie FA-VL compte-tenu de leurs caractéristiques radiologiques ;
- d'analyser, au stade de la définition des principales options de sûreté, les secteurs d'implantation d'un stockage de déchets FA-VL sur le site de la CCVS, au regard des enjeux de sûreté, des enjeux environnementaux propres au site, des exigences réglementaires s'appliquant au site. L'analyse des exigences réglementaires s'appliquant au site à ce jour et les enjeux environnementaux associés au site sont présentés respectivement dans les chapitres 5 et 6 du présent rapport ;
- de présenter la démarche de sûreté de l'Andra pour la phase d'après-fermeture pour un stockage de déchets FA-VL à faible profondeur en formation argileuse, et sa déclinaison à un stockage implanté sur le site de la CCVS. En particulier, la démarche de sûreté aux grandes échelles de temps (au-delà de 50 000 ans), dont les grands principes ont été présentés au groupe permanent d'experts chargés des déchets (GPD) qui a émis un avis en mars 2021 (6), est détaillée. Ceci fait l'objet du chapitre 8 du présent rapport ;
- d'éclairer sur la capacité d'accueil du site vis-à-vis des différentes typologies de déchets au travers des évaluations de sûreté après-fermeture présentées au chapitre 8 du présent rapport et des techniques constructives pouvant être mises en œuvre pour un stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS. Une revue et une analyse des techniques constructives est présentée au chapitre 7 du présent rapport ;
- d'identifier des études qu'il sera nécessaire de mener pour poursuivre les travaux pour le stockage des déchets FA-VL, en particulier pour établir un dossier d'options de sûreté (DOS) d'un stockage sur le site de la CCVS, objet du chapitre 10 du présent rapport, mais également pour définir les caractéristiques d'un éventuel autre site adapté à l'accueil d'un stockage de déchets FA-VL qui ne pourraient pas être stockés sur le site de la CCVS.

Cet ensemble d'études vise à permettre à l'Andra de statuer sur la faisabilité technique d'un stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS.

Les conclusions obtenues de l'ensemble de ces études doivent permettre à l'ASN de se positionner sur la démarche de sûreté de l'Andra pour la phase d'après-fermeture, ainsi que sur l'opportunité de poursuivre les études de conception d'un stockage à faible profondeur de tout ou partie des déchets candidats sur le site de la CCVS et le programme d'études pour cela le cas échéant.

Au regard des conclusions de l'instruction de ce dossier, l'Andra décidera, en lien avec les producteurs, la poursuite ou non des études de conception et des options de sûreté d'un stockage sur le site de la CCVS. Cette étape constitue ainsi un jalon décisionnel important dans la stratégie de gestion des déchets FA-VL.

Si la décision de poursuivre les études est prise, l'inventaire des déchets à étudier pour élaborer le dossier d'options de sûreté sera alors défini en lien avec les producteurs de déchets en se fondant notamment sur les conclusions des évaluations de sûreté après-fermeture menées dans le cadre de ce rapport. La définition de cet inventaire s'appuiera également sur les avis sur les scénarios de gestion des déchets FA-VL en vue d'établir un schéma directeur de gestion de ces déchets, objets du chapitre II de l'arrêté PNGMDR précité.

2

Enjeux associés à la gestion des déchets FA-VL

2.1 Enjeux liés à la gestion des déchets de faible activité à vie longue 16
2.2 Concept de stockage à faible profondeur en milieu « confinant » 19
2.3 Alternatives au concept de stockage à faible profondeur en formation argileuse 20
2.4 Rappel des études menées par l'Andra sur le stockage à faible profondeur en formation argileuse 21

2.1 Enjeux liés à la gestion des déchets de faible activité à vie longue

La catégorie des déchets FA-VL a été introduite dans le PNGMDR couvrant la période de 2007 à 2009 (7).

Elle désigne des déchets radioactifs de natures physico-chimiques et d'origines très diverses, tous caractérisés par :

- leur faible niveau d'activité radiologique, qui leur confère une dangerosité relativement faible en comparaison à celle des déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) ;
- la longue période radioactive des principaux radionucléides qui les composent, maintenant leur niveau de dangerosité sur plusieurs milliers à dizaines de milliers d'années.

Dans la classification française des déchets radioactifs représentée sur la figure 2-1, la catégorie des déchets FA-VL se situe aux interfaces avec les catégories des déchets de très faible activité (TFA), des déchets de faible à moyenne activité à vie courte (FMA-VC) et des déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL).

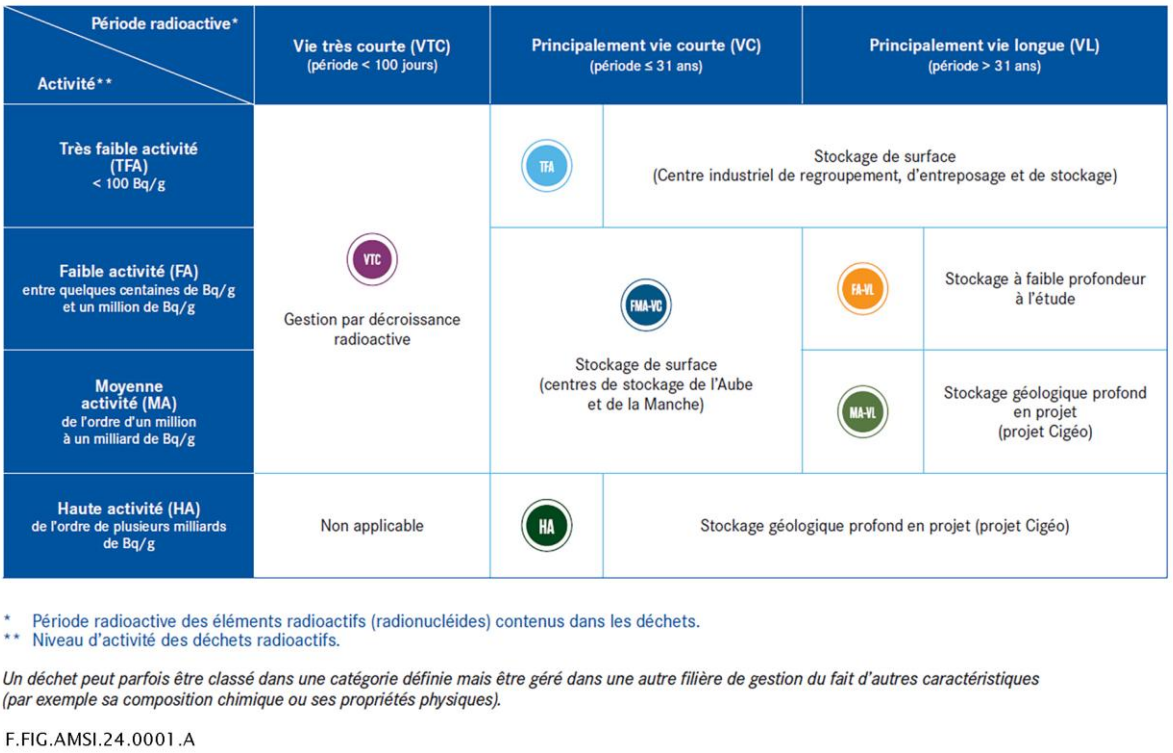


Figure 2-1 Classification française des déchets radioactifs

La catégorie des déchets FA-VL constitue une catégorie intermédiaire, sur des domaines de périodes radioactives et d'activités tels qu'il est complexe d'en donner une définition objective et de lui associer une liste précise de déchets. À cet égard, l'inventaire actuel des déchets de cette catégorie est appelé à évoluer à la suite des études menées en réponses à l'article 27 de l'arrêté PNGMDR (4) qui demande, d'une part à l'Andra de définir « *des critères objectifs permettant de discriminer les déchets relevant de la filière des déchets de faible activité à vie longue de ceux relevant de la filière des déchets de moyenne activité à vie longue, en particulier pour les déchets bitumés* », d'autre part au CEA et à Orano d'évaluer « *les quantités de déchets relevant des filières FA-VL et MA-VL, en particulier les déchets bituminés* ». Ces études, remises au cours de l'année 2023, ont conduit l'Andra à proposer des critères visant à exclure des déchets d'un stockage à faible profondeur, et les producteurs à identifier, en application de ces critères, des déchets aujourd'hui catégorisés MA-VL comme pouvant relever de la filière FA-VL. Une grande partie de ces déchets, que les producteurs avaient identifiés préalablement aux travaux précités pour permettre d'engager les études en support au présent rapport (au cours de l'année 2022), fait partie des déchets étudiés dans le cadre du présent rapport afin d'étudier le caractère compatible de tous les

déchets potentiellement acceptables en stockage à faible profondeur. Les études réalisées en réponse à l'article 27 de l'arrêté PNGMDR n'ont pas remis en cause les listes de déchets définies pour les études présentées dans le présent rapport.

Les déchets FA-VL, tels qu'étudiés pour le rapport d'étape de 2015, sont d'origines et de natures très différentes ; ils sont présentés plus en détail au chapitre 3 du présent rapport. Ils peuvent être répartis en quatre grandes typologies de déchets :

- des déchets dits radifères, dont la radioactivité est principalement issue de l'exploitation de minerais d'origine naturelle, pour des activités électronucléaires et non électronucléaires ;
- des déchets de graphite, principalement issus de l'exploitation et du démantèlement à venir des réacteurs nucléaires de première génération d'EDF et du CEA (filière uranium naturel graphite gaz (UNGG)), ainsi que des déchets produits lors des opérations de traitement des combustibles usés UNGG dans l'usine UP2-400 d'Orano La Hague ;
- des déchets constitués d'enrobés bitumés résultant du traitement d'effluents radioactifs aqueux produits avant 1995 par la station de traitement des effluents de site du CEA de Marcoule ;
- des déchets technologiques et de procédés issus de l'exploitation des installations nucléaires de base (INB) du site Orano de La Hague.

Jusqu'au début des années 2000, les déchets FA-VL étaient constitués des déchets radifères et des déchets de graphite. En 2006, à la suite du refus par l'Andra de stocker une partie des déchets bitumés du site du CEA de Marcoule en stockage de surface au Centre de stockage de l'Aube (CSA), ces déchets ont été orientés vers une solution de stockage à faible profondeur, entrainant leur catégorisation en déchets FA-VL. En 2013, une partie des déchets technologiques conditionnés en colis CBF-C'2 produits par les INB d'Orano du site de La Hague ont également été catégorisés FA-VL. Ces déchets ont fait l'objet d'études et sont dénommés « déchets FA-VL historiques » dans la suite du rapport.

D'autres déchets produits par le CEA et Orano et actuellement catégorisés MA-VL sont intégrés aux études présentées dans ce rapport, compte tenu de leur niveau d'activité et de la durée de vie des radionucléides qu'ils contiennent, afin d'étudier la faisabilité de leur stockage à faible profondeur. Ces déchets figurent dans les listes de colis de déchets établies par le CEA et Orano en réponse à l'article 27 précité de l'arrêté PNGMDR.

L'origine, les quantités, la nature et les caractéristiques physiques, radiologiques et chimiques des déchets de faible activité à vie longue sont très diverses. Cette diversité des différents enjeux associés à leur gestion est à considérer pour définir des solutions de gestion adaptées.

<u>Des enjeux de sûreté liés en particulier à la longue durée de vie des radionucléides composant les déchets FA-VL</u>

Les solutions de gestion des déchets sont à proportionner aux enjeux liés à leur niveau d'activité et à leur durée de vie. S'agissant des déchets FA-VL, leur faible niveau d'activité ne justifie pas de les orienter vers une solution de stockage en grande profondeur destinée aux déchets les plus actifs et les plus dangereux, mais leur importante durée de vie requiert des solutions permettant de préserver l'homme et l'environnement sur de très grandes échelles de temps, allant parfois au-delà de 50 000 ans.

Compte tenu des spécificités précitées des déchets FA-VL, il est indispensable d'établir une démarche de sûreté spécifique et adaptée aux caractéristiques de ces déchets afin de cerner les enjeux de sûreté associés à leur gestion. Cette démarche se doit d'être robuste en regard des grandes échelles de temps (plusieurs dizaines de milliers d'années) auxquelles la perte de la mémoire de l'existence du stockage est vraisemblable.

Se pose ainsi la question des risques qu'engendrent ces déchets pour les générations futures et de l'effort technologique et financier à consentir aujourd'hui pour les protéger de leur dangerosité. La démonstration de sûreté pour les solutions de gestion des déchets est à apporter jusqu'à ce que le niveau d'activité des déchets ait suffisamment décru, à un niveau tel que l'impact radiologique sur l'homme et sur l'environnement soit aussi faible que raisonnablement possible et acceptable.

Ainsi les solutions de gestion adaptées aux déchets FA-VL doivent permettre d'isoler les déchets de l'homme et de l'environnement sur de très longues périodes, et de maîtriser les phénomènes de transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques dans l'environnement.

Des enjeux industriels associés à la gestion des déchets FA-VL

Les origines, les quantités et les natures très différentes des déchets FA-VL confèrent à leur gestion des enjeux industriels également très différents.

Les déchets radifères sont issus pour partie d'activités industrielles non électronucléaires, produits par des activités d'exploitation de minerais ou issus d'activités historiques datant du début du siècle dernier à la suite de la découverte de la radioactivité, mais également d'activités en lien avec l'industrie nucléaire de l'amont du cycle du combustibles français de la filière eau légère. Ces déchets sont en grande majorité déjà produits et entreposés dans des installations dédiées dans l'attente d'une solution de gestion adaptée.

Une grande partie des déchets de graphite est actuellement dite « sur pied », c'est-à-dire que les éléments de graphite (briques d'empilement et rondins de graphite) sont actuellement en place dans les réacteurs de la filière UNGG, aujourd'hui à l'arrêt, en attente de leur démantèlement, et que les déchets correspondants seront disponibles lorsque les opérations de démantèlement débuteront. Celles-ci interviendront progressivement, entre 2040 et l'horizon 2100. Une autre partie des déchets de graphite en quantité moins importante est actuellement entreposée dans des silos et des fosses. Les exploitants de ces installations prévoient de les reprendre dans les années à venir. La définition d'une filière de gestion adaptée à ces déchets et disponible lorsque les colis de déchets de graphite seront produits constitue un enjeu fort pour réaliser les opérations de démantèlement des réacteurs UNGG (Uranium naturel graphite gaz) et expérimentaux, et pour expédier les colis produits directement vers leur stockage selon la stratégie industrielle des producteurs.

Les déchets bitumés ont été produits dès les années 1960 par le CEA sur le site de Marcoule puis par Orano sur le site de La Hague. Ils sont entreposés sur les sites de production dans l'attente d'une solution de stockage. La gestion des capacités d'entreposage de ces déchets jusqu'à la mise à disposition d'une filière de gestion constitue un enjeu important pour leurs producteurs.

Des déchets technologiques, dont une partie relève de la filière FA-VL, issus de l'exploitation d'installations nucléaires du CEA ou d'Orano, sont toujours en cours de production et entreposés sur les sites dans l'attente d'une solution de stockage. Les enjeux industriels liés à la gestion des entreposages de ces déchets et à leur saturation sont également à considérer.

Compte tenu des temporalités très diverses relatives à la production des déchets, de leur disponibilité pour mise en stockage et de la mise à disposition d'une filière opérationnelle de gestion de ces déchets, différentes solutions de gestion sont potentiellement nécessaires, ce qui constitue un enjeu industriel fort. En outre, l'exploitation des installations d'entreposage des déchets dans l'attente d'un stockage, ou la création de nouveaux entreposages, constituent également un enjeu industriel pour les producteurs.

Des enjeux environnementaux associés à la mise en œuvre d'une installation de stockage

L'implantation d'une installation de stockage de déchets radioactifs sur un site conduit, comme tout projet industriel, à devoir analyser les impacts environnementaux qu'occasionneront la construction puis l'exploitation de l'installation, de façon à les limiter au maximum.

Les sites présentant des formations géologiques argileuses de faible conductivité hydraulique, qui sont recherchées pour accueillir un stockage de déchets radioactifs en raison de leur performance de confinement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, sont très souvent des zones humides, et sont de ce fait riches en biodiversité. C'est pourquoi les enjeux environnementaux sur ces sites peuvent être particulièrement importants et doivent être étudiés le plus précisément possible pour éviter de les impacter, et les réduire s'ils ne peuvent pas être évités.

De plus, le renforcement des exigences visant à limiter l'artificialisation des sols et les émissions de gaz à effet de serre est également à intégrer pour justifier des choix de site et de technique(s) constructive(s) pour mettre en œuvre un tel projet.

Ainsi, la sensibilité environnementale des sites pressentis pour accueillir un projet, tel qu'une installation de stockage de déchets radioactifs, constitue un enjeu important pour la définition de solutions de gestion.

Ces choix ainsi que les enjeux énoncés dans ce chapitre sont également à mettre en regard des solutions alternatives à la création d'une installation de stockage.

2.2 Concept de stockage à faible profondeur en milieu « confinant »

La loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 définit le cadre de la gestion des déchets radioactifs (8). Le principe d'un stockage dédié aux déchets FA-VL a ainsi été exprimé dès 2006. Les orientations générales de sûreté de l'ASN de 2008 (2) précisent que « *le stockage de déchets FA-VL est [...] une installation intermédiaire entre un centre de stockage de surface et un centre de stockage en formation géologique profonde* ».

Dans ce contexte, la solution étudiée depuis de nombreuses années en France pour le stockage des déchets FA-VL est un stockage implanté à faible profondeur dans une formation géologique présentant des propriétés de confinement pour la plupart des radionucléides et des substances toxiques chimiques, correspondant à une formation géologique argileuse. Ce concept constitue une solution permettant d'apporter une réponse aux enjeux de sûreté, proportionnée aux caractéristiques radiologiques des déchets FA-VL. Elle est considérée en France comme la solution de référence pour la gestion des déchets FA-VL.

Ce concept, qui pourrait être mis en œuvre au sein de la formation argileuse du site de la CCVS, constituerait ainsi une des solutions de gestion des déchets FA-VL. Il présente toutefois des forces et des limites, quel que soit le site d'implantation, qu'il convient d'analyser. Cette analyse doit en outre prendre en considération la nature des radionucléides présents dans les déchets et les performances de rétention de ceux-ci de la formation argileuse d'accueil.

Par principe, la faible profondeur permet d'isoler les déchets de l'homme et de l'environnement tout en répondant à l'exigence de proportionnalité à la dangerosité des déchets FA-VL, en comparaison avec le stockage à grande profondeur des déchets HA et MA-VL dont le niveau d'activité et de dangerosité est plus élevé. Corrélativement, la mise en œuvre d'un stockage à faible profondeur permet *a priori* une conception plus simple et moins coûteuse que celle d'un stockage à plus grande profondeur. La notion de « faible » profondeur n'est cependant pas quantifiée aujourd'hui dans les textes formalisant les exigences de sûreté de telles installations, en France et à l'étranger. Elle est à définir et à justifier notamment par l'étude de l'érosion pouvant intervenir au cours du temps, qui est spécifique à la nature de la formation hôte du stockage et au site, et par l'étude de scénarios d'intrusions humaines involontaires dits « banals » dans le stockage qui doivent être étudiés pour vérifier que les conséquences de l'exposition de l'homme occasionnée par ces situations restent acceptables.

Par ailleurs, le choix de considérer pour le stockage une formation hôte présentant des propriétés de confinement des radionucléides et des substances toxiques chimiques significatives et stables dans le temps vise, du point de vue de la sûreté, à limiter et à maîtriser dans le temps leurs transferts hors du stockage et de fait leur impact radiologique et chimique sur l'homme et l'environnement. Les formations argileuses de faible conductivité hydraulique possèdent de telles propriétés de confinement, stables dans le temps. Ceci a cependant pour corollaire, pour des déchets à vie longue dont l'activité décroît très lentement - voire ne décroît pas sur la première centaine de milliers d'années - de maintenir dans le stockage une activité radiologique quasi constante sur de grandes échelles de temps.

Ainsi, le concept de stockage à faible profondeur en formation argileuse pour des déchets FA-VL permet d'isoler les déchets dans le temps et de bénéficier des propriétés de confinement de l'argile hôte. En cela, il constitue une solution proportionnée pour la gestion des déchets FA-VL.

Cependant, il est par nature sensible aux évolutions géodynamiques externes et climatiques qui interviendront aux échelles de temps au cours desquelles le niveau d'activité des déchets sera maintenu, et sensible aux activités humaines (plus accessible au cours du temps aux intrusions humaines). Par conséquent, la mise en œuvre de ce concept nécessite de déployer une approche spécifique aux grandes échelles de temps pour démontrer, sur le plan de la sûreté, que l'impact radiologique du stockage reste acceptable, y compris à très long terme. L'approche que l'Andra a établie pour cela est présentée au chapitre 8.1 du présent rapport.

Ceci met en évidence le paradoxe posé par un tel concept dans l'argile entre, d'une part le confinement des radionucléides et substances toxiques chimiques permettant de limiter l'impact du stockage, et d'autre part, le maintien dans le temps d'une activité importante puisqu'elle ne décroit pas ou très peu et que les radionucléides à vie longue sont retenus dans le stockage. Or les processus d'altération et d'érosion de la couche argileuse abritant le stockage, qui interviendront dans le temps, conduiront à rendre les déchets plus accessibles sur le long terme.

Par conséquent, le présent rapport apporte un éclairage sur le caractère acceptable du concept de stockage à faible profondeur en formation argileuse affleurante, avec ses forces et ses limites, et sur la nature des déchets FA-VL pour lesquels il constitue une solution adaptée. Le projet à l'étude sur le site de la CCVS, pour des propriétés de site et hypothèses d'architectures données, objet du présent rapport, peut constituer une solution adaptée pour certains déchets FA-VL. D'autres solutions de gestion seront à étudier pour les déchets qui ne pourraient pas être stockés sur le site de la CCVS.

2.3 Alternatives au concept de stockage à faible profondeur en formation argileuse

Des solutions de gestion, autres que le concept de stockage à faible profondeur en formation argileuse, peuvent être à considérer pour certains déchets étudiés dans le présent rapport et pourraient répondre aux problématiques posées par leur gestion. Ces autres solutions complètent ainsi la « boîte à outils » pour la gestion globale de ces déchets. Ce sont notamment :

- le stockage de certains déchets FA-VL dans des installations de stockage de surface actuellement en exploitation, dans la mesure où ces déchets respectent les spécifications d'acceptation de ces installations et leurs exigences de sûreté ;
- le stockage dans le centre de stockage Cigéo, actuellement en projet. Des déchets FA-VL figurent dans les inventaires d'étude de cette installation. Les déchets de graphite, les déchets bitumés FA-VL tels qu'étudiés dans le rapport d'étape de 2015 et des déchets radifères du nucléaire diffus figurent dans l'inventaire de réserve étudié au titre de l'adaptabilité de cette installation. Les déchets conditionnés en colis CBF-C'2 catégorisés FA-VL ainsi que les déchets MA-VL candidats au stockage sur le site de la CCVS et étudiés pour le présent rapport figurent dans l'inventaire de référence pris en compte dans le dossier d'autorisation de création déposé en janvier 2023. Néanmoins, le stockage de déchets FA-VL dans cette installation ne répond pas au besoin de disposer d'une solution proportionnée pour ces déchets ;
- des concepts de stockage alternatifs, restant à définir. Pour cela, une étape de recherche d'un site adapté aux caractéristiques des déchets concernés et situé sur un territoire favorable à l'implantation d'une installation de stockage de déchets radioactifs, est à mener.

Dans le rapport de l'Andra (9) transmis le 4 janvier 2024 en réponse à l'article n° 29 de l'arrêté PNGMDR (4), l'Andra présente les options de gestion envisageables pour les déchets FA-VL, qu'elle a identifiées en lien avec les producteurs.

Le projet de stockage sur le site de la CCVS, objet du présent rapport, fait ainsi partie des options de gestion des déchets FA-VL considérées. Les enseignements apportés par les études présentées dans la suite du rapport dossier, qui font l'objet du chapitre 9, permettent de préciser le rôle du projet de stockage sur le site de la CCVS dans la stratégie globale de gestion des déchets FA-VL et éclairent sur les caractéristiques à retenir pour la définition d'un concept complémentaire.

Les éléments présentés dans le rapport en réponse à l'article n° 29 feront prochainement l'objet d'une analyse multicritères et multi-acteurs, afin de permettre l'expression de tous les acteurs sur leurs priorités (environnementales, économiques, éthiques ou encore territoriales…), avant d'aboutir à l'élaboration d'un schéma de gestion à l'horizon 2025.

2.4 Rappel des études menées par l'Andra sur le stockage à faible profondeur en formation argileuse

Dès les années 1990, l'Andra a initié des études pour concevoir des installations de stockage dédiées aux déchets FA-VL. Ces études ont d'abord été réalisées sur le plan théorique, en l'absence de site identifié pour réaliser des études d'implantation, et pour un inventaire de déchets radifères et de déchets de graphite uniquement.

À partir de 2013 et à la suite d'un processus de recherche d'un site adapté à l'implantation d'une installation de stockage, l'Andra a poursuivi ses études pour justifier la faisabilité de concevoir et d'implanter une installation de stockage à faible profondeur sur un site situé dans le département de l'Aube (dép. 10), pour un inventaire de déchets comportant des déchets bitumés de faible activité et des déchets technologiques.

Ces précédentes études, ainsi que les principaux enseignements qui en ont été tirés, sont succinctement rappelées ci-après.

2.4.1 Premières études menées sur site générique

Au cours des années 1990, l'Andra a initié des études de deux projets de stockage, l'un pour des déchets radifères, l'autre pour des déchets de graphite. Le regroupement de ces deux projets a été acté en 2004 pour envisager la création d'une installation à dimension industrielle et favoriser la synergie entre les deux projets.

Pour ce projet, des dossiers présentant des « options de sûreté d'un stockage en subsurface de déchets FA-VL – déchets radifères et graphite » et des « allocations de performances » pour les déchets de graphite ont été soumis en 2002 à l'Autorité de sûreté nucléaire. Celle-ci ayant constaté l'intérêt de poursuivre le développement d'un projet de stockage à faible profondeur, l'Andra a réalisé en 2004-2005 des études d'un niveau d'avant-projet sommaire, sur site générique, pour le stockage de déchets radifères et de déchets de graphite.

Ces études ont permis de préciser les exigences requises pour le site d'accueil du stockage à rechercher. Des critères ont ainsi été établis, portant notamment sur la nature de la formation géologique et ses propriétés géophysiques et géochimiques au regard des performances recherchées de confinement des radionucléides contenus dans les déchets radifères et de graphite. Ainsi, le site recherché devait en particulier présenter une couche de formation argileuse affleurante, de très faible conductivité hydraulique, homogène et régulière, d'une épaisseur d'au moins 50 m, sur une superficie d'environ 100 ha.

Sur cette base, une première recherche de site a été menée à l'échelle du territoire de la France métropolitaine. En 2008, l'Andra a été missionnée par le ministre de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire pour conduire cette recherche au moyen d'un processus d'appel à candidature auprès de territoires répondant aux critères établis, pour réaliser des investigations géologiques en vue d'implanter un stockage de déchets FA-VL. Sur la quarantaine de candidatures reçues par l'Andra, deux communes ont été sélectionnées après analyse reposant sur des critères géologiques, environnementaux et sociaux-économiques. Cependant, ces communes ont retiré leur candidature au cours de l'année 2009. Par la suite, le Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire a formulé des recommandations pour poursuivre la démarche de recherche de site. Dans ce cadre, l'Andra avait alors proposé une démarche consistant notamment à étendre les activités de l'Andra dans la Communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines qui comporte des communes qui s'étaient portées candidates en 2008.

À l'issue de ce processus, la Communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines (CCVS), située dans le département de l'Aube (dép. 10), a délibéré favorablement à la réalisation par l'Andra d'investigations géologiques sur son territoire.

2.4.2 Études sur le site de la Communauté de Communes de Vendeuvre-Soulaines

Entre 2013 et 2015, l'Andra a réalisé une première campagne d'investigations géologiques sur le site de la CCVS.

Cette campagne de reconnaissance géologique a concerné un secteur d'environ 50 km^2 correspondant aux cinq communes de Juzanvigny, Épothémont, Crespy-Le-Neuf, Morvilliers et La Chaise. Trois objectifs principaux ont été donnés pour cette campagne : vérifier l'existence de volumes d'argile suffisants présentant des capacités de confinement répondant aux critères de sûreté et des propriétés mécaniques permettant de construire des ouvrages de stockage, caractériser les écoulements d'eau en profondeur, et évaluer la stabilité géomorphologique du site dans le temps.

Les résultats obtenus ont conduit à délimiter une zone dite « zone restreinte » (ZR) en limite nord de la CCVS, entre les communes de Juzanvigny et Épothémont. Sur cette zone, l'épaisseur de la couche des Argiles tégulines est comprise entre 30 m au sud-est de la ZR et 80 m au nord-ouest de la ZR.

Les contours de la ZR (cf. Figure 2-2) ont été déterminés :

- au nord, par la limite du territoire de la CCVS ;
- à l'ouest, par la zone urbanisée de Juzanvigny ;
- au sud-ouest, par l'exclusion des secteurs présentant des gradients hydrauliques verticaux ascendants (zone artésienne), non favorables à l'implantation d'une installation de stockage ;
- au sud et à l'est, par l'épaisseur insuffisante de la couche d'argile (inférieure à 30 m).

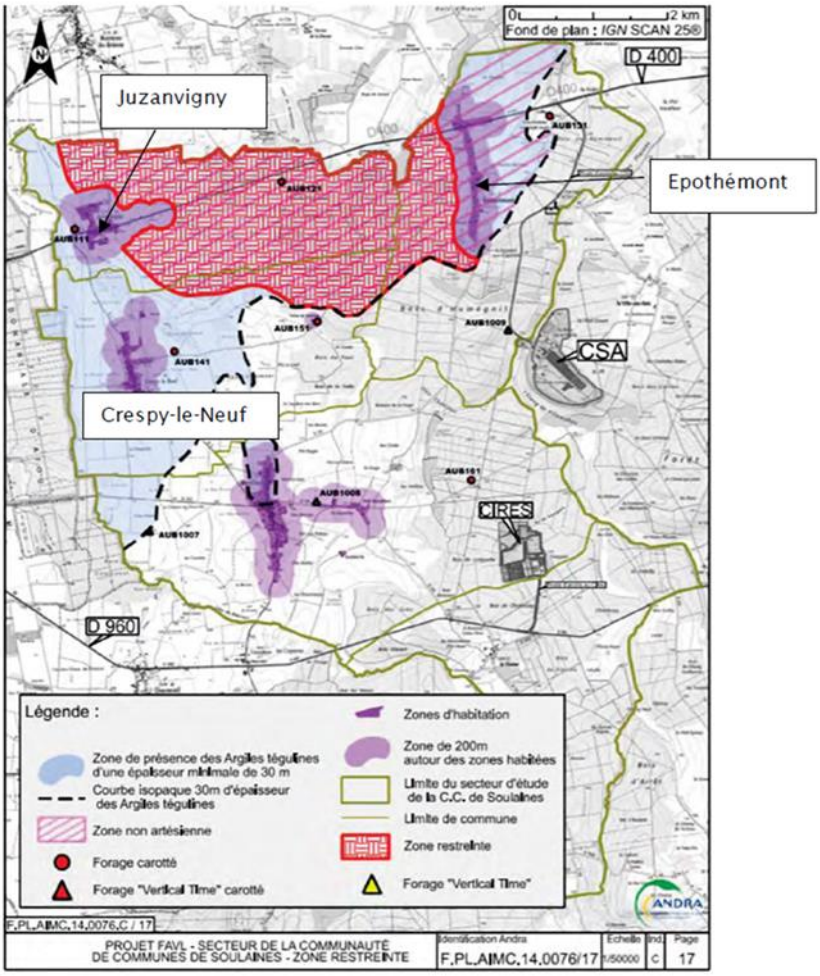


Figure 2-2 Zone restreinte telle que définie en 2013 pour réaliser de premières études pour la conception d'une installation de stockage de déchets FA-VL

En se fondant sur les résultats des investigations menées en 2013-2015, l'Andra a réalisé différentes études :

- des études de conception préliminaires d'un stockage sur le site ;
- de premières évaluations de sûreté :
  - ✓ après la fermeture du stockage, sur une période allant jusqu'à 50 000 ans, d'une part pour évaluer la compatibilité des déchets au stockage à faible profondeur par l'étude de scénarios d'intrusions humaines involontaires dans le stockage, d'autre part évaluer de façon exploratoire l'impact radiologique dû à certains radionucléides d'intérêt mobiles dans le système de stockage et présents dans les déchets étudiés, pour une évolution normale du stockage ;
  - ✓ en exploitation, centrées sur les principes de maîtrise du confinement de la radioactivité et la protection des personnes contre les rayonnements ionisants.
- un premier diagnostic des enjeux environnementaux identifiés sur la ZR.

L'inventaire des déchets considérés alors pour ces études était constitué de déchets FA-VL dits « historiques » décrits ci-avant (cf. Chapitre 2.1 du présent rapport), c'est-à-dire des déchets radifères et de graphite, une partie des déchets bitumés produits par le CEA de Marcoule et des déchets technologiques du site Orano de La Hague.

La profondeur d'implantation des alvéoles de stockage considérée était d'environ 20 m au toit des alvéoles. Deux options de conception différentes ont été étudiées, fondées sur des techniques de creusement éprouvées industriellement pour la réalisation d'ouvrage à cette profondeur :

- un concept dit « à ciel ouvert », correspondant à la réalisation d'une excavation permettant d'atteindre le niveau d'implantation des alvéoles par terrassement depuis la surface. Des alvéoles de stockage creusées dans l'argile hôte accueillent les colis à stocker. Les vides sont comblés par un matériau de remplissage. Après remplissage des alvéoles, la couverture du stockage est reconstituée avec les Argiles tégulines excavées, de façon à obtenir une couverture homogène de faible conductivité hydraulique ;
- un concept dit « souterrain », correspondant à la réalisation d'alvéoles de stockage en galeries souterraines. Après remplissage des alvéoles par les colis à stocker, les galeries sont remblayées avec les Argiles tégulines excavées et les accès sont refermés au moyen d'ouvrages de fermeture.

Ces deux options ont été prises en compte pour réaliser les études de sûreté précitées.

Ces études et les résultats obtenus ont été présentés dans un rapport d'étape (1) remis en 2015 dans le cadre du PNGMDR 2013-2015.

2.4.2.1 Principaux résultats et enseignements tirés des études de 2015

Ces études ont permis de conclure qu'aucun point rédhibitoire à la poursuite des études d'un stockage à une profondeur d'environ 20 m, pour des déchets FA-VL, qui pourrait être implanté sur une zone d'environ 10 km^2 au nord du territoire de la CCVS, n'avait été identifié.

Les investigations réalisées sur le site ont permis de disposer d'une bonne représentation du milieu géologique sur le secteur investigué. Elles ont notamment montré que la couche des Argiles tégulines possède une bonne homogénéité, une conductivité hydraulique moyenne faible et une géométrie simple à faible pendage d'une épaisseur comprise entre 30 m et 80 m. De plus, les écoulements d'eau sur la ZR sont caractérisés par un gradient de charge hydraulique vertical descendant. Ces caractéristiques sont globalement favorables à l'implantation d'un stockage à faible profondeur.

Les premières études d'ingénierie ont également permis de disposer de premières représentations d'architectures de stockage et d'estimer des superficies des zones de stockage.

Sur le plan de la sûreté, les résultats obtenus ont montré la capacité d'un tel stockage à isoler et à confiner les déchets sur de longues durées. Les études, menées pour chaque typologie de déchets, n'ont pas conduit à identifier de point rédhibitoire, attaché à l'une ou l'autre de ces typologies, pour la poursuite des études.

En particulier, les éléments de conclusions suivants ont été établis :

- pour les déchets radifères, les propriétés de sorption importantes des radionucléides des déchets radifères (isotopes des chaînes de filiation) dans les Argiles tégulines et dans les matériaux cimentaires sont notables ;
- pour les déchets de graphite, des enseignements ont été acquis sur le comportement du carbone 14 et du chlore 36, principaux radionucléides contenus dans ces déchets présentant des enjeux pour les transferts par l'eau et contributeurs principaux à l'impact radiologique sur la période étudiée. La réévaluation de l'inventaire en chlore 36 conduite en 2013-2015 par le CEA et EDF, radionucléide pour lequel une réduction notable avait été établie, avait en outre été prise en compte. Des compléments d'étude sont en cours pour consolider les connaissances notamment sur la cinétique de relâchement et la spéciation du carbone 14 et sur les propriétés de transfert dans les composants du stockage. Certains de ces résultats ont été intégrés dans cette étude ;
- pour les déchets bitumés, la mobilité du technétium 99 due à sa sensibilité aux conditions redox a permis d'identifier que la maîtrise du transitoire redox au sein du stockage constitue un enjeu fort, en particulier pour le cas d'une couverture reconstituée.

Par ailleurs, des études complémentaires ont été identifiées pour étudier l'exhalaison des gaz radioactifs tel que le radon généré par certains déchets radifères.

Les principaux enjeux environnementaux recensés lors de cette première phase d'études du site sont liés à la présence de zones naturelles sensibles, caractérisées en particulier au sud-est de la ZR, où se trouve un site classé Natura 2000 et zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique de type I (ZNIEFF). Des espaces boisés sont également présents sur le site dans la partie ouest. Enfin des zones humides sont présentes sur une majeure partie de la surface de la ZR.

Des axes de travail et d'études nécessaires à la poursuite du projet ont ainsi été recensés, en particulier sur le besoin de compléter les investigations géologiques du site, d'itérer les études de sûreté à partir des améliorations des connaissances des déchets et des caractéristiques du site.

2.4.2.2 Principales conclusions de l'instruction

Les conclusions de l'instruction de ce rapport par l'ASN ont fait l'objet du courrier (10). L'ASN a également rendu son avis sur l'ensemble des études remises sur les déchets FA-VL dans le cadre du PNGMDR 2013-2015 (11), et en particulier sur les études du rapport d'étape (1) et les grands principes de conception présentés par l'Andra. Les principales conclusions ayant guidé la poursuite du projet et la définition des études menées pour le présent dossier sont présentées ci-après. Elles concernent principalement les connaissances des performances de la couche d'argile et la nécessité de garantir et justifier une épaisseur d'argile suffisante sous le stockage pour maîtriser les transferts de radionucléides et substances toxiques chimiques vers l'aquifère sous-jacent.

Elle a également estimé, compte tenu des caractéristiques connues du site et des premiers résultats des évaluations de sureté, qu'il « *sera difficile de démontrer la faisabilité, dans la zone investiguée, d'une installation de stockage de l'intégralité des déchets de type FA-VL* » étudiés par l'Andra dans le rapport d'étape précité.

S'agissant des caractéristiques géologiques des Argiles tégulines, l'ASN confirme le besoin d'acquérir des connaissances complémentaires, en particulier au niveau inférieur de la couche d'argile en interface avec l'aquifère sous-jacent.

S'agissant des connaissances sur les évolutions géodynamiques du site, en particulier dues aux phénomènes d'altération et d'érosion des argiles, l'ASN demande à l'Andra d'affiner ses connaissances sur ces processus pour la zone d'étude.

S'agissant de la profondeur d'implantation du stockage, l'ASN a estimé que la vingtaine de mètres considérée par l'Andra « *semble faible vis à vis de son altération* [*i.e.* Altération de la couverture], *de l'érosion et des risques d'intrusion* », demandant à l'Andra de proposer des marges pour tenir compte de ces phénomènes.

S'agissant des évaluations de sûreté, l'ASN a estimé que les fonctions de sûreté retenues par l'Andra étaient compatibles avec les orientations générales de 2008 (2). Elle a précisé que l'exposition au radon devait être étudiée au-delà de la période considérée par l'Andra, à savoir 50 000 ans, et a demandé à l'Andra d'étayer les évaluations de sûreté des transferts des radionucléides dans l'eau. En particulier, elle souligne l'importance de conserver une épaisseur de garde inférieure suffisante pour limiter les relâchements de radionucléides et substances toxiques chimiques dans l'aquifère sous-jacent.

S'agissant des études d'ingénierie, l'ASN a en particulier relevé que des compléments d'études sont à apporter pour la mise en œuvre d'une couverture reconstituée après-fermeture des alvéoles de stockage, ainsi que sur les risques de tassements liés à la dégradation des composants du stockage.

2.4.2.3 Poursuite des études à la suite de l'instruction du rapport d'étape de 2015

Par la suite, l'Andra a engagé des études conformément au plan d'actions établi à l'issue du rapport d'étape de 2015 (1). En particulier, en 2017, l'Andra a conduit une deuxième campagne d'investigations géologiques du site, ciblée plus particulièrement sur la caractérisation des formations superficielles.

Par ailleurs, afin d'établir un guide de sûreté pour le stockage à faible profondeur et mettre à jour les orientations générales de 2008 (2), l'ASN a mis en place un groupe de travail en 2018-2019, réunissant notamment l'IRSN, l'Andra, des membres des groupes permanents d'experts et les producteurs de déchets FA-VL. Les conclusions du groupe de travail ont été présentées dans un rapport de l'IRSN (12) et présentées en mars 2021 aux membres du groupe permanent d'experts chargés de déchets, qui a rendu

un avis (6). Ces travaux ont permis de préciser certaines exigences de sûreté pour la conception d'un stockage à faible profondeur, au sujet notamment de l'exposition liée au radon et de la ressource en eau. D'autres sujets n'ont pas trouvé consensus, en particulier la profondeur à considérer pour les intrusions humaines banales et les modalités de gestion des incertitudes sur l'évolution géomorphologique de l'environnement pour la démonstration de sûreté aux grandes échelles de temps. Les propositions de l'Andra pour traiter ces deux sujets ont en particulier été présentées aux membres du GPD. Dans son principe, la démarche de l'Andra pour gérer le sujet des incertitudes aux grandes échelles de temps, qui repose sur l'évaluation de situations conventionnelles et est exposée en détail au chapitre 8 du présent rapport, a reçu un accueil favorable du GPD (6), en indiquant qu'il « *n'a pas d'objection à ce que les incertitudes soient traitées au travers de scénarios qualifiés de conventionnels par l'Andra dès lors qu'ils constituent une évaluation raisonnablement majorante des évolutions potentielles du stockage*. »

Compte tenu de cet historique des études conduites sur un stockage à faible profondeur et en particulier des enseignements acquis des études menées sur le site de la CCVS, de leur instruction, et des travaux conduits par l'ASN sur les exigences de sûreté d'un tel stockage, l'Andra a repris ses études en 2021 en considérant une profondeur d'implantation de 30 m au toit des alvéoles de stockage. Le choix de cette profondeur d'implantation vise à répondre à la demande de l'ASN de proposer des marges par rapport à la profondeur d'une vingtaine de mètres prise en compte dans le rapport d'étape de 2015, pour tenir compte notamment des risques d'intrusion dans le stockage pouvant intervenir à long terme. Les justifications associées sont présentées dans le chapitre 8.2.2 du présent rapport présentant les évaluations des situations d'intrusions humaines involontaires dans le stockage et dans le chapitre 4.7.2 du présent rapport présentant l'évaluation des phénomènes d'érosion sur le site de la CCVS.

Outre l'évolution de la profondeur d'implantation du stockage, l'Andra a suivi une approche différente de celle suivie pour le rapport d'étape de 2015, qui visait à étudier de façon exploratoire un stockage de déchets FA-VL en retenant des paramètres correspondant au meilleur de la connaissance pour réaliser les évaluations de sûreté et d'identifier les études qui devaient être menées pour poursuivre les études de conception du stockage. Les éléments présentés dans le présent rapport constituent une itération supplémentaire à la suite des études exploratoires de 2015. L'approche suivie par l'Andra pour le présent rapport a en particulier pour objectif d'étudier la faisabilité du stockage et d'éclairer la capacité d'accueil du site ainsi que la compatibilité des différents déchets considérés avec un stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS. Ainsi, l'Andra a, pour réaliser les évaluations de sûreté après-fermeture menées et présentées au chapitre 8 du présent rapport, fait des choix enveloppes, c'est-à-dire visant à ne pas sous-estimer les impacts radiologiques et dus au substances toxiques chimiques *via* l'étude de scénarios de sûreté considérant des hypothèses et des paramètres conservatifs. Ceci conduit à l'obtention de résultats qui, en intégrant les évolutions de connaissances en particulier sur la cinétique du relâchement du carbone 14, aboutissent à des enseignements et des conclusions plus défavorables pour certaines typologies de déchets, telles que les déchets de graphite, que celles pressenties à la suite des études de 2015.

Ainsi, l'Andra a établi sa stratégie et construit un programme d'études permettant de statuer sur la pertinence de poursuivre les études de conception d'un stockage sur le site de la CCVS. Cette stratégie a été partagée avec les producteurs de déchets FA-VL et présentée à l'ASN. Elle fait l'objet de la feuille de route précitée.

Le programme d'études comporte cinq principaux volets.

1. L'établissement de l'inventaire des déchets pour mener les études et la constitution des données d'entrée relatives aux déchets et à leur conditionnement.
2. L'étude des enjeux et contraintes de surface, en particulier les enjeux environnementaux sur la zone d'étude du site de la CCVS, afin de poser les bases d'une démarche « Éviter-réduire-compenser » (ERC).
3. L'étude de l'évolution géodynamique de la zone d'étude, en particulier de l'aléa érosif sur une période de 100 000 ans.
4. Des études de sûreté portant sur la période suivant la fermeture du stockage, en considérant deux grandes périodes : l'une allant jusqu'à 50 000 ans après la fermeture de stockage, l'autre allant au-delà de 50 000 ans.
5. Une revue des meilleures techniques disponibles pour la réalisation d'un stockage implanté à 30 m de profondeur au toit des alvéoles de stockage.

La synthèse de ces études est présentée dans le présent document.

3

Présentation des déchets étudiés

3.1 Déchets radifères et déchets contenant des substances radioactives naturelles (SRON) 30
3.2 Déchets de graphite 33
3.3 Déchets bitumés des sites CEA de Marcoule et Orano de La Hague 35
3.4 Déchets technologiques 37
3.5 Évolutions de l'inventaire des déchets étudiés par rapport aux études de 2015 38
3.6 Synthèse de l'inventaire des déchets étudiés 38

Les déchets étudiés pour ce rapport sont, d'une part des déchets catégorisés FA-VL dans l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (IN) (13), tels que présentés au chapitre 2.1 du présent rapport, d'autre part des déchets aujourd'hui catégorisés MA-VL potentiellement compatibles avec un stockage à faible profondeur.

Les déchets FA-VL étudiés sont pour une grande partie les déchets FA-VL historiques (étudiés pour le rapport d'étape de 2015 (1)). Il convient de noter que les résidus de traitement de conversion de l'uranium (RTCU) ne sont pas intégrés au champ des études de ce rapport. Pour ces déchets, un projet d'installation de stockage dédiée est actuellement à l'étude par Orano et fait l'objet de l'action FA-VL.5 du PNGMDR 2022-2026 (3).

Les déchets MA-VL étudiés dans le cadre de ce rapport répondent à des critères établis par les producteurs selon lesquels ces déchets pourraient relever d'une solution de stockage intermédiaire entre un stockage en surface et un stockage en profondeur, compte tenu de leur niveau d'activité et de leur durée de vie. Ce sont des déchets bitumés MA-VL produits par le CEA sur son site de Marcoule et par Orano sur son site de La Hague, des déchets technologiques et de procédé produits par le CEA sur ses sites de Marcoule et de Cadarache et par Orano sur son site de La Hague, ainsi que des déchets de type radifère produits par le passé par le CEA sur le site du Bouchet situé en Essonne (dép. 91).

Les critères sur lesquels le CEA et Orano se sont appuyés pour définir les déchets MA-VL candidats aux études pour ce rapport sont fondés sur des limites d'activités radiologiques en émetteurs alpha à 300 ans et de débit d'équivalent de dose des colis, dérivées des spécifications d'acceptation du CSA. En raison du calendrier des études du PNGMDR, les producteurs ont défini les listes de colis de déchets MA-VL étudiés avant que l'Andra n'élabore les critères demandés par l'article 27 de l'arrêté PNGMDR (4) (action FA-VL.1 du PNGMDR 2022-2026), fondés sur une démarche différente de celle des producteurs et qui constituent des critères d'exclusion d'un stockage à faible profondeur. Les critères définis par l'Andra et leur application par les producteurs sont globalement cohérents avec les inventaires pris en compte pour les études du présent rapport. Comme indiqué au chapitre 2.1 du présent rapport, les listes de colis de déchets établis par les producteurs en réponse à l'article 27 n'ont pas remis en cause le périmètre des déchets étudiés pour le présent rapport. Les réponses du CEA et d'Orano à l'article 27 ont été transmises par les courriers cités en références (14) et (15) respectivement.

Les déchets étudiés peuvent être répartis en quatre grandes typologies :

- les déchets radifères et les substances radioactives d'origines naturelles (SRON), présentés au chapitre 3.1 du présent rapport ;
- les déchets de graphite, présentés au chapitre 3.2 du présent rapport ;
- les déchets bitumés, présentés au chapitre 3.3 du présent rapport ;
- les déchets technologiques issus de l'exploitation ou du démantèlement d'installations nucléaires, présentés au chapitre 3.4 du présent rapport.

Une partie des déchets dont la production est passée et/ou perdure, sont d'ores et déjà conditionnés. D'autres déchets sur pied, produits et/ou en cours de production ne sont pas encore conditionnés, mais un conditionnement de référence est d'ores et déjà défini par leurs producteurs. Enfin, pour d'autres déchets encore, leurs producteurs n'ont pas défini à ce stade de conditionnement : des hypothèses de conditionnement ont été prises par l'Andra pour réaliser les études du présent rapport, celles-ci sont appelées à évoluer lorsque les producteurs auront défini les conditionnements.

3.1 Déchets radifères et déchets contenant des substances radioactives naturelles (SRON)

Les déchets radifères sont, d'une part des déchets historiques issus de l'exploitation passée de minerais pour l'extraction de terres rares ou d'uranium, d'opérations de dépollution de sites industriels anciens ayant utilisé le radium ou le thorium dans la première partie du vingtième siècle, d'autre part des déchets produits par des activités industrielles actuelles, par exemple pour la production de zirconium utilisé pour l'industrie électronucléaire. Les déchets SRON sont des déchets générés par la transformation de matières premières naturellement riches en radioéléments, non utilisées pour leurs propriétés radioactives.

Les déchets radifères sont caractérisés par leur inventaire radiologique en radioéléments des chaînes naturelles dites 4N (thorium 232 et descendants), 4N+2 (uranium 238 et descendants), et 4N+3 (uranium 235 et descendants). Les déchets radifères exhalent du radon, dont l'isotope le plus stable est le radon 222 produit par désintégration radioactive du radium 226.

Ces déchets contiennent des sels chimiques solubles en teneurs variables selon leur origine.

3.1.1 Déchets issus de l'extraction de terres rares produits par la société Solvay

Jusqu'en 1994, la société Solvay a traité dans son usine de La Rochelle de la monazite[3] pour en extraire des terres rares, utilisées par exemple pour la fabrication de composants électroniques ou de catalyseurs pour l'automobile. Cette activité a généré des déchets de type radifère :

- des résidus radifères (dits RRA), entreposés dans des fûts sur le site du CEA de Cadarache et sur le site de La Rochelle. Ils se présentent sous la forme d'une pâte partiellement asséchée par l'ajout d'un absorbant minéral. Une faible production de ces résidus perdure aujourd'hui. À l'horizon 2030, la quantité de déchets RRA est estimée à 5 399 tonnes. Leur conditionnement en vue d'un stockage n'est pas défini à ce jour par Solvay ;
- des résidus solides banalisés (dits RSB), entreposés sur le site de La Rochelle. Ils se présentent sous la forme de terres humides, qui constituent un stock de 8 400 tonnes. De même, Solvay n'a pas défini à ce jour de conditionnement pour ces déchets.

Solvay étudie par ailleurs le traitement d'hydroxydes bruts de thorium (HBTh) dans l'objectif de valoriser le thorium, l'uranium et les terres rares qu'ils contiennent. Le procédé de traitement, s'il était mis en œuvre, conduirait à produire notamment des résidus radioactifs de nature semblable aux déchets RRA. La quantité de résidus ainsi produits, dont le conditionnement n'est à ce jour pas défini, est estimée à 2 418 tonnes par Solvay.



Figure 3-1 *Déchets radifères entreposés sur le site de Solvay de La Rochelle – Résidus radifères RRA (à gauche) et Résidus solides banalisés RSB (à droite)*

3.1.2 Déchets issus du traitement de minerais d'uranium produits par le CEA

De 1946 à 1971, le CEA a traité des minerais riches en uranium et en thorium dans son usine du Bouchet en Essonne (dép. 91), principalement pour la fabrication de combustibles pour les piles et réacteurs expérimentaux exploités par le CEA et la production de sels de thorium. Ces activités ont conduit à la production de déchets radifères.

Les résidus miniers issus de ces activités ont été entreposés sur le site du CEA d'Itteville en Essonne (déposante d'Itteville) qui a également servi de bassin de décantation de boues. En 1993, une couverture constituée d'argile compactée, de graviers et de terres arables a été mise en place pour recouvrir les résidus entreposés. La masse totale de résidus entreposée est estimée à 40 000 tonnes ; la part de résidus catégorisés FA-VL représente environ 12 000 tonnes. Un conditionnement de référence, sous forme d'une benne industrielle, est aujourd'hui envisagé par le CEA.

[3] La monazite est un minerai de terres rares d'origine naturelle, qui contient couramment du thorium ou de l'uranium



Figure 3-2 *Déposante du site du CEA d'Itteville (source illustration - Inventaire national Andra)*

Les opérations de décontamination d'équipements de procédé ont conduit à la production de déchets radifères composés de sulfates de plomb (dits « sulfate de plomb radifères »). Ces déchets ont été conditionnés sur site entre 1958 et 1970 en fûts métalliques, puis ont subi des reconditionnements successifs. Les colis obtenus (caissons béton de 5 m^3 ou conteneurs bétons cylindriques de 500 L) sont entreposés sur le site du CEA de Cadarache. Ces déchets, aujourd'hui catégorisés MA-VL, ont été inclus dans les études à la demande du CEA en raison de leur caractère radifère. Ils représentent environ 152 tonnes de déchets conditionnés.



Figure 3-3 *Colis de déchets dits « sulfate de plomb radifères » entreposés sur le site du CEA de Cadarache (source illustrations - Inventaire national Andra)*

3.1.3 Déchets issus de l'extraction de zirconium produits par Framatome

L'usine de Jarrie, du nom de la commune où elle est implantée en Isère (dép. 38), assure la transformation du zirconium en produits destinés à l'industrie nucléaire, en particulier pour la fabrication de gaines métalliques des combustibles des réacteurs à eau sous pression. Elle est aujourd'hui exploitée par Framatome. Le procédé mis en œuvre conduit à la fabrication de deux types de résidus radifères catégorisés FA-VL :

- des résidus produits lors de l'étape du procédé de carbochloration du minerai de zircon ou de zircone (dits résidus CAX). Framatome estime les quantités de résidus CAX à 4 595 tonnes en 2050 ;
- des résidus produits lors de l'étape du procédé de sublimation du chlorure de zircon issu de la chloration du minerai de zircon ou de zircone (dits résidus SAX). Framatome estime les quantités de résidus SAX à 1 360 tonnes en 2050.

Le conditionnement de ces déchets en vue de leur stockage n'est à ce jour pas défini par Framatome.

3.1.4 Déchets issus de l'assainissement d'anciens sites pollués, dont la gestion est confiée à l'Andra

La gestion des déchets issus de l'assainissement de sites pollués au radium et au thorium est placée, à la demande de l'État, sous la responsabilité de l'Andra. Ces opérations ont généré des déchets radifères de type FA-VL, entreposés dans le bâtiment de regroupement et d'entreposage du Cirès exploité par l'Andra, ainsi que sur le site du CEA de Cadarache.

Ils sont constitués de terres et gravats contaminés au radium 226 ou au thorium 232. Ils proviennent notamment de l'assainissement :

- de sites de la société des Réveils Bayard (Seine-Maritime (dép. 76)), qui réalisait des mécanismes d'horlogerie ;
- du site de Bandol (Var (dép. 83)) sur lequel était implanté un laboratoire de la société d'études et application du radium (SEA radium) produisant des sels radio-luminescents ;
- de l'ancienne fabrique de pierres à briquets Orflam-Plast de Pargny-sur-Saulx (Marne (dép. 51)), ainsi que de l'étang de la Gravière situé non loin de la fabrique ;
- du démantèlement de deux usines de fabrication d'acide phosphorique de la société Grande Paroisse (Seine-Maritime (dép. 76)).

D'autres déchets seront produits par de futures opérations d'assainissement. La quantité de déchets issus des opérations d'assainissement est évaluée par l'Andra à 1 356 tonnes à l'horizon 2030. Ces déchets sont aujourd'hui conditionnés en caissons métalliques.

3.1.5 Autres déchets radifères : SRON et déchets issus des petits producteurs non électronucléaires (PNE)

Les déchets contenant des substances radioactives d'origine naturelle (SRON) sont des déchets produits par la transformation de matières premières naturellement riches en radioéléments, non utilisées pour leurs propriétés radioactives. Ces déchets sont d'origines diverses : la production d'engrais phosphatés, le traitement de minerais, le traitement de terres rares.

Par ailleurs, dans le cadre de sa mission de service public, l'Andra collecte des déchets FA-VL chez des particuliers ; elle assure également la gestion de déchets provenant de petits producteurs non électronucléaires. Ces déchets sont de nature très variée : déblais issus d'activités anciennes d'exploitation de la monazite, paratonnerres, sources provenant de détecteurs ioniques d'incendie, carters contenant du thorium issus de l'aéronautique…

Les déchets SRON et les déchets produits par de petits producteurs pris en compte pour les études présentées dans ce rapport représentent une quantité d'environ 6 497 tonnes. Le conditionnement de ces déchets, sous forme de caissons métalliques principalement, est aujourd'hui envisagé par l'Andra.

3.2 Déchets de graphite

Les déchets de graphite proviennent majoritairement de l'exploitation et du démantèlement à venir des réacteurs électronucléaires de l'ancienne filière uranium naturel graphite-gaz (UNGG), de réacteurs expérimentaux, ainsi que des opérations de traitement des combustibles utilisés dans les réacteurs UNGG réalisées dans l'usine UP2-400 de La Hague.

La majorité des radionucléides contenus dans les déchets de graphite sont des produits d'activation neutronique du graphite, de ses impuretés et du caloporteur, tels que le tritium, le cobalt 60 et le fer 55 pour les radionucléides à vie courte, ainsi que le carbone 14, le chlore 36, le calcium 41, le nickel 59 et 63 et le niobium 94 pour les radionucléides à vie longue. S'y ajoutent des produits de fission (strontium 90, césium 137 et 135, technétium 99…) et des actinides (américium, plutonium…) relâchés par les combustibles lors du fonctionnement des réacteurs. Les déchets de graphite produits par les opérations de retraitement des combustibles (dits « déchets UNGG » dans la suite du document) contiennent d'autres radionucléides, notamment de l'uranium et du neptunium.

Depuis une quinzaine d'années, EDF et le CEA mènent des travaux sur la caractérisation de leurs déchets de graphite pour préciser les inventaires radiologiques. La dernière mise à jour date de 2021 et est en cours d'examen par l'ASN. Ces données ont en outre été transmises à l'Andra pour la réalisation des études de sûreté après-fermeture présentées dans ce rapport. Ces réévaluations d'inventaire radiologique conduisent à des valeurs plus faibles d'activité pour plusieurs radionucléides, notamment le carbone 14, le chlore 36 et le calcium 41, diminuant ainsi les inventaires radiologiques de leurs déchets de graphite. Orano a également procédé à une mise à jour des inventaires radiologiques de ses déchets de graphite, conduisant également à une réduction des activités de certains radionucléides.

3.2.1 Empilements et chemises de graphite des réacteurs de la filière UNGG du CEA et d'EDF

Dans les réacteurs de la filière UNGG, d'importantes quantités de graphite étaient mises en œuvre comme modérateur neutronique. Deux types de déchets sont issus de ces réacteurs : les briques et rondins de graphite formant les empilements constituant les cœurs des réacteurs et leurs protections biologiques le cas échéant, et les chemises de graphite qui constituaient les supports des cartouches de combustible.

EDF a exploité six réacteurs électrogènes situés à Chinon (réacteurs CHA1, CHA2 et CHA3), à Saint-Laurent-des-Eaux (réacteurs SLA1 et SLA2) et à Bugey (réacteur BUG1). Le CEA a exploité trois réacteurs électrogènes situés sur le site de Marcoule (réacteurs G1, G2 et G3) et trois réacteurs expérimentaux situés sur les sites de Saclay (piles EL2 et EL3) et de Cadarache (réacteur Rapsodie). Ils sont aujourd'hui à l'arrêt et en attente de démantèlement, phase au cours de laquelle les colis de déchets seront effectivement produits.

Les plus fortes activités dans les empilements et chemises de graphite sont représentées par le carbone 14, le tritium, et le nickel 63. Pour le stockage de ces déchets, une attention particulière est portée au chlore 36, radionucléide à vie longue particulièrement mobile dans le système de stockage, de période radioactive très longue (3×10^5 ans), bien que présent en très faible concentration dans le graphite. Ce radionucléide est produit par l'activation d'impuretés de chlore présentes dans le graphite lors de l'irradiation en réacteur.

À la suite de la récente mise à jour des inventaires radiologiques par le CEA et EDF, des réductions notables de l'activité en carbone 14, chlore 36 et calcium 41, qui sont les principaux radionucléides contributeurs de l'impact radiologique du stockage, sont à souligner pour les empilements et les chemises, par rapport aux inventaires pris en compte lors des études précédentes (rapport d'étape de 2015 (1)).

La quantité totale des déchets de graphite est d'environ 22 000 tonnes, dont 19 000 tonnes pour les empilements (15 067 tonnes provenant des réacteurs d'EDF et 3 677 tonnes de ceux du CEA) et 3 000 tonnes pour les chemises (1 994 tonnes entreposées dans des silos sur le site EDF de Saint-Laurent et 731 tonnes entreposées sur le site du CEA de Marcoule).

EDF et le CEA ont défini des conditionnements de référence pour ces déchets : ce sont des colis en béton dans lesquels un liant hydraulique est injecté autour des déchets. Des colis parallélépipédiques de grande dimension sont retenus par EDF et des caissons métalliques pré-bétonnés à parois planes (CPP) par le CEA.

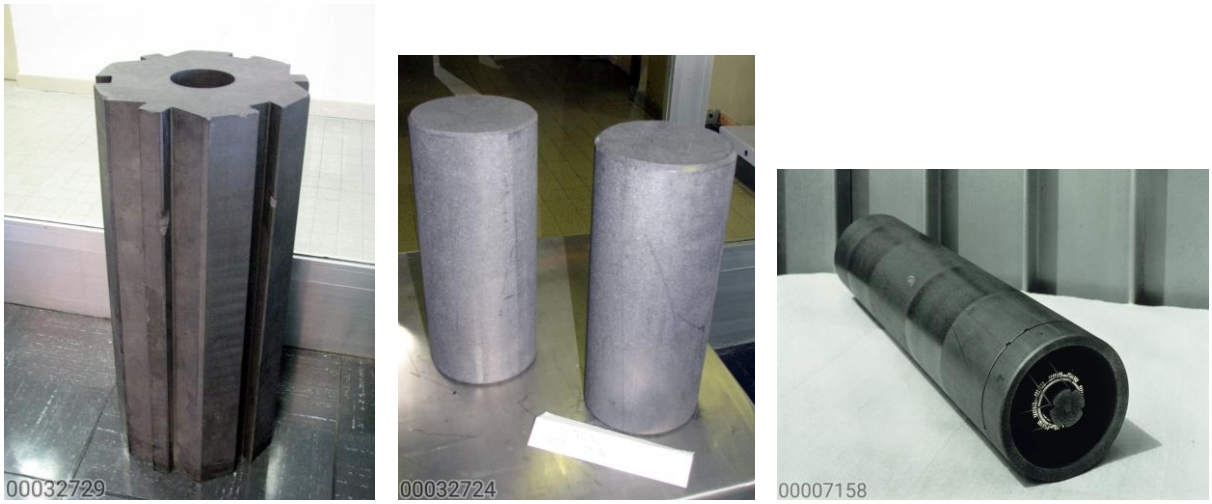


Figure 3-4 *Brique de l'empilement du réacteur EDF de Bugey 1 (gauche), rondins de la protection biologique du réacteur de Bugey 1 (milieu) et chemise des réacteurs EDF de Saint Laurent (droite) (source illustrations EDF)*

3.2.2 Déchets de graphite d'Orano produits par les opérations de traitement des combustibles UNGG

Le traitement des combustibles UNGG réalisé entre 1966 et 1990 dans l'usine UP2-400 de l'établissement Orano de La Hague a conduit à la production de déchets, actuellement entreposés sur le site de La Hague. Ceux étudiés dans le cadre de ce dossier sont :

- des déchets de structure des combustibles UNGG, entreposés en vrac dans les silos 115 et 130 et le SOD (stockage organisé des déchets) de l'usine UP2-400. Les silos contiennent des morceaux de chemises de graphite, de magnésium, des fils de selles en acier inoxydable, des éclats d'uranium. Orano envisage de conditionner ces déchets dans un colis en béton cubique, dans lequel un liant hydraulique est injecté autour des déchets ;
- des déchets dits de faible granulométrie, composés de résines échangeuses d'ions, zéolithes et diatomées, utilisées pour traiter les eaux des unités du procédé de traitement des combustibles, actuellement entreposées dans des décanteurs (décanteurs 1, 2 et 8) situés dans un atelier de l'usine UP2-400, ainsi que des boues de fond de fosses de procédé. Orano envisage de conditionner ces déchets dans des colis de béton cylindriques, les déchets étant bloqués par un liant hydraulique.

Les plus fortes activités de ces déchets UNGG sont représentées par le césium 137, le strontium 90, le nickel 63, l'américium 241, ainsi que le carbone 14. Ces déchets comportent également du chlore 36. À l'*instar* d'EDF et du CEA, la récente mise à jour des inventaires radiologiques des déchets UNGG a conduit à réduire significativement leurs activités en carbone 14 et chlore 36. Des caractérisations complémentaires de ces déchets seront réalisées en vue de leur reprise et conditionnement.

Les déchets UNGG FA-VL d'Orano représentent une masse de 1 146 tonnes de déchets.

3.3 Déchets bitumés des sites CEA de Marcoule et Orano de La Hague

Une partie des effluents radioactifs aqueux produits par les activités des installations nucléaires des sites du CEA de Marcoule et d'Orano La Hague est traitée dans les stations de traitement des effluents liquides de ces sites, respectivement la STEL et les installations STE2 et STE3 (l'installation STE2 étant désormais à l'arrêt). Le procédé mis en œuvre conduit à la production de boues, composées de sels chimiques (solubles et insolubles) et de radionucléides. Les boues sont enrobées à chaud dans du bitume puis l'enrobé est conditionné dans des fûts en acier doux entreposés dans des entreposages dédiés.

La STEL du site du CEA de Marcoule produit des déchets bitumés depuis 1966. Environ 62 000 fûts de déchets bitumés sont entreposés sur le site. Une grande partie de ces fûts est en cours de reprise et de reconditionnement pour être placés dans des surfûts en acier inoxydable, puis entreposés dans un entreposage dédié (surfûts EIP, du nom de l'installation d'entreposage – entreposage intermédiaire polyvalent). Environ 41 000 de ces fûts sont aujourd'hui catégorisés FA-VL à l'Inventaire national (inventaire de fûts de déchets bitumés établi par le CEA en considérant les critères d'acceptation radiologique du CSA), les autres sont catégorisés MA-VL. La quasi-totalité de ces déchets bitumés, à savoir les déchets bitumés FA-VL et la majeure partie des déchets bitumés MA-VL, est prise en compte pour les études objets du présent rapport.

L'installation STE3 du site Orano de La Hague produit des déchets bitumés depuis 1987 ; ils sont tous catégorisés MA-VL à l'Inventaire national (IN 2023)[4] par Orano, qui estime cependant que la très grande majorité relève de la catégorie FA-VL. 11 353 fûts d'enrobés bitumineux ont ainsi été considérés pour les études du présent rapport. L'installation STE2 a produit des boues entreposées dans des silos dédiés du site de La Hague ; une petite partie de ces boues a été bitumée dans le cadre d'essais de bitumage dans l'installation STE3. 81 fûts acier ont été estimés par Orano comme relevant de la catégorie FA-VL et sont pris en compte dans les études du présent rapport.

Les déchets bitumés, qu'ils soient produits par le CEA ou Orano, présentent un spectre radiologique diversifié. Les plus fortes activités radiologiques sont représentées par le césium 137, le strontium 90, l'américium 241 et les isotopes 239 et 241 du plutonium. Pour les évaluations des impacts radiologiques de ces déchets en stockage, une attention particulière est portée au sélénium 79, à l'iode 129, au chlore 36 et aux isotopes 239 et 240 du plutonium, qui constituent les principaux contributeurs à l'impact radiologique.

Ces déchets sont également caractérisés par leur composition chimique, compte tenu de la présence de sels chimiques en quantités notables tels que des nitrates et des sulfates, ainsi qu'en espèces organiques complexantes telles que le tributylphosphate (TBP).

Les déchets bitumés représentent environ 17 000 tonnes, dont 14 470 tonnes de déchets bitumés produits par le CEA et 2 504 tonnes produits par Orano.

Pour leur stockage, Orano et le CEA envisage de conditionner ces déchets dans des colis semblables, à savoir des colis en béton de forme cubique dans lesquels quatre fûts de déchets bitumés sont disposés (colis CBF-K pour Orano et caisson métalliques pré-bétonné à parois planes (CPP) pour le CEA).



Figure 3-5 *Fût de déchet bitumés du site du CEA de Marcoule (en bleu à droite) et le sur-fût EIP (à gauche) (source Inventaire national Andra)*

[4] https://inventaire.andra.fr

3.4 Déchets technologiques

Les déchets technologiques sont issus principalement de l'exploitation des différentes installations nucléaires des sites du CEA de Cadarache et de Marcoule et du site d'Orano de La Hague, et par les opérations de maintenance ou de démantèlement réalisées dans ces installations.

3.4.1 Déchets technologiques du site d'Orano de La Hague

Entre 1990 et 1994, les déchets technologiques produits par l'exploitation des ateliers des usines du site de La Hague (outillages, équipements métalliques…) ont été conditionnés dans des conteneurs béton-fibre comportant de l'amiante, dénommés CAC (coques amiante ciment). 143 de ces colis, actuellement catégorisés MA-VL, sont pris en compte dans les études.

Depuis 1994, les déchets technologiques de La Hague sont conditionnés dans des conteneurs en béton cylindriques de type CBF-C2, dans lesquels les déchets sont bloqués par un liant hydraulique. Les colis dépassant les critères d'acceptation pour leur stockage en surface au Centre de stockage de l'Aube (CSA) sont entreposés sur le site de La Hague et sont dénommés CBF-C'2. Une partie de ces colis, catégorisée FA-VL ou MA-VL, est prise en compte dans les études présentées dans ce rapport, ce qui représente environ 3 500 colis CBF-C'2.

Leur spectre radiologique est très diversifié. Les plus fortes activités sont représentées par le césium 137, le strontium 90, ainsi que par des radionucléides émetteurs alpha notamment l'américium 241, le plutonium 238 et le curium 244. Une attention particulière est portée au sélénium 79, à l'iode 129, au chlore 36 et aux émetteurs alpha pour les études de sûreté long terme en stockage.

Ces déchets représentent 1 545 tonnes.

3.4.2 Déchets technologiques des sites du CEA de Marcoule et de Cadarache

Des déchets technologiques et de procédé de diverses natures et origines (dits « déchets technologiques » dans la suite du rapport), aujourd'hui catégorisés MA-VL, sont pour partie pris en compte dans les études du présent rapport compte tenu de leurs caractéristiques radiologiques.

Les caractéristiques physico-chimiques et radiologiques de ces déchets sont très variées. La plupart contiennent des radionucléides émetteurs alpha ainsi que des substances chimiques complexantes ou susceptibles de former des espèces complexantes par dégradation.

Au total, les « déchets technologiques » des sites du CEA de Cadarache et de Marcoule représentent 2 800 tonnes.

Une partie de ces déchets est déjà conditionnée. Pour les déchets qui ne sont pas encore conditionnés et certains colis qui nécessiteraient d'être reconditionnés, le CEA prévoit un conditionnement en caissons métalliques pré-bétonnés à parois planes (CPP).

<u>Déchets technologiques du site de Cadarache</u>

Les colis de déchets pris en compte dans les études de ce rapport sont pour l'essentiel déjà produits et entreposés sur le site du CEA de Cadarache.

L'ensemble de ces colis, actuellement intégrés à l'inventaire de référence du centre de stockage Cigéo et catégorisés MA-VL concernent :

- des déchets technologiques immobilisés en fûts de 870 L faiblement irradiants (870 FI) ;
- des boues de filtration enrobées en fûts de 223 L bloqués ou non en coque béton de 500 L faiblement irradiant (500 L FI) ;
- des déchets d'exploitation bloqués en fûts de 500 L moyennement irradiants (500 L MI).

Déchets technologiques du site de Marcoule

Les familles concernées correspondent à des déchets issus des opérations, en cours ou à venir, de reprise/conditionnement des déchets du site de Marcoule.

L'ensemble de ces déchets, de diverses natures et origines, sont actuellement intégrés à l'inventaire de référence de l'INB Cigéo dans la filière MA-VL et peuvent être répartis selon les groupes suivants :

- des déchets de procédé liés à l'exploitation de l'usine UP1 du site de Marcoule et aux opérations de mise à l'arrêt définitif et de démantèlement de l'usine. La plupart sont entreposés dans des fosses de l'installation MAR400 ;
- des colis qui seront produits par le conditionnement des déchets technologiques métalliques et organiques actuellement entreposés en puits et en fosses ;
- des déchets de structure métalliques des combustibles, autres que ceux des réacteurs UNGG, traités à l'usine UP1. Ils se trouvent actuellement dans les fosses du dégainage et en zone nord du site de Marcoule ;
- des déchets de structure magnésiens constitués des gaines et des bouchons des combustibles des réacteurs UNGG traités sur le site de Marcoule. La majorité de ces déchets magnésiens est répartie dans 16 fosses sur deux installations du site de Marcoule.

3.5 Évolutions de l'inventaire des déchets étudiés par rapport aux études de 2015

L'inventaire des déchets étudiés en 2023 a significativement évolué par rapport à celui étudié en 2015.

Quelques déchets étudiés en 2015 ne figurent plus dans l'inventaire des déchets FA-VL. C'est le cas de déchets SRON et des résines échangeuses d'ions d'EDF qui auraient été produites selon la stratégie de démantèlement sous eau des réacteurs UNGG d'EDF qui a depuis été abandonnée au profit d'un démantèlement à sec. Ces déchets représentent environ 440 tonnes qui ne sont plus prises en compte dans les études pour le présent rapport.

L'inventaire des déchets bitumés FA-VL du site du CEA de Marcoule a de son côté été réévalué à la hausse par le CEA compte tenu, d'une part de la prise en compte d'une date plus lointaine pour le calcul de l'activité des déchets (2030 au lieu de 2013) et de leur décroissance radiologique, d'autre part de l'amélioration des connaissances de ces déchets au fur et à mesure de leur reprise et reconditionnement en surfûts EIP. Le nombre de fûts de déchets bitumés FA-VL du CEA déclaré à l'Inventaire national passe ainsi de 32 900 à 40 800, soit environ 1 900 tonnes supplémentaires.

Des déchets UNGG FA-VL du site d'Orano de La Hague se sont en outre ajoutés à l'inventaire, représentant environ 50 tonnes de déchets supplémentaires.

Enfin, des déchets du CEA et d'Orano, aujourd'hui catégorisés MA-VL mais pouvant relever de la catégorie FA-VL, sont étudiés afin d'éclairer sur leur compatibilité avec un stockage à faible profondeur. Il s'agit principalement de déchets bitumés (environ 7 500 tonnes de déchets supplémentaires à ceux étudiés en 2015), de déchets technologiques (environ 3 800 tonnes de déchets supplémentaires à ceux étudiés en 2015) et de déchets radifères du CEA contenant des sulfates de plomb (environ 153 tonnes).

Au total, l'inventaire de déchets étudiés en 2023 compte 12 800 tonnes de déchets supplémentaires par rapport à l'inventaire de déchets étudiés en 2015.

Les résultats présentés dans les chapitres suivants permettent d'apprécier leur niveau de compatibilité avec un stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS.

3.6 Synthèse de l'inventaire des déchets étudiés

Le tableau 3-1 présente une synthèse de l'inventaire quantitatif des déchets étudiés dans le présent rapport et le tableau 3-2 présente l'inventaire quantitatif, par typologie de déchets, des radionucléides et substances toxiques chimiques d'intérêt pour les évaluations des transferts par l'eau (SEN).

Tableau 3-1 Inventaire quantitatif des déchets étudiés

Déchets	Masses (tonnes)	Volume de déchets conditionnés (m^3)
Déchets radifères	**42 177**	**74 888**
Déchets RRA (Solvay)	5 399	16 897
Déchets RSB (Solvay)	8 400	10 000
Résidus du traitement des HBTh (Solvay)	2 418	2 884
Déchets de la déposante d'Itteville (CEA)	12 000	18 090
Déchets « Sulfate de plomb radifères » (CEA)	152	654
Déchets CAX (Framatome)	4 595	13 117
Déchets SAX (Framatome)	1 360	4 270
Déchets issus de l'assainissement de sites pollués (Andra)	1 356	1 310
Autres déchets radifères	6 497	7 666
Déchets de graphite	**22 615**	**86 396**
Briques et rondins d'empilements (EDF)	15 067	62 093
Briques d'empilement (CEA)	3 677	7 277
Chemises de graphite (EDF)	1 994	8 467
Chemises de graphite (CEA)	731	1 452
Déchets UNGG (Orano)	1 146	7 107
Déchets bitumés	**16 974**	**89 912**
Déchets bitumés du site de Marcoule (CEA)	14 470	75 898
Déchets bitumés du site de La Hague (Orano)	2 504	14 014
Déchets technologiques	**4 357**	**25 970**
Déchets technologiques du site de La Hague (Orano)	1 545	4 313
Déchets technologiques des sites de Marcoule et de Cadarache (CEA)	2 812	21 657
Total	**86 123**	**277 166**

Tableau 3-2 *Inventaire quantitatif des radionucléides et substances toxiques chimiques d'intérêt pour les évaluations des transferts par l'eau (SEN) par typologie de déchets*

Radionucléides d'intérêt	Activité totale moyenne par typologie de déchets à t0 (01/01/2050) (Bq)	Substances toxiques chimiques d'intérêt	Masse totale par typologie de déchets (tonnes)
Déchets radifères			
Uranium 238	$7{,}22 \times 10^{11}$	Uranium	58,4
Uranium 234	$7{,}45 \times 10^{11}$	Bore	104
Radium 226	$1{,}51 \times 10^{13}$	Antimoine	0,402
Plomb 210	$1{,}41 \times 10^{13}$	Sélénium	0,608
Protactinium 231	$5{,}31 \times 10^{10}$		
Déchets de graphite			
Carbonne 14	$5{,}44 \times 10^{14}$		
Chlore 36	$1{,}175 \times 10^{12}$		
Déchets bitumés			
Sélénium 79	$1{,}11 \times 10^{11}$	Uranium	80,2
Iode 129	$2{,}10 \times 10^{10}$	Bore	1,26
Chlore 36	$6{,}50 \times 10^{10}$	Antimoine	0,0835
		Sélénium	0,085
Déchets technologiques			
Sélénium 79	$4{,}91 \times 10^{10}$	Uranium	36,7
Iode 129	$5{,}97 \times 10^{10}$	Bore	1,08
Chlore 36	$1{,}14 \times 10^{11}$	Antimoine	0,524
Carbone 14	$9{,}64 \times 10^{11}$	Sélénium	0,0386

4

État des connaissances sur le milieu géologique du site de la CCVS

4.1 Introduction *42*
4.2 Présentation des campagnes d'investigations de terrain *42*
4.3 Le cadre géologique – Description des formations *46*
4.4 Le cadre structural *50*
4.5 Les caractéristiques des Argiles tégulines *52*
4.6 L'organisation des écoulements *60*
4.7 L'évolution future du site *64*
4.8 Conclusion *68*

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les caractéristiques géologiques du site de la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines et du secteur environnant. Le terme « géologie » s'entend au sens large et inclut un ensemble de domaines allant de la sédimentologie, la géologie structurale, la minéralogie à la géochimie, l'hydrogéologie… L'acquisition des connaissances géologiques s'est faite principalement au travers de campagnes de terrain incluant des forages, des tranchées et la mise en œuvre de méthodes géophysiques. La réalisation de forages et de tranchées a permis d'accéder à des échantillons de roches ayant fait l'objet d'analyses en laboratoire (minéralogie, géochimie, géomécanique…). Les résultats obtenus complétés par des travaux de modélisation permettent de disposer d'une compréhension intégrée de la géologie du site à l'actuel et d'établir les grands traits de son évolution future.

Les caractéristiques du site présentées dans la suite de ce chapitre constituent une synthèse globale des études réalisées, en ciblant les principaux paramètres et propriétés nécessaires à la réalisation des évaluations de performance et de sûreté qui sont présentées dans les chapitres suivants.

4.2 Présentation des campagnes d'investigations de terrain

La caractérisation du site de Vendeuvre-Soulaines a été principalement réalisée au travers de deux grandes phases d'investigation :

- de 2013 à 2015, un premier volet d'études a été déployé sur un secteur d'environ 50 km² sur la communauté de communes de Soulaines Dhuys (devenue communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines) en incluant des travaux de cartographie géologique et d'hydrologie de surface sur des zones plus étendues. Cette phase a permis d'acquérir un premier état des lieux des caractéristiques géologiques du secteur en ciblant deux formations argileuses : les Argiles tégulines (Albien inférieur et moyen), présentes sur l'essentiel du secteur, plus particulièrement au nord, et les Argiles à Plicatules (Aptien inférieur) présentes à l'affleurement ou sous faible recouvrement au sud et sud-est du secteur. Les Argiles à Plicatules constituent la formation géologique dans laquelle sont implantés les alvéoles du Cires accueillant des déchets de très faible activité (TFA). Le terme « secteur d'étude » est utilisé pour désigner la zone étudiée en 2013-2015.

  La première campagne d'investigation s'est ponctuée mi-2015 par la remise du rapport d'étape FA-VL 2015 (1), qui a confirmé les Argiles tégulines en tant que potentielle roche hôte et qui a défini une zone de 10 km² pour mener des études complémentaires ;
- de 2016 à 2019, un second volet d'études a été conduit sur une zone restreinte de 10 km² située au nord du secteur étude. Le programme d'investigations menées s'inscrivait dans une logique de consolidation des connaissances et tenant compte des avis et recommandations formulés à la suite du rapport d'étape de 2015. Le terme « zone restreinte » est utilisé pour désigner la zone étudiée à partir de 2016.

4.2.1 Première campagne d'investigation (2013-2015)

La première campagne de terrain a été menée sur une zone constituée du territoire des cinq communes candidates : Juzanvigny, Épothémont, Crespy-le-Neuf, Morvilliers et La Chaise d'une superficie d'environ 50 km², complétée de travaux spécifiques de cartographie géologique et d'hydrogéologie sur des surfaces supérieures respectivement de 250 km² et 400 km².

L'objectif de cette campagne était d'apporter un ensemble de connaissances sur :

- la géologie du secteur d'étude (nature et géométrie des formations géologiques, nature des formations de surface…) ;
- les propriétés physico-chimiques des formations géologiques (minéralogie, propriétés de rétention, géochimie au sens large…) en ciblant principalement les formations argileuses des Argiles tégulines et les Argiles à Plicatules ;
- la caractérisation des eaux souterraines et de surface (hydrogéologie, hydrogéochimie et hydrologie) ;
- les propriétés hydromécaniques et dispersives des roches et des sols.

Une première phase s'est d'abord déployée sur la période allant d'août 2013 à janvier 2014 au travers des moyens suivants (cf. Figure 4-1) :

- 7 forages carottés ayant atteint jusqu'à 120 m de profondeur avec diagraphies (mesures en forages), levés géologiques, mesures sur chantier, ainsi que le prélèvement et l'expédition de plus de 1 000 échantillons pour analyse dans des laboratoires d'études et/ou de recherche. 6 plateformes ont été construites pour la réalisation de ces forages ;
- 120 km de mesures géophysiques légères acquises selon trois techniques différentes (levés électromagnétiques, panneaux électriques et des profils en sismique réfraction) représentant environ 120 km (3 × 40 km) de profils dont les tracés sont un peu différents des tracés prévisionnels en raison des difficultés d'accès sur le terrain et de la proximité des villages. 10 carottages sismiques dits VT, nécessaires à l'interprétation des mesures géophysiques ont été faits dont 3 dans des forages carottés réalisés en même temps ;
- 11 forages à but hydrogéologique avec le déploiement des diagraphies et des tests hydrogéologiques (pompages et suivis piézométriques) ;
- des caractérisations géotechniques incluant la réalisation de trous à la pelle (deux par plate-forme), de 5 essais au pénétromètre, de dix essais pressiométriques (deux par plate-forme) et de 5 forages carottés (limités à 30 m de profondeur) dont les échantillons prélevés ont fait l'objet d'analyses géotechniques ;
- des études de cartographie géologique et d'hydrologie de surface nécessitant une analyse plus régionale intégrant des mesures de jaugeage dans les cours d'eau du secteur d'étude élargi en hautes et basses eaux.

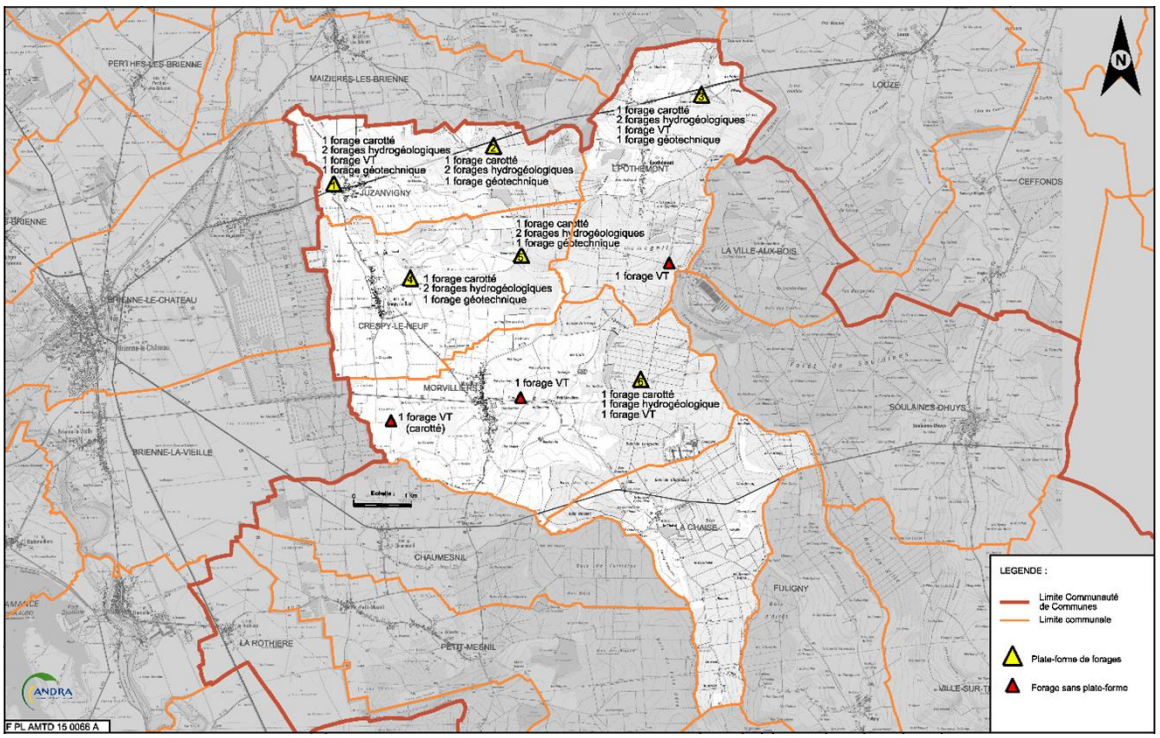


Figure 4-1 *Localisation des forages réalisés lors de la première phase de la campagne 2013-2015 sur le secteur d'étude de la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines*

Une seconde phase d'investigation de site a été mise œuvre au premier semestre 2015 avec un focus sur le nord du secteur d'étude. Cette seconde phase a consisté en la réalisation de trois forages carottés (un sur la commune de Crespy-le-Neuf et deux sur la commune d'Épothémont) et d'investigations géophysiques complémentaires.

L'intégration des résultats issus de cette campagne a permis (i) de montrer que, par sa nature riche en minéraux argileux et sa présence à l'affleurement ou sous couverture quaternaire sur le secteur étudié, la formation argileuse des Argiles tégulines (Albien supérieur et moyen) possède *a priori* des caractéristiques favorables, et (ii) de définir une zone restreinte d'environ 10 km² au nord du secteur d'étude dont les caractéristiques géologiques sont les plus favorables à la poursuite des études. Cette zone de 10 km² a été choisie selon trois critères :

- une épaisseur d'Argiles tégulines (la couche cible) supérieure à 30 m ;
- l'absence de nappe d'eau artésienne (c'est-à-dire une nappe d'eau dont la charge hydraulique est supérieure au niveau topographique et qui formerait une exsurgence d'eau par forage) ;
- l'exclusion d'une zone de 200 m autour des zones habitées.

4.2.2 Seconde campagne d'investigation (2016-2019)

La seconde campagne de terrain a été élaborée à la suite du rapport d'étape de 2015 précité en tenant compte des recommandations et avis formulés. Elle a été mise en œuvre sur la zone restreinte de 10 km² avec un objectif général de consolider les connaissances acquises lors de la première campagne dans une logique de démonstration de la faisabilité d'un projet d'installation dans cette zone restreinte. Les objectifs visés étaient les suivants :

- la confirmation de la lithologie et de la géométrie des Argiles tégulines ;
- la consolidation de la distribution spatiale des paramètres physico-chimiques et hydromécaniques ;
- le fonctionnement hydrogéochimique des Argiles tégulines, notamment dans la dizaine de mètres en interface avec l'atmosphère ;
- l'identification des formations superficielles et les liens avec les processus d'évolution géomorphologiques (érosion, dépôts, mouvement de terrain…).

Ces objectifs ont été abordés au travers de la mise en œuvre de moyens complémentaires permettant une articulation des études autour de la transition surface vers profondeur (cf. Figure 4-2) :

- une campagne de quatre forages carottés profonds (<100 m) réalisée de septembre 2017 à octobre 2018 avec la mise en œuvre de diagraphies, de levés géologiques et de prélèvements d'échantillons ;
- une campagne d'investigation des formations de surface comprenant la réalisation de tranchées de 5 mètres de profondeur et de sondages pédologiques (jusqu'à 1,5 m profondeur). 13 tranchées exploratoires ainsi été réalisées sur la commune de Juzanvigny localisées selon deux lignes de versants et deux lignes de points hauts (cf. Figure 4-2) ;
- des compléments d'investigations géophysiques.

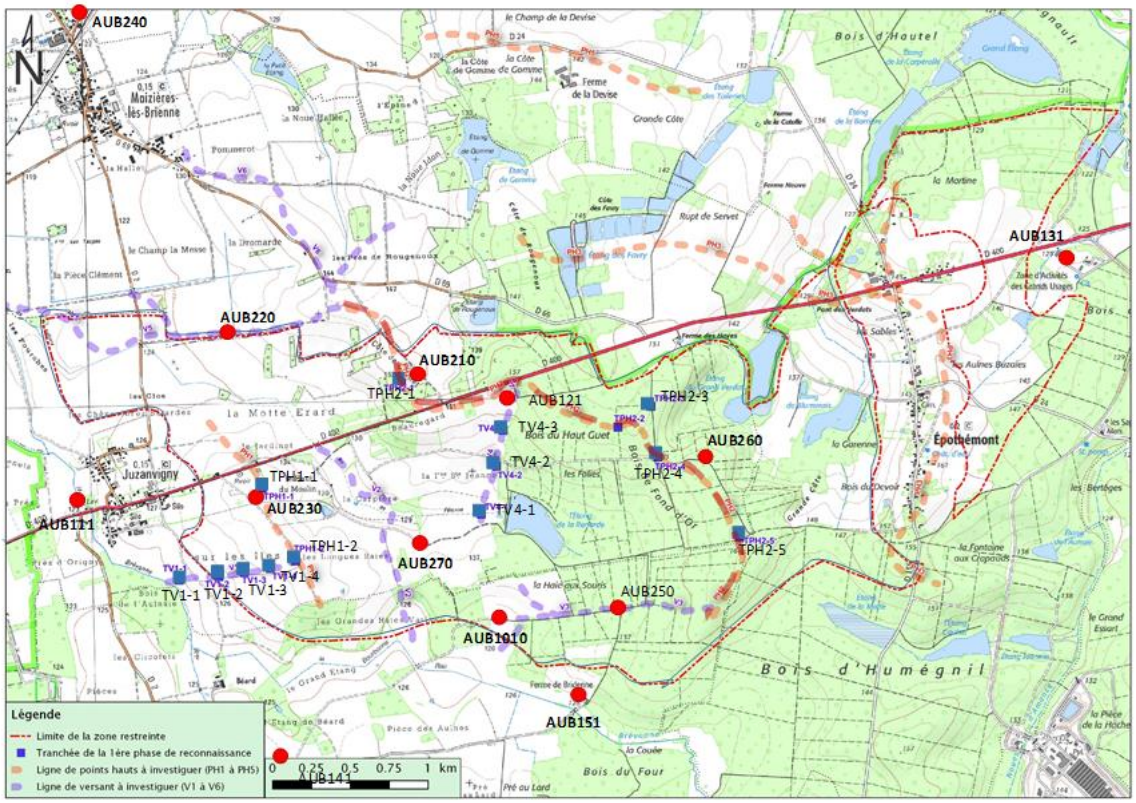


Figure 4-2 *Carte géographique de la zone restreinte (10 km²) avec localisation des forages (points rouges) et tranchées (carrés bleus) réalisés. Les lignes de versants sont représentées en pointillés violets et les lignes points hauts en pointillés orange*

L'intégration des résultats et la réanalyse des données pour le présent rapport a permis de redéfinir la zone d'intérêt pour l'implantation d'un stockage et la conduite des évaluations. Celle-ci a été réduite au nord-ouest en raison de son caractère artésien obtenu par extrapolation des données (cf. Figure 4-3).

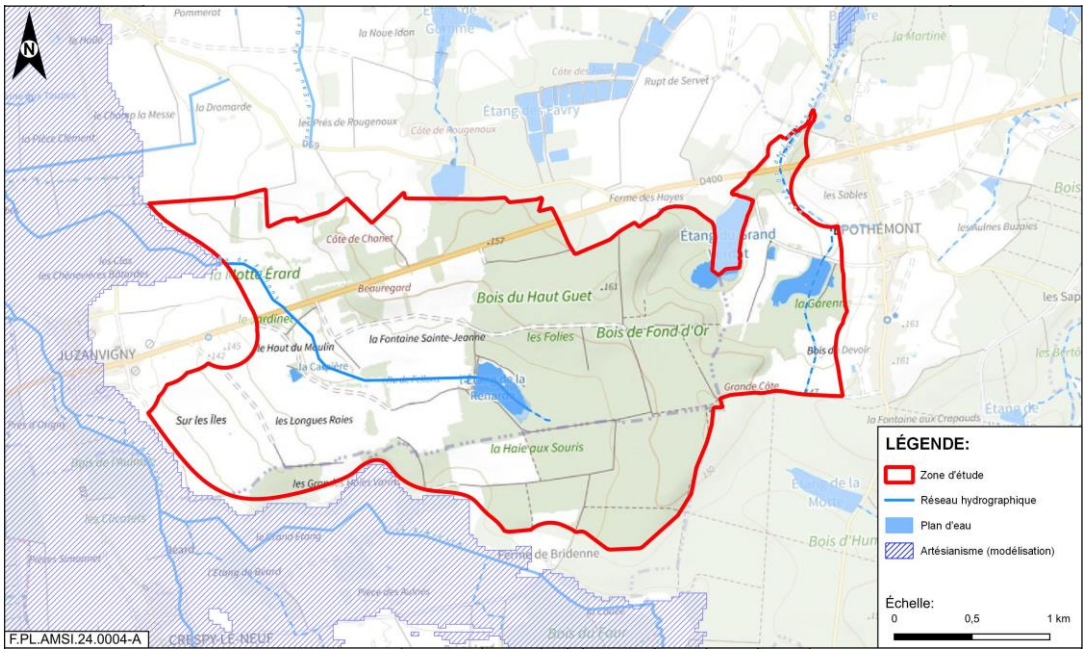


Figure 4-3 *Zones potentiellement artésiennes à proximité de la zone d'étude*

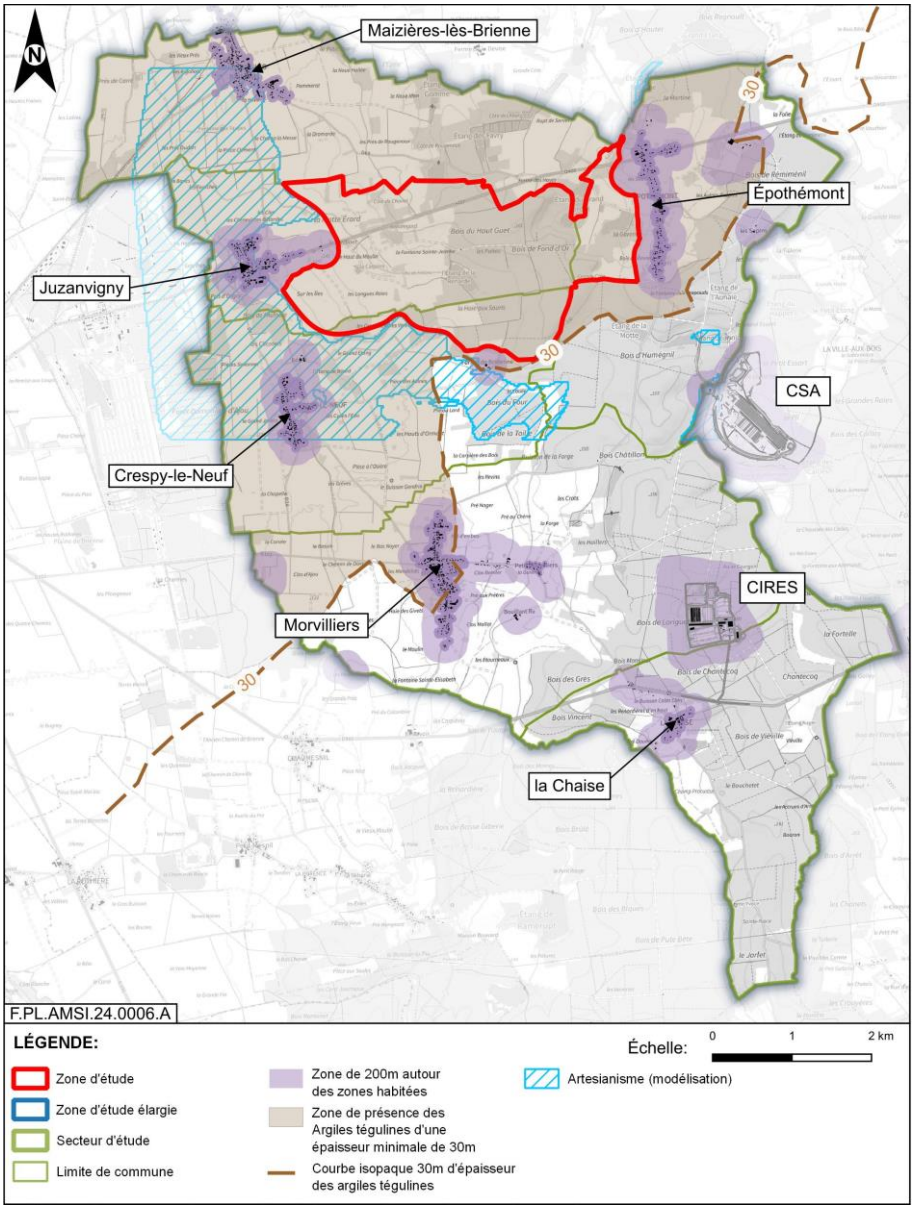


Figure 4-4 *Carte géographique de la zone d'étude retenue (contour rouge) et des critères de sélection associés*

Le terme « zone d'étude » est utilisé dans la suite du document pour désigner la zone considérée pour mener les évaluations de performance et de sureté en après-fermeture.

4.3 Le cadre géologique – Description des formations

Le secteur étudié s'inscrit dans la partie orientale du bassin de Paris, dans une région où les formations géologiques à l'affleurement, d'âge début du Crétacé (≈ 100 Ma), ont été peu affectées par les processus physiques liés à l'évolution du bassin (enfouissement, compaction, diagenèse…) (16). La pile sédimentaire est faiblement inclinée vers le centre du bassin (1° à 2°) et est constituée depuis la surface par (cf. Figure 4-5) :

- les Argiles tégulines de l'Albien moyen et inférieur ;
- la formation aquifère des Sables de l'Aptien supérieur ;
- les Argiles à Plicatules de l'Aptien inférieur ;
- les formations sablo-argileuses aquifères du Barrémien ;
- et les calcaires de l'Hauterivien.

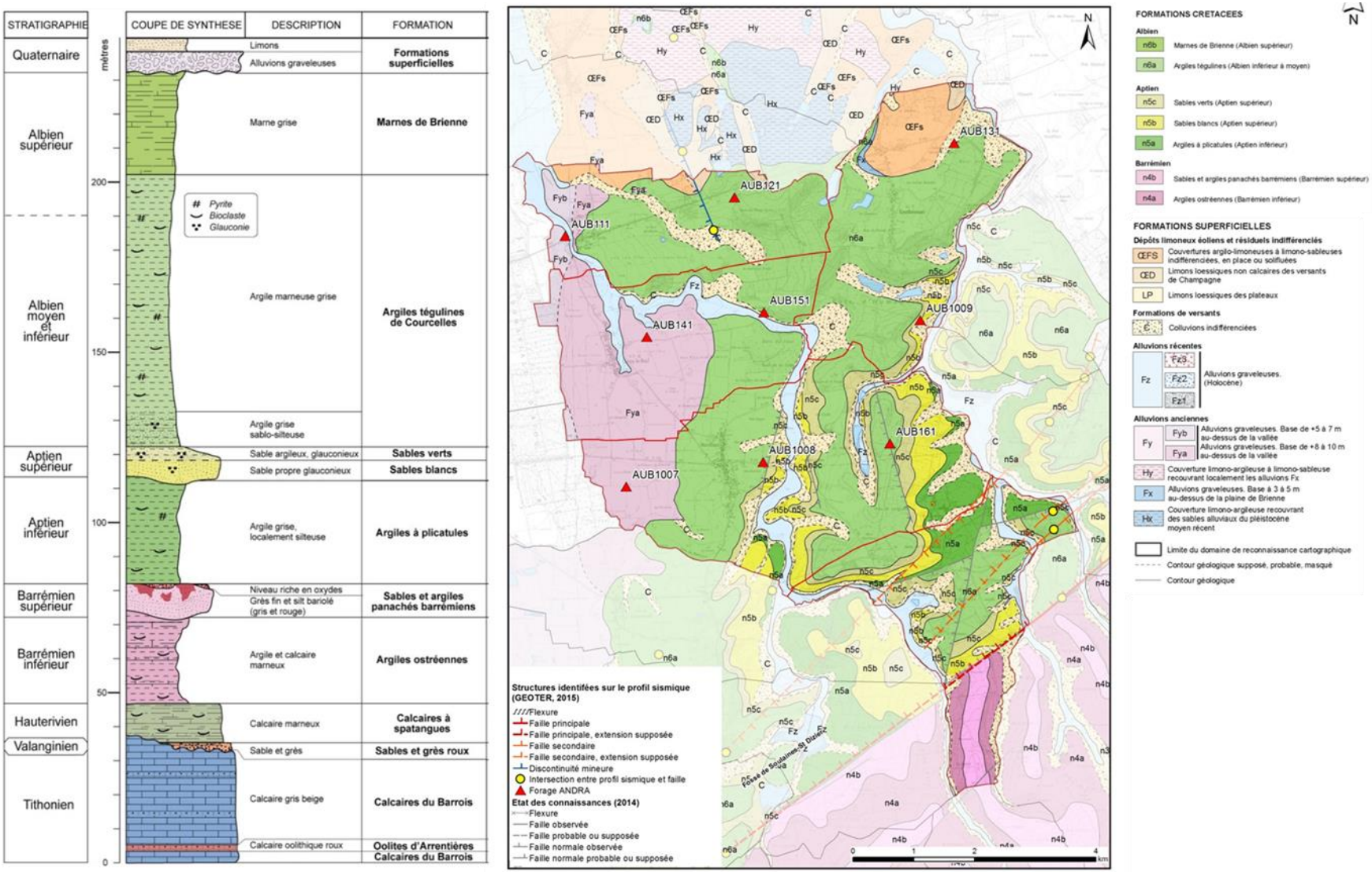


Figure 4-5 *Log géologique synthétique des formations crétacées présentes sur la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines (à gauche) et carte géologique de 2015 du secteur au 1/25 000e (à droite)*

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 ces formations. Les Marnes de Brienne qui constituent la formation sus-jacente des Argiles tégulines sont absentes sur le secteur étudié.

Cet ensemble de formations correspond à des dépôts terrigènes à marins qui se sont mis en place lors de cycles régressifs-transgressifs dans une aire limitée à une gouttière de direction nord-ouest/sud-est. L'inondation permanente de la gouttière a lieu pendant l'Albien avec les dépôts des Argiles tégulines et des Marnes de Brienne qui marquent l'approfondissement des dépôts et la mise en relation du bassin alpin et du bassin de la mer du nord (cf. Figure 4-6). L'ensemble constitué des Argiles tégulines et des Marnes de Brienne est également connu et référencée sous la détermination « Argiles du Gault ».

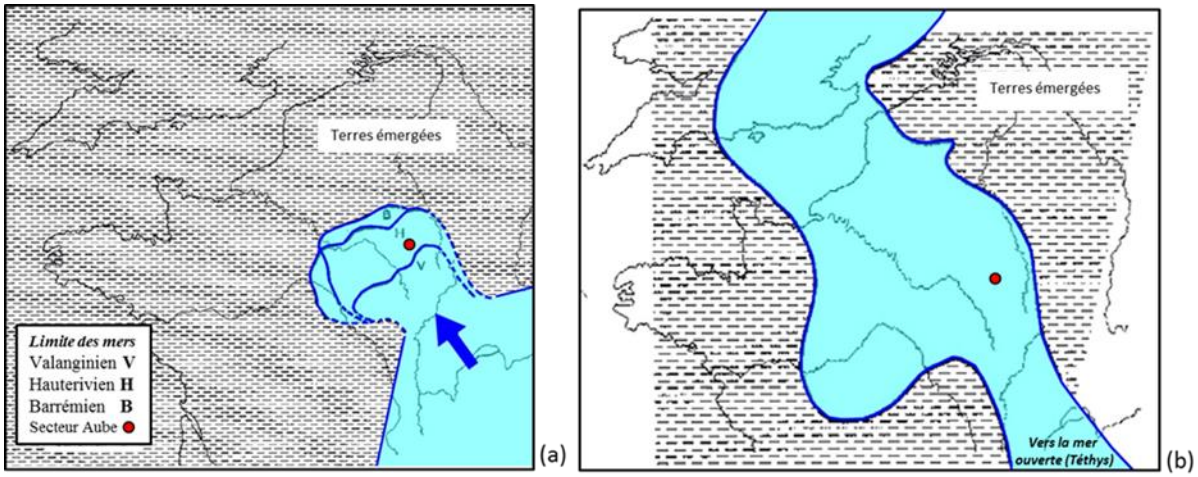


Figure 4-6 *Évolution de l'extension des incursions marines, du Valanginien (a) à l'Albien (b) (schéma modifié d'après Collete et al., 1995)*

Les résultats des investigations de terrain combinés à ceux provenant de forages déjà existants dans la région (forages pétroliers essentiellement) permettent de disposer d'un modèle géologique régional garantissant la bonne représentation de l'épaisseur et de l'extension latérale des formations géologiques.

Sur le secteur étudié, les Argiles tégulines ne sont pas présentes dans leur intégralité car elles ont été en partie érodées lors de la formation du relief actuel. La position du toit des Argiles tégulines au contact des Marnes de Brienne a toutefois été reconnue dans le forage AUB240 (situé au nord en dehors de la zone d'étude). L'épaisseur de la couche sur le secteur (en incluant celle des formations superficielles estimée à 5 m en moyenne) est fonction de la topographie (globalement entre 130 m et 160 m) et du pendage général de la couche. Ainsi, l'épaisseur de la couche atteint 80 m à l'extrémité nord-ouest du secteur étudié et diminue progressivement vers le sud-est jusqu'à l'affleurement des Sables de l'Aptien (cf. Figure 4-7 et figure 4-8). Le choix de la zone restreinte en 2015 a été réalisé à partir des cartes d'épaisseur des Argiles tégulines avec un critère minimal de 30 m. L'épaisseur des Argiles tégulines au sein de la zone est comprise entre 30 m et 70 m (cf. Figure 4-9).

Les Sables de l'Aptien constituent la formation sous-jacente en interface avec les Argiles tégulines. Cette formation aquifère présente une épaisseur comprise entre 6 m et 10 m et affleure vers le sud-est.

Les Argiles à Plicatules en interface avec les Sables de l'Aptien ont une épaisseur comprise entre 20 m et 30 m.

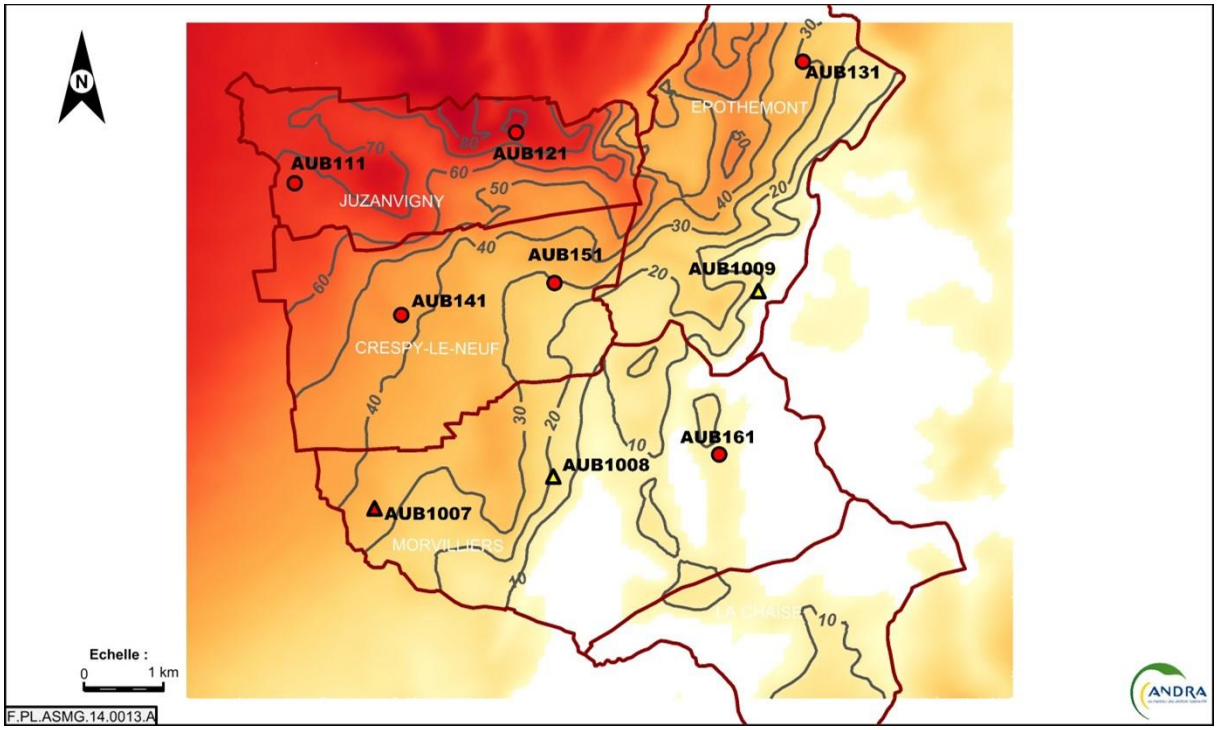


Figure 4-7 *Carte de l'épaisseur (m) des Argiles tégulines (formations superficielles incluses) sur le secteur établi à partir des forages (de moins épais en « jaune clair » au plus épais en « rouge foncé »)*

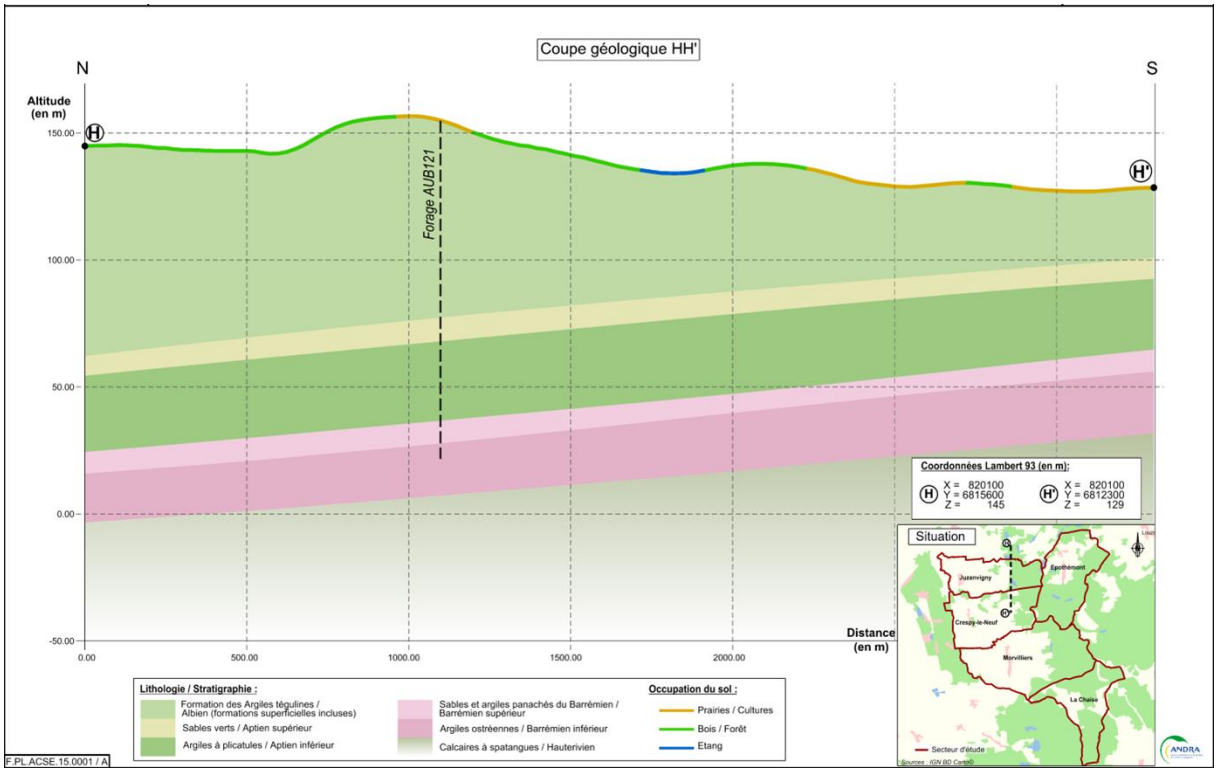


Figure 4-8 *Coupe géologique nord-sud au nord du secteur d'étude*

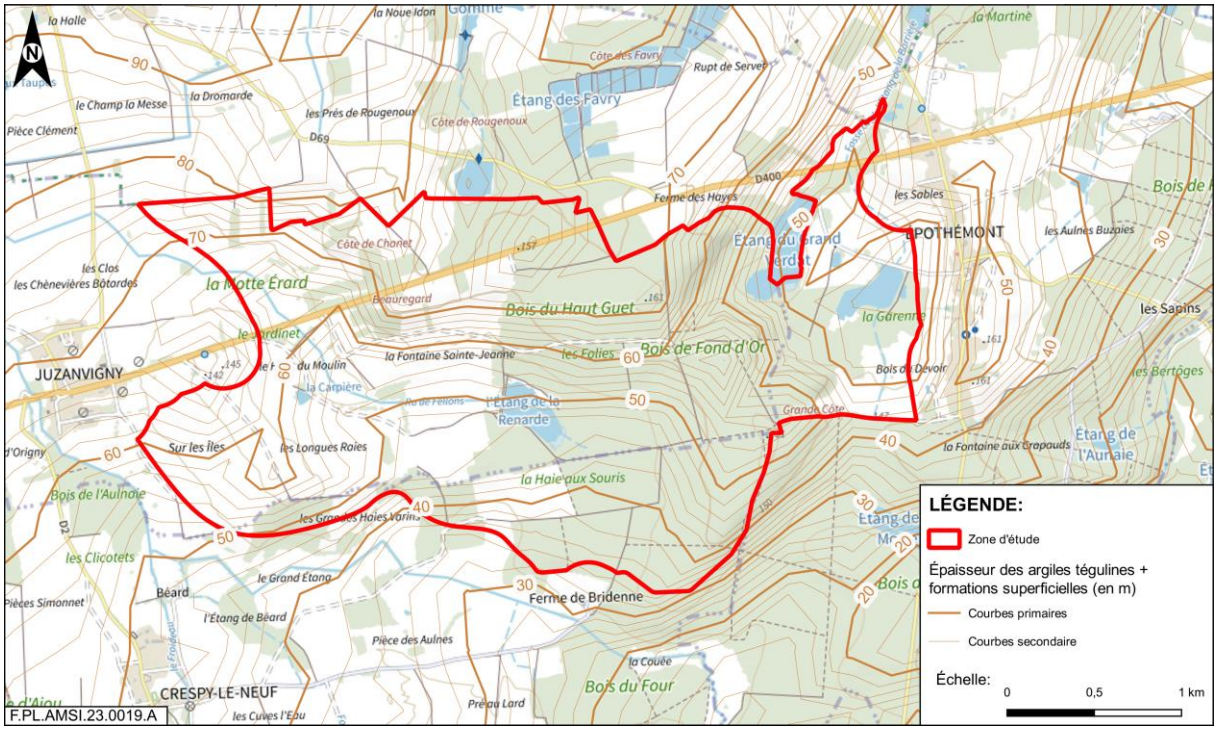


Figure 4-9 *Carte de l'épaisseur (m) des Argiles tégulines (formations superficielles incluses) sur la zone d'étude*

4.4 Le cadre structural

Le secteur d'étude n'est traversé par aucune faille majeure (c.-à-d. une faille affectant toute la pile sédimentaire et atteignant le socle du bassin). Les failles majeures les plus proches sont la faille de Saint-Martin-de-Bossenay à 60 km à l'ouest du secteur, 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 (cf. Figure 4-10). Ces failles sont inactives aujourd'hui et l'ont été il y a environ 30 millions d'années.

À l'intérieur de ce bâti structural régional, une tectonique de couverture en failles et flexures (affectant uniquement les formations sédimentaires méso-cénozoïques), s'est développée régionalement durant le Cénozoïque (Tertiaire). Le retraitement de profils sismiques met en évidence des structures cassantes comme au sud, le fossé de Soulaines et à l'est, le système de failles de Saint Dizier. Il s'agit de structures d'orientation nord-est/sud-ouest qui présentent des rejets de quelques mètres à dizaine de mètres.

D'autres structures de faible extension et rejet (<7 m), en dehors de la zone restreinte, sont suspectées à partir des profils sismiques réalisés sans qu'il ne soit possible aujourd'hui de confirmer leur existence (cf. Figure 4-11).

Ce cadre structural est à mettre en regard du contexte géodynamique du Bassin parisien, connu comme l'une des zones cratoniques les plus stables de la plateforme ouest-européenne, avec une très faible activité sismique et des taux de déformations extrêmement faibles (compris entre 0,04 mm/an et 0,1 mm/an). Sur la région de l'Aube, comme partout en France, l'activité sismique est connue par les enregistrements de sismicité instrumentale des réseaux nationaux opérant depuis 1961, ainsi que par la base de données sur la sismicité historique, SisFrance, qui couvre les derniers 1 500 ans. Aucun séisme historique et instrumental localisé dans la région de Soulaines, ou paléoséisme qui pourrait être rattaché aux structures tectoniques régionales (fossés de Soulaines, faille de Saint Dizier, failles de Vittel, faille de Saint-Martin-de-Bossenay…) n'est ainsi répertorié dans la région. Ceci est confirmé par les observations de terrain démontrant dans la région l'absence de tout indice néotectonique (événement tectonique récent survenu au Quaternaire) et de paléosismicité locale (rupture) ou distale (liquéfaction et figures de charges) et de déformation quaternaire d'origine tectonique retenu comme probant par le groupe Neopal (base nationale des déformations récentes et paléoséismes) et par la BDFA IRSN (base de données de failles potentiellement actives) sur les failles qui encadrent le secteur dans un rayon de plus de 50 km.

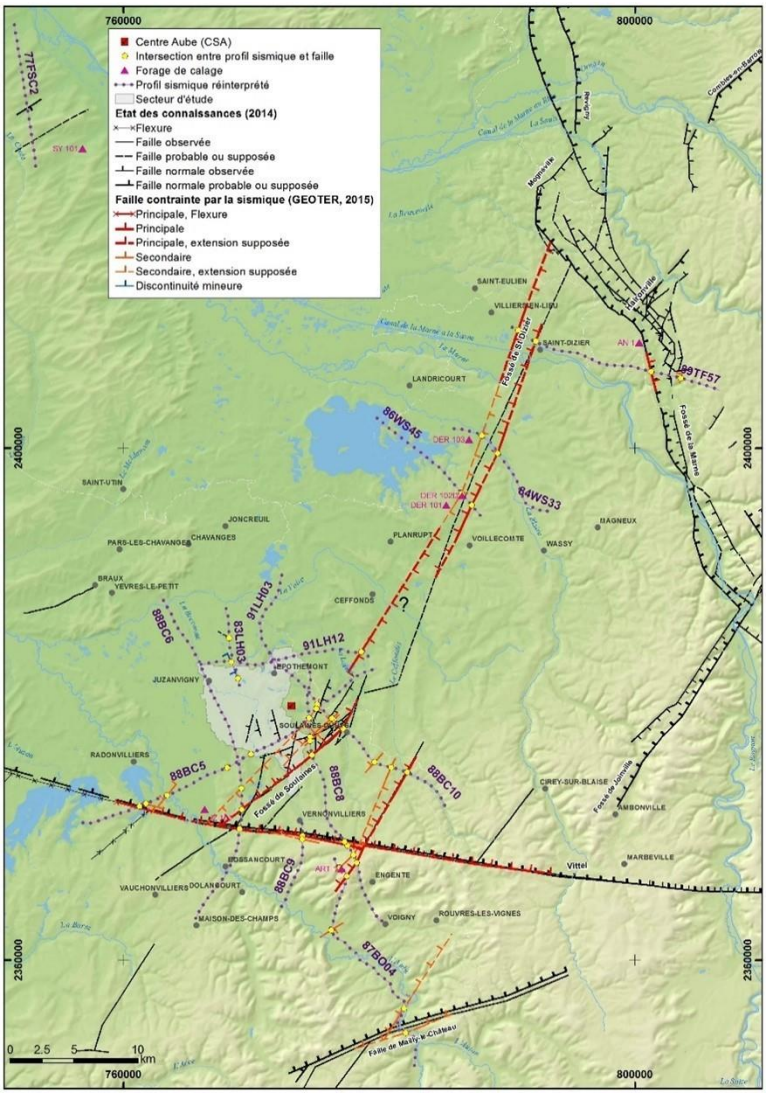


Figure 4-10 Schéma structural régional (réalisé en 2015)

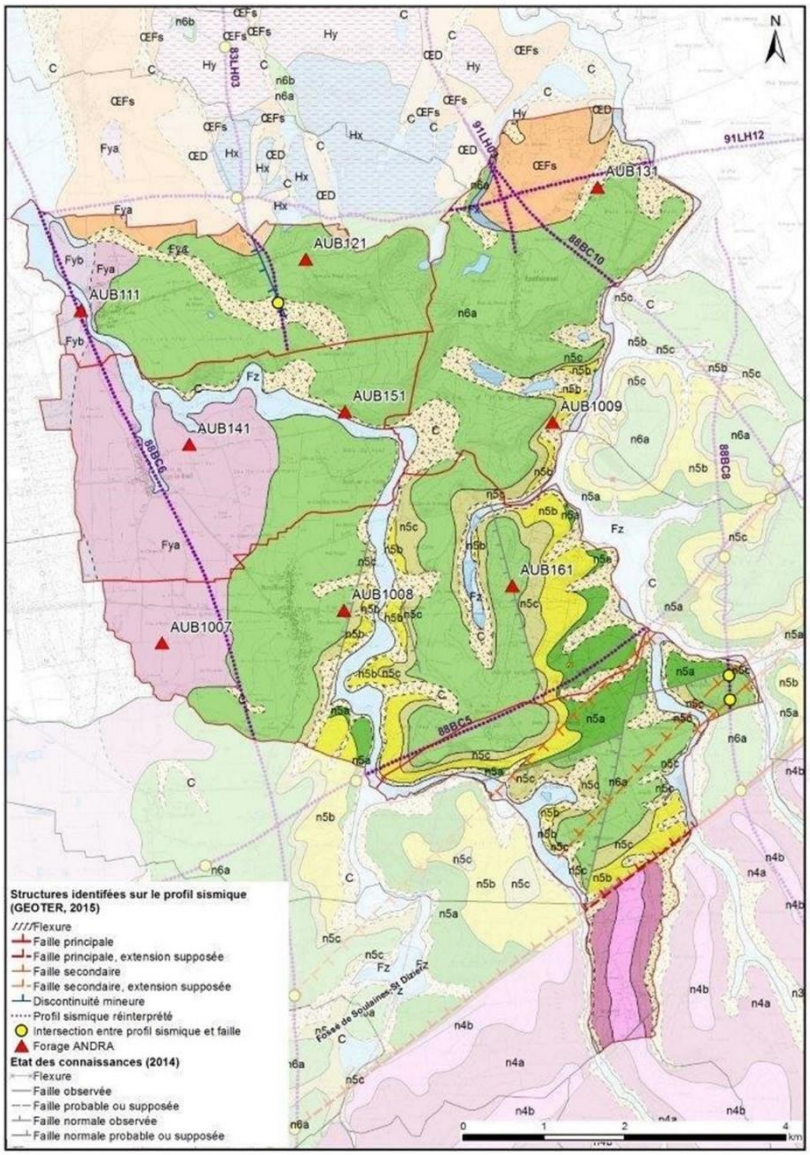


Figure 4-11 Schéma structural du secteur d'étude (réalisé en 2015)

4.5 Les caractéristiques des Argiles tégulines

Cette section présente les principales caractéristiques des Argiles tégulines en lien avec ses propriétés de confinement et leurs représentations dans des évaluations de sûreté en après-fermeture.

4.5.1 Les caractéristiques lithologiques et minéralogiques

Déposées il y a 100 Ma dans des environnements marins calmes, les Argiles tégulines présentent une lithologie et une composition minéralogique relativement peu variables verticalement et latéralement (17, 18). Les phases minérales dominantes dans les Argiles tégulines sont les suivantes :

- des minéraux argileux (de 35 % à 65 % en masse) essentiellement l'illite, les interstratifiés illite/smectite, la muscovite, la biotite, le chlorite, la kaolinite et la glauconite (cf. Figure 4-12). Parmi ces phases argileuses, seule la smectite (en tant que qu'interstratifiés illite/smectite) présente des propriétés de gonflement. Hormis la glauconite, les minéraux argileux cités ci-dessus sont caractéristiques d'une origine terrigène, la glauconite étant un minéral authigène qui se forme dans les environnements sédimentaires marins. De manière générale, la présence en quantité importante de minéraux argileux constitue un facteur important vis-à-vis des capacités de confinement des

formations géologiques étant donné leurs propriétés élevées de sorption vis-à-vis des radionucléides et substances toxiques chimiques.

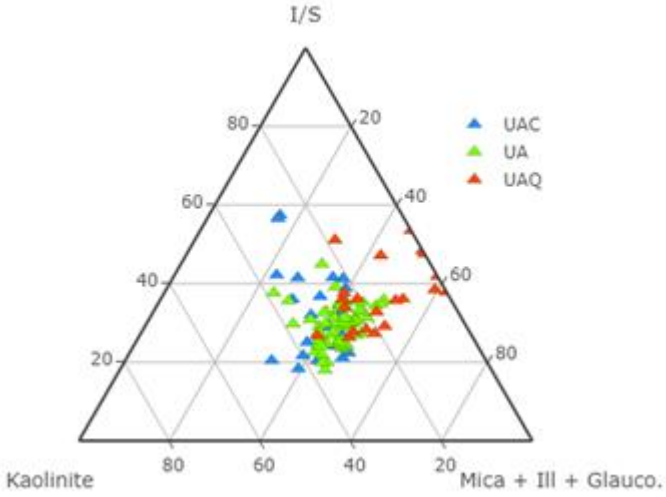


Figure 4-12 *Répartition en pourcentage des principaux groupes de minéraux argileux composant les Argiles tégulines*

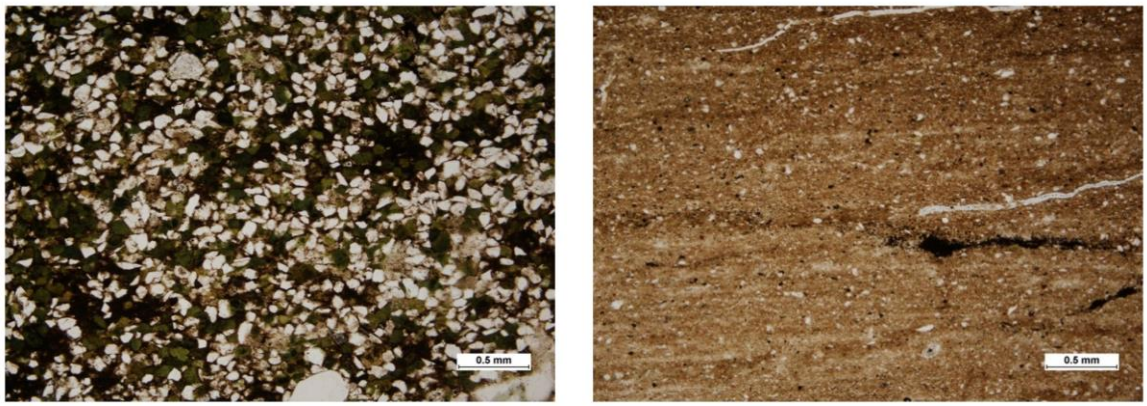
- des tectosilicates (de 20 % à 60 % en masse) constitués essentiellement des grains de quartz et des feldspaths ;
- des carbonates composés principalement de calcite et des traces de dolomite, ankérite et sidérite. Les carbonates sont essentiellement présents sous la forme de fragments fossiles et de tests entiers de microfossiles (notamment foraminifères). De la calcite diagénétique a localement été observée en tant que recristallisation en surface des bioclastes. La proportion de carbonates reste inférieure à 30 % ;
- des phases accessoires (pyrite, phosphates…) qui constituent moins de 5 % de la composition minéralogique globale. La pyrite est un minéral authigène caractéristique des roches argileuses sédimentaires qui se forme généralement au sein du sédiment pour des conditions chimiques réductrices. Des nodules de phosphates ont également été observés très régulièrement dans les forages mais représentent des volumes insuffisants pour être quantifiés. Les phosphates échantillonnés correspondent à une fluorapatite dont la formule structurale générale de type $Ca_5(PO_4, CO_3, SO_4)_3F$ (18) ;
- la teneur en matière organique est faible, inférieure à 1 % en masse. La matière organique est décrite comme peu évoluée (19).

De par leur composition minéralogique, les Argiles tégulines sont classées en tant que roches silico-clastiques à la transition entre des argiles sableuses et des marnes sableuses. La proportion des trois principales familles de minéraux évolue de la base au sommet de la formation avec toutefois une gamme de variations relativement limitée notamment d'un point de vue de la teneur en minéraux argileux (moyenne 50 % ± 12). Les évolutions globales de minéralogie se corrèlent très bien latéralement pour un même niveau stratigraphique et sont peu contrastées verticalement. Aucune hétérogénéité sédimentaire (passées sableuses notamment) de plus de quelques centimètres n'a ainsi été observée.

L'analyse de la minéralogie et des relevés diagraphiques ont permis d'identifier trois principaux faciès géologiques avec une variabilité latérale limitée sur la zone d'étude (cf. Figure 4-14 et figure 4-15). De la base au sommet, il est ainsi distingué :

- une unité Argilo-Quartzeuse (UAQ) constituée de silts argileux à grains grossiers dispersés de quartz de teinte verdâtre du fait de la richesse en glauconie (cf. Figure 4-13). Les teneurs en carbonates sont faibles et la teneur en tectosilicates est globalement décroissante. Cette unité marque la transition avec les Sables de l'Aptien. L'épaisseur de cet intervalle est de 9 m à 12 m ;

- une unité Argileuse (UA) décrite comme des argiles silteuses riches en glauconite avec peu de carbonates. Son épaisseur est comprise entre 35 m et 40 m. La granulométrie des roches de cette unité est plus fine que celle de l'unité UAQ (cf. Figure 4-13). La teneur en tectosilicates décroît sensiblement corrélée à une augmentation de la teneur en minéraux argileux avec un maximum d'environ 60 % au sommet de l'unité ;
- une unité Argilo-Carbonatée (UAC) composée d'argiles gris foncé où s'intercalent des bancs décimétriques plus carbonatés. Cette unité est un terme de transition avec les Marnes de Brienne et voit sa teneur en carbonates progressivement augmentée.



F.FIG.AMSI.24.0002A

Figure 4-13 *Photographies au microscope optique illustrant les Argiles tégulines (à gauche : Unité Argilo-Quartzeuse et à droite : Unité Argileuse)*

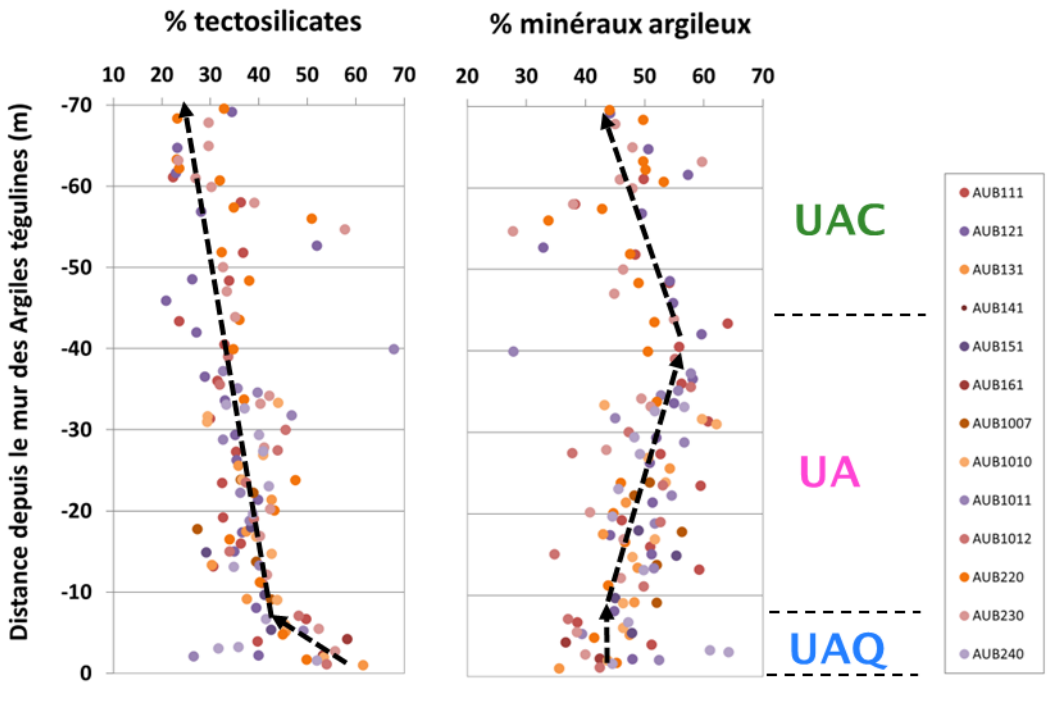


Figure 4-14 *Évolution de la teneur en minéraux argileux et en tectosilicates dans les Argiles tégulines (distance à partir du mur de la couche)*

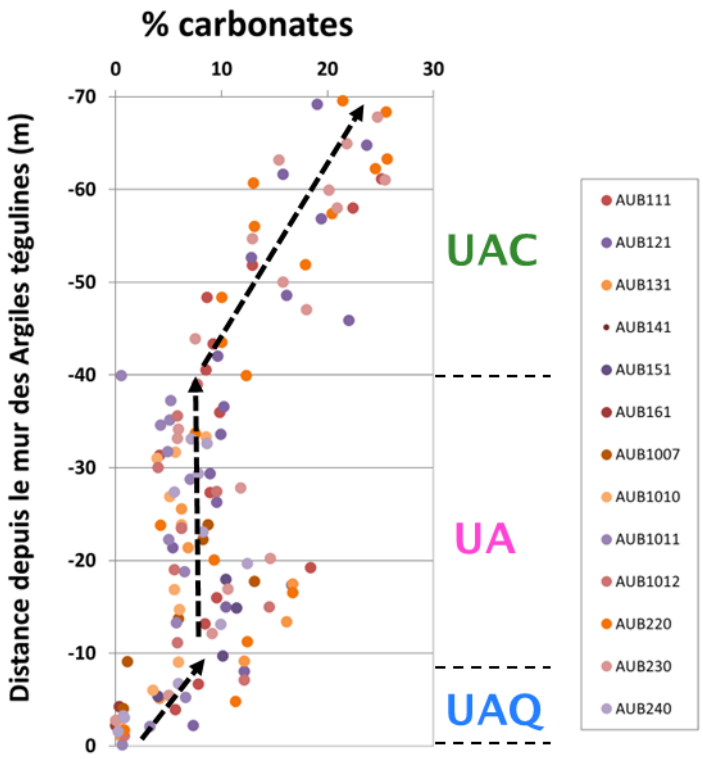


Figure 4-15 *Évolution de la teneur en carbonates dans les Argiles tégulines (distance à partir du mur de la couche)*

Les évolutions minérales et de granulométrie des Argiles tégulines de leur base à leur sommet sont l'expression d'une évolution au cours du temps du contexte sédimentaire avec globalement une transition progressive d'un environnement terrigène à un environnement marin. La faible évolution de minéralogie des minéraux argileux indique des sources d'apports du matériel sédimentaire relativement constant au cours du temps.

La présence de minéraux argileux avec des teneurs comprises entre 40 % et 60 % de manière continue sur l'ensemble de la couche constitue une caractéristique essentielle vis-à-vis des propriétés de confinement des Argiles tégulines.

4.5.2 Les caractéristiques microstructurales

Les propriétés d'organisation interne des minéraux (*e.g.* la microstructure) constitutifs des roches conditionnent certaines propriétés macroscopiques (conductivité hydraulique, coefficient de diffusion…).

Les Argiles tégulines présentent une microstructure peu compacte cohérente avec leur nature plastique et peu indurée. Les caractéristiques principales de la microstructure sont les suivantes :

- la porosité (*e.g.* volume de vides/volume total) des Argiles tégulines est en moyenne de 30 ± 4 %. Ces valeurs se situent dans la gamme supérieure des porosités des formations argileuses (NEA, 2022 (20)) et sont en accord avec son caractère peu induré. Le profil vertical de porosité évolue vers la surface avec des augmentations de 5 % à 10 % (valeurs absolues) dans les vingt premiers mètres. En dessous, la porosité est relativement constante sans corrélation forte avec la minéralogie. L'augmentation de la porosité vers la surface est attribuée essentiellement à des processus de déconfinement mécanique en accord avec leur comportement connu en essais œdométriques (cf. Figure 4-16) ;

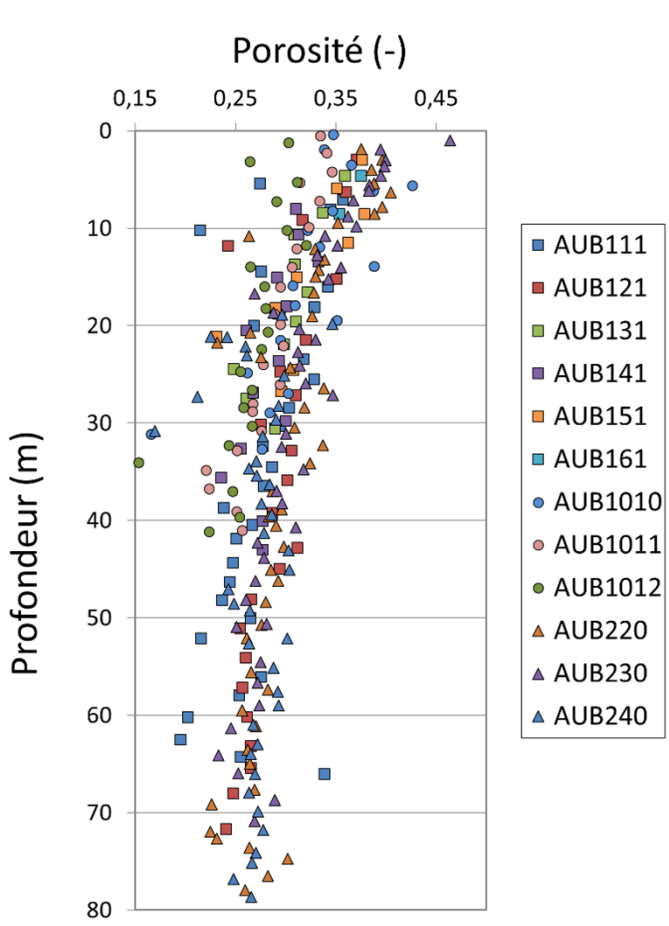


Figure 4-16 *Évolution de la porosité totale des Argiles tégulines en fonction de la profondeur*

- les tailles de pores des Argiles tégulines sont principalement comprises entre 30 nm et 80 nm avec des pores interfoliaires (<nm) présents dans les feuillets de smectites. Ces tailles de pores bien que de petites dimensions témoignent également du caractère peu induré de la formation en accord avec les valeurs de porosité totale ;
- les observations microstructurales confirment l'absence de signe de processus diagenétiques (post dépôt sédimentaire) majeurs comme la réorganisation des minéraux argileux (liée à la compaction physique) ou des précipitations minérales typiques de la diagenèse chimique. Les pores, bien que de petite taille (dizaines de nanomètres), n'apparaissent pas « colmatés » par un ciment calcaire, ce qui explique les valeurs de porosité des Argiles tégulines.

La microstructure des Argiles tégulines est ainsi décrite comme un assemblage essentiellement composé de grains de quartz englobés dans une matrice argileuse finement poreuse. La matrice argileuse est principalement constituée de particules argileuses d'interstratifiés illite/smectite et d'illite. Les autres minéraux inclus dans la matrice argileuse sont principalement des carbonates d'origine biodétritique, des grains de glauconie, des micas et des agrégats de pyrite. Une organisation conceptuelle de la microstructure est donnée sur la figure 4-17.

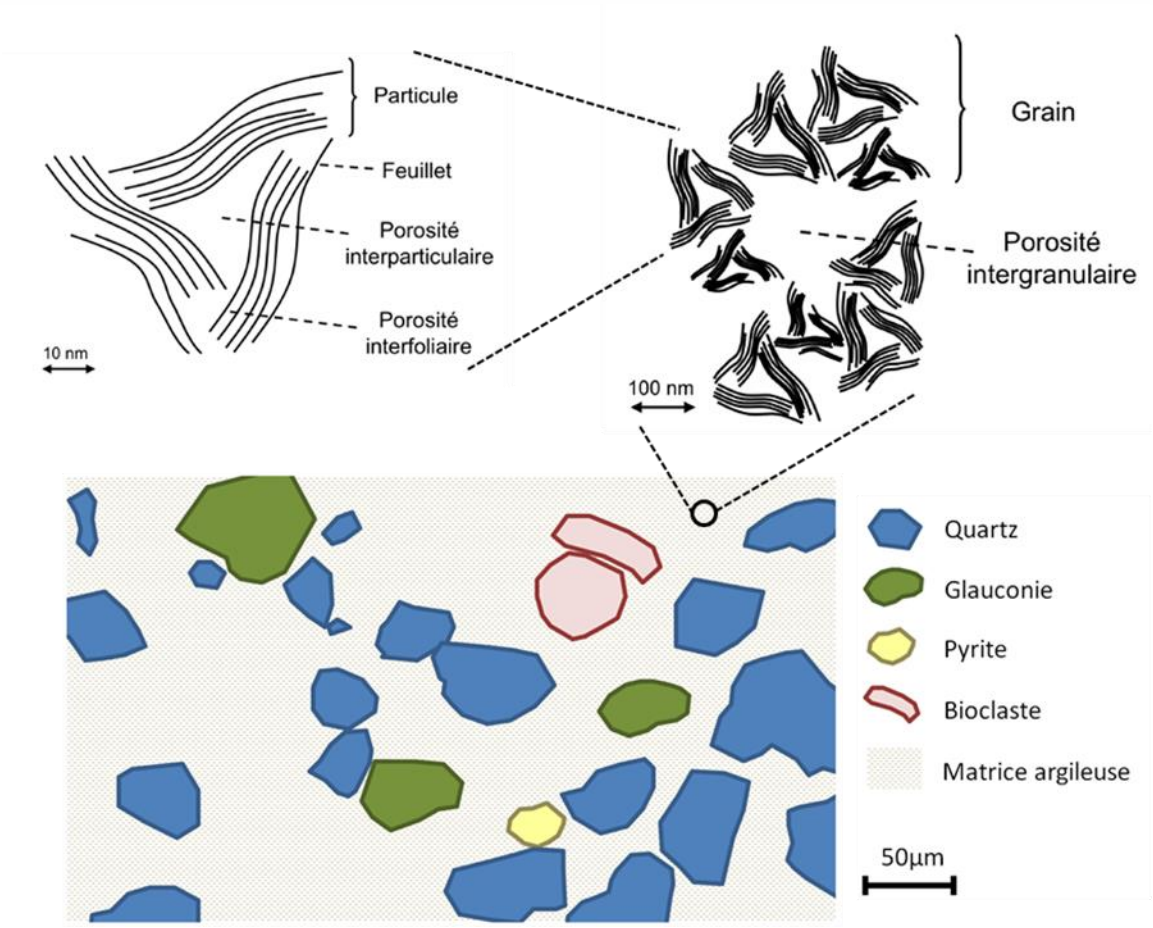


Figure 4-17 Représentation conceptuelle des arrangements minéraux dans les Argiles tégulines

4.5.3 Chimie des eaux interstitielles et régulation du système solides-fluides

Les connaissances sur la chimie des eaux et les mécanismes la régulant sont essentiels pour définir les paramètres sous-tendant les interactions entre la roche et l'environnement du stockage (matériaux, déchets, radionucléides…).

Du fait de leur faible conductivité hydraulique, l'eau interstitielle des Argiles tégulines n'est pas directement accessible en forage. La chimie des eaux a ainsi été caractérisée par une approche couplant des approches expérimentales (tests de lixiviation, mesures des cations échangeurs, mesures des pressions partielles des gaz dissous…) et de modélisations géochimiques. Ce type d'approches, développées et validées sur les roches argileuses (21), permet de disposer d'une vision intégrée des processus de régulation de la chimie des eaux.

Par la nature affleurante des Argiles tégulines, le système géochimique n'est pas complétement isolé avec la présence d'une interface avec l'atmosphère. Des échanges de fluides avec l'atmosphère (oxygène et eau de pluie) ont lieu depuis la surface et contribuent ainsi à la régulation du système géochimique des Argiles tégulines en plus des processus de régulation classiquement admis pour les roches argileuses (échanges cationiques avec les minéraux argileux, équilibres du systèmes carbonates…). La chimie des eaux (et de ces différents indicateurs : pression partielle de CO_2, population d'échangeur…) des Argiles tégulines évolue ainsi de la surface vers la profondeur (22, 23).

Le système géochimique peut être décrit comme suit (cf. Figure 4-18) :

- en dessous de 15 – 20 mètres de profondeur : la composition chimique est régulée essentiellement par les minéraux constitutifs de la roche avec (i) un potentiel redox négatif (estimé autour de -200 mV) contrôlé par la présence de phases porteuses de soufre et de fer, et (ii) une pression

partielle de carbonates pilotée par le système carbonate. Le pH est autour de la neutralité. Les cations majeurs sont dominés par le calcium et magnésium et les anions par les sulfates et hydrogénocarbonates. La quantité d'espèces dissoutes dans l'eau est inférieure à 600 mg/L (ce qui correspond à la définition d'une eau douce). Cette faible concentration en sels dissous indique néanmoins que depuis leur mise en place, un mélange avec des eaux d'origine météoriques ;

- dans les 5 - 10 premiers mètres : le système géochimique est affecté par les échanges avec l'atmosphère (oxygène et eau météorique). Les principaux processus identifiés sont ceux liés au processus d'oxydo-réduction (oxydation des minéraux comme la pyrite, dégradation de la matière organique), d'altération supergène (transformation minérale), d'échanges cationiques (liés aux minéraux argileux) et de régulation du système carbonates (dissolution partielle des carbonates). Il en résulte une chimie des eaux spécifique avec une quantité d'espèces dissoutes élevée de 600 mg/L à 6000 mg/L riche en calcium, sulfates et ions hydrogénocarbonates (du fait d'une pression partielle de CO_2 élevée). Ces eaux peuvent être qualifiées de douces à saumâtres. Leur pH est compris entre 7,5 et 8 ;
- entre ces deux zones : le cortège minéral constitutif des Argiles tégulines apparait peu affecté par les échanges avec l'atmosphère. Néanmoins, au sein de cette zone, la chimie des eaux évolue progressivement entre les deux zones avec des caractéristiques intermédiaires régulées par des processus de transport des solutés.

D'un point de vue géochimique et minéral, les argiles présentent donc une « frange d'altération » de quelques mètres de profondeur due à l'interface avec l'atmosphère. L'altération de surface touche principalement des minéraux secondaires sans affecter significativement les minéraux argileux en présence. En dessous de quelques mètres de profondeur, la chimie des eaux est essentiellement régulée par les minéraux constitutifs de la roche avec des potentiels rédox négatifs et des pH proches de la neutralité.

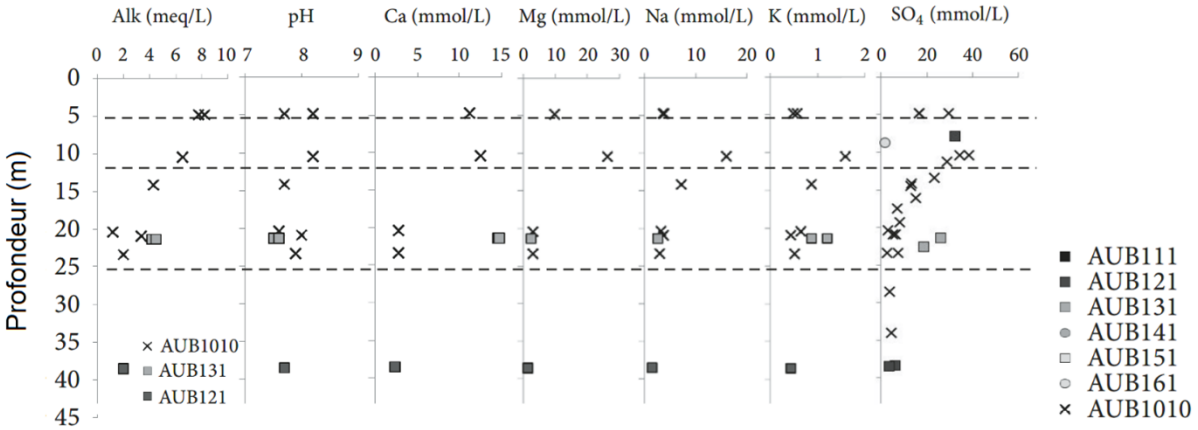


Figure 4-18 *Évolution de la chimie des eaux des Argiles tégulines en fonction de la profondeur pour différents forages (Alk : alcalinité)*

Les analyses faites dans plusieurs tranchées et forages indiquent un effet de la topographie sur les processus d'altération/échanges atmosphériques qui sont moins développés (en profondeur) dans les pentes en comparaison des sommets et bas de pentes (23).

4.5.4 Les propriétés hydro-dispersives et de rétention des radionucléides et des substances toxiques chimiques

Les propriétés hydro-dispersives définissent les caractéristiques intrinsèques de transport de solutés de Argiles tégulines. Il s'agit de (i) la conductivité hydraulique et (ii) des coefficients de diffusion effectif de l'eau et de solutés de référence. Ces caractéristiques ont été déterminées à partir de mesures sur échantillons prélevés dans des forages.

De manière globale, ces propriétés sont peu variables et en accord avec le caractère argileux relativement homogène de la couche dans son épaisseur :

- la conductivité hydraulique des Argiles tégulines, mesurée sur échantillons, est de $2,4 \times 10^{-11}$ m/s ($\pm 1,9 \times 10^{-11}$ m/s) avec une variabilité inférieure à un ordre de grandeur (cf. Figure 4-19) ;
- le coefficient de diffusion effectif moyen de l'eau (mesuré avec de l'eau tritiée, HTO) est de 9×10^{-11} m²/s ($\pm 2 \times 10^{-11}$ m²/s) ;
- le coefficient de diffusion effectif des anions (mesuré par des essais avec du ^{36}Cl) est sensiblement inférieur (environ d'un facteur 2) à celui de l'eau. Le phénomène dit d'exclusion des anions classiquement observé pour les roches argileuses indurées est, pour les Argiles tégulines, relativement peu marqué en cohérence avec sa microstructure relativement peu compacte ;
- il n'a pas été mis en évidence d'effets significatifs de la « frange d'altération » sur les propriétés hydro-dispersives.

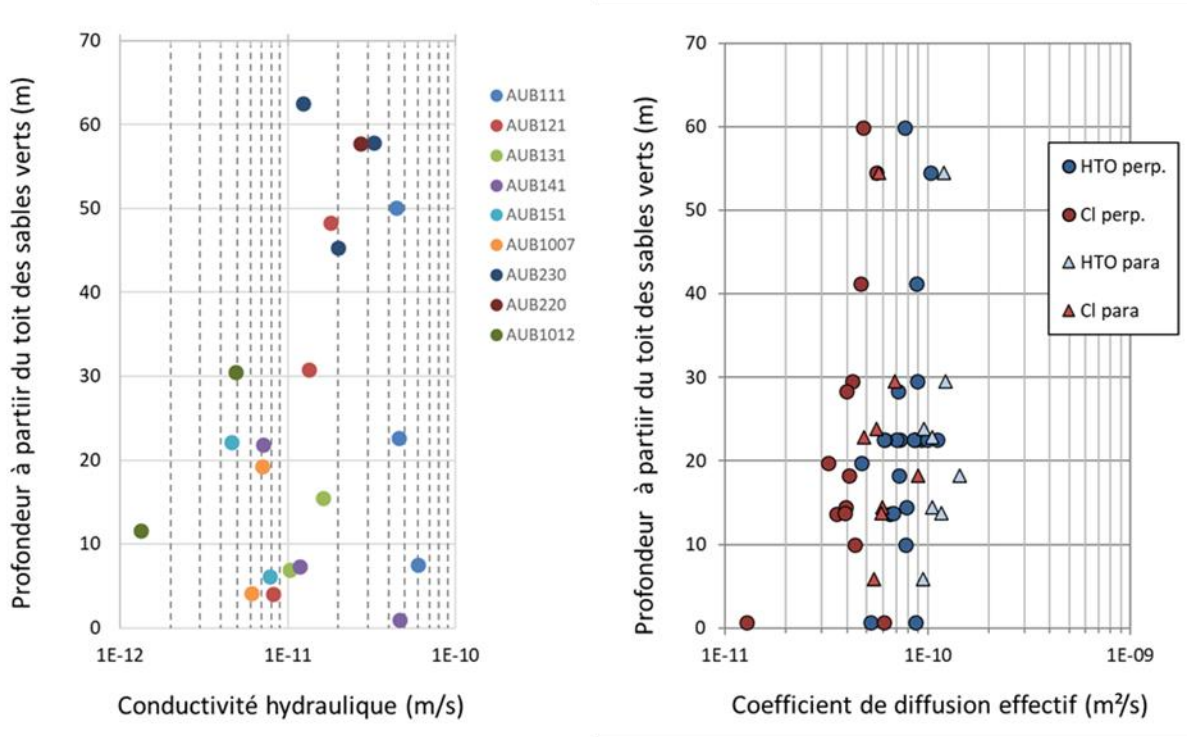


Figure 4-19 *Profils verticaux de conductivité hydraulique et des coefficients de diffusion effectifs (eau tritiée et chlore) mesurés dans les Argiles tégulines*

Les phénomènes de rétention par les phases minérales soustraient les éléments chimiques de la solution aqueuse, contribuant à leur immobilisation. Dans les roches argileuses, les processus de rétention sont principalement portés par les minéraux argileux. La caractérisation des propriétés de rétention a été menée en 2013-2015 en incluant un ensemble de radionucléides (RN) et substances toxiques chimiques (TC). Les phénomènes de rétention sont représentés par le coefficient de distribution solide – liquide (K_d) qui définit le rapport des concentrations à l'équilibre entre dans l'eau et retenues à la surface des solides. La capacité d'interaction des radionucléides est classée comme suit (cf. Tableau 4-1) :

- RN/TC non interagissant (non retenu) : $K_d = 0$;
- RN/TC peu interagissant : $0 < K_d \leq 0,01$ m³/kg ;
- RN/TC (modérément) interagissant : $0,01 < K_d \leq 1$ m³/kg ;
- RN/TC fortement interagissant : $K_d > 1$ m³/kg.

Tableau 4-1 Capacités d'interaction des RN/TC avec les Argiles tégulines

RN/TC non interagissant	Cl, I, Se, C
RN/TC peu interagissant	Mo, Ca, K, U, B
RN/TC (modérément) interagissant	Cs, Ni, Ra, Pb, Cd, As, Sb
RN/TC fortement interagissant	Pu, Th, Am, Cm, Np, Ac, Be

Les résultats obtenus concordent avec les connaissances existantes sur les roches argileuses. Ainsi, la prédominance des minéraux argileux assure des propriétés de rétention élevées pour la plupart des radionucléides et des substances toxiques chimiques :

- le chlore, l'iode et le sélénium n'ayant pas d'interactions avec les minéraux argileux sont attendus comme mobiles ;
- le radium, qui a fait l'objet d'une caractérisation plus spécifique de son comportement (cf. Missana *et al.,* 2017 (24)), est caractérisé par des sorptions élevées ;
- l'uranium qui est attendu sous une forme +VI en solution étant donné la présence d'hydrogénocarbonates en solution et sa capacité à former des complexes dans ces conditions, a de fait une sorption relativement faible mais non nulle ;
- les métaux de transition, les lanthanides et la plupart des actinides présentent des capacités d'interactions élevées.

Du fait de la stabilité de leur spéciation pour de larges conditions géochimiques, la sorption de la plupart des radionucléides et substances toxiques chimiques est peu variable dans toute l'épaisseur des Argiles tégulines avec un effet limité de l'altération de surface (cf. Chapitre 4.5.3 du présent rapport). Du fait de leur sensibilité aux conditions d'oxydo-réduction, certains éléments comme le technétium Tc ou le chrome Cr ont été identifiés comme pouvant être affectés par la zonation géochimique de surface avec une diminution de leur rétention.

4.5.5 Les propriétés géomécaniques

Plusieurs propriétés mécaniques ont été déterminées pour les Argiles tégulines (résistance à la compression, pression de gonflement, résistance au cisaillement…).

Les Argiles tégulines présentent une variabilité significative de ces propriétés mécaniques en fonction de la profondeur. Les résistances à la compression sont plus faibles et dispersées (<5 MPa) dans les 20 - 30 premiers mètres et plus élevées et moins variables (>5 MPa) au-delà. Ces valeurs de résistance à la compression sont cohérentes avec la nature peu indurée des Argiles tégulines telles que précédemment décrit et des effets de surface tels que décrits au chapitre 4.5.2 du présent rapport.

Les Argiles tégulines présentent également des propriétés de gonflement de l'ordre de la dizaine à centaines de kPa.

4.6 L'organisation des écoulements

4.6.1 Le réseau hydrographique et des écoulements en surface

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 °C à 7 °C, des températures moyennes estivales de 15 °C à 17 °C et des précipitations moyennes annuelles variant entre 750 mm/an et 850 mm/an.

Le secteur appartient ainsi à la Champagne humide, qui forme une vaste dépression topographique soulignée par la zone d'affleurement des formations argileuses du Crétacé inférieur. Les principales

rivières présentes à proximité du secteur 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. Plus localement, la nature essentiellement argileuse et sableuse de ces formations contrôle la topographie et une morphologie du relief peu accentuée caractérisée par des collines basses et douces, 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 m et 160 m.

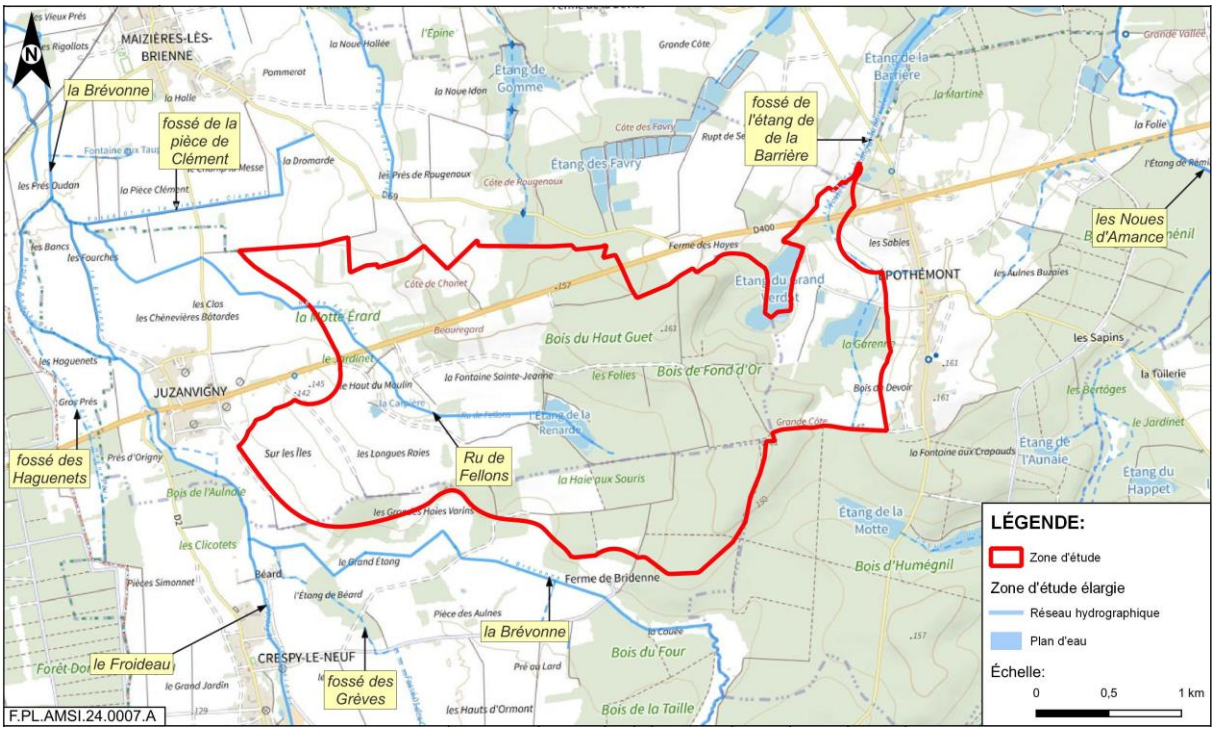


Figure 4-20 Carte du réseau hydrographique sur le secteur d'étude

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 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'Épothémont et de Morvilliers, et (iii) les affleurements de l'aquifère du Barrémien au sud du secteur. Une part des écoulements de surface (réseau hydrographique) est également interceptée par ces formations perméables à l'affleurement.

Sur la zone restreinte, les études de terrain et les analyses géochimiques/isotopiques permettent de dresser un schéma conceptuel des écoulements de surface. Les écoulements s'organisent en suivant la topographie avec des écoulements souterrains/hypodermiques depuis les crêtes vers les vallées qui peuvent localement constituer des zones de décharge vers la Brévonne et une ancienne vallée de l'Aube/Brévonne (correspondant au ru de Fellons) constituée actuellement de colluvions (cf. Figure 4-21). L'ancienne vallée de l'Aube/Brévonne constituerait une zone de décharges intermédiaire vers l'actuelle plaine d'alluviale de l'Aube. L'occurrence d'écoulements d'eau dans les premiers mètres a été également mise en évidence en lien avec la présence de formation quaternaire. Il a également été mis en évidence des liens entre le développement des processus d'altération des Argiles tégulines et le schéma des écoulements de surface.

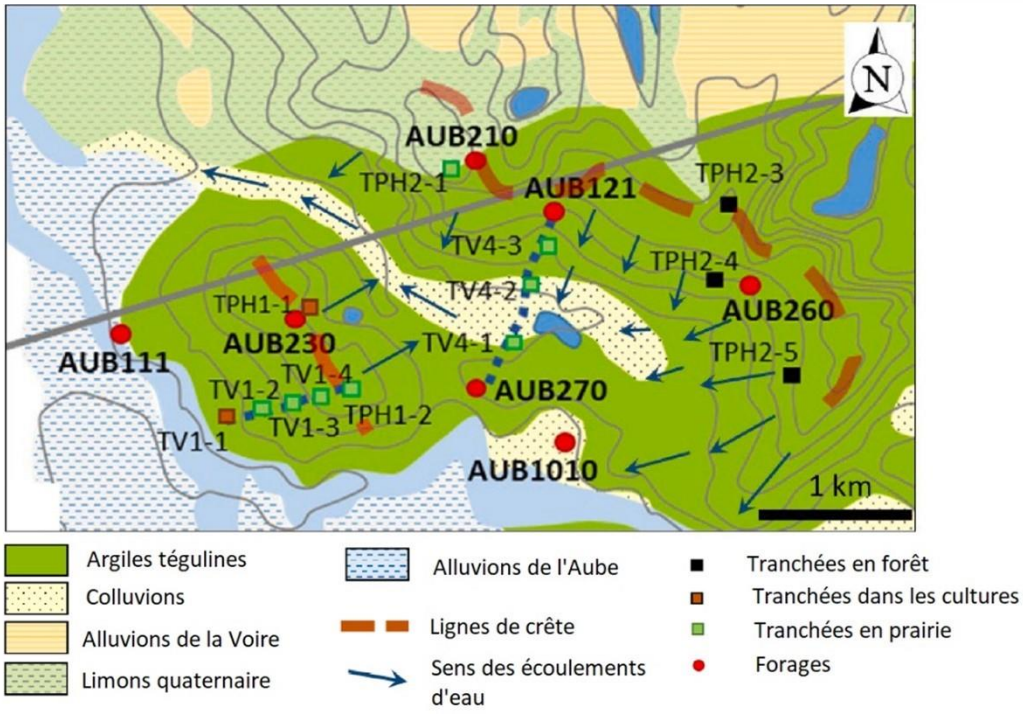


Figure 4-21 Schéma des écoulements de surface sur la zone d'étude

4.6.2 L'organisation des écoulements en profondeur

Le système hydrogéologique régional et local a une structure typique de bassin sédimentaire multicouches, alternant entre formations aquifères (Sables verts de l'Aptien supérieur, Sables du Barrémien) et formations semi-perméables, dites aquitards ou aquicludes (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 6 m à 10 m d'épaisseur, inséré entre les formations argileuses très peu perméables des Argiles tégulines et des Argiles à Plicatules (cf. Figure 4-22). 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 (25). 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 (complétées vers l'est par les points de mesures du Centre de Surface de l'Aube vers l'est), indique un écoulement dirigé vers le nord, cohérent avec le modèle hydrogéologique régional avec un gradient de charge hydraulique horizontal d'environ 1,5 ‰. Les transmissivités mesurées par des tests de pompage sont comprises entre 2×10^{-5} m²/s et 10^{-3} m²/s.

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.

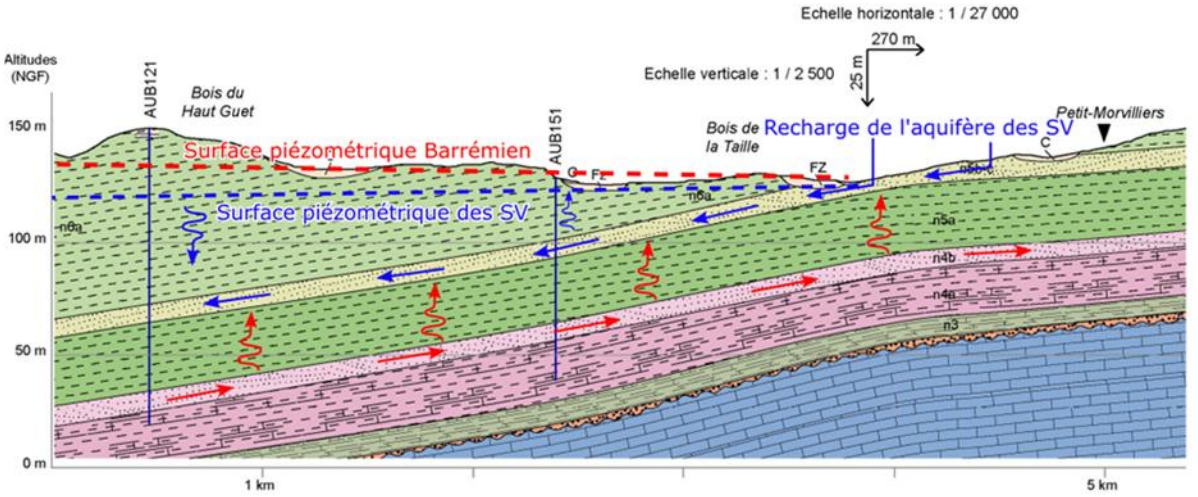


Figure 4-22 *Schéma conceptuel selon une coupe nord-sud des écoulements de l'aquifère des Sables verts et du Barrémien sur le secteur d'étude*

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 m à 25 m, inséré entre les Argiles à Plicatules et les Argiles ostréennes du Barrémien (25). 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 de charge hydraulique 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 celles 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.

À l'échelle du secteur d'étude, du fait des différences de charge hydraulique entre la nappe des Sables verts de l'Aptien et les formations superficielles, le gradient de charge hydraulique vertical est descendant ou ascendant. Le choix de la zone restreinte en 2015 a pris en compte le sens du gradient hydraulique afin de privilégier des gradients hydrauliques descendants favorisant un exutoire naturel vers les sables de l'Aptien. Sur la zone restreinte, le gradient de charge est ainsi nul à descendant avec une valeur maximale localisée d'environ 0,5 m/m. Là où il est ascendant, la nappe des Sables verts peut être localement artésienne suivant la topographie. La carte de distribution spatiale du gradient de charge hydraulique vertical est représentée sur la figure 4-23. Ce phénomène d'artésianisme a été directement observé dans certains forages. La réanalyse des données piézométriques acquises en 2015 a conduit à préciser la géométrie de la zone d'intérêt pour l'implantation du stockage en éliminant l'ensemble des zones supposées artésiennes (cf. Figure 4-3).

Les nombres de Péclet[5] estimés pour ces différents gradients de charge traduisent un transport de solutés plutôt convectif dominant. Toutefois, compte tenu de l'épaisseur des Argiles tégulines et de leur conductivité hydraulique, les flux d'eau et les vitesses d'écoulement demeurent relativement faibles (temps de transfert de l'ordre de la dizaine de milliers d'années). 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.

[5] Nombre de Péclet : nombre sans dimension, 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).

Enfin, aucune relation directe entre les deux aquifères n'a été mise en évidence au cours des essais hydrogéologiques. Cependant, au vu des gradients hydrauliques verticaux estimés, une recharge de la nappe des Sables verts par la nappe du Barrémien n'est pas à exclure, mais elle serait limitée, au regard de la recharge par les zones d'affleurement.

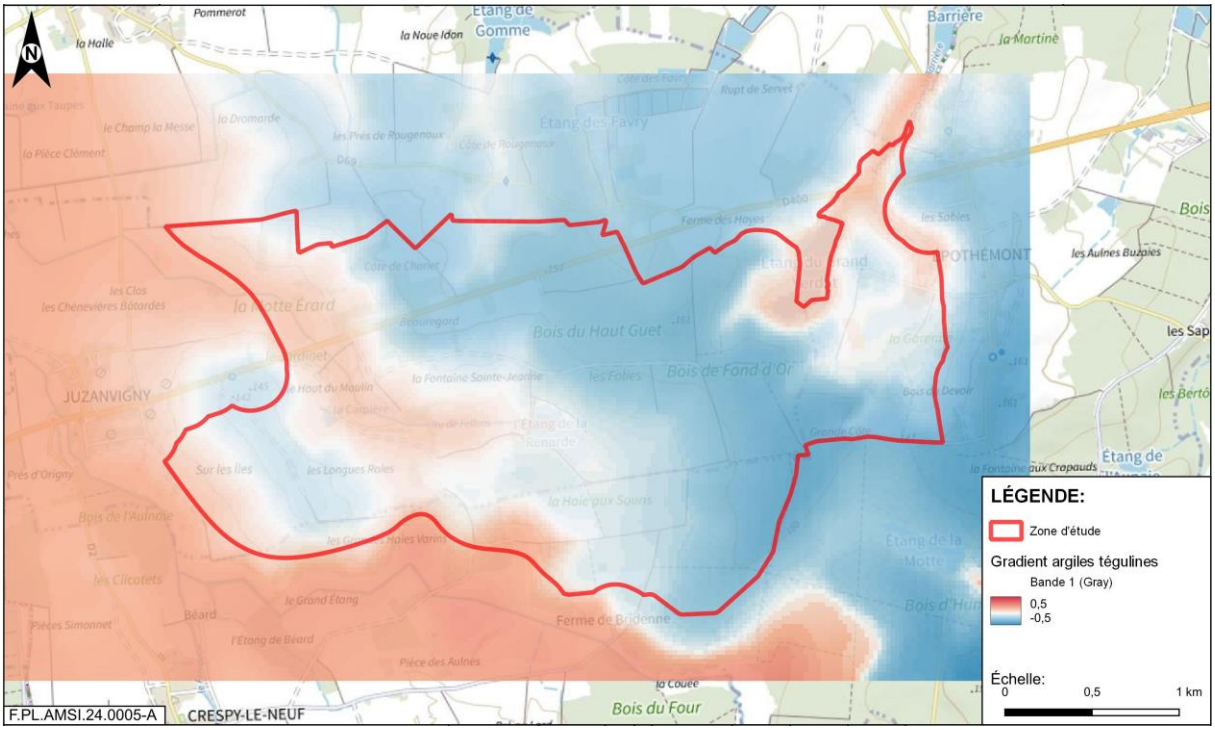


Figure 4-23 Carte de distribution spatiale du gradient de charge hydraulique vertical à travers les Argiles tégulines sur la zone d'étude et alentour

4.7 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.

4.7.1 L'évolution climatique future

Sur les premiers 50 000 ans, ce sont les processus de géodynamique externe, dont le moteur principal est le climat, qui réguleront l'aléa érosif, les processus de géodynamique interne (mouvements tectoniques (surrection, flambage lithosphérique…) n'étant pas suffisants à cette échelle de temps pour avoir un effet sur les variations morphologiques du secteur. Le climat conditionne notamment les volumes et régimes des précipitations, paramètres qui ont un effet majeur sur le couvert végétal (nature et densité), et influe à la fois directement et indirectement sur les phénomènes locaux d'érosion comme notamment la formation des ravines.

L'évolution du climat est traitée avec la prise en compte de deux scénarios visant à encadrer le domaine des évolutions possibles. Comme pour les autres sites Andra, les scénarios retenus sont ceux qui ont été obtenus dans le cadre du projet européen BIOCLIM, du fait de leur caractère « maximaliste ».

1. Un scénario d'évolution naturelle du climat, dit A4, établi en prenant en compte le taux actuel de CO_2 dans l'atmosphère, prévoit la poursuite dans le futur des cycles climatiques glaciaires-interglaciaires : succession d'états climatiques tempéré, boréal, périglaciaire et de maximum glaciaire. Durant les prochains 50 000 ans, l'Aube sera caractérisée par un climat tempéré à tendance océanique proche de l'actuel. Au-delà de 50 000 ans, débutera un refroidissement avec un

premier épisode de climat boréal suivi d'un bref retour en climat tempéré, suivi d'un refroidissement plus marqué avec une succession de climats boréal et périglaciaire. Au-delà de 50 000 ans, la présence d'un pergélisol n'est donc pas à exclure dans l'Aube, en lien avec le retour d'une glaciation aux alentours des prochains 90 - 100 000 ans.

2. Un scénario d'évolution fortement perturbée par les activités humaines, dit B4, établi en fonction d'une hypothèse estimée maximaliste sur les rejets de CO_2 au cours des prochains siècles (rejet dans l'atmosphère de 5 000 Gt de carbone fossile en 350 ans depuis la révolution industrielle) et sur le cycle du CO_2 atmosphérique. Ce scénario est caractérisé par une rupture de l'évolution par rapport au passé : translation vers le pôle chaud qui ne s'amortit que très lentement, en 600 ans à 800 000 ans. Dans le cas du scénario d'évolution climatique perturbée (B4), un réchauffement très rapide est attendu. Durant les prochains 50 000 ans, le climat serait de type subtropical à pluies d'hiver (Cs), caractérisé par des étés très secs suivis sans transition par une période de fortes précipitations. Cet état climatique est considéré exister dès les prochains siècles, en relation avec le pic de CO_2 atmosphérique qui découle des hypothèses prises pour les activités humaines (rejet de 5 000 Gt de carbone fossile en 350 ans). Au-delà de 50 000 ans, le climat serait un peu moins chaud, de type subtropical humide (Cr), caractérisé par de moindres contrastes saisonniers, suivi d'un bref retour à des conditions climatiques de type tempéré à tendance océanique vers 100 000 ans.

La figure 4-24 montre l'allure générale de ces scénarios, établis sur la durée du prochain million d'années au pas de 1 000 ans, pour la région de Meuse/Haute-Marne, et dont seule la partie couvrant les premiers 100 000 ans importe pour la présente étude.

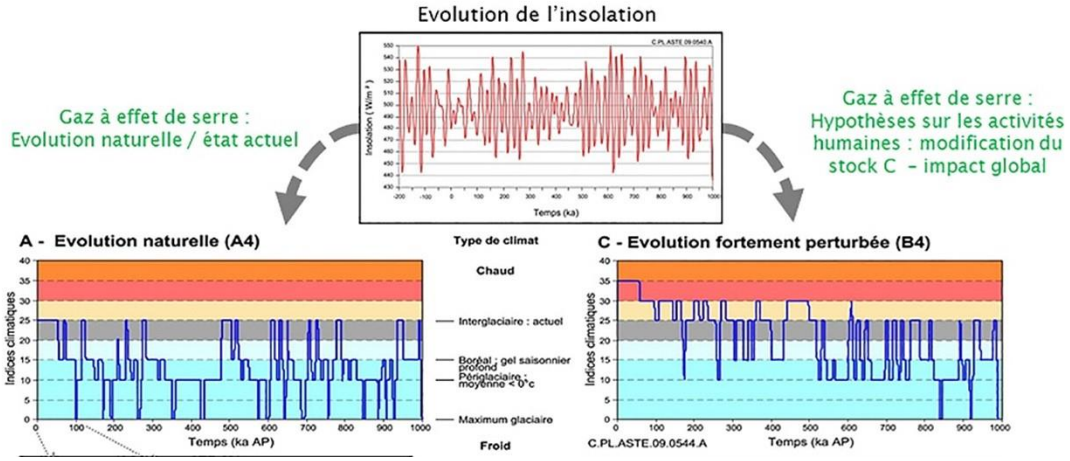


Figure 4-24 Scénarios d'évolution du climat sur le prochain million d'années

4.7.2 L'évolution géomorphologique

Le phénomène d'érosion (au sens large) conditionne l'évolution morphologique et topographique et, par couplage, les propriétés physico-chimiques de la formation géologique hôte depuis la surface et/ou de la couverture. L'aléa érosif qui est la prévalence d'une érosion d'une intensité donnée constitue une donnée d'entrée importante pour la démonstration de sureté. Dans le cadre d'un stockage de déchets FA-VL, l'aléa érosif doit être évalué sur des périodes de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'années.

L'évaluation de l'aléa érosif sur le site de la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines (CCVS) s'appuie sur la connaissance des phénomènes érosifs survenus par le passé et l'intensité de ceux-ci, des analogues naturels et des outils de modélisation associant les différents facteurs des phénomènes d'érosion (climat, hydrologie…).

Les investigations et caractérisations (géologie, géophysique, hydrologie, pédologie, géochimie…) menées de 2013 à 2018 ont permis de disposer de l'historique des effets érosifs sur le site de la CCVS. Combinées à la connaissance des phénomènes d'érosion et de l'évolution du climat, celles-ci ont permis d'appréhender les grandes tendances de l'évolution topographique et géomorphologique avec néanmoins des sources d'incertitudes.

D'un point de vue phénoménologique, il est attendu que :

- dans le cas d'une évolution naturelle du climat (A4), l'évolution géomorphologique restera partout faible à négligeable sur la durée des prochains 50 000 ans, période pendant laquelle les conditions actuelles, climat tempéré et couvert végétal dense, devraient perdurer. Au-delà de 50 000 ans, des phénomènes d'incisions des vallées qui toucheraient l'Aube, la Voire et leurs affluents et l'occurrence d'un pergélisol (retrait thermique, dessiccation, cryopompage et cycles gel-dégel (cryoturbation, fentes en coin, solifluxion…)) piloteraient l'érosion. Toutefois les phénomènes liés à la présence d'un pergélisol pourraient affecter les propriétés physico-chimiques des formations argileuses (et des couvertures) au-delà de cette période ;
- dans le cas d'une évolution perturbée du climat (B4), du fait de l'installation de climats de type subtropical, caractérisés par des pluies méditerranéennes concentrées en automne et/ou en hiver, et de fortes sècheresses d'été, l'érosion sera active sur les reliefs cependant qu'il y aura dominance de l'alluvionnement en fonds de vallées. Dès les prochains siècles, et sur la durée des prochains 100 000 ans, les zones de collines où affleurent les argiles du Crétacé seront soumises à une érosion hydrique du fait du régime des précipitations et de la faible densité du couvert végétal (*e.g.* adaptation naturelle au climat, feux de forêt, zones cultivées et pastorales). Ceci induit des phénomènes d'érosion/dépôt importants induisant des modifications du réseau hydrologique (Aube, Voire et ses affluents). À l'échelle locale, cette érosion serait marquée par la création de ravinements, liés à la concentration du ruissellement diffus en sillons de différents ordres.

La quantification des effets de l'érosion sur l'évolution de la topographie à l'échelle du secteur étudié a nécessité de rechercher et développer des approches spécifiques sans cadre de référence méthodologique pour ces échelles de temps et d'espace. Les approches développées utilisent des outils et méthodes qui sont généralement appliqués pour de grandes échelles spatiales (échelle d'une région, d'un pays et d'un continent) sans prospective long terme.

La méthodologie utilisée est basée en premier lieu sur des simulations statiques maîtrisées, avec la mise en application d'un modèle de type RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) intégrant la topographie, les contraintes hydrologiques, physiques (érosion mécanique), climatiques (sur la base des deux scénarios climatiques A4 et B4) et de nature des sols (effet de végétalisation, érodabilité…). Ce type de modèle fait référence dans la communauté scientifique pour quantifier l'érosion (26). Pour cette étude, plusieurs sensibilités ont été réalisées avec un paramétrage plus ou moins conservatif (pluie, couvert végétal). Ces évaluations ont été faites avec une maille fine de 25 m × 25 m et une maille plus grossière de 250 m × 250 m. La maille de 250 m × 250 m a été jugée la plus représentative au vu des caractéristiques topographiques et morphologiques du secteur étudié. Les valeurs obtenues sont les suivantes :

- pour le scénario d'évolution climatique naturelle (A4), l'érosion simulée sur les prochains 50 000 ans serait de 80 cm en moyenne et au maximum très localement (sur une maille de 250 m × 250 m) sur certaines parties hautes de 7,5 m. Ces valeurs sont également en accord avec une projection des simulations faites par l'ESDAC (*European Soil Data Centre*) pour des conditions actuelles ;
- pour le scénario d'évolution climatique perturbée (B4), l'érosion simulée sur les prochains 50 000 ans serait de 4 m en moyenne et au maximum très localement (sur une maille de 250 m × 250 m) sur certaines parties hautes de 21 m. Ces valeurs restent élevées en raison de la prise en compte d'un coefficient pluviométrique pénalisant et d'un couvert végétal dégradé de type prairie, rendant les résultats de la simulation très conservatifs.

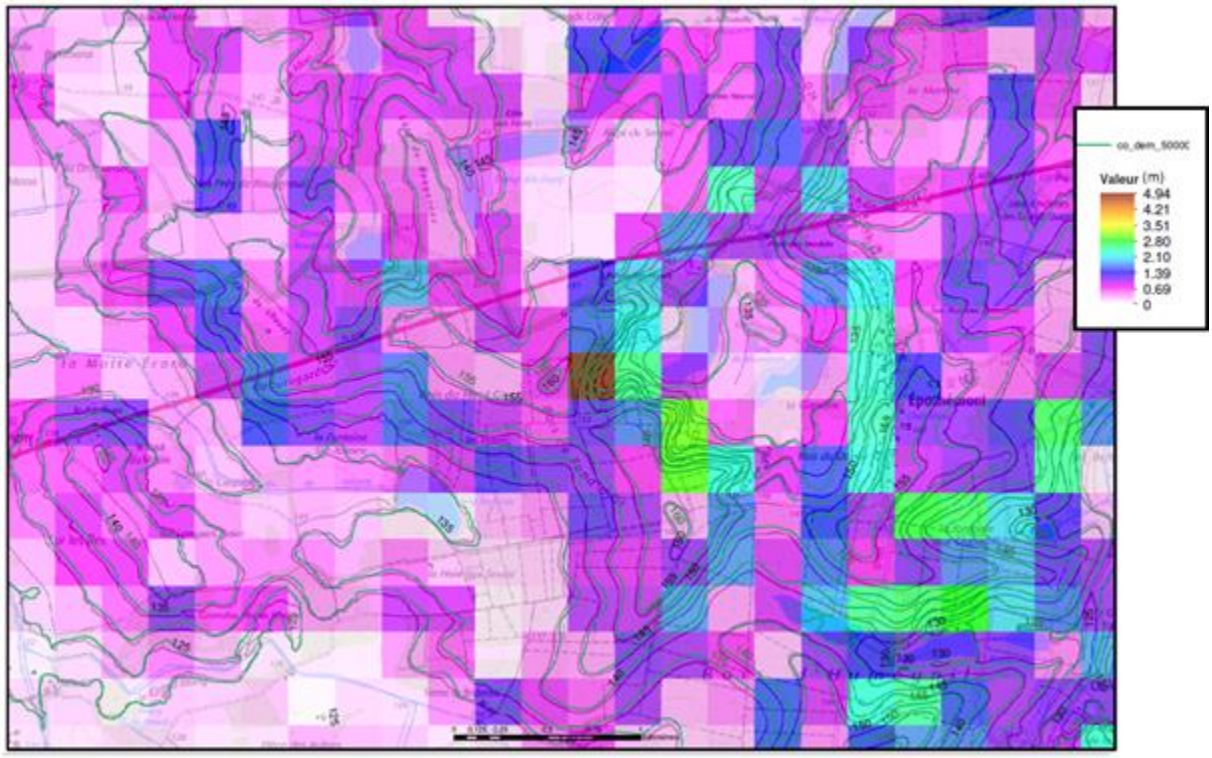


Figure 4-25 *Illustration d'une simulation d'érosion à 50 000 ans à partir du modèle RUSLE sur la zone d'étude (climat B4 – couvert végétal de type forêt)*

Sur les prochains 50 000 ans, les simulations permettent d'estimer l'impact du scénario climatique, le scénario B4 étant de 2 à 3 fois plus érosif que le scénario A4. Cette différence n'est pas liée à l'intensité des évènements pluvieux mais à la dégradation de la protection du couvert végétal (couvert forestier ou prairies naturelles) en climat méditerranéen.

Les études menées mettent en exergue que le modèle RUSLE est une approche pénalisante qui ne prend pas en compte les bilans de masse et par conséquent le dépôt des matériaux érodés. Le modèle RUSLE conduit à maximiser l'ablation sur l'ensemble de la zone concernée. Son utilisation pour des simulations prospectives apparait ainsi peu adaptée au-delà de quelques milliers à dizaines de milliers d'années. Compte tenu de ce constat et afin d'évaluer l'érosion jusqu'à 100 000 ans, une approche par dynamique globale de la topographie du secteur (approche dite LEM *Landscape Evolution Modeling*) a été développée et testée de manière prospective. Le modèle LEM a été calibré sur les premiers 50 000 ans à partir des simulations RUSLE. Les résultats obtenus montrent que l'érosion diminue de manière asymptotique au cours du temps avec un aplanissement progressif de la topographie. À l'échelle du secteur d'étude, le bilan de matières serait légèrement positif (avec des apports externes au secteur d'étude). Localement, le système tend à l'équilibre après la phase maximale d'érosion atteinte dans les 50 000 ans. Ces études montrent également les limites de l'approche LEM sur de grandes échelle de temps favorisant l'équilibre érosion/dépôt.

Une approche de dynamique des cours d'eau (Aube, Voire, la Marne) a également été menée pour appréhender leurs évolutions futures :

- pour le climat A4, le lit de l'Aube resterait comparable (avec un enfoncement de l'Aube dans son lit) avec un impact limité en termes d'évolution géomorphologique sur le secteur d'étude ;
- pour le climat B4, il y aurait une dynamique d'évolution plus forte avec au-delà de 80 000 ans la possible capture de l'Aube par la Marne *via* la Voire par débordement. Ceci impliquerait une modification du lit de l'Aube qui pourrait potentiellement affecter le secteur d'étude.

L'occurrence d'un climat périglaciaire (évolution naturelle A4 post-50 000 ans) pourrait également conduire à la mise en place d'un pergélisol affectant les propriétés de la couche d'argiles. Les phénomènes liés aux cycles de gel-dégel (gélifraction[6], la cryoturbation[7], loupe de glissement…) pourraient induire des modifications importantes et pérennes de la microstructure des roches affectées et des paramètres s'y rapportant (conductivité hydraulique, coefficient de diffusion). La revue bibliographique sur des analogues naturels indique néanmoins que ces phénomènes se limitent aux 10 premiers mètres depuis la surface au sein d'une couche dite « active ». En dessous, la roche resterait gelée avec un impact moindre sur sa microstructure. Dans la zone affectée par les cycles de gel-dégel, des modifications de propriétés des roches sont ainsi attendues avec de potentielles augmentations de la conductivité hydraulique de deux ordres de grandeur (associée à une augmentation du coefficient de diffusion d'un ordre de grandeur par relation empirique). D'autres phénomènes affectant la géochimie sont également attendus liée à la chimie des eaux avec cependant une capacité globale de rétention qui serait toutefois conservée par la présence de minéraux argileux. Ces éléments sont à mettre en regard des données acquises sur les Argiles tégulines qui telles qu'observées aujourd'hui sont les témoins de la dernière glaciation avec occurrence d'un permafrost permanent dans la région. Comme indiqué dans les paragraphes ci-dessus, il n'a pas été mis en évidence d'évolution forte des paramètres de transfert intrinsèques (conductivité hydraulique, coefficient de diffusion).

4.7.3 L'évolution hydrogéologique

L'évolution hydrogéologique du site dépendra directement de ces deux scénarios climatiques, une évolution naturelle (A4) ou une évolution perturbée (B4) :

- la recharge en eau sera affectée par les évolutions du régime de précipitation, l'évapotranspiration (fonction de la végétation) et l'évolution topographique ;
- la topographie qui sera affectée par les phénomènes d'érosion/dépôts qui vont influer sur les gradients de charge hydraulique locaux.

Pour le climat A4, sur les prochains 50 000 ans, compte tenu du régime de précipitation et de l'évolution relativement faible de la topographie, il est attendu une évolution relativement faible du fonctionnement hydrogéologique. Au-delà de 50 000 ans, l'occurrence d'une glaciation pourrait affecter plus drastiquement l'évolution hydrogéologique avec un gel des zones de recharge en eau et une modification significative des écoulements de surface (liée aux effets du permafrost).

Pour le climat B4, l'évolution climatique conduirait à une recharge en eau plus faible (concentration des pluies en automne et sécheresse en été) qui diminuerait globalement la piézométrie et les gradients de charge hydraulique associés.

Au stade des études, l'évolution future de l'hydrogéologie demeure qualitative et n'intègre pas de modélisation couplant évolution topographique et recharge en eaux.

4.8 Conclusion

L'acquisition des connaissances géologiques (au sens large) a fait l'objet de nombreux travaux incluant des campagnes de terrain (forages, tranchées, investigations géophysiques) et des analyses/caractérisation en laboratoire à partir des échantillons récoltés.

Les données acquises lors de la première campagne d'investigation (2013-2015) ont tout d'abord permis de sélectionner les Argiles tégulines (Albien supérieur et moyen) en tant que potentielle formation hôte et d'identifier une zone de 10 km² dont les caractéristiques sont les plus favorables. De manière générale, la formation des Argiles tégulines présente une géométrie relative simple et bien définie et ne présente pas d'hétérogénéité sédimentaire et structurale majeure. Elle est également constituée par une quantité importante de minéraux argileux lui conférant des capacités de confinement substantielles avec notamment des propriétés élevées de sorption vis-à-vis des radionucléides et substances toxiques chimiques.

[6] Fragmentation des roches causée par les effets du gel et du dégel
[7] Phénomène géomorphologique affectant les couches superficielles du sol soumises à des alternances de gel et de dégel.

Étant donné son contact direct avec la surface, la couche des Argiles tégulines présente une évolution de ses propriétés géochimiques (incluant la chimie des eaux) et géomécaniques à proximité de la surface dans les premiers 5 - 10 m. Les données acquises notamment lors de la seconde campagne de terrain ont permis de disposer d'une bonne compréhension des Argiles tégulines en surface avec des effets induits attendus comme moindres sur ces capacités de confinement.

L'ensemble des études conduites sur l'évolution du site indique une bonne confiance dans l'évolution du site (climat, érosion…) jusqu'à 50 000 ans. En particulier, les conclusions des études sur l'érosion montrent que la profondeur de 30 m pour l'implantation du stockage est robuste au regard de ces phénomènes. Au-delà de 50 000 ans et notamment pour le scénario d'évolution climatique A4, l'évolution de site demeure moins maitrisée quantitativement en lien également avec la capacité des outils/méthodes de modélisation (et qui ont été développés spécifiquement) à appréhender ces phénomènes. Les grands phénomènes sous-tendant l'évolution au-delà de 50 000 ans sont néanmoins connus et permettent de dresser une évolution conceptualisée du site pour cette période. Toutefois, la moins bonne maîtrise de l'évolution de site au-delà de 50 000ans implique sa prise en compte dans les évaluations de sureté en après-fermeture avec la définition de scénarios conventionnels (cf. Chapitre 8 du présent rapport).

Les résultats obtenus complétés par des travaux de modélisation permettent de disposer d'une compréhension intégrée de la géologie du site à l'actuel et d'établir les grands traits de son évolution future. Ces résultats permettent également de disposer des éléments nécessaires à la conduite des évaluations de sureté en après-fermeture, que ce soit pour la définition des hypothèses et modèles mais également dans la sélection des valeurs paramétriques en support aux différents scénarios retenus.

5

Analyse des principales règles et enjeux juridiques applicables au territoire de la zone de l'étude

5.1 Enjeux liés à la présence humaine actuelle et passée de la zone d'étude 72
5.2 Enjeux liés aux documents d'urbanisme applicables à la zone d'étude 73
5.3 Enjeux liés aux zonages environnementaux 74

Afin d'éclairer les possibilités d'implantation d'une installation de stockage sur le site de la CCVS, l'Andra a analysé les principales règles applicables au territoire de la zone d'étude et les enjeux juridiques associés.

La future installation de stockage de déchets FA-VL aura le statut d'installation nucléaire de base (INB), les règles actuelles s'appliquant aux INB sont ainsi prises en compte.

Les éléments présentés ci-après résultent de l'analyse des conditions, enjeux et procédures qui devront être mises en œuvre pour mener à bien le projet au sein de la zone d'étude (ZE). Les règles susceptibles de contraindre le déploiement d'utilités ou de moyens logistiques nécessaires à la construction, puis à l'exploitation du futur stockage ont également été examinées suivant diverses thématiques ; la localisation géographique de la ZE, les règles d'urbanisme applicables et les zonages environnementaux.

5.1 Enjeux liés à la présence humaine actuelle et passée de la zone d'étude

Compte tenu de la configuration de la zone d'étude, qui est encadrée d'ouest en est par deux zones urbaines (communes de Juzanvigny et d'Épothémont), l'identification de distances d'éloignement de la future INB par rapport à ces zones sont à analyser.

A l'instar des centres de stockage de surface actuellement exploités par l'Andra, une INB de stockage de déchets FA-VL ne comportera pas de zone d'aléa à cinétique rapide, nécessitant d'établir un périmètre autour celle-ci. Cependant, l'Andra prévoit d'établir une distance d'éloignement de minimum 200 m[8] du futur centre de stockage par rapport aux zones urbanisées, principalement pour des raisons d'acceptabilité locale.

Par ailleurs, l'Andra n'a pas identifié de périmètre résultant d'un plan de prévention des risques technologique, industriel ou nucléaire, susceptibles de recouper la zone d'étude et de rendre non accessibles certains secteurs[9]. Ceci n'entraîne donc pas de contrainte particulière en termes d'implantation du projet sur la zone d'étude.

Cependant, sur la zone d'étude et aux abords de celle-ci, il existe des secteurs au droit desquels certaines activités, l'occupation et l'utilisation des sols, sont limitées voire proscrites. Ainsi, il existe :

- en dehors de la ZE :
  - ✓ un polygone d'isolement du dépôt de munitions (situé à l'ouest de la zone d'étude), ainsi que des servitudes aéronautiques de dégagement de l'aérodrome de Brienne-le-Château (au nord-ouest de la ZE) ;
  - ✓ une ancienne décharge située à la ferme de Bridenne à Crespy -Le-Neuf, au sud de la ZE, est classée comme un ancien site de collecte et de stockage des déchets non dangereux dont des ordures ménagères. Pour l'implantation du projet, l'Andra observera un éloignement de 200 m aux abords de l'ancienne décharge de Bridenne.
- au sein de la ZE : des servitudes d'alignement concernant la route départementale D400, classée à grande circulation et qui traverse la ZE d'ouest en est, imposent un recul minimal de 25 m de cet axe routier.

La route départementale D400 relie en ligne droite les deux communes de Juzanvigny et Épothémont. Cette route départementale traverse la partie nord de la zone d'étude, au droit des secteurs où la couche des Argiles tégulines possède une épaisseur de plus de 60 m, qui sont des secteurs d'intérêt pour l'implantation de l'installation de stockage. Aussi, les possibilités d'implantation au niveau du tracé de la route départementale D400 ont été analysées par l'Andra, en interrogeant, d'une part l'opportunité de construire des galeries d'accès au stockage ou des galeries de stockage sous la route (*a minima* à 30 m de profondeur), d'autre part la possibilité de dévier la route.

[8] Suivant les standards du code de l'environnement concernant les installations susceptibles de donner lieu à des servitudes d'utilité publique (articles L. 515-8 à L. 515-12).

[9] Le détail des risques majeurs recensés sur la commune est notamment consultable sur le site Géorisque et le dossier départemental des risques majeurs (DDRM) de l'Aube (27, 28).

À ce stade des études, il est souhaitable d'éviter la présence d'une installation de stockage sous une route au regard notamment des contraintes de la réglementation actuelle, qui impose pour un tel projet d'acquérir la route et de la dévier (son acquisition impliquant une procédure de désaffectation et de déclassement du domaine public). En effet, le droit nucléaire[10] impose la maîtrise foncière des terrains de l'INB d'assiette (en surface et en souterrain), ce qui constitue un obstacle à la réalisation d'une INB souterraine sous une voie de circulation dont le fonctionnement serait maintenu. Une acquisition de la route imposera probablement sa déviation en raison de sa fréquentation actuelle et pour rétablir la liaison routière entre les communes de Juzanvigny et Épothémont, ce qui pourrait perturber significativement la circulation routière du secteur et engendrerait des atteintes environnementales qu'il conviendrait d'étudier. À ce stade du projet, l'étude des possibilités d'implantation d'une future installation de stockage à faible profondeur tient compte de la présence de la route départementale D400 selon son tracé actuel, sans envisager sa déviation ni le passage d'ouvrages sous la route, moyennant l'observation d'un recul à la route départementale D400 d'au minimum de 25 m.

Le contour de la zone d'étude tel que redéfini (contour rouge) de façon notamment à respecter les distances d'éloignement de 200 m des zones urbaines et de la ferme de Bridenne, ainsi que le recul de 25 m de la route départementale D400, est représenté sur la figure 5-1.

Concernant les dispositions d'archéologie préventive, la zone d'étude n'est pas située sur ou aux abords d'un site patrimonial remarquable, et il n'existe pas à ce jour d'arrêté fixant des zones de présomption de prescription archéologique. Les aménageurs comme l'Andra peuvent cependant, avant toute intervention dans le milieu naturel susceptible d'affecter d'éventuels vestiges archéologiques, saisir le préfet de région (service régional de l'archéologie) afin qu'il examine si leur projet est susceptible de donner lieu à des prescriptions d'archéologie préventive[11].

5.2 Enjeux liés aux documents d'urbanisme applicables à la zone d'étude

L'Andra a analysé la compatibilité du projet d'implantation d'une INB de stockage au regard des documents d'urbanisme actuellement en vigueur sur la ZE, en particulier le Schéma de cohérence territoriale (SCOT) des Territoires de l'Aube (29) et le Plan local d'urbanisme intercommunal (PLUi) de la Communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines (30).

Certaines orientations du SCOT concernant les zones agricoles, ainsi que les utilisations des sols et usages autorisés des terrains situés sur la ZE inscrits au règlement du PLUi, ne permettent pas de stocker des déchets radioactifs sur une parcelle agricole ou naturelle. Or la zone d'étude comporte nombre de ces zones.

Ainsi, une mise en compatibilité de ces documents d'urbanisme, en vue de la création d'un zonage intégrant les activités de l'Andra, sera notamment nécessaire pour permettre la réalisation du projet. Les conditions de mise en œuvre des procédures réglementaires associées seront analysées finement par l'Andra une fois que le projet d'implantation sera précisé. En tout état de cause, l'Andra justifiera, dans l'étude d'impact du projet, le choix des localisations requises pour son implantation.

La figure 5-1 représente la localisation des zonages du PLUi.

Dans la droite ligne du Plan biodiversité (31) décliné par la loi n° 2023-630 du 20 juillet 2023 visant à faciliter la mise en œuvre des objectifs de lutte contre l'artificialisation des sols (32) au travers des SCOT, l'Andra fera ses meilleurs efforts dans sa conception environnementale, tout en intégrant les optimisations sur le plan de la sûreté nucléaire, pour être le plus économe en consommation foncière.

[10] Cf. En particulier les dispositions du code de l'environnement relatives aux installations nucléaires de base (articles L. 593-1 à L. 593-43 et R. 593-14 à R. 593-28).
[11] Cf. Articles L. 522-4 et R. 523-12 du code du patrimoine

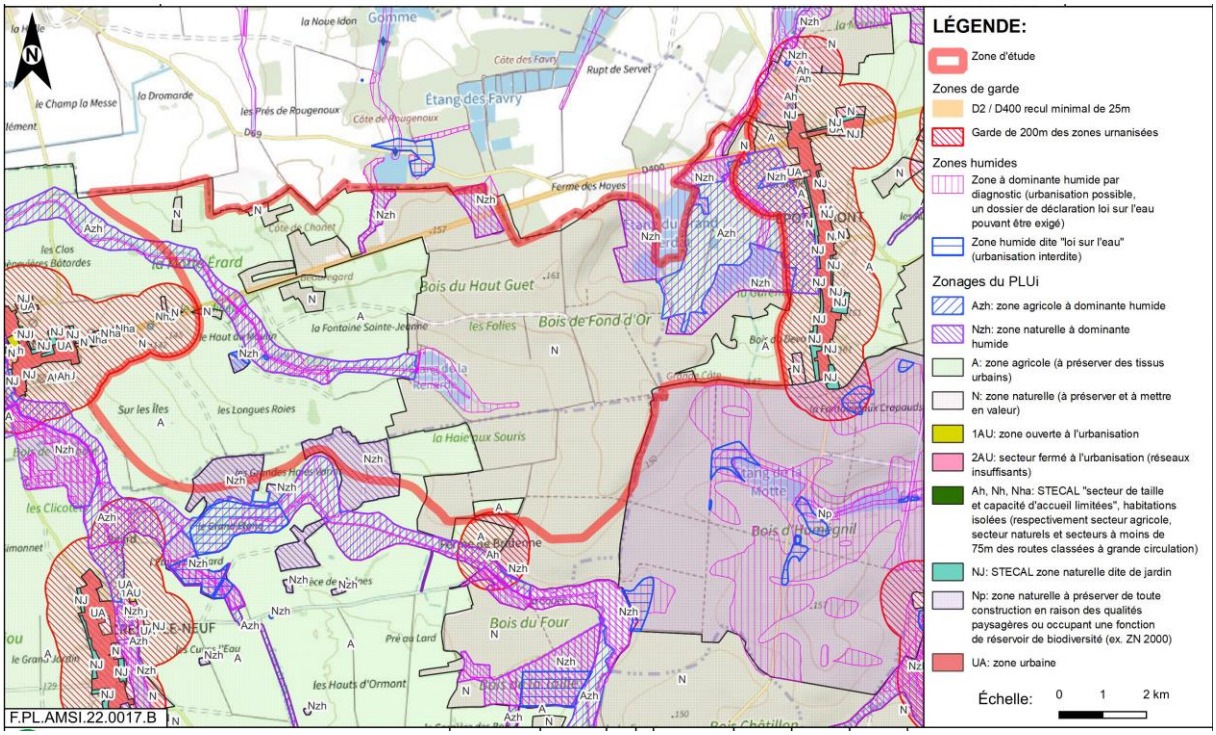


Figure 5-1 *Zonage du Plan local d'urbanisme intercommunale de la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines dans le secteur de la zone d'étude et de ses abords*

5.3 Enjeux liés aux zonages environnementaux

Les zonages environnementaux aux abords et sur la zone d'étude sont présentés au chapitre 6.2.4.1 du présent rapport.

Pour la mise en œuvre du projet, les études de conception, puis l'étude d'impact, poursuivront l'identification des zones environnementales. Ces études devront démontrer que l'implantation d'une installation de stockage de déchets radioactifs FA-VL au sein de la zone d'étude constitue la meilleure solution notamment du point de vue environnemental pour y stocker ces déchets et que des alternatives ayant des incidences moindres pour l'environnement (en particulier la biodiversité) ont été examinées et comparées.

Afin de poursuivre la conception dans une démarche respectant la séquence éviter, réduire, compenser puis d'établir l'évaluation environnementale qui sera nécessaire pour poursuivre le projet, l'Andra a d'ores et déjà engagé un premier diagnostic de la biodiversité et des enjeux environnementaux sur la zone d'étude et aux abords de celle-ci. Une synthèse de cette étude est présentée dans le chapitre 6 du présent rapport.

6

Étude des enjeux environnementaux sur la zone d'étude du site de la CCVS

6.1 Évitement des enjeux les plus forts lors de la définition de la zone d'étude *77*
6.2 Facteurs susceptibles d'être discriminants pour l'implantation du projet et/ou le choix de la technique constructive *78*
6.3 Facteurs considérés comme peu discriminants dans l'implantation du projet et/ou le choix de la technique constructive *94*
6.4 Conclusion *95*

La conception du projet de centre de stockage de déchets FA-VL sur le site de la CCVS doit respecter la séquence éviter, réduire, et en dernier lieu compenser (séquence ERC) les incidences du projet. Cette séquence permet d'élaborer un projet présentant les incidences les plus faibles. Il est souhaitable de l'appliquer le plus en amont possible dans la conception du projet et à sa poursuite dans ses différentes phases de vie. Ainsi, dès les années 90, des critères environnementaux ont été intégrés aux critères de recherche de site pour une installation de stockage en complément des critères de sûreté (géologie, hydrogéologie) et d'acceptabilité ; depuis lors, la prise en compte de l'environnement dans ce cadre est croissante.

Un diagnostic environnemental de la zone d'étude du site de la CCVS a été réalisé entre 2020 et 2023. Une synthèse en est présentée dans ce chapitre, avec plusieurs objectifs :

- identifier et cartographier les enjeux[12] et parfois sensibilités[13] de différents facteurs[14] environnementaux ;
- établir une première hiérarchisation des enjeux ;
- éclairer les choix d'implantation et de techniques constructives à venir pour l'installation de stockage.

Certains facteurs de l'environnement ne présentent pas la même valeur d'enjeu ou de sensibilité en fonction du secteur considéré de la zone d'étude ou de la technique constructive qui serait utilisée. Ils sont ainsi qualifiés de discriminants. C'est le cas des facteurs suivants : le sous-sol, le sol, les eaux superficielles, les eaux souterraines, la biodiversité, la population et l'habitat, la qualité de l'air et le climat, les activités agricoles et sylvicoles, le paysage, les infrastructures de transport et les réseaux. Ces facteurs sont présentés au chapitre 6.2 du présent rapport. Les autres facteurs sont présentés succinctement au chapitre 6.3 du présent rapport.

Pour effectuer l'analyse des enjeux environnementaux, la zone d'étude a été élargie d'un kilomètre, notamment pour éviter les « effets de bord » et donc avoir une bonne évaluation des enjeux environnementaux de la zone d'étude (cf. Figure 6-1).

Pour la suite des études, la zone d'étude devra être complétée avec les zones nécessaires aux accès (accès routier et/ou ferroviaire) au centre de stockage et à son fonctionnement (alimentation en eau, énergie, etc.).

[12] L'enjeu d'un facteur environnemental est le résultat de l'appréciation de la valeur globale du facteur, dans un objectif de préservation. Cette valeur est définie selon l'état du facteur.
[13] Risque de dégradation de l'enjeu prenant en compte le projet
[14] Pour l'Andra, un facteur est un élément de l'environnement du centre ou du projet. L'ensemble des facteurs contribue à la caractérisation de l'environnement naturel et humain.

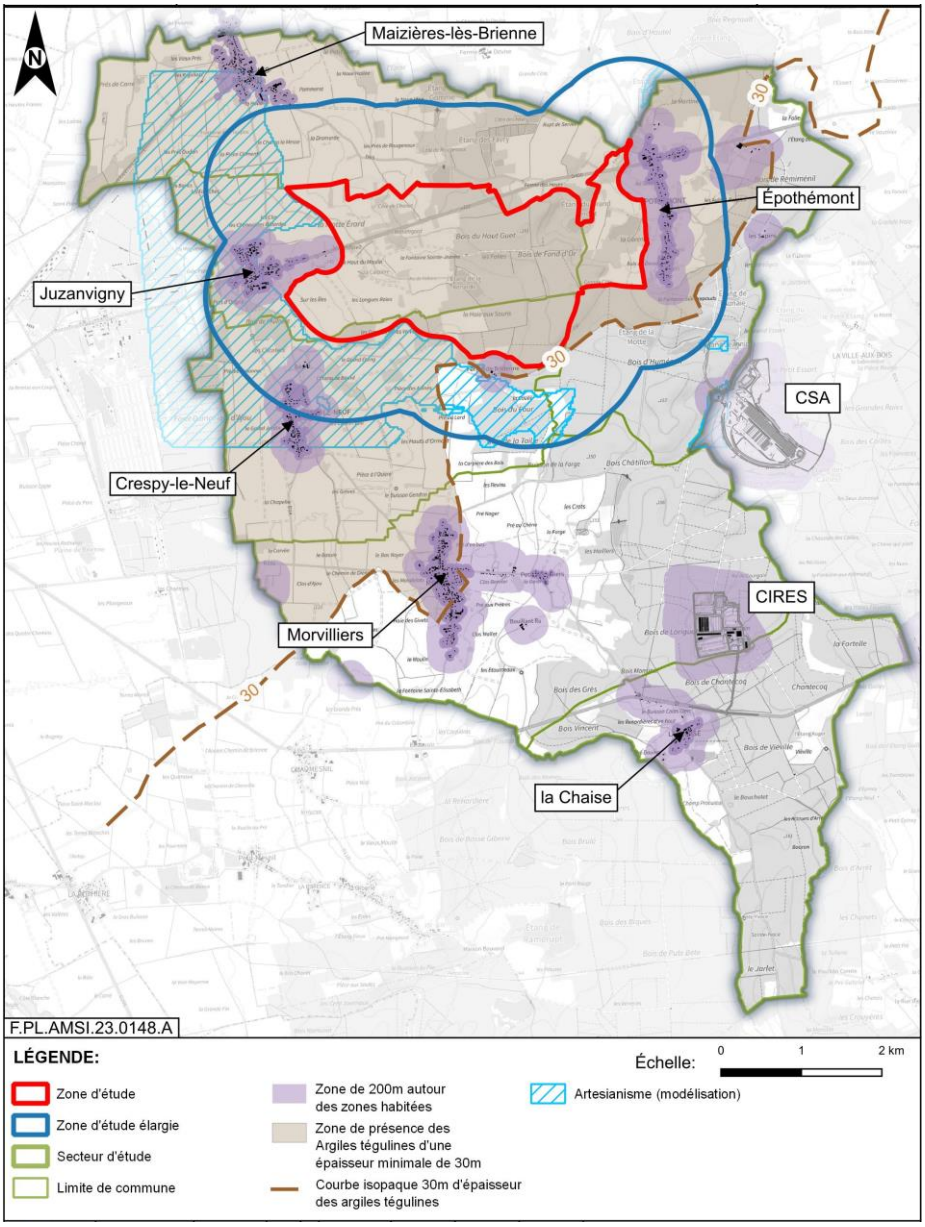


Figure 6-1 *Zone d'étude (contour rouge) et zone d'étude élargie de 1 km (contour bleu)*

6.1 Évitement des enjeux les plus forts lors de la définition de la zone d'étude

Le processus qui a conduit à la définition de la zone restreinte étudiée en 2015, puis à celle de la zone d'étude (cf. Figure 6-1) pour le présent rapport est rappelé aux chapitres 2.4.2 et 4.2. Ainsi, la zone artésienne et les zones habitées (villages d'Épothémont, de Juzanvigny et les habitations isolées) ont notamment été évitées. En complément, il a été fait le choix d'éviter le site du réseau européen Natura 2000 « Bois d'Humégnil » au sud-est de la zone d'étude (cf. Figure 6-9) :

- la zone artésienne et les zones de gradient hydraulique ascendants les plus importants au nord-ouest de la zone d'étude, pour des raisons de sûreté vis-à-vis de la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques (cf. Figure 6-2) ;

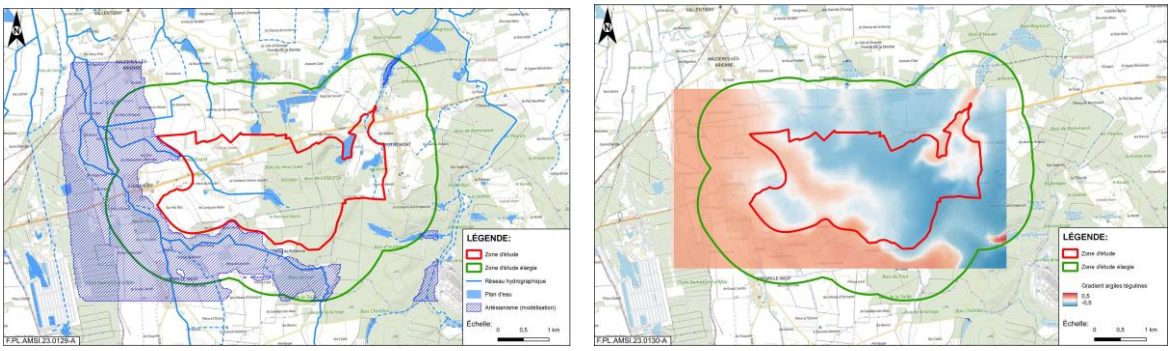


Figure 6-2 Zones artésiennes (à gauche), gradients hydrauliques (à droite)

- les zones habitées et notamment les villages d'Épothémont, Juzanvigny et les habitations isolées (cf. Figure 6-6) ;
- le site du réseau européen Natura 2000 « Bois d'Humégnil » au sud-est de la zone d'étude (cf. Figure 6-9).

6.2 Facteurs susceptibles d'être discriminants pour l'implantation du projet et/ou le choix de la technique constructive

6.2.1 Sous-sol

L'implantation d'un centre de stockage de déchets radioactifs nécessite de disposer d'une couche géologique favorable (épaisseur, propriétés, etc.) au confinement des déchets radioactifs. Par ailleurs, la géologie conditionne le type de sol en surface, la présence d'aquifères et leur vulnérabilité à une éventuelle pollution, les ressources exploitables et les moyens techniques à mettre en œuvre pour les terrassements.

Le contexte géologique de la zone d'étude est présenté dans le chapitre 4.3 du présent rapport.

Compte tenu de l'exigence de profondeur de 30 m minimum au toit du stockage et du maintien d'une garde d'argile sous le stockage, la partie sud de la zone d'étude, présentant les épaisseurs d'argile les plus faibles, (cf. Figure 4-9), est moins favorable à l'accueil d'un stockage à faible profondeur de déchets FA-VL. Cependant, ce secteur pourrait accueillir des installations de surface nécessaires à l'exploitation du stockage.

6.2.2 Sol

L'implantation d'un centre de stockage de déchets nécessite de consommer de la surface au sol, dont une partie est consommée de manière provisoire lors de la phase travaux. Or, le sol a diverses fonctions écologiques, telles que l'accueil de la biodiversité, l'infiltration de l'eau, le stockage du carbone ou encore la régulation du cycle des nutriments. De plus, il est le support d'activités humaines (agriculture, stockage et filtration des polluants, source de matières premières, etc.). Afin de maintenir ces fonctions, il est nécessaire de :

- limiter au juste besoin la surface des emprises artificialisées[15] en cohérence avec les choix de sûreté relatifs aux architectures de stockage. Ceci est cohérent avec les objectifs de la loi « climat et résilience » (33), qui énonce un nouvel objectif général applicable aux collectivités publiques en matière d'urbanisme ; la « *lutte contre l'artificialisation des sols, avec un objectif d'absence d'artificialisation nette à terme* » (article L. 101-2, 6° bis, du code de l'urbanisme). Ces objectifs sont repris et déclinés dans les documents d'urbanisme de la CCVS[16] ;

[15] On entend par surface artificialisée « une surface dont les sols sont soit imperméabilisés en raison du bâti ou d'un revêtement, soit stabilisés et compactés, soit constitués de matériaux composites » article L. 101-2-1 du code de l'urbanisme introduit par la loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 dite « climat et résilience » (33)).

[16] Plan local d'urbanisme intercommunal (PLUi) de la CCVS approuvé au 13 février 2020 (34).

- de privilégier une implantation des emprises dans les zones aux fonctionnalités moindres et notamment les zones de moins bonne qualité agronomique[17] et/ou ayant déjà été remaniées.

Par ailleurs, l'implantation d'un projet nécessite de vérifier l'absence de pollution des sols qui peut engendrer des contraintes d'implantation et de conception.

La zone d'étude du site de la CCVS est majoritairement occupée par des terres agricoles, constituées de cultures et de prairies, sur sa moitié est et extrême ouest et par de la forêt de feuillus (cf. Figure 6-3) sur sa moitié est. Il s'agit donc majoritairement de zones non artificialisées. La majeure partie de la zone apparait déjà comme boisée sur les cartes de l'état-major (1820-1866), ce qui indique que les sols n'y ont vraisemblablement jamais été modifiés. De plus, aucun bâti n'est présent dans la zone d'étude.

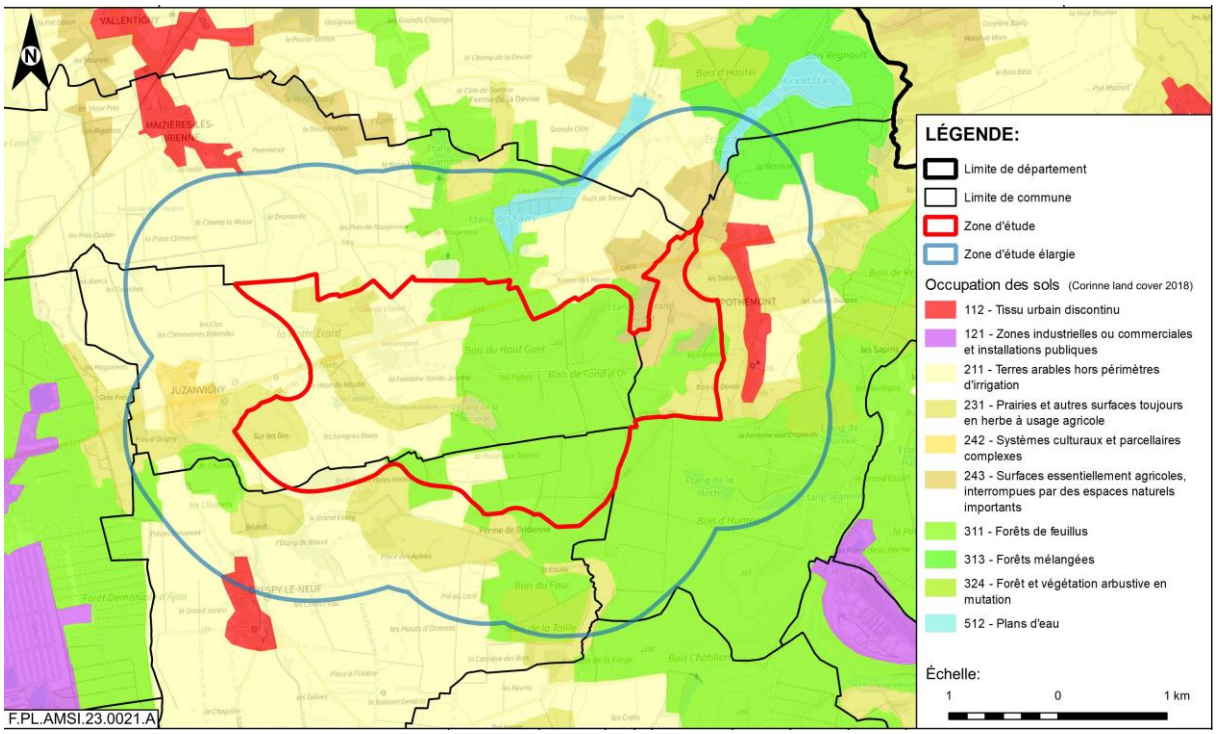


Figure 6-3 *Occupation des sols au niveau de la zone d'étude (source : Corine Land Cover (35))*

Les prospections de terrain réalisées entre juillet 2017 et février 2018 (36) ont permis de caractériser la pédologie et de classer les secteurs de la zone d'étude en fonction de leurs qualités agronomiques (cf. Figure 6-4).

Ainsi les sols de meilleure qualité agronomique sont présents dans la partie ouest de la zone d'étude (zones orangées sur la figure 6-4). Les sols du secteur forestier n'ont vraisemblablement jamais été modifiés, leur conférant ainsi également une valeur environnementale.

[17] Un sol est considéré de bonne qualité agronomique lorsqu'il est fertile. Cela repose sur différents paramètres ; un sol fertile est notamment un sol profond, poreux, retenant bien l'eau, riche en matière organique.

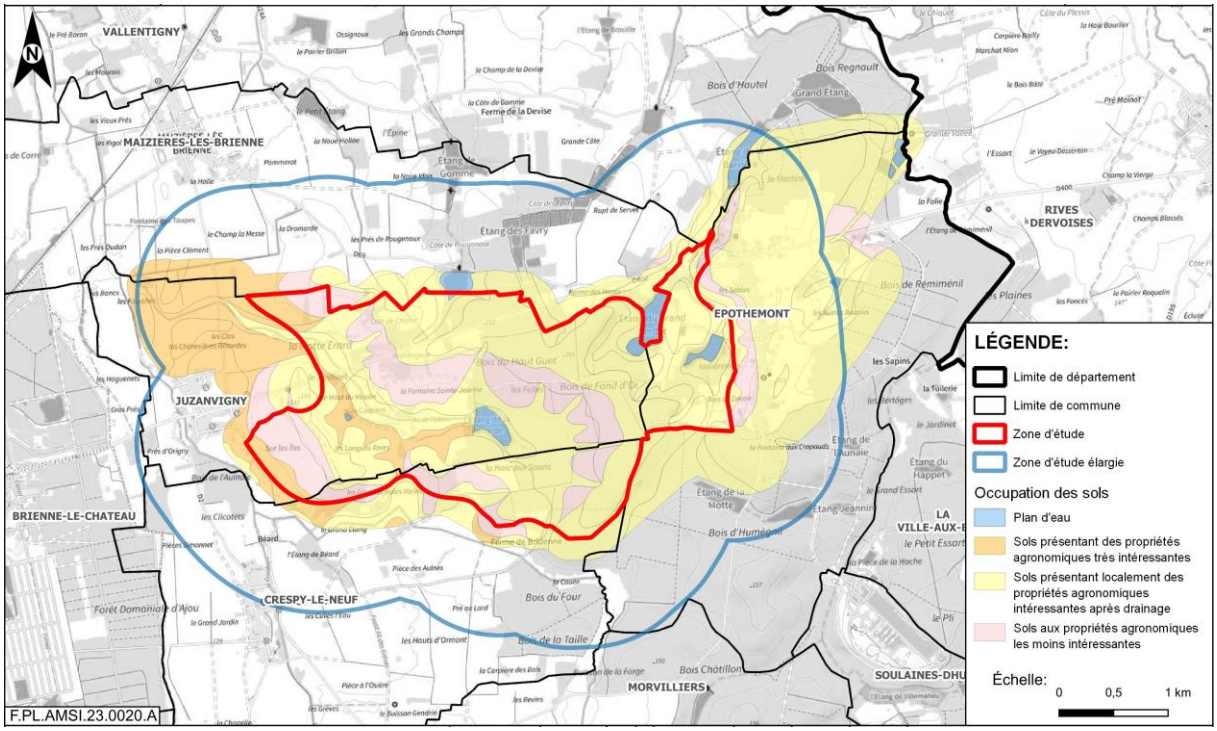


Figure 6-4 Propriétés agronomiques des sols au niveau de la zone d'étude

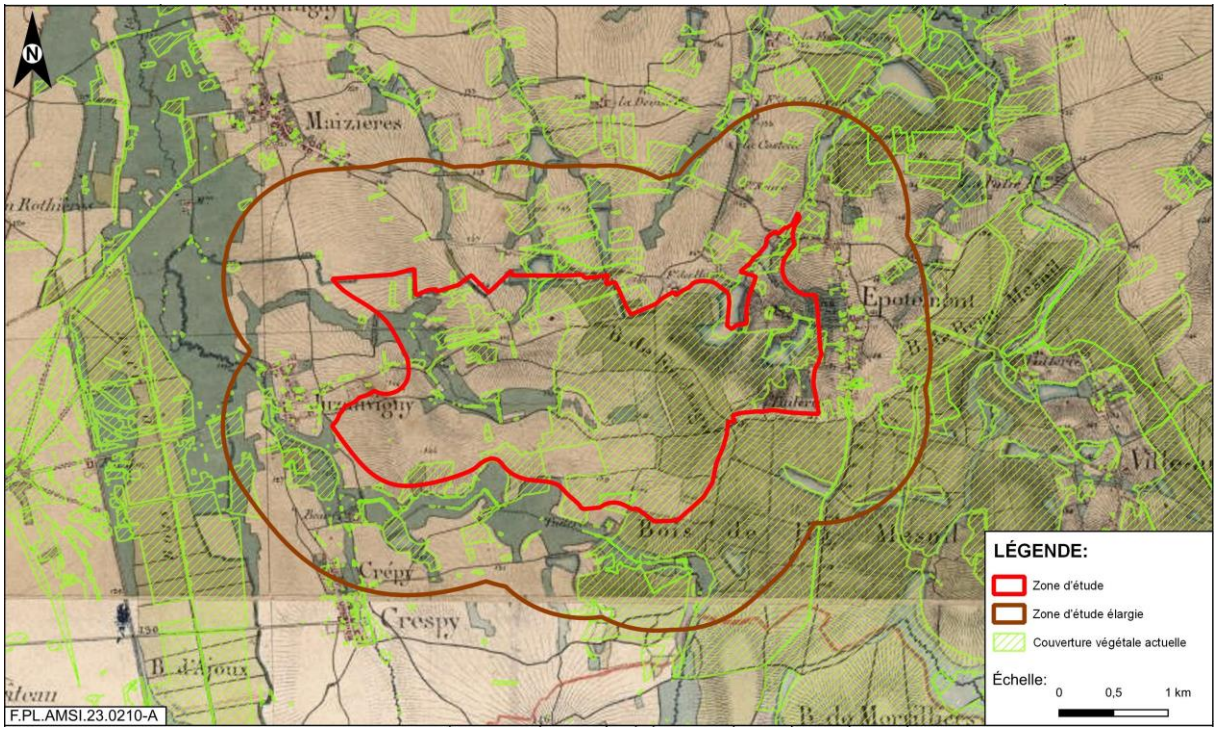


Figure 6-5 Carte de l'état-major où figurent les boisements anciens

Par ailleurs, la consultation des bases de données en vigueur dans le domaine des sites et sols pollués[18] a mis en évidence qu'aucun site pollué ou potentiellement pollué connu des administrations n'est susceptible d'avoir engendré une pollution des sols ou de la nappe au niveau de la zone d'étude. Le site pollué le plus proche est l'ancienne décharge de la ferme de Bridenne à Crespy-le-Neuf, pour laquelle l'Andra recommande d'éviter de s'implanter à moins de 200 m (cf. Chapitre 5.1 du présent rapport).

La démarche ERC appliquée au facteur sol conduit aux préconisations suivantes concernant l'implantation du projet :

- la création de surfaces artificialisées doit être minimisée, en limitant les emprises du projet au juste besoin. Pour ce facteur « sol », le choix de l'architecture de stockage sera important (cf. Chapitre 7.2.4 du présent rapport) ;
- l'implantation sur des sols aux fonctions les moins intéressantes, par exemple au regard des propriétés agronomiques et de l'ancienneté des sols, doit être privilégiée. À ce stade des études, il s'agirait donc d'éviter une implantation dans des zones situées à l'extrême ouest (cf. Figure 6-4) et dans le bois d'Humégnil ;
- les restrictions d'usage des sols par rapport à la situation avant-projet doivent être limitées. Ainsi, l'emprise des terrains en surface au droit des alvéoles de stockage souterrain est importante à évaluer car elle correspondrait globalement aux surfaces enlevées aux usages locaux (emprise dite « neutralisée » notamment pendant la construction et l'exploitation du stockage, en complément des emprises des installations en surface) ;
- l'implantation du centre dans un périmètre de 200 mètres autour de l'ancienne décharge de Crespy-le-Neuf doit être évitée.

6.2.3 Eaux

Le facteur eau est en interface forte avec le facteur biodiversité traité au chapitre 6.2.4 du présent rapport, mais également avec d'autres facteurs comme le paysage ou le sous-sol. La création d'un centre de stockage de déchets radioactifs peut avoir plusieurs types d'incidences sur les eaux en fonction des choix de localisation et de conception réalisés :

- des incidences quantitatives, en particulier sur les eaux souterraines (prélèvements, injection, limitation de l'infiltration ou modification des directions d'écoulements) et sur les eaux superficielles (prélèvements, barrages à l'écoulement, aggravation des risques d'inondation, modification des régimes hydrodynamiques) ;
- des incidences qualitatives par les émissions de substances dans le milieu lors des différentes phases de vie ou en cas de pollution accidentelle ;
- des incidences sur les usages *via* une implantation conduisant à supprimer un captage ou à une incompatibilité d'usage d'une ressource.

6.2.3.1 Eaux superficielles et risques d'inondation

La zone d'étude est située à cheval sur trois sous-bassins versants : ceux de la Voire, des Noues d'Amance et de la Brévonne. Ces deux dernières rivières recoupent la zone d'étude élargie. Le réseau hydrographique au niveau de la zone d'étude se compose (i) du ru des Fellons (cours d'eau intermittent affluent de la Brévonne) dans la partie centrale, (ii) du fossé de l'étang de la Barrière reliant deux étangs au nord-est et (iii) de six plans d'eau en tout ou partie (seuls certains sont visibles à l'échelle de la figure 6-6). Le ru des Fellons ne constitue pas une masse d'eau au sens de la directive cadre sur l'eau (37)[19]. Une partie des surfaces agricoles est drainée et la zone d'étude comporte des fossés en bordure de parcelles agricoles.

[18] Information de l'administration concernant des pollutions suspectées ou avérées (ancienne dénomination BASOL), secteurs d'information sur les sols (SIS) et carte des anciens sites Industriels et activités de services (CASIAS).

[19] Une masse d'eau de surface est définie comme une partie distincte et significative des eaux de surface telle qu'un lac, un réservoir, une rivière, un fleuve ou un canal, une partie de rivière, de fleuve ou de canal, une eau de transition ou une portion d'eaux côtières, constituant le découpage élémentaire des milieux aquatiques destinée à être l'unité d'évaluation de la DCE.

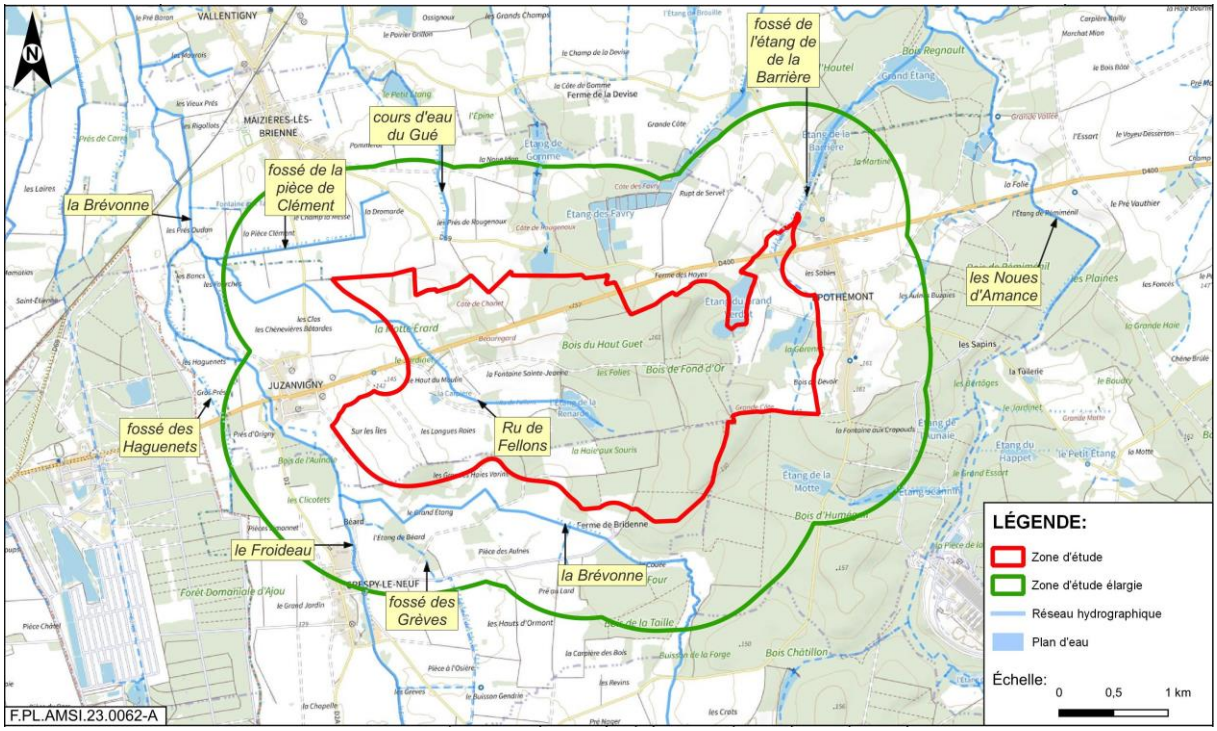


Figure 6-6 Réseau hydrographique sur la zone d'étude (source : Géoportail[20])

Aucune prise d'eau superficielle n'est recensée sur la zone d'étude. Dans la zone d'étude, les usages des eaux superficielles sont la pêche dans certains plans d'eau et l'abreuvement de bovins dans la zone d'étude élargie.

Concernant les risques d'inondation :

- les communes de la zone d'étude ne sont pas concernées par les risques d'inondation par ruissellement (pas d'arrêté de catastrophe naturelle)[21] ;
- la zone d'étude n'est pas concernée par les risques d'inondation par débordement de cours d'eau identifié dans un Plan de prévention des risques (PPRI) ;
- le caractère inondable du ru des Fellons et des plans d'eau de la zone d'étude n'est pas connu à ce stade des études ;
- la partie nord-ouest de la commune de Juzanvigny, en dehors de la zone d'étude, est concernée par le risque de rupture du barrage de la digue de Giffaumont, sur le lac réservoir Marne (Lac du Der).

Afin de respecter la démarche ERC pour le facteur « eaux superficielles », il s'agira :

- d'éviter la modification des régimes hydrologiques des cours d'eau et plans d'eau, et pour cela de limiter les emprises du stockage, les volumes d'eau pluviales rejetées et prendre en compte les bassins versants dans la conception ;
- de prendre en compte les risques d'inondation dans la conception, en commençant par l'acquisition de données complémentaires, au niveau du ru des Fellons et de l'étang de la Renarde (retenue collinaire) et la prise en compte des données existantes concernant le risque de rupture de barrage à Juzanvigny ;
- de prendre en compte les usages existants des eaux ;
- d'éviter/réduire l'impact éventuel des prélèvements sur les cours/plans d'eau et l'impact des rejets sur ces milieux et ce pour les différentes phases de vie du stockage.

[20] https://www.geoportail.gouv.fr/
[21] https://www.georisques.gouv.fr/

Par ailleurs, la conception des installations devra être réalisée en cohérence avec la capacité du milieu récepteur pour les rejets d'eaux du centre de stockage, à la fois d'un point de vue quantitatif et qualitatif.

Enfin, des données complémentaires devront être acquises concernant le fonctionnement des écoulements sur la zone d'étude et le lien avec les cours d'eau et plans d'eau en aval.

6.2.3.2 Eaux souterraines et risques d'inondation

Les nappes d'eaux souterraines rencontrées sur la zone d'étude sont, de la plus proche de la surface à la plus profonde (cf. Figure 4-23 et figure 4-22) :

- ponctuellement, les aquifères des formations superficielles Quaternaire, affleurant notamment au niveau du ru des Fellons (alluvions). Les nappes qu'ils contiennent sont potentiellement en relation directe avec les cours d'eau qui les drainent et les alimentent ;
- sur toute la surface de la zone d'étude :
  - ✓ l'aquifère des Sables verts de l'Albo-Aptien, sous la couche des Argiles tégulines. Sur la zone d'étude cette nappe est captive. Son alimentation se fait essentiellement par les eaux météoriques, en dehors de la zone d'étude où les sables sont à l'affleurement et ponctuellement par des cours d'eau en basses eaux. Son sens d'écoulement est globalement dirigé vers le nord ;
  - ✓ l'aquifère des sables du Barrémien, sous la couche d'Argiles à Plicatules.

Ces deux derniers aquifères font partie de la masse d'eau FRHG215 – Albien-Néocomien libre entre Seine et Ornain de la directive cadre sur l'eau (37), dont l'état chimique est médiocre, l'état quantitatif est bon et l'objectif de bon état est fixé pour 2027. Des interfaces eaux de surface/eaux souterraines de ces aquifères existent potentiellement au niveau des zones d'affleurement de ces formations.

La zone d'étude a été définie de façon à éviter la zone artésienne et à se situer en dehors des zones à gradients hydrauliques ascendants les plus forts (cf. Chapitre 4.6.2 du présent rapport et figure 4-23).

Concernant la vulnérabilité des aquifères :

- les aquifères des formations superficielles du Quartenaire sont vulnérables à une pollution qui pourrait provenir de la surface compte-tenu de leur faible profondeur et de l'absence de protection par un horizon imperméable ;
- en l'absence de faille hydrauliquement active (cf. Chapitre 4.4 du présent rapport), l'épaisseur et les faibles conductivités hydrauliques des Argiles tégulines constituent une barrière hydraulique efficace pour éviter les remontées de nappe en provenance des sables verts. En revanche, dès lors que l'on s'intéresse à la migration des solutés sur des temps longs, ces mêmes gradients constituent l'un des principaux moteurs (la convection). Une recharge de la nappe aquifère des Sables verts par celle du Barrémien n'est à prendre en compte (cf. Chapitre 4.6 du présent rapport).

Par ailleurs, il n'est pas recensé, sur la zone d'étude élargie, de zone de répartition des eaux (ZRE)[22], d'aire d'alimentation de captage (AAC)[23], de captage pour l'alimentation en eau potable ou de périmètre de protection associée, de captage pour l'alimentation en eau industrielle ou agricole. Le captage pour l'alimentation en eau potable le plus proche est celui de Maizières-lès-Brienne, à plus de 1,5 km au nord-est.

L'aquifère Albo-Néocomien, correspondant à la masse d'eau FRHG218, est un réservoir profond, principalement captif, situé sous la craie du Bassin parisien, sur une extension de plus de 100 000 km². Il est d'intérêt majeur pour l'alimentation en eau potable, notamment dans l'agglomération parisienne. L'aquifère est constitué de trois formations sableuses pouvant varier de quelques mètres à une centaine de mètres. Sur la zone d'étude, il est représenté uniquement par la formation des Sables verts Albo-aptiens appartenant à la masse d'eau FRHG215 (cf. *Supra*). La zone d'étude est située en amont hydraulique de la

[22] Les zones de répartition des eaux (ZRE) sont définies en application de l'article R211-71 du code de l'environnement (CE), comme des « zones présentant une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins ».

[23] L'aire d'alimentation de captages (AAC) désigne la surface sur laquelle l'eau, qui s'infiltre ou ruisselle, alimente un ou des captages sensibles aux pollutions diffuses. Ce zonage a pour objectif de désigner la zone où des actions seront mises en place pour la protection de la ressource en eau, notamment en matière de lutte contre les pollutions diffuses.

zone de forage pour l'alimentation en eau potable de Paris. L'aquifère des Sables verts au niveau de la zone d'étude contribue de façon très minoritaire à la réalimentation de la nappe captée par l'agglomération parisienne, compte-tenu :

- de l'épaisseur limitée de 10 m de l'aquifère des sables verts et de sa lithologie (sables riches en argile et granulométrie grossière), qui lui donnent un caractère peu productif en regard du reste de la formation sur le bassin de Paris, pour subvenir aux besoins en eau potable d'une grande ville ;
- de sa faible extension en regard des 5 700 km² de toute la bordure est et sud du Bassin parisien ;
- de son éloignement, à près de 200 km de l'agglomération parisienne.

Concernant les risques d'inondation, l'ensemble des zones où affleurent des formations quaternaires à l'intérieur de la zone d'étude sont considérées comme potentiellement sujettes aux remontées de nappes ou inondations de caves.

Afin de respecter la démarche ERC pour le facteur « eaux souterraines », les préconisations sont les suivantes :

- implanter préférentiellement les ouvrages de stockage dans des zones de gradient hydraulique descendant afin de ne pas favoriser le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques vers la surface et de dimensionner le stockage de façon à ce que les incidences qualitatives sur la nappe aquifère des Sables verts soient acceptables compte-tenu des échanges hydro-dispersifs existants entre les Argiles tégulines qui accueilleront le stockage et les Sables verts ;
- éviter une implantation en zone alluviale et au niveau des zones de remontée de nappe, qui impliquerait potentiellement de devoir pomper des eaux en fond de fouille, et éviter les zones inondables (zone centre ru des Fellons/étang de la Renarde et zone au nord-est des étangs du Grand Verdat et du Blumerais).

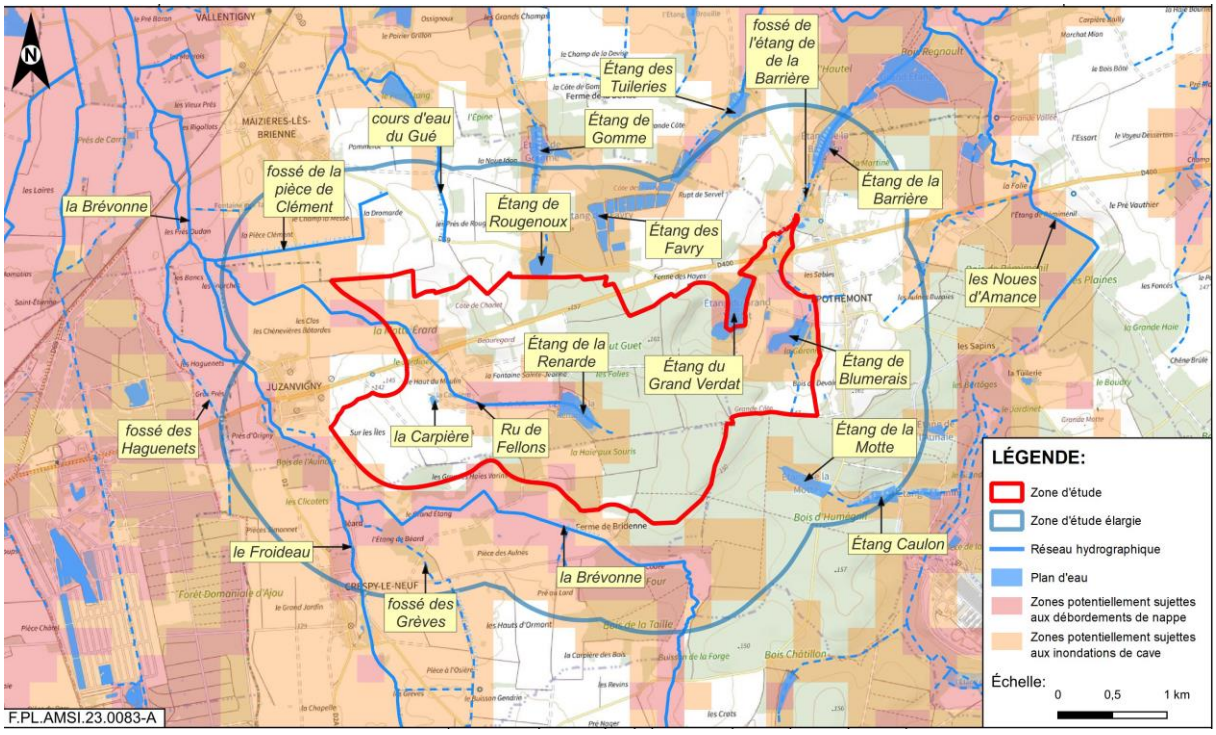


Figure 6-7 Zones sensibles aux remontées de nappe (source : Géorisques)

Par ailleurs, le futur centre de stockage aura des besoins en eau, avec une alimentation possible par branchement sur le réseau existant ou création d'un nouveau forage. L'incidence quantitative sur le milieu devra être étudiée et limitée.

Des données complémentaires devront être acquises concernant le fonctionnement des écoulements des eaux souterraines, et notamment de la nappe alluviale.

6.2.4 Biodiversité

L'implantation en surface d'installations (installations de surface, bâtiments supports à l'exploitation, verses, etc.) nécessitera une emprise de plusieurs hectares susceptible d'avoir une incidence sur les habitats, la flore, la faune, les zones humides, les corridors écologiques. Cette surface pourra varier en fonction de la technique constructive. Des incidences sont également possibles par dérangement, dégradation du milieu de vie (nuisances lumineuses, acoustiques, dégradation de la qualité de l'air, de l'eau, etc.). Par ailleurs, le projet peut être à l'origine d'incidences indirectes sur les zones d'alimentation des zones humides ou sur un site Natura 2000, si un lien fonctionnel était établi entre la zone d'étude et le site Natura 2000 adjacent et si une incidence était identifiée sur un habitat ou une espèce ayant participé à la désignation du site.

Un diagnostic pédologique (36), un diagnostic des zones humides et un premier diagnostic des habitats et espèces de faune et de flore (adapté au niveau d'étude très amont du présent dossier) ont été réalisés en 2018 et 2021. Une synthèse des résultats est présentée ci-après.

6.2.4.1 Zones de protection et d'inventaire

Un inventaire de l'ensemble des zones de protection et d'inventaire a été réalisé dans l'aire d'étude élargie.

La zone d'étude est située dans le site RAMSAR[24] « Étangs de la Champagne humide » (39) (cf. Figure 6-8), au sud du Parc naturel régional de la forêt d'Orient et en limite du site Natura 2000[25] « Bois d'Humégnil » (42), également ZNIEFF de type I[26] dont l'emprise a été évitée au moment de la délimitation de la zone d'étude (cf. Figure 6-9).

[24] La Convention de Ramsar du 2 février 1971 est relative aux zones humides d'importance internationale (38) ; à savoir les milieux humides dont la préservation présente un intérêt international au point de vue écologique, botanique, zoologique, limnologique ou hydrobiologique. La désignation d'un site Ramsar constitue un acte de labellisation et de reconnaissance par l'État. Celle-ci n'a pas d'effet juridique contraignant mais les sites Ramsar fournissent, comme les ZNIEFF, des indications sur le possible intérêt écologique d'un site, opposables en cas de contentieux.

[25] Le réseau Natura 2000 s'inscrit au cœur de la politique de conservation de la nature de l'Union européenne et est un élément clé de l'objectif visant à enrayer l'érosion de la biodiversité. Ce réseau mis en place en application de la directive « Oiseaux » datant de 1979 et de la directive « Habitats » datant de 1992 vise à assurer la survie à long terme des espèces et des habitats particulièrement menacés (40, 41), à forts enjeux de conservation en Europe.

[26] L'inventaire des Zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF) a pour objectif d'identifier et de décrire, sur l'ensemble du territoire national, des secteurs de plus grand intérêt écologique abritant la biodiversité patrimoniale dans la perspective de créer un socle de connaissance mais aussi un outil d'aide à la décision (protection de l'espace, aménagement du territoire). On distingue deux types de ZNIEFF :

- les ZNIEFF de type I : espaces homogènes écologiquement, définis par la présence d'espèces, d'associations d'espèces ou d'habitats rares, remarquables ou caractéristiques du patrimoine naturel régional. Ce sont les zones les plus remarquables du territoire ;
- les ZNIEFF de type II : espaces qui intègrent des ensembles naturels fonctionnels et paysagers, possédant une cohésion élevée et plus riches que les milieux alentours.

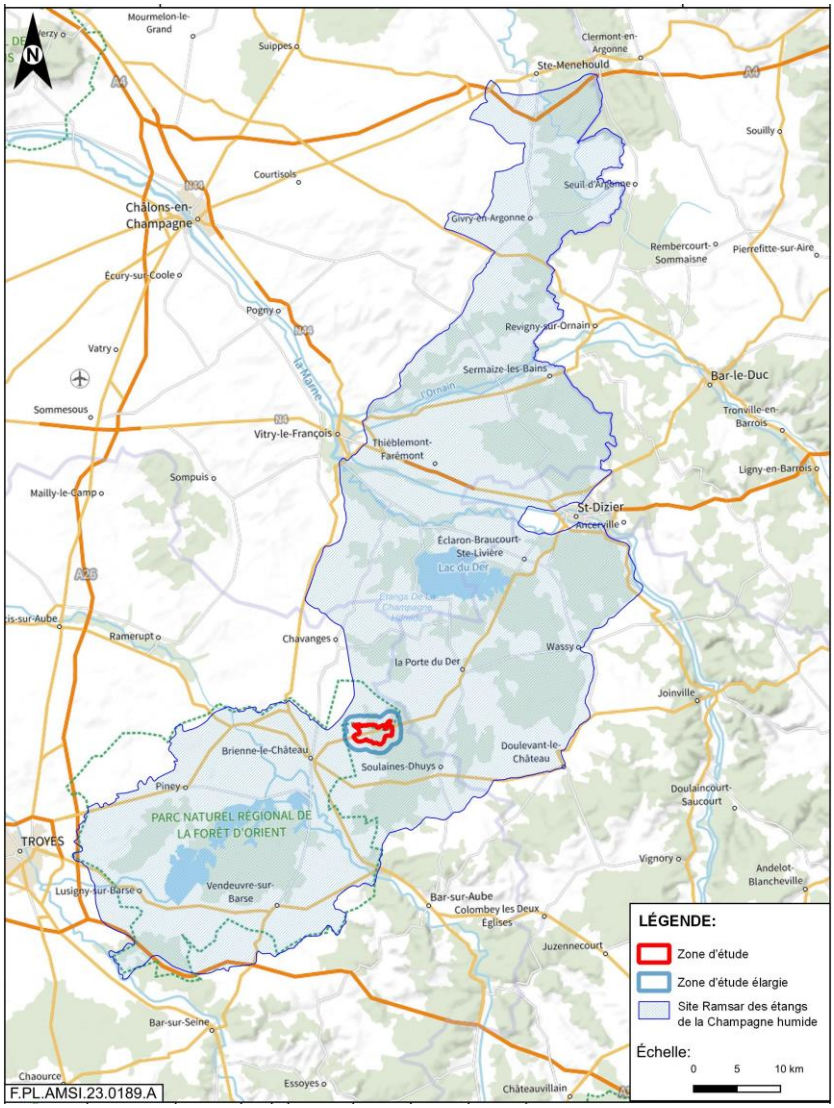


Figure 6-8 Site Ramsar des étangs de la Champagne humide

Elle recoupe :

- la Zone d'intérêt pour la conservation des oiseaux (ZICO)[27] « Lac du Der Chantecoq et étangs latéraux », dans la partie au nord de la route départementale D400 ;
- la ZNIEFF de type I « Les prairies, Bois et Étangs du Grand Verdat et des Blumerais », au nord-est.

[27] Les Zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO) sont des sites d'intérêt majeur qui hébergent des effectifs d'oiseaux sauvages jugés d'importance communautaire ou européenne. Les ZICO ont été désignées dans le cadre de la directive n° 79/409/CEE de 1979 (40). Les ZICO les plus appropriées à la conservation des oiseaux les plus menacées ont été classées totalement ou partiellement en Zones de Protection Spéciales (ZPS).

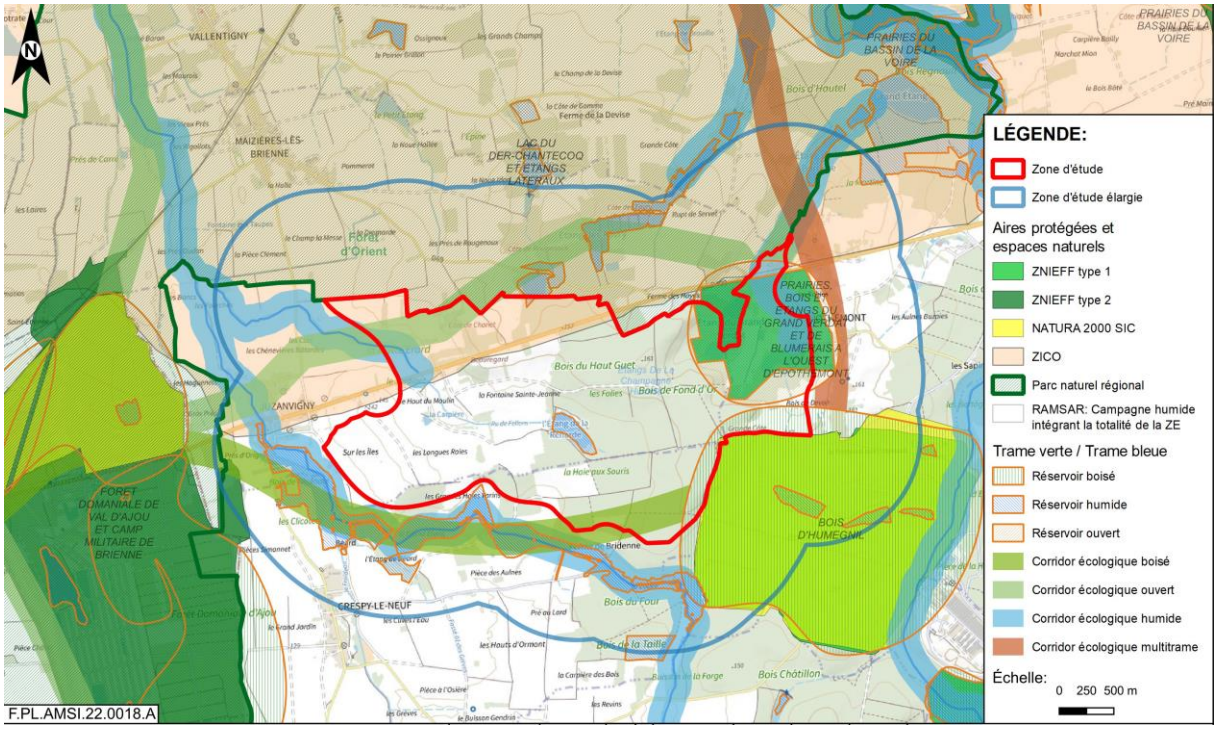


Figure 6-9 Zonages d'inventaires et de protection pour le milieu naturel

Aucun autre zonage d'inventaire ou de protection n'est présent dans la zone d'étude.

6.2.4.2 Zones humides

La zone d'étude est située en majeure partie en zone d'argile affleurante, favorable à la présence de zones humides. La figure 6-10 montre d'ailleurs que la quasi-totalité de la zone d'étude est située en zone humide (toutes les zones en couleur de cette carte sont des zones humides). Certaines de ces zones figurent dans le Plan local d'urbanisme intercommunal de la CCVS, antérieur aux études de l'Andra.

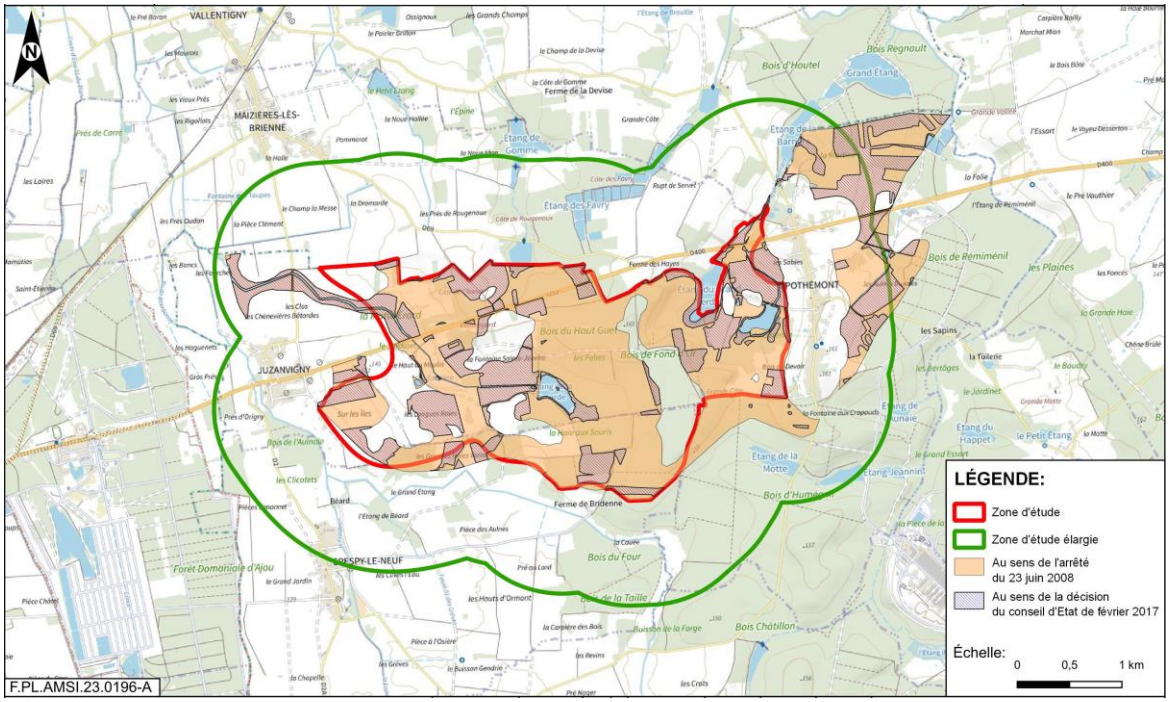


Figure 6-10 Zones humides (Biotope, 2018)

Une évaluation des fonctionnalités de quelques secteurs différents de la zone d'étude a montré que la fonctionnalité générale des milieux est globalement faible à modérée. Cela devra être confirmé par des études sur la totalité de la zone d'étude.

6.2.4.3 Réservoirs de biodiversité et corridors écologiques

La zone d'étude élargie est recoupée par (cf. Figure 6-8) :

- deux réservoirs de biodiversité de la trame verte, correspondant aux ZNIEFF et aux zones Natura 2000 présentées au chapitre 6.2.4.1 du présent rapport et trois corridors de biodiversité ;
- deux réservoirs de biodiversité de la trame bleue et deux corridors écologiques.

Un des objectifs du PADD[28] du SCOT[29] concerne spécifiquement les corridors écologiques « identifier, conforter et valoriser la trame verte et bleue ».

6.2.4.4 Habitats et flore

L'occupation des sols de la zone d'étude présente une couverture forestière importante, des milieux ouverts largement dominés par la grande culture et des surfaces prairiales (cf. Figure 6-3, chapitre 6.2.2 du présent rapport). Une quarantaine d'habitats différents y sont recensés, dont certains présentent un intérêt communautaire[30].

330 taxons de flore ont été recensés en 2021, dont 47 espèces considérées comme patrimoniales en se basant principalement sur leur niveau de rareté :

- 27 espèces sont rares (R), 17 espèces très rares (RR) et 3 espèces extrêmement rares (RRR) ;
- 5 espèces figurent sur la liste rouge régionale, dont 2 espèces menacées Carex vulpina vulnérable (VU) et Œnanthe peucedanifolia en danger (EN) et 3 espèces quasi-menacées (NT), Hordeum secalinum, Œnanthe fistulosa et Myosotis nemorosa.

Aucune espèce végétale protégée n'a été observée.

6.2.4.5 Faune

L'étude réalisée en 2021 a consisté à analyser le potentiel d'accueil des différents milieux présents pour la faune connue sur le territoire, sans faire d'inventaire faunistique spécifique par cortège à ce stade très amont des études. Les habitats de faune présents sur la zone d'étude présentent un état de conservation relativement dégradé. Ceci impacte directement leur potentiel d'accueil pour la faune. Cependant plusieurs espèces patrimoniales, dont plusieurs sont protégées, sont signalées sur les trois communes, telles que :

- pour les mammifères, le chat forestier et différentes espèces de chiroptères ;
- pour les oiseaux, les étangs (pour la plupart exclus de la zone d'étude) regroupent une bonne partie des enjeux avifaunistiques avec le Blongios nain, le Butor étoilé, le Canard chipeau, la Rousserolle turdoïde ou les Sarcelles d'été et d'hiver. Aux prairies peu intensives sont associés le Courlis cendré ou la Cigogne blanche et lorsque celles-ci comportent des milieux arbustifs, la Pie-grièche écorcheur y trouve un habitat favorable. A la plaine agricole sont associées également des espèces patrimoniales comme le Busard cendré ou le Traquet motteux ;
- pour les amphibiens, le Sonneur à ventre jaune occupe les milieux forestiers et/ou prairiaux avec des ornières en eau, et le Triton crêté, les mares forestières. Ces deux espèces sont protégées et figurent en annexe II/IV de la directive Habitats ;
- pour les insectes : un cortège odonatologique très riche dont la Leucorrhine à gros thorax ou la Cordulie à deux taches par exemple au niveau des étangs et milieux palustres, le Criquet ensanglanté associé aux prairies humides et deux papillons de jour dans les milieux prairiaux en gestion extensive, le Gazé et le Cuivré des marais.

[28] Plan d'aménagement du développement durable
[29] Schéma de cohérence territoriale
[30] Sony définis comme étant d'intérêt communautaire, les espèces et habitats qui bénéficient de mesures de conservation au titre de Natura 2000 et font l'objet de listes exhaustives annexées aux directives européennes.

6.2.4.6 Synthèse sur la biodiversité

La zone d'étude a été délimitée de façon à éviter la zone à enjeu très fort constituée de la zone Natura 2000, également Znieff type I et réservoir de biodiversité du Bois d'Humégnil. Une hiérarchisation des enjeux écologiques de la zone d'étude a été réalisée (cf. Figure 6-11) sur la base des données acquises et montre quelques enjeux ponctuels très forts, puis des enjeux forts et modérés, principalement localisés :

- au niveau des boisements (Bois du Haut Guet, Bois du Fond d'or, Bois d'Humégnil), où sont essentiellement recensés les habitats d'intérêt communautaire ;
- des étangs et alentours, notamment la ZNIEFF 1 autour de l'étang du Verdat ;
- le long du lit majeur de la Brévonne et du Ru des Félons.

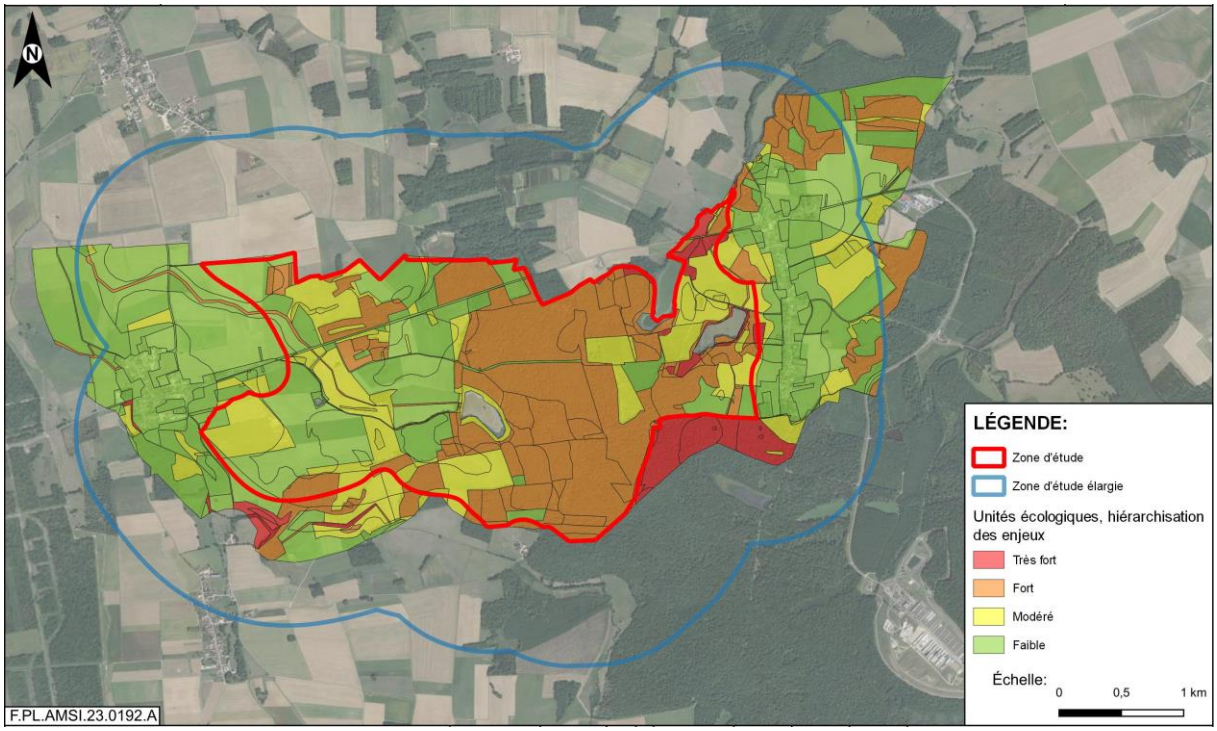


Figure 6-11 Hiérarchisation des enjeux écologiques

Les incidences dépendront des emprises du projet et de sa localisation ; elles seront plus fortes dans la partie est boisée de la zone d'étude.

Concernant les zones humides présentes sur la quasi-totalité de la zone d'étude, il conviendra d'éviter et réduire les incidences sur les zones présentant les fonctionnalités les plus fortes et de compenser les incidences résiduelles. Des emprises complémentaires pourront être nécessaires pour cette compensation.

Des compléments d'étude devront être mis en œuvre pour affiner les incidences potentielles directes et indirectes, en interface avec une définition plus précise des emprises nécessaires au fur et à mesure de l'avancement des études. Parmi les données qui seront prises en compte figureront les actions entreprises dans le cadre du programme « Territoire engagé pour la Nature » et notamment les données de l'Atlas de biodiversité communal à l'échelle de la CCVS réalisé entre 2021 et 2024.

6.2.5 Population, habitat, air, cadre de vie

Le recensement des zones d'habitat actuel et projeté, et des établissements accueillant des personnes sensibles, permet d'éviter de s'implanter sur ces zones ou à proximité, et de limiter les nuisances (bruit, émissions lumineuses, etc.)

S'agissant de la qualité de l'air, un centre de stockage de déchets radioactifs peut engendrer des émissions gazeuses chimiques et radiologiques qui doivent être les plus faibles possibles et respecter les valeurs réglementaires, y compris en phase travaux. Il est alors important de regarder la qualité de l'air autour de la zone d'étude dans laquelle il s'implante, de limiter les rejets et de privilégier une implantation limitant la présence d'habitations et de populations sensibles à faible distance et sous les vents dominants. À cet égard, il convient de noter que le retour d'expérience des centres Andra en exploitation montre que les émissions atmosphériques sont très faibles à négligeables. Le choix de la technique constructive des alvéoles de stockage devra de plus être pris en compte, afin de limiter les rejets atmosphériques et les émissions de gaz à effet de serre à l'origine du changement climatique, ainsi que les émissions de poussières, etc. En outre, la qualité physicochimique et radiologique de l'air est bonne.

S'agissant de la population et de l'habitat, les communes de la zone d'étude élargie sont peu peuplées (moins de 200 habitants). Les densités de population sont très faibles (inférieures à 20 habitants/km^2). Les habitations les plus proches de la zone d'étude ont été évitées lors de la définition de la zone d'étude.

L'établissement recevant du public (ERP) accueillant des populations sensibles le plus proche est l'école de Maizières-lès-Brienne, situé à 2 km en dehors de la zone d'étude élargie. Il est donc considéré comme peu sensible aux émissions/nuisances du projet dans ses différentes phases de vie. À contrario les premières habitations sont situées à moins de 500 m (cf. Figure 6-3, chapitre 6.2.2 du présent rapport, le long de la route départementale D400 à Juzanvigny, dans le centre bourg d'Épothémont et à la ferme de Bridenne à Crespy-le-Neuf) et certaines sont sous les vents dominants. Les évaluations d'impact devront démontrer que le risque lié aux émissions résiduelles est acceptable.

La définition de la zone d'étude a permis d'éviter l'impact sur le bâti et de réduire les nuisances (bruit, émissions lumineuses, vibrations) pour les populations avoisinantes. Les incidences potentielles dépendront ensuite de la proximité des emprises et des zones de travaux par rapport aux zones habitées, aux techniques constructives et aux modalités de travaux. Ainsi la démarche de recherche de réduction des incidences sera poursuivie.

Enfin, aucune « zone ouverte à l'urbanisation » identifiée dans le Plan local d'urbanisme intercommunal (PLUi) de la CCVS approuvé en février 2020 n'est présente au sein de la zone d'étude (34).

6.2.6 Activités agricoles et sylvicoles

Un projet, s'il est en secteur rural, peut générer des incidences directes sur les activités économiques agricoles et sylvicoles existantes. La présence d'une installation industrielle telle qu'un centre de stockage pourrait également présenter des incidences indirectes sur les productions et les activités (incidences sur la qualité des produits agricoles, l'image des productions, les cheminements, les captages d'eau…).

La zone d'étude présente des activités agricoles et sylvicoles qui forment une séparation nette du territoire :

- à l'ouest, une agriculture prépondérante. Cette activité est principalement représentée par les grandes cultures puis par la polyculture-élevage. Elle est un élément important de l'économie du territoire avec des exploitations présentes sur et à l'extérieur des communes de la zone d'étude dont certaines montrent des orientations de diversification et de valorisation. Cependant, elle présente peu d'éléments non délocalisables ou fortement liés aux parcelles (absence de production en signe officiel d'identification de la qualité et de l'origine (SIQO) et de culture spécifique, peu d'engagements en Mesures agro-environnementales et climatiques (MAEC) ou en agriculture biologique, pâturages non attenants aux exploitations) ;
- à l'est, des espaces forestiers qui occupent la majeure partie du territoire (cf. Figure 6-3). L'activité sylvicole est marquée par la présence importante de la forêt sur la moitié est de la zone d'étude. Cette proximité de forêts de production se traduit par la présence d'activités économiques (exploitations forestières, scieries) sur les communes de la zone d'étude. Les contraintes les plus importantes pour l'implantation d'un centre sont liées à la présence de forêts soumises au régime forestier (forêt communale) et aux parcelles utilisées pour la compensation forestière du Cires (centre implanté en zone boisée).

Ainsi, une implantation d'installations en surface dans la partie ouest aura des incidences sur l'activité agricole et dans la partie est sur l'activité sylvicole (et agricole près de Épothémont). Par ailleurs, la présence d'alvéoles de stockage est susceptible d'engendrer des contraintes ou servitudes, pour l'utilisation des zones en surface situées en surplomb.

Le territoire est également le siège d'activités moins documentées, comme la chasse et certainement la cueillette. La suite des études et les échanges avec les acteurs économiques locaux permettront de préciser les caractéristiques des exploitations et donc les enjeux agricoles et sylvicoles locaux.

6.2.7 Paysage

Un diagnostic paysager a été réalisé en 2023, avec pour objectifs d'identifier les enjeux paysagers et les potentielles perceptions pour une implantation d'un centre de stockage de déchets sur la zone d'étude, d'en déduire les principales mesures d'évitement à mettre en œuvre et de commencer à identifier des mesures de réduction.

L'analyse paysagère a montré que la zone d'étude n'est pas concernée par des zones protégées d'un point de vue paysager ou historique (site du patrimoine mondial de l'Unesco, site classé, site inscrit, monument historique). Le paysage est typique de l'Aube et à cheval entre deux unités paysagères, dont la délimitation est faite par la lisière entre l'espace agricole et l'espace forestier. La figure 6-12 synthétise le diagnostic des enjeux de la zone d'étude.

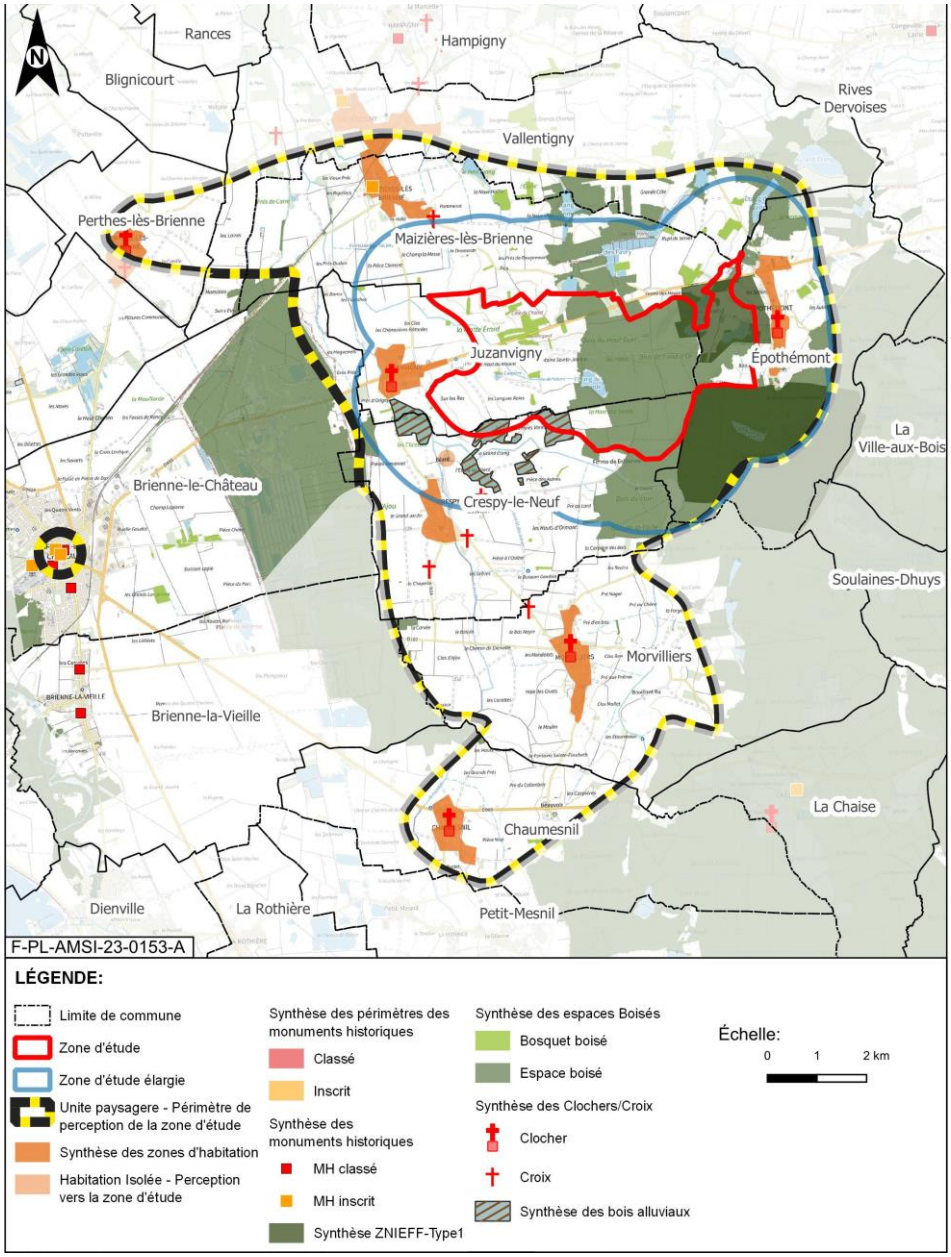


Figure 6-12 Enjeux paysagers globaux (Ingérop, 2023)

La sensibilité est variable en fonction des secteurs de la zone d'étude. Elle est illustrée par la figure 6-13.

Il existe des zones sensibles :

- d'un point de vue du contexte paysager, qui correspond à la sensibilité probable de la population à la qualité des composantes intrinsèques du paysage (forêts, plaines agricoles, étangs, etc.), avec des enjeux estimés forts à très forts (abords des plans d'eau) ;
- d'un point de vue de la perception paysagère, correspondant à la sensibilité de la population depuis les zones vécues aux possibles visibilités sur le projet (vue proche ou lointaine, présence ou non de filtres ou masques paysagers, etc.) avec des enjeux estimés forts à très forts (zone agricole entre Juzanvigny et le bois).

Elle est la plus forte dans les zones cumulant des enjeux de contexte paysager et de perception paysagère (zones au sud-ouest, frange ouest de la zone boisée, proximité d'Épothémont à l'est), qu'il conviendra prioritairement d'éviter.

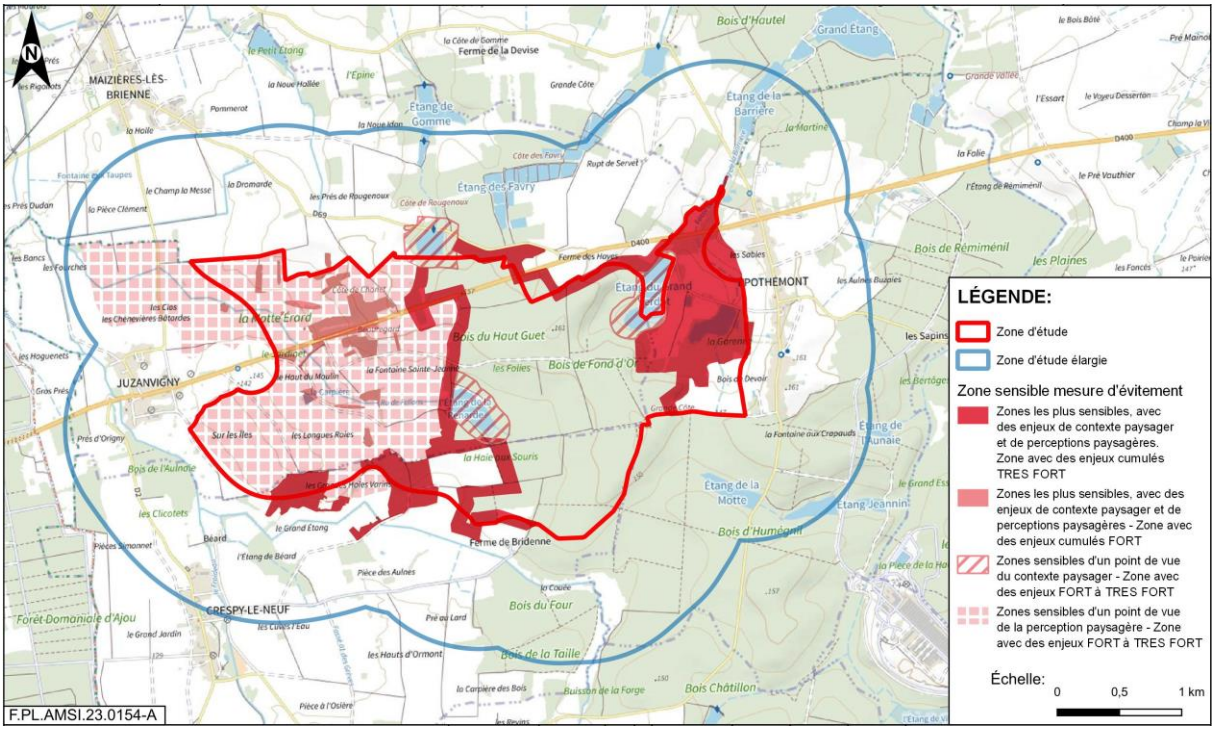


Figure 6-13 Hiérarchisation des sensibilités paysagères sur la zone d'étude (Ingérop, 2023)

6.2.8 Infrastructures et réseaux

L'implantation du projet doit éviter de couper ou de perturber des infrastructures de transport ou des réseaux. À contrario elle doit se trouver à proximité de ceux-ci afin de pouvoir acheminer les matériaux et les déchets, de disposer des utilités nécessaires au fonctionnement du centre et, autant que possible, de ne nécessiter que d'éventuels prolongements limités pour réduire les incidences sur d'autres facteurs de l'environnement (sol, biodiversité, eau, paysage, etc.).

En dehors de la route départementale D400, aucune infrastructure de transport ou réseau majeur n'est identifié au niveau de la zone d'étude.

La présence de la route départementale D400 constitue une contrainte pour l'implantation du projet dans la partie nord de la zone d'étude, mais également un atout pour son accessibilité. Une implantation de projet dans le sud de la zone d'étude parait plus contrainte en termes d'accessibilité et nécessiterait des créations de route avec des incidences associées.

Des alternatives au transport routier existent à proximité pour le transport grande distance des colis de déchets, des matériaux (réseau fluvial à environ 30 km ; gare fret et terminal ferroviaire de Brienne-le-Château à l'ouest de la zone d'étude). Ainsi, les différents modes de transport possibles devraient être approfondis et comparés, notamment vis-à-vis des émissions qu'ils engendrent et des emprises foncières, incidences écologiques, paysagères, etc.

La zone d'étude ne recoupe pas de réseau structurant (gaz à plus de 6 km, hydrocarbure à plus de 34 km, aqueduc, etc.). Des études complémentaires devront être menées pour approfondir les besoins en énergie, électricité, eau (potable, pluviales, usées) du projet et ainsi étudier et comparer les solutions d'approvisionnement/de gestion.

6.2.9 Déchets et gestion des déblais

L'exploitation d'un centre de stockage de déchets radioactifs est à l'origine de la production de déchets, conventionnels ou non conventionnels, dont il convient de limiter au maximum les quantités et la dangerosité. Par ailleurs, une fois ces déchets produits, ils doivent être gérés dans le respect de la hiérarchie des modes de traitement et du principe de proximité.

En outre, une attention particulière doit être portée aux déblais d'excavation qui présentent des enjeux à la fois :

- techniques et liés au statut juridique de ces matériaux, pour équilibrer les volumes de déblais et remblais et/ou trouver une filière de valorisation et en dernier lieu de stockage des déblais en conformité avec la réglementation,
- et environnementaux, liés au trafic des véhicules et engins et au dépôt des déblais si ceux-ci devaient être entreposés (incidence potentielle sur la qualité des sols et des eaux, etc.).

La quantité de déblais à gérer sera fonction de la technique constructive ; le terrassement en pleine fouille jusqu'à 40 m de profondeur étant celle générant le plus de déblais (cf. Chapitre 7.2.4 du présent rapport). La limitation des quantités de déblais et le choix d'une zone pour leur stockage limitant les incidences environnementales seront pris en compte dans les critères d'analyse de la technique constructive retenue. Les possibilités de valorisation des déblais seront considérées pour limiter les volumes à stocker et ce, en conformité avec la réglementation applicable aux opérations de valorisation des matériaux excavés.

6.2.10 Consommation de ressources

Un centre de stockage de déchets a besoin de ressources pour ses différentes phases de vie. Il conviendra de limiter au maximum la consommation de ressources pouvant générer des incidences, notamment *via* des choix de conception et de techniques constructives adaptées. Celles-ci pourront influer sur la quantité d'eau, d'énergie, d'électricité et de matériaux consommés (acier, béton, etc.). Les matériaux seront choisis de façon à respecter les principes du développement durable, tout en garantissant les fonctions de sûreté.

6.3 Facteurs considérés comme peu discriminants dans l'implantation du projet et/ou le choix de la technique constructive

Le relief, les risques naturels liés aux mouvements de terrains, les ressources géologiques, le patrimoine culturel, historique et archéologique, les activités économiques ou de loisirs autres que agricoles et sylvicoles et les risques technologiques, sont des facteurs considérés comme peu discriminants pour le projet. Ils sont brièvement décrits ci-après.

Le relief doux de la zone d'étude n'est pas une contrainte pour l'implantation d'un centre de stockage au sens des enjeux environnementaux à ce stade du projet. Par ailleurs, l'évolution à très long terme du relief en lien avec les phénomènes d'érosion vis-à-vis du stockage des déchets est analysée dans le cadre des études de sûreté (cf. Chapitre 4.7.2 du présent rapport).

En outre, il n'est pas identifié de risques naturels liés aux mouvements de terrains qui soient de nature à remettre en cause un secteur d'implantation au sens des enjeux environnementaux à ce stade du projet (cf. Chapitre 4.4 du présent rapport).

S'agissant des ressources géologiques exceptionnelles, il n'en est pas identifié qui soit présente de façon spécifique à l'aplomb de la zone d'étude. Les sables et graviers d'une petite surface de la zone ouest et les argiles sur la zone d'étude, pourraient être utilisées dans le futur comme ressource de matériaux (et les sables et graviers pour la géothermie basse énergie), mais ces matériaux sont disponibles dans d'autres secteurs en dehors de la zone d'étude.

S'agissant du patrimoine culturel, historique et archéologique, il n'en est pas recensé au niveau de la zone d'étude.

De même, il n'est pas recensé d'activités industrielle ou commerciale sur la zone d'étude. L'usage de la zone d'étude (chasse, cueillette, pêche, promenade, etc.) devra être affiné lors d'échanges avec le territoire et pris en compte lors de la suite des études.

Enfin, la zone d'étude n'est pas concernée par un risque technologique susceptible de contraindre l'implantation. Les données disponibles sur les risques existants (transport de matières dangereuses sur la route départementale D400) devront être approfondies et prises en compte dans le cadre des études de conception.

6.4 Conclusion

Le diagnostic environnemental de la zone d'étude du site de la CCVS, effectué suite à la sélection du site sur des critères géologiques, hydrogéologiques (sûreté) et d'acceptabilité (cf. Chapitres 2.4.2 et 4.2 du présent rapport) et à une première étape d'évitement des enjeux les plus forts (zone artésienne, zones habitées, site du réseau européen Natura 2000) montre que plusieurs facteurs de l'environnement ne présentent pas la même valeur d'enjeu ou de sensibilité en fonction du secteur de la zone d'étude ou de la technique constructive qui serait utilisée.

Les facteurs qualifiés de discriminants sur la zone d'étude sont le sous-sol, le sol, les eaux superficielles, les eaux souterraines, la biodiversité, la population et l'habitat, la qualité de l'air et le climat, les activités agricoles et sylvicoles, le paysage, les infrastructures de transport et les réseaux.

Concernant l'implantation, l'Andra n'identifie pas de secteurs à exclure pour l'implantation du futur stockage, ce qui confirme la possibilité d'implanter un stockage sur la zone d'étude. Cette implantation, malgré la poursuite de la démarche d'évitement-réduction dans la suite des études, s'accompagnera nécessairement de la mise en place de mesures de compensation sur des surfaces importantes pour les zones humides et l'agriculture et/ou sylviculture en fonction du secteur d'implantation choisi.

Les zones d'enjeux les plus faibles, qui seraient à privilégier pour une implantation en surface pour concevoir un stockage de moindre impact, sont variables au sein de la zone d'étude en fonction du facteur de l'environnement (biodiversité, paysage, etc.) étudié. Deux exemples illustrent cela. La partie nord-ouest de la zone d'étude présente des enjeux écologiques globalement plus faibles, un atout d'accessibilité avec la présence de la route départementale D400 et la présence d'utilités à l'ouest (réseau ferroviaire, réseaux) ; néanmoins, elle présente un risque de perception paysagère plus forte du projet, des gradients hydrauliques ascendants à affiner, une proximité du village de Juzanvigny, des activités agricoles, le ru des Fellons, avec la zone alluviale associée, et ponctuellement une meilleure qualité agronomique des sols. De son côté, le bois d'Humégnil à l'est présente des enjeux opposés : enjeux écologiques plus forts et enjeux paysagers plus faibles qu'au nord-ouest.

La superposition des niveaux d'enjeu de chacun des facteurs sur l'ensemble de la zone d'étude montre que la zone est (limite marquée par le bois d'Humégnil) présente globalement des enjeux plus forts que la zone ouest.

Concernant le choix de la technique constructive, devront être pris en compte, en plus des enjeux identifiés ci-avant, en particulier les déblais produits, les matériaux consommés et les émissions de gaz à effet de serre.

Les choix finaux des secteurs d'implantation et des techniques constructives dépendront notamment des conclusions des évaluations de sûreté après-fermeture, présentées au chapitre 8 du présent rapport, mais également des résultats des études itératives conception-environnement-concertation lors de la suite des études.

Par ailleurs, pour la suite des études, des données supplémentaires devront être acquises pour affiner les enjeux hydrologiques, hydrogéologiques, pédologiques et ceux liés aux activités agricoles, sylvicoles, aux usages de la zone d'étude et à la biodiversité et il conviendra d'ajouter, à la zone d'étude, les zones comprenant les variantes étudiées pour l'accès au centre de stockage et pour son fonctionnement (alimentation en eau, énergie, etc.).

Le diagnostic réalisé constitue ainsi une première base, vouée à être affinée avec l'avancement des études, du débat public et de la concertation, pour éclairer les choix et mener une conception intégrée prenant en compte différents enjeux, dont la préservation de l'environnement.

7

État des lieux des techniques constructives

7.1 Revue des techniques constructives 99
7.2 Analyse comparative des techniques constructives du point de vue de la faisabilité technique 106
7.3 Analyse préliminaire des dispositions à mettre en œuvre en phase d'exploitation pour les différents types d'ouvrage de stockage à l'étude 109
7.4 Analyse comparative des techniques constructives du point de vue de leur impact sur les enjeux du stockage à long terme 111
7.5 Choix et hypothèses prises pour les architectures de stockage étudiées pour les évaluations de sûreté après-fermeture 112
7.6 Conclusion 114

Les études de conception d'un stockage implanté à une profondeur de 30 mètres minimum au toit des alvéoles de stockage sur le site de la CCVS sont actuellement au stade programmatique, c'est-à-dire à un stade amont de la mise en place d'un projet industriel et de la définition des options de conception et de sûreté.

Dans ce cadre, l'Andra a mené une revue des meilleures techniques disponibles pour la réalisation d'un tel stockage dans la formation des Argiles tégulines, afin d'identifier les techniques constructives qui pourraient être mises en œuvre compte tenu de l'état de l'art, en considérant principalement :

- la profondeur minimale d'implantation de 30 mètres au toit des alvéoles de stockage ;
- les caractéristiques géologiques et géomécaniques des Argiles tégulines.

Cette étude vise notamment à identifier les atouts et limites techniques des différentes techniques constructives envisageables pour réaliser un stockage à faible profondeur. Elle doit permettre d'éclairer les choix d'architectures de stockage pour la suite du développement du stockage. Ces choix seront principalement guidés par :

- l'inventaire des déchets qui sera défini pour poursuivre les études de conception : nature des déchets, volume et géométrie des colis de déchets, risques spécifiques liés aux déchets pour les opérations de mise en stockage. La définition de cet inventaire reposera principalement sur les enseignements tirés des évaluations de sûreté après fermeture présentées au chapitre 8 du présent rapport ;
- les atouts, les impacts et les limites techniques identifiés dans le cadre de la revue des techniques constructives.

Les installations de stockage qui pourraient être envisagées sont de deux types :

- des ouvrages de stockage dits « à ciel ouvert », pour lesquels les alvéoles de stockages sont réalisés au fond d'une excavation dans la couche des Argiles tégulines. Après mise en place des colis à stocker dans les alvéoles, l'excavation est refermée par une couverture d'argile constituée de matériaux d'apport pour constituer la couverture du stockage (dénommée « couverture remaniée » dans la suite de ce chapitre) ;
- des ouvrages de stockage en galeries souterraines, pour lesquels les alvéoles de stockage sont constitués de galeries creusées dans les Argiles tégulines par des méthodes de creusement mécanisées ou conventionnelles. Après mise en place des colis dans les alvéoles et d'un bouchon de fermeture de ceux-ci, les ouvrages d'accès aux alvéoles sont refermés par des matériaux d'apport.

Outre la profondeur d'au moins 30 m au toit des alvéoles de stockage, les principales données et exigences prises en compte pour réaliser la revue des techniques constructives sont les suivantes :

- le respect des limites de la zone d'étude ;
- les caractéristiques géotechniques des Argiles tégulines ;
- le maintien d'une garde inférieure minimale d'argile (prise par hypothèse au début des études, avant la finalisation des évaluations de sûreté) ;
- la recherche d'une limitation des perturbations hydromécaniques et chimiques de l'argile à proximité des ouvrages lors de leur construction ;
- des données quantitatives et géométriques des colis de déchets étudiés, ainsi qu'une exigence de regroupement des colis de déchets par typologie ;
- la possibilité technique de placer les accès au stockage à l'abri en particulier pour la gestion des eaux météoriques.

À ce stade des études, la conception des installations et des équipements nécessaires à l'exploitation du stockage, et qui seront situés en surface, tels que les installations dédiées à la réception des colis de déchets, à leur contrôle ou encore à leur entreposage avant stockage, les moyens d'acheminement des colis de déchets jusqu'aux zones de réception, ainsi que les utilités nécessaires au fonctionnement du

stockage (eau, énergie…), n'a pas fait l'objet d'études spécifiques. Ces installations et équipements seront étudiés ultérieurement, pour la définition des options de sûreté du stockage.

Les principales dispositions nécessaires à l'exploitation du stockage et qui seraient susceptibles de contraindre la conception des ouvrages, telles que la mise en place d'une ventilation des ouvrages souterrains par exemple, ont été prises en compte dans leur principe, de façon à identifier d'éventuelles limites techniques associées aux techniques constructives.

S'agissant de la réalisation de la couverture remaniée pour la fermeture d'un stockage réalisé à ciel ouvert, l'Andra a mené une analyse du retour d'expérience disponible sur des ouvrages similaires ou dont les techniques de réalisation sont valorisables pour concevoir une couverture remaniée.

Nota : les figures présentées dans le chapitre 7.1 du présent rapport sont des schémas de principe, permettant d'illustrer les types d'ouvrage de stockage qui seraient réalisés selon les techniques constructives décrites. Les dimensions indiquées sont données à titre d'exemple.

7.1 Revue des techniques constructives

Pour le rapport d'étape transmis en 2015 (1), les études des techniques constructives ciblaient un stockage implanté à environ 20 mètres de profondeur. À la suite notamment de l'instruction de ce dossier par l'ASN, l'Andra a poursuivi ses études en considérant une profondeur du stockage de 30 m au toit des alvéoles de stockage (cf. Chapitre 2.4.2.3 du présent rapport).

Une étude réalisée en 2018 par l'Andra, dans l'objectif d'évaluer les technologies et concepts de stockage à faible profondeur au travers d'une analyse multicritères, a conclu qu'au-delà d'une profondeur de l'ordre de 20 m à 30 m, une conception en galeries souterraines devient plus pertinente qu'une conception à ciel ouvert selon les critères considérés. Cette étude a également préconisé d'étudier le creusement d'alvéoles souterraines par microtunnelier, technologie qui pourrait présenter des atouts pour un stockage de déchets FA-VL.

La revue des techniques constructives présentée dans le présent rapport s'est appuyée sur ces éléments et sur l'état de l'art à date concernant les techniques constructives.

7.1.1 Stockage « à ciel ouvert »

Ce type d'option technique de stockage correspond à la réalisation d'une excavation à ciel ouvert par l'utilisation de procédés courants, tels que par exemple des terrassements grande masse depuis la surface avec transport des terres excavées en tombereaux. Les alvéoles de stockage sont disposés en fond de fouille. La mise en place éventuelle de soutènements des parois de la zone excavée est détaillée au chapitre 7.1.1.2 du présent rapport.

Les dimensions envisagées à ce stade pour les alvéoles et prises comme hypothèses pour l'étude, reposent sur le retour d'expérience d'études préalablement menées et sont telles qu'elles permettent le stockage de plusieurs milliers de mètres-cubes de déchets. Ainsi, la largeur des alvéoles considérée est d'environ 20 m à 30 m, leur longueur est d'une centaine de mètres et leur hauteur est de 10 m maximum. Ces dimensions sont adaptables selon les choix d'implantation et les exigences de sûreté : elles pourraient être plus importantes par exemple si une optimisation du remplissage des alvéoles est recherchée, ou bien réduites de façon notamment à diminuer la compacité du stockage et des incidences des dimensions du stockage sur la sûreté après-fermeture (cf. Chapitre 8 du présent rapport).

La revue des techniques constructives a conduit à classer les techniques de réalisation de l'excavation en trois grandes catégories, présentées dans les chapitres 7.1.1.1 à 7.1.1.3 du présent rapport. Elles y sont brièvement présentées, ainsi que des éléments d'analyse de leur adéquation pour la réalisation d'un stockage à 30 m de profondeur dans les Argiles tégulines.

7.1.1.1 Techniques de réalisation par terrassement depuis la surface

Les solutions par terrassement consistent à réaliser une excavation depuis la surface jusqu'à la profondeur souhaitée, en réalisant des parois talutées. La solution dite « pleine fouille » conduit à réaliser des talus peu pentus pour assurer leur stabilité (cf. Figure 7-1). Des variantes sont possibles, permettant un raidissement des talus, par exemple par la mise en place de tirants dans l'argile.

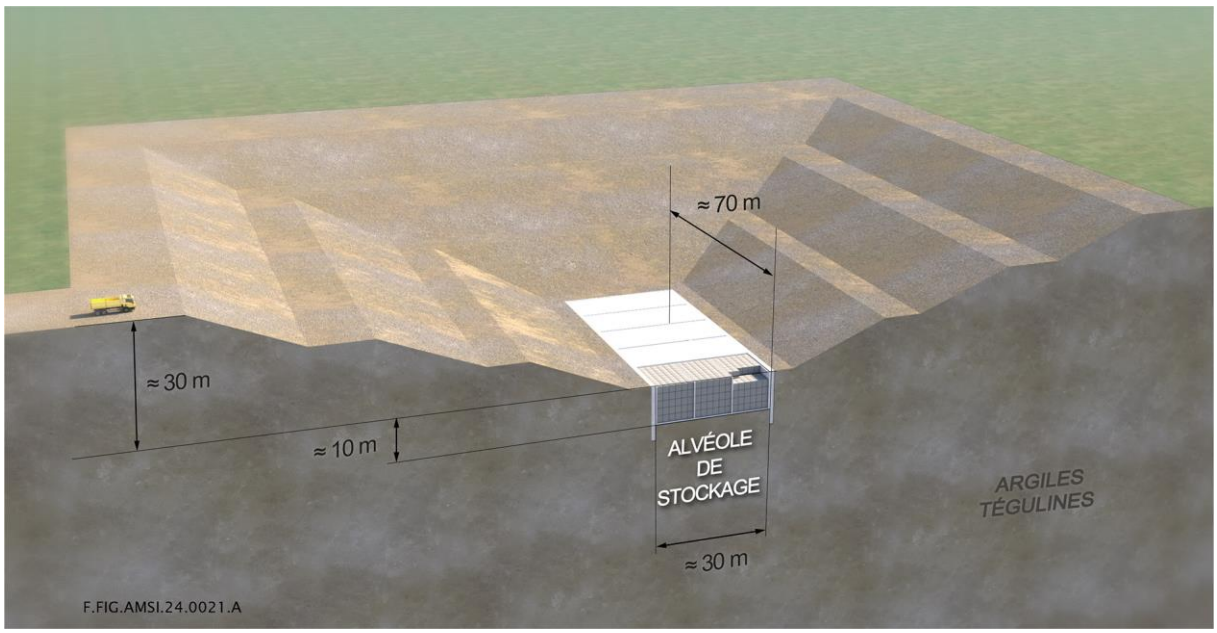


Figure 7-1 *Illustration d'un ouvrage de stockage réalisé en terrassement pleine fouille jusqu'au toit du stockage (exemple avec 10 m de hauteur de stockage)*

La solution de terrassement pleine fouille depuis la surface conduit à des emprises en surface importantes de la zone excavée et des volumes importants de terres excavées qui devraient être déplacés. De plus, la mise à l'abri des intempéries de la surface excavée au cours de la construction des alvéoles, de leur exploitation et enfin de la fermeture du stockage serait rendue particulièrement complexe à mettre en œuvre compte tenu de l'étendue de la surface à abriter. Enfin, la mise en place de la couverture remaniée serait d'une surface et d'un volume très importants, rendant complexe la démonstration de la maîtrise de sa réalisation.

Afin de raidir les talus de la zone excavée pour diminuer la surface de celle-ci, des tirants pourraient être implantés dans les talus d'argile. Néanmoins, la longueur des tirants à utiliser, estimée de l'ordre de 40 m, et leur nombre important pourraient dégrader les performances de l'argile en place. De plus, la dépose des tirants au moment de la fermeture du stockage serait techniquement complexe. Enfin, un raidissement des talus ne permettrait pas de réduire significativement la surface excavée et la difficulté liée à la mise sous abri de la surface excavée.

Aussi, l'Andra considère que cette solution ne serait pas à privilégier pour réaliser le stockage.

7.1.1.2 Techniques de réalisation avec mise en place d'un soutènement depuis la surface

Cette solution correspond à la réalisation d'une excavation dont les parois sont maintenues par des composants ouvragés (*i.e.* soutènement), et permettant de réduire la surface excavée à la surface même des alvéoles de stockage. Elle présente l'avantage de réduire l'emprise en surface ainsi que les quantités de terre excavée et de permettre de façon plus aisée la mise sous-abri de la zone excavée.

Le soutènement linéaire vertical depuis la surface permet la réalisation de tranchées de grande longueur au fond desquelles sont réalisés les alvéoles de stockage (cf. Figure 7-2).

Cette technique repose sur la réalisation de parois de soutènement permettant de terrasser la fouille entre ces parois. Pour assurer la stabilité des parois au fur et à mesure du terrassement, la mise en place d'appuis entre parois est nécessaire.

Pour assurer la stabilité des parois de soutènement, des fiches d'ancrage réalisées sous le niveau du fond des alvéoles et dans le prolongement des parois sont nécessaires. Elles mesurent habituellement entre un tiers et la moitié de la hauteur soutenue, mais les dimensions peuvent être diminuées en fonction de la géométrie de l'alvéole, de la présence de butonnage et des conditions hydrogéologiques. La présence de ces fiches dans la couche d'argile située sous le fond du stockage (garde inférieure d'argile) est susceptible de réduire localement l'épaisseur de garde d'argile saine.

Deux types de parois différents peuvent être envisagés :

- les parois continues, qui constituent un écran de soutènement étanche, sont entièrement réalisées depuis la surface avant la réalisation du terrassement ;
- les parois discontinues. Une partie du soutènement constitué de pieux en béton ou de profilés métalliques est réalisée ou mise en place depuis la surface. Le parement en béton est ensuite mis en place au fur et à mesure du terrassement.

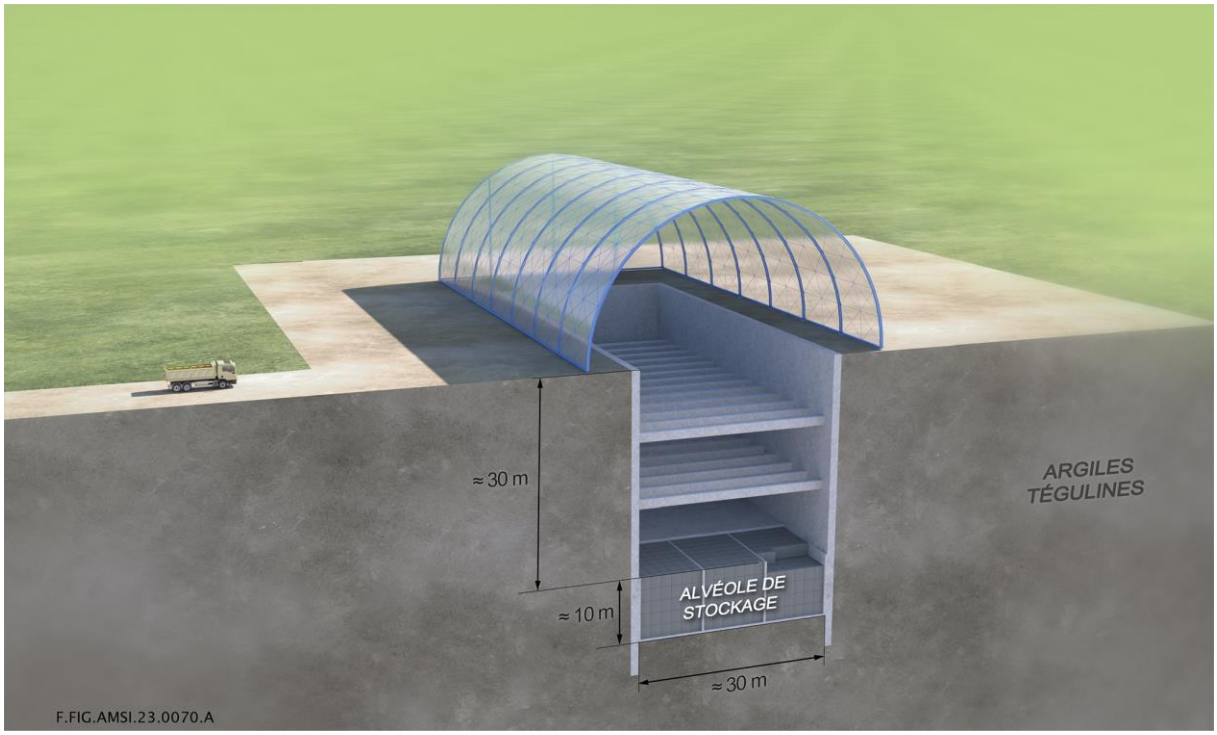


Figure 7-2 *Illustration d'un ouvrage de stockage réalisé en soutènement linéaire vertical depuis la surface (exemple avec 10 m de hauteur de stockage)*

Une autre solution mettant en œuvre un soutènement depuis la surface correspond à la réalisation de puits au fond desquels les colis de déchets sont stockés (cf. Figure 7-3). Par ailleurs, le soutènement circulaire constitué par les parois des puits présente l'avantage d'être auto-stable à l'exploitation : la mise en place d'appuis entre parois n'est alors pas nécessaire et les fiches d'ancrage sont plus courtes. Néanmoins, le diamètre des puits est limité par ces techniques.

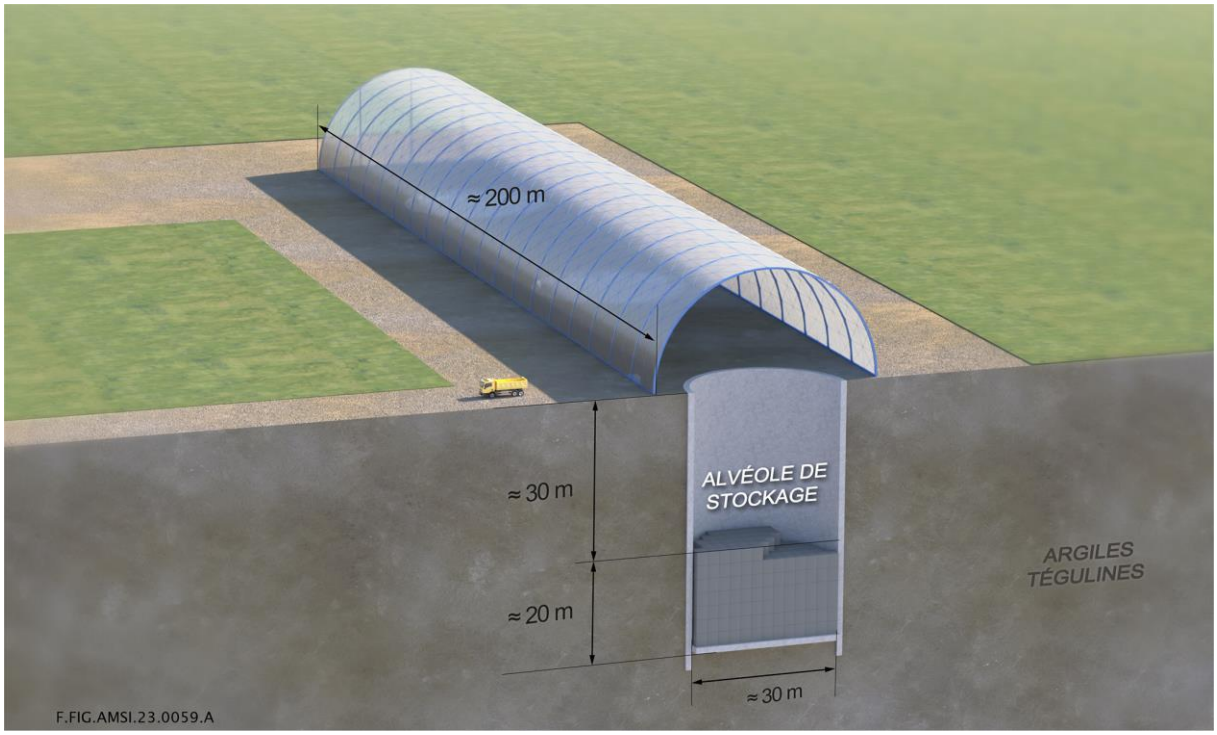


Figure 7-3 *Illustration d'un ouvrage de stockage réalisé en soutènement linéaire vertical type puits depuis la surface (exemple avec 20 m de hauteur de stockage)*

7.1.1.3 Techniques de réalisation par terrassement depuis la surface puis mise en place d'un soutènement

Cette solution constitue un intermédiaire entre la solution par terrassement présentée au chapitre 7.1.1.1 du présent rapport et la solution par soutènement depuis la surface présentée au chapitre 7.1.1.2 du présent rapport. Cette solution mixte comprend une partie (supérieure) réalisée en terrassement pleine fouille et une partie (inférieure) où des soutènements sont mis en place dans les argiles plus compactes (cf. Figure 7-4). Cette solution mixte est celle prise en compte pour les études de sûreté en phase après-fermeture (cf. Chapitre 8 du présent rapport).

Elle présente l'avantage de limiter la présence d'ouvrages de génie civil dans la partie supérieure de la couverture. Elle permet également de réduire la surface excavée et les volumes de terres associées par rapport aux solutions sans soutènement présentées au chapitre 7.1.1.1 du présent rapport ; elle facilite par ailleurs la mise sous abri tout en limitant les quantités de béton et d'acier de ferraillage mises en œuvre.

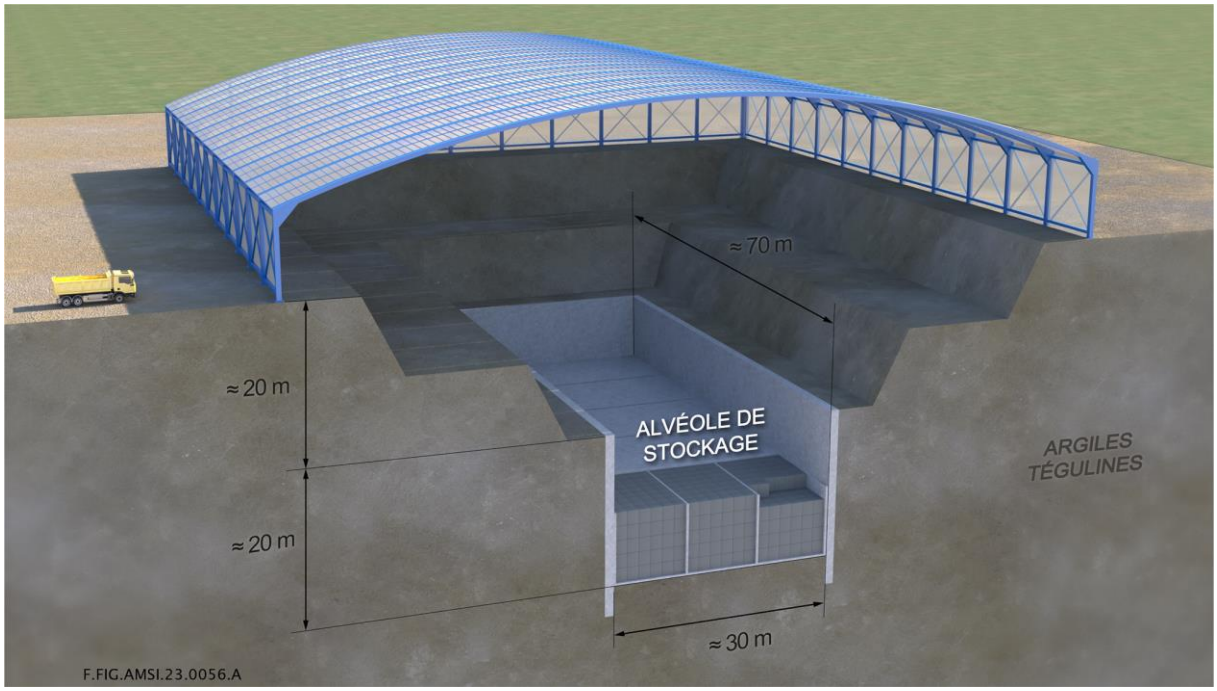


Figure 7-4 Illustration d'un ouvrage de stockage à ciel ouvert mixte : terrassement et soutènement linéaire vertical (exemple avec 10 m de hauteur de stockage)

7.1.2 Stockage en galeries souterraines

Pour ces options techniques, les alvéoles de stockage sont constitués de galeries horizontales creusées dans la couche d'argile et dans lesquelles sont disposés les colis de déchets. Des ouvrages d'accès permettent d'assurer la liaison avec la surface pour l'acheminement du matériel et des colis de déchets.

De manière générale, les méthodes de creusement des galeries sont divisées en deux grandes familles : (i) les méthodes conventionnelles et (ii) les méthodes mécanisées mettant en œuvre tunnelier ou microtunnelier. Ces méthodes sont toutes éprouvées dans le domaine industriel.

Pour la présente étude, la réalisation de galeries de diamètre utile compris entre 1 m et 10 m a été explorée, correspondant à la disposition dans l'alvéole de stockage de colis de façon unitaire à la file les uns des autres pour les galeries de faible diamètre ou au gerbage des colis sur plusieurs niveaux dans un alvéole de plus grand diamètre. Un soutènement/revêtement assure la stabilité mécanique des ouvrages souterrains. Les alvéoles peuvent être débouchants ou borgnes ; les alvéoles débouchants peuvent être nécessaires pour maintenir la ventilation des alvéoles pendant l'exploitation en fonction des colis qu'ils contiennent.

D'après le retour d'expérience acquis par l'Andra, les Argiles tégulines présentent des propriétés géomécaniques adaptées à la mise en œuvre de ces techniques. Une démarche de conception (étude/méthode) sera à réaliser en fonction du creusement (type/phasage/soutènement) pour limiter les perturbations hydromécaniques de la couche d'argile engendrées par le creusement.

7.1.2.1 Ouvrages d'accès

Des ouvrages de liaison surface-fond de type puits, ou des puits reliés par des galeries, ou encore des tranchées permettent la construction des alvéoles, puis le cheminement et la mise en place des colis dans les alvéoles ; ils permettent également la ventilation des galeries souterraines. Un accès par une ou plusieurs descenderies, c'est-à-dire une galerie en pente permettant d'accéder à une ou plusieurs galeries d'accès aux alvéoles, pourrait être envisagé mais il nécessiterait une emprise plus importante que les accès par puits.

Les accès par puits limitent l'emprise des excavations en surface et le volume des verses produites par la réalisation des accès, tandis qu'un accès par tranchée, plus consommateur d'emprise, facilite la construction des ouvrages (amenée du matériel de construction, montage du tunnelier ou du microtunnelier, évacuation des déblais…) et leur exploitation (utilités, accès aux alvéoles…).

7.1.2.2 Techniques de réalisation de creusement par méthode conventionnelle

Le principe du creusement en souterrain par méthode conventionnelle repose sur un cycle alternant successivement excavation puis mise en place du soutènement. L'excavation peut se faire par exemple à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle, en pleine section ou en section divisée en fonction des dimensions de l'ouvrage.

Cette technique offre une flexibilité permettant d'adapter la dimension des alvéoles (diamètre, forme et longueur) aux dimensions des empilements de colis à stocker et elle permet de réaliser les intersections de galeries. Par ailleurs, la méthode conventionnelle est adaptée pour réaliser des alvéoles borgnes. La figure 7-5 présente un exemple de stockage composé de deux alvéoles borgnes avec un accès commun par puits.

Elle nécessite la présence de personnels à proximité du front de taille pour lesquels des mesures de sécurité spécifiques seraient à mettre en place.

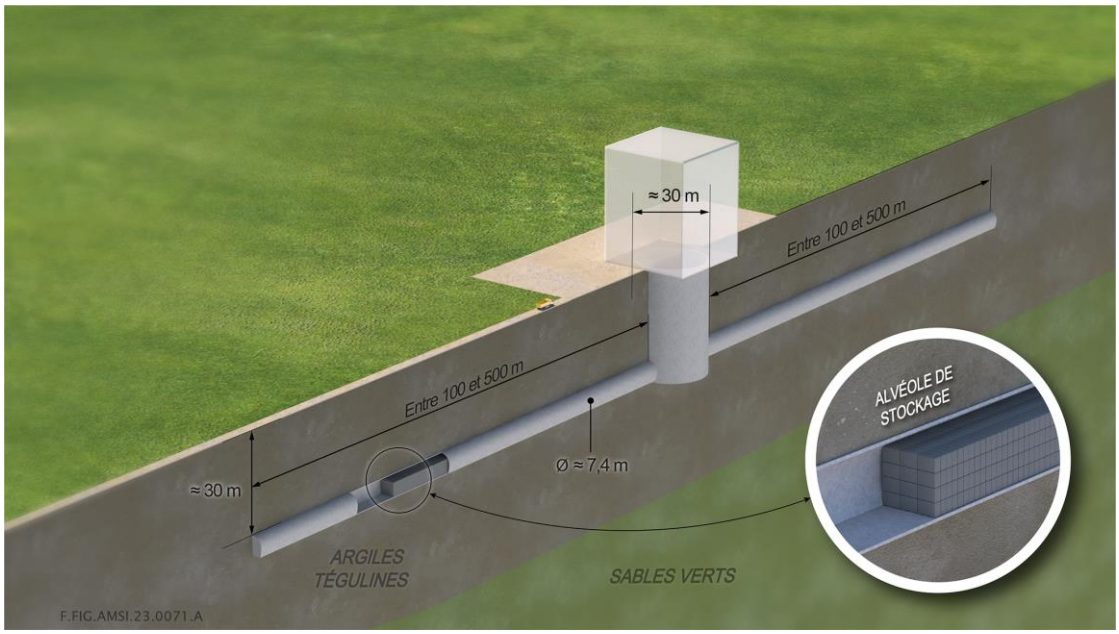


Figure 7-5 *Illustration d'un module de stockage de deux alvéoles, réalisé par creusement conventionnel (diamètre excavé de l'ordre de 10 m) avec un accès par puits sous abri*

7.1.2.3 Techniques de réalisation de creusement par méthode mécanisée

Un tunnelier est une machine composée à l'avant d'une roue de coupe tournante qui, pressée contre le front de taille par les vérins de poussée, assure l'abattage du terrain au moyen d'outils qui y sont fixés. La roue est suivie de matériels permettant de mettre en place le revêtement constitué d'anneaux de voussoirs à l'avancement et de moyens d'évacuation des déblais et du marinage. Les tunneliers pour les galeries de grand diamètre excavé (supérieur à 5 m) sont pilotés depuis le corps de la machine et mesurent plusieurs dizaines de mètres de longueur. Ils disposent de retours d'expérience pour des diamètres excavés au-delà de 10 m. L'utilisation d'un tunnelier est intéressante pour réaliser des galeries de grande longueur (kilométrique) ; elle est possible pour réaliser des galeries d'*a minima* 500 m, et rectilignes ou à grand rayon de courbure.

En cas d'utilisation d'un tunnelier, l'ouvrage débouchant est privilégié puisqu'il permet de sortir le tunnelier après creusement sans le démonter.

La figure 7-6 présente un exemple de stockage composé d'un alvéole créé par tunnelier et débouchant avec accès par puits. Le puits de sortie peut être de taille plus réduite que le puits d'entrée du tunnelier.

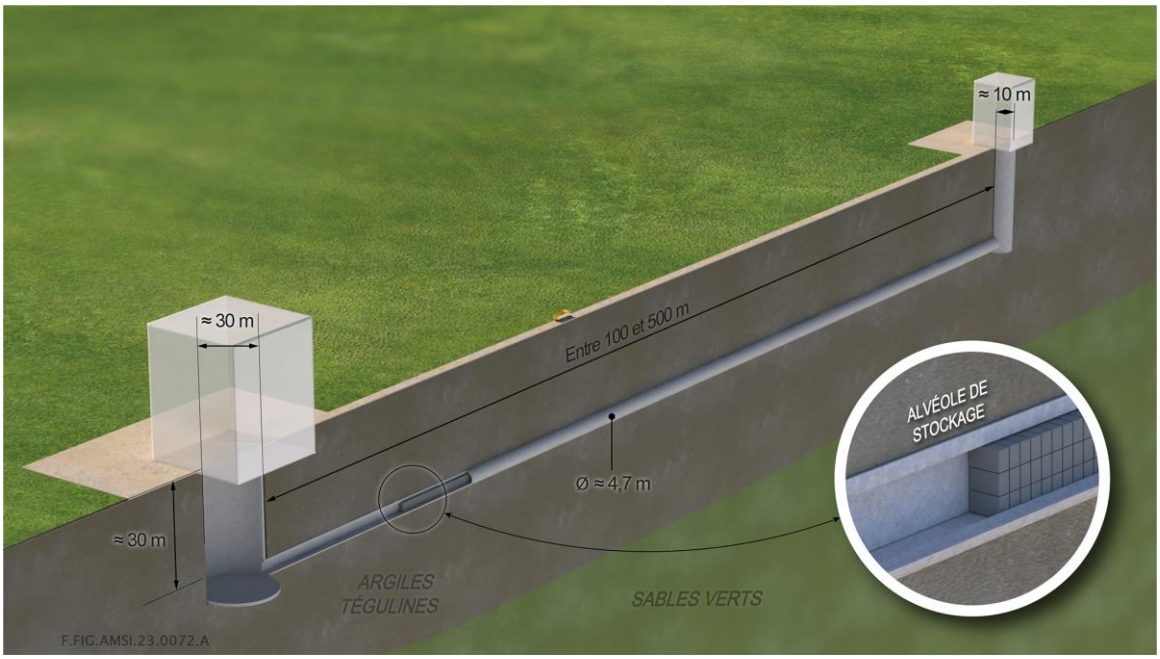


Figure 7-6 *Illustration d'un module de stockage composé d'un alvéole de stockage de l'ordre de 5 m de diamètre utile réalisé par tunnelier avec accès par puits sous abri*

Les microtunneliers permettent de réaliser des tunnels de section plus petite, inférieure à trois mètres utiles. Du fait de la dimension des galeries, ils sont pilotés depuis la surface. Le revêtement est constitué d'un tube poussé dans le micro-tunnel mis en place au fur et à mesure de l'avancement du microtunnelier, c'est pourquoi il est nécessaire d'installer des stations intermédiaires de poussée (à intervalles de 100 m à 150 m ; qui comportent chacune une virole métallique abandonnée dans le terrain à la fin de la construction). Ainsi, la longueur maximale des micro-tunnels dépend du diamètre excavé.

La figure 7-7 présente un exemple de stockage composé de sept alvéoles créés par microtunnelier et débouchants avec accès par tranchées talutées.

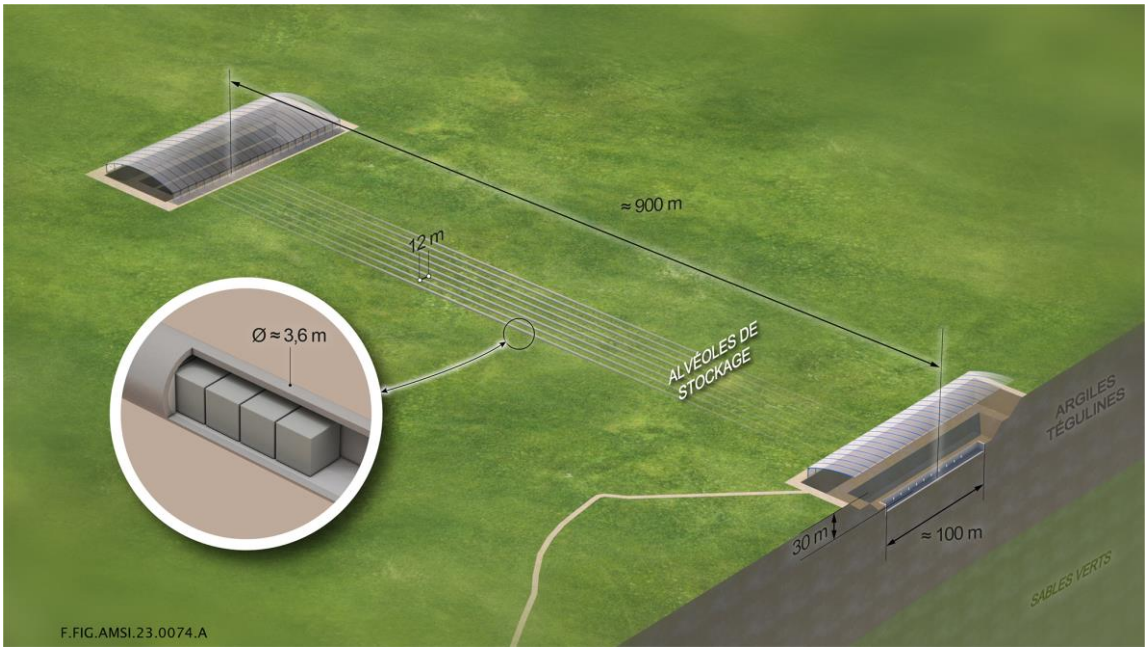


Figure 7-7 *Illustration d'un module de stockage composé d'une dizaine d'alvéoles de l'ordre de 3 m de diamètre utile réalisés par microtunnelier avec accès par tranchées sous abri*

7.2 Analyse comparative des techniques constructives du point de vue de la faisabilité technique

7.2.1 Complexité technique de mise en œuvre

Les premiers travaux de reconnaissance géologique ont été effectués principalement à faible profondeur, en cohérence avec l'objectif d'une implantation à environ 20 mètres Un approfondissement du stockage à 30 mètres, ainsi que l'ouverture vers des solutions souterraines, nécessitent de compléter la caractérisation du terrain plus en profondeur. Il semble que les argiles à plus de 25 mètres présentent une meilleure résistance mécanique qu'en partie supérieure, mais il conviendrait de s'en assurer. Des données complémentaires devront être acquises (cf. Chapitre 10 du présent rapport) pour caractériser plus finement la couche hôte.

Les techniques pour réaliser un stockage à ciel ouvert sont des techniques éprouvées et couramment utilisées. Les machines de creusement et ateliers de travaux sont moins complexes à mettre en œuvre que pour le souterrain. La mise en œuvre de technique de réalisation à ciel ouvert se complexifie toutefois à mesure que la profondeur d'excavation augmente du fait notamment de l'augmentation de l'emprise en surface en cas de terrassement (difficulté de mise sous abri par exemple) et de l'augmentation du volume excavé. Par ailleurs, la gestion des eaux dues aux intempéries est *a priori* plus complexe à gérer pour les ouvrages à ciel ouvert ; pour les deux types d'architecture, des bassins d'orages seront en principe nécessaires.

Pour les architectures en souterrain, la méthode de creusement conventionnelle permet de construire des ouvrages de stockage sans difficulté majeure si la tenue mécanique de l'argile au niveau des ouvrages est suffisante pour assurer la stabilité du front d'excavation ; des moyens supplémentaires (renforcement du front notamment) seraient à mettre en œuvre dans le cas contraire. Par ailleurs, l'utilisation d'accès par puits plutôt que par tranchées, s'il réduit l'impact en surface, implique davantage de difficultés de construction, notamment car l'espace contraint en puits et galerie d'accès complexifie l'apport des matériaux et matériels, l'évacuation des déblais et les moyens d'évacuation et d'intervention en cas d'incident.

Pour les deux types d'architectures, la gestion des verses est un sujet qui peut s'avérer complexe à gérer, de façon plus conséquente pour une architecture à ciel ouvert, d'autant plus si elle est réalisée sans soutènement.

La méthode de creusement mécanisée est également utilisée couramment. Cependant, l'utilisation d'un tunnelier n'est pas bien adaptée au creusement de galeries borgnes car elle nécessiterait un tunnelier spécifique rétractable et des durées de réalisation des alvéoles plus longues. Concernant l'utilisation du microtunnelier ou d'un tunnelier, le type d'accès choisi, par tranchées ou par puits et galerie, a une incidence sur la complexité du chantier : le choix d'un accès par puits et galerie est peu usuel et nécessiterait la réalisation d'une galerie de grand diamètre. A l'inverse, l'accès par tranchée rendrait plus simple l'entrée et la sortie des microtunneliers, et le volume disponible dans la tranchée permettrait d'abriter des équipements pour l'exploitation ; cependant, cela engendrerait des travaux importants pour l'exploitation (mise sous abri de l'ensemble de la tranchée) et des quantités de béton plus importantes pour réaliser les soutènements, que pour les accès par puits ou puits et galerie.

De manière générale, les contraintes de creusement en souterrain nécessitent des moyens logistiques pour assurer la sécurité du personnel (ventilation, dépoussiérage, tenue des structures) et des besoins du chantier (électricité, eau, transfert des déblais …) plus importants que pour un stockage à ciel ouvert.

7.2.2 Faisabilité de la fermeture des modules ou alvéoles de stockage

Après la phase d'exploitation, le stockage doit être fermé. La phase de fermeture recouvre soit la mise en place d'une couverture remaniée et la dépose éventuelle d'ouvrages de soutènement dans le cas d'une architecture à ciel ouvert, soit dans le cas d'un stockage souterrain, la mise en place d'ouvrages de fermeture des alvéoles et le comblement des ouvrages d'accès.

Quelle que soit l'architecture de stockage, le comblement des vides autour des colis dans les alvéoles de stockage constitue un enjeu important pour un stockage à faible profondeur : il vise à limiter les déformations de la couverture du stockage, qu'elle soit remaniée ou constituée des argiles en place, au cours du temps en raison de l'affaissement des vides résiduels laissés dans le stockage. Ce point est traité au chapitre 7.4.2 du présent rapport.

7.2.2.1 Dépose des ouvrages de soutènement

Pour les options techniques à ciel ouvert avec soutènement depuis la surface, une déconstruction partielle sur les premiers mètres en surface est nécessaire pour éviter, d'une part la présence de signe d'intérêt susceptibles d'apparaitre au fil du temps notamment sous l'effet des phénomènes d'érosion, d'autre part pour limiter les risques de formation de voie de transfert de solutés ou de gaz le long des ouvrages de soutènement laissés en place. De telles opérations de dépose des soutènements ne sont que très rarement réalisées ; leur maîtrise reste à être confirmée et leur incidence sur les performances du stockage est à évaluer. En outre, ces opérations présentent des risques d'endommagement des alvéoles du stockage situés à l'aplomb. À cet égard, l'option technique qui prévoit un mixte de terrassement/soutènement (cf. Chapitre 7.1.1.3 du présent rapport) permettrait de s'affranchir de ces opérations de dépose des ouvrages de soutènement.

Pour les options techniques souterraines, la dépose des éléments de soutènement des ouvrages d'accès pourrait également être nécessaire pour des raisons similaires. Les difficultés techniques de réalisation de ces opérations de dépose seraient semblables, mais leur mise en œuvre présenterait toutefois moins de risques en raison de l'absence d'alvéoles de stockage à l'aplomb. S'agissant de la fermeture des alvéoles de stockage en galeries souterraines, les modalités de fermeture ne sont pas définies à ce stade des études : selon celles-ci, une dépose partielle des soutènements des galeries pourrait être requise, opération complexe à mettre en œuvre selon le retour d'expérience des études du centre de stockage Cigéo.

7.2.2.2 Réalisation d'une couverture remaniée pour un stockage à ciel ouvert

Le retour d'expérience acquis de la mise en place des couvertures des alvéoles de stockage du Cires et de la planche d'essai du CSA pour étudier le comportement et l'évolution dans le temps d'une couverture d'une épaisseur comprise entre 0,6 m et 1,5 m montre que, pour ces ouvrages et dans les conditions mises en œuvre, des performances d'étanchéité proches de celles de l'argile en place peuvent être atteintes. Par ailleurs, le retour d'expérience issu de la réalisation de noyaux de barrages hydrauliques et de talus de grande hauteur peut être exploité pour étudier les performances qui pourraient être atteintes pour une couverture de 30 m d'épaisseur. Ces éléments de retour d'expérience seront valorisés pour les études de réalisation d'une couverture remaniée et permettent d'identifier les axes d'études à mener pour poursuivre les études de conception.

En particulier, l'analyse de ces éléments montre que la fondation de la couverture (sol support) doit être conçue de manière à éviter des tassements différentiels ou des concentrations de contraintes qui pourraient provoquer des déformations de la couverture et une dégradation de ses performances. Pour cela, en complément de la limitation des vides dans les colis et autour de ceux-ci, des dispositions techniques, telles que la mise en place de couches de matériau granulaire par exemple, pourraient être mises en œuvre pour limiter l'impact des contrastes de rigidité entre les parois des alvéoles et la partie argileuse de la couverture.

Par ailleurs, la formation d'un éventuel effet baignoire, pouvant survenir si la couverture remaniée du stockage est significativement plus perméable que les Argiles tégulines entourant le stockage, laissant infiltrer plus d'eau dans la couverture que dans les argiles et conduisant à une accumulation d'eau dans le stockage et l'entraînement de radionucléides ou substances toxiques chimiques vers la biosphère, est un sujet qui devra être étudié.

Des études complémentaires seront nécessaires pour préciser les performances que la couverture remaniée doit atteindre et les dispositions techniques pour la réaliser.

7.2.2.3 Faisabilité de la fermeture d'un stockage en souterrain

Il n'a pas été identifié, à ce stade, de difficulté technique pour la fermeture des accès aux galeries de stockage.

À ce stade des études, l'exigence qualitative retenue pour les ouvrages de fermeture des alvéoles en galeries souterraines est de limiter le transfert des solutés par la voie ouvragée et de préserver le milieu géologique et la couverture, ce qui pourrait en partie être réalisé avec un remblai permettant de combler les vides dans les ouvrages d'accès. Les études menées pour le projet de centre de stockage Cigéo montrent qu'il est possible de mettre en place un remblai dans une galerie avec une densité moyenne suffisante pour limiter les déformations à long terme des galeries d'accès. S'il est nécessaire de mettre en œuvre des ouvrages présentant des performances hydrauliques particulières, les enseignements tirés des études du projet de centre de stockage Cigéo pourraient être utilisés pour un stockage en faible profondeur (par exemple les essais de mise en œuvre en galerie d'un noyau en briques ou en pellets d'argile).

Le comblement des vides résiduels entre les colis dans les alvéoles est présenté au chapitre 7.4.2 du présent rapport.

7.2.3 Flexibilité de la géométrie des alvéoles de stockage

Les architectures de stockage à ciel ouvert offrent une flexibilité sur les dimensions des alvéoles de stockage, qui ne sont pas contraintes par les techniques constructives mises en œuvre.

Les dimensions des alvéoles des architectures de stockage en souterrain sont quant à elles contraintes par les moyens de creusement utilisés. Concernant les sections des alvéoles en galeries souterraines, la section des galeries réalisées par méthode mécanisée est généralement circulaire, alors que la géométrie de la section excavée peut être adaptée lors de l'utilisation de la méthode conventionnelle (par exemple en forme de fer à cheval, permettant de limiter les volumes d'argile excavée) et les alvéoles pourraient atteindre une quinzaine de mètres de large en méthode conventionnelle. Le faible diamètre des alvéoles réalisées au microtunnelier constitue en outre une contrainte concernant les dimensions et géométries

des colis à stocker ; certains colis de grandes dimensions pourraient ne pas être adaptés à de tels ouvrages.

Concernant les longueurs des alvéoles, la méthode conventionnelle offre une grande flexibilité de réalisation, les méthodes de creusement mécanisées au tunnelier pour des alvéoles de grand diamètre sont généralement mises en œuvre pour réaliser des galeries de longueur supérieure à environ 1 000 m. Dans le cas de creusement par microtunnelier, la longueur d'alvéole est limitée par les contraintes de poussée du tube ; la longueur est ainsi limitée à environ 500 m à 1 200 m selon le diamètre de l'alvéole (dans une gamme d'environ 1 m à 3 m). Du fait même de leurs caractéristiques, la géométrie des alvéoles créé par microtunnelier ne sont pas adaptées à l'ensemble des colis que les producteurs ont souhaité étudier dans le présent rapport.

7.2.4 Emprise et capacité de stockage

Les architectures de stockage à ciel ouvert ne présentent pas de limite technique concernant la hauteur des alvéoles ; ainsi, avec la profondeur d'implantation de 30 m et le maintien d'une garde inférieure d'une vingtaine de mètres, il serait théoriquement possible d'envisager l'implantation d'alvéoles de 20 mètres de hauteur dans les secteurs où l'épaisseur de la couche d'argile est la plus importante sur la zone d'étude. Cependant, la hauteur du stockage a une incidence forte sur les impacts des scénarios de sûreté après-fermeture d'intrusion humaine involontaire (scénarios de forages), ce qui implique une limitation de celle-ci. En outre, une telle hauteur de stockage contraindrait les choix d'implantation aux zones (de superficie réduite) où la couche des Argiles tégulines est la plus importante.

Les techniques constructives en souterrain présentent en surface des emprises limitées pour les ouvrages d'accès, limitant ainsi les atteintes et perturbations sur l'environnement superficiel. Toutefois, pour les architectures conçues en microtunnelier, ces accès sont multiples et répartis sur tout ou partie de la zone d'étude. Par ailleurs, l'emprise des terrains en surface au droit des alvéoles de stockage souterrain est importante à évaluer car elle correspondrait globalement aux surfaces enlevées aux usages locaux pendant la construction, l'exploitation du stockage et potentiellement la phase de surveillance post-fermeture, en complément des emprises des installations en surface. Cette emprise des modules de stockage en souterrain dépend fortement du diamètre des alvéoles de stockage et de l'espacement nécessaire entre eux qui est fonction de ce diamètre.

Les options techniques à ciel ouvert présentent en surface des emprises similaires ou plus importantes que celles en souterrain, induisant potentiellement des perturbations plus importantes sur l'environnement. Les ordres de grandeur des emprises sont très variables selon les techniques constructives étudiées. Ainsi, l'option de stockage avec uniquement du terrassement conduit à des emprises significatives. Les options avec soutènement vertical présentent les emprises les plus faibles ; les options mixtes peuvent être adaptées pour limiter les emprises tout en visant à satisfaire les exigences de sûreté après fermeture.

Pour les deux options techniques, l'emprise des verses dépend de leur volume et du phasage de déploiement du stockage mais elle peut être adaptée aux contraintes locales ou environnementales, notamment en termes de hauteur de stockage des déblais et de localisation des verses.

7.3 Analyse préliminaire des dispositions à mettre en œuvre en phase d'exploitation pour les différents types d'ouvrage de stockage à l'étude

Les différentes techniques constructives ont fait l'objet d'une première analyse de leurs avantages et inconvénients sur les dispositions de maîtrise des risques à mettre en place lors de l'exploitation du stockage. Cette analyse n'est pas exhaustive ; elle s'appuie uniquement sur les aspects techniques dans le but d'identifier d'éventuelles difficultés qui pourraient affecter la faisabilité technique du stockage. En première analyse, la maîtrise des risques d'inondation d'origine externe liés en particulier aux intempéries constitue un enjeu important pour les ouvrages à ciel ouvert et pour les ouvrages d'accès des alvéoles de stockage en souterrain. Pour les ouvrages souterrains, la maîtrise des risques de dispersion de substances radioactives et des risques d'incendie et d'explosion revêtent une importance particulière compte tenu de l'environnement confiné des ouvrages souterrains.

7.3.1 Dispositions de maîtrise des risques d'inondation d'origine externe

En phase d'exploitation, ces risques sont notamment dus, d'une part à la présence d'eau issue des intempéries (appelées eaux météoriques) dans les alvéoles si leurs accès ne sont pas mis sous abri, en particulier pour un stockage à ciel ouvert, d'autre part aux eaux interstitielles provenant du sol (eaux d'exhaure en souterrain), dont le volume recueilli dans les excavations devrait être limité compte tenu de la faible conductivité hydraulique de l'argile hôte.

Ainsi, les eaux météoriques pourraient affecter la stabilité des talus et des ouvrages de stockage réalisés à ciel ouvert s'ils ne sont pas mis à l'abri, de même que celle des ouvrages d'accès d'un stockage souterrain.

Pour les architectures à ciel ouvert, la mise sous abri sera d'autant plus aisée que la surface à abriter sera faible ; ainsi, les architectures avec soutènement depuis la surface ou de conception mixte terrassement/soutènement seront *a priori* plus faciles à abriter. Outre la mise sous abri, des bassins d'orage devront être mis en place ainsi que des moyens de pompage pour collecter et évacuer les faibles volumes d'eau interstitielle recueillis. La structure de mise sous abri devra faire l'objet d'étude pour établir les exigences auxquelles elle doit répondre afin de la dimensionner de façon adaptée. Cela pourra conduire à fixer des limites quant à l'envergure de la zone à mettre sous abri, ou à étudier la mise en place de supports intermédiaires de la structure abri.

Pour les architectures souterraines, la mise sous abri des ouvrages d'accès serait à réaliser et les ouvrages souterrains devraient être dotés d'une pente pour la gestion des eaux d'exhaure, et permettant également de préserver l'épaisseur de garde et la profondeur visées.

7.3.2 Dispositions de maîtrise des risques dus à la production de gaz

Certains colis de déchets, en particulier les déchets radifères, produisent des gaz radioactifs, notamment du radon. Quel que soit le type d'ouvrage envisagé (ciel ouvert ou souterrain), ces gaz exposent les opérateurs à des risques d'exposition interne aux rayonnements ionisants, ce qui nécessite de prévoir des dispositions de protection des opérateurs et d'évacuation des gaz.

Des gaz susceptibles de générer des risques d'incendie et d'explosion (gaz ATEX), tels que l'hydrogène, sont produits par des phénomènes de radiolyse au sein de certains colis de déchets et par corrosion de certains métaux réactifs présents dans les déchets (aluminium, magnésium).

Les risques liés à l'émission de ces gaz (radioactifs et ATEX) ont été pris en compte de façon qualitative dans le cadre de l'étude des techniques constructives pour identifier d'éventuelles contraintes techniques liées aux dispositions qui devraient être mises en œuvre pour la gestion de ces gaz.

Ainsi, des moyens de ventilation des alvéoles devront être étudiés afin d'évacuer les gaz produits. Pour les architectures de stockage en souterrain, ceci pourra nécessiter la mise en place de gaines de ventilation, de ventilateurs, de caissons de filtration…, dont l'encombrement peut constituer une difficulté pour la conception de ce type de stockage. En effet, suivant les choix de conception retenus, le diamètre des ouvrages d'accès devrait permettre à la fois l'acheminement des colis et le retour d'air nécessaire à la ventilation qui permet d'éviter les zones mortes d'accumulation d'hydrogène dans les alvéoles et de limiter la concentration en radon dans les ouvrages d'accès.

Pour les alvéoles réalisés à ciel ouvert, la maîtrise de ces risques semble *a priori* moins complexe ; ceci devra toutefois être étudié de façon détaillée selon les configurations des alvéoles de stockage et des structures de mises sous abri.

7.3.3 Dispositions de maîtrise des risques d'incendie et d'explosion

Le stockage en galeries souterraines présente des enjeux spécifiques liés à la maîtrise des risques d'incendie en exploitation. Sur ce sujet, le retour d'expérience des études du centre de stockage Cigéo pourra être valorisé ; ainsi, des recoupes entre galeries ou des issues d'évacuation (par exemple puits) devraient être placées tous les 400 mètres environ pour permettre l'évacuation des personnels et l'intervention des secours en cas d'incendie.

Pour le stockage à ciel ouvert, des études spécifiques devront être menées selon les configurations envisagées et selon les risques associés aux colis à stocker. La mise en œuvre de moyens d'extinction d'un départ de feu et de gestion des fumées semble *a priori* moins complexe mais devra être étudiée de façon détaillée selon les configurations des alvéoles de stockage et des structures de mises sous abri.

7.3.4 Manutention des colis

Le retour d'expérience acquis au CSA pour la manutention des colis, ainsi que les dispositions étudiées pour le projet de centre de stockage Cigéo, pourront être valorisés pour étudier les moyens de manutention adaptés aux colis à stocker et aux architectures de stockage retenues. La descente des colis dans des puits sur une hauteur de 30 mètres nécessitera d'étudier des dispositions de manutention spécifiques.

Quel que soit le type d'architecture de stockage (ciel ouvert ou souterrain), la conception des moyens de manutention devra par ailleurs tenir compte du caractère irradiant des colis de déchets : des dispositions de protection contre l'exposition aux rayonnements ionisants tels des écrans de protection ou la réalisation d'opérations à distance pourront être requises. Ceci pourra impliquer de prévoir des dispositions de conception particulières, telles que l'utilisation de hottes de transfert, de chariots équipés de protections biologiques...

Pour les alvéoles de stockage en souterrain, des contraintes sur les dimensions et géométries des colis à stocker pourront exister selon les diamètres et longueurs d'alvéoles ; ainsi, les alvéoles de petit diamètre ne sont pas adaptés aux colis de grandes dimensions et de masse importante. De manière générale, les colis de plusieurs tonnes nécessiteront des moyens de manutention spécifiques complexes en souterrain.

7.4 Analyse comparative des techniques constructives du point de vue de leur impact sur les enjeux du stockage à long terme

Ce chapitre présente une comparaison des différentes techniques constructives sur la base de critères permettant ultérieurement d'évaluer les impacts potentiels de ces techniques en termes de sûreté. Les performances des argiles environnantes peuvent être modifiées localement et temporairement lors de la construction des ouvrages ainsi que sur le long terme, en phase d'après fermeture avec la dégradation des ouvrages de soutènement.

Les ouvrages de stockage doivent être conçus de manière à éviter entre autres la création de chemins préférentiels de migration des radionucléides et substances toxiques chimiques vers la surface (en particulier par les soutènements d'un stockage à ciel ouvert). Cela induit en particulier une exigence de limitation des perturbations de l'argile à proximité des ouvrages de stockage lors de leur construction d'une part et une exigence de limitation des déformations au sein de l'argile après la fermeture du stockage d'autre part.

7.4.1 Impact de la construction sur les propriétés des argiles en place

Lors des opérations de creusement des alvéoles, qu'elles soient à ciel ouvert ou en galeries souterraines, les propriétés des argiles en place autour des alvéoles de stockage sont localement perturbées, aussi bien pour un stockage réalisé en souterrain qu'à ciel ouvert ; l'extension de ces perturbations serait à caractériser dans la suite des études.

Pour les alvéoles en galeries souterraines, des évaluations préliminaires des perturbations induites par creusement ont été menées et montrent que leur extension dépend notamment du diamètre excavé.

Pour les alvéoles en ciel ouvert, les perturbations hydromécaniques sont essentiellement dues à la décompression des argiles en fond de fouille. Cependant, il est attendu que les argiles situées sous les alvéoles de stockage soient recomprimées sous le poids des ouvrages de stockage, des colis stockés et de la couverture : l'impact de ces phénomènes de décompression/recompression sur les propriétés de l'argile devra être caractérisé afin de quantifier l'extension des perturbations générées. Des perturbations locales sont également induites par les fiches d'ancrage des parois verticales des alvéoles de stockage dans la garde inférieure.

7.4.2 Perturbations induites à long terme par les vides résiduels dans les alvéoles à la fermeture

Un affaissement des ouvrages de stockage et une déformation ou un endommagement de la couverture du stockage peuvent être générées par l'évolution à long terme des alvéoles de stockage ; leur amplitude dépend principalement du volume de vides résiduels au sein de ces alvéoles. Le volume de vides résiduels dans les alvéoles de stockage doit donc être limité autant que possible au moment de leur fermeture. Les vides résiduels dans le stockage sont principalement de deux natures : (i) les vides présents au sein des colis de déchets et (ii) les vides laissés entre les colis dans les alvéoles.

7.4.2.1 Comblement des vides au sein des colis

Les vides dans les colis doivent être réduits au maximum lors du conditionnement des déchets non encore conditionnés. Pour mémoire, pour les déchets dont les producteurs n'ont pas à ce jour défini de conditionnement, des hypothèses de conditionnement ont été prises par l'Andra pour réaliser les études du présent rapport, celles-ci sont appelées à évoluer lorsque les producteurs auront défini les conditionnements.

Le taux de vide maximum au sein des colis destinés au stockage sera quantifié dans la poursuite des études.

7.4.2.2 Comblement des vides autour des colis dans les alvéoles de stockage

Quel que soit le type d'architecture retenu, la limitation des taux de vide autour des colis dans les alvéoles et ouvrages d'accès constitue une exigence qualitative à ce stade des études.

Les possibilités de limitation des vides autour des colis dans les alvéoles dépendent des options techniques de stockage.

Pour les architectures à ciel ouvert, le comblement des vides autour des colis dans les alvéoles de stockage peut être réalisé au fur et à mesure de leur remplissage par un matériau granulaire ou cimentaire, comme cela est déjà réalisé pour les alvéoles du CSA. L'accès au-dessus des alvéoles de stockage facilite la mise en place du matériau de remplissage et permet une bonne maîtrise de l'atteinte des performances de comblement des vides entre les colis.

Pour les architectures en galeries souterraines, le comblement des vides dans les alvéoles semble plus complexe à mettre en œuvre ; la faisabilité et l'efficacité du comblement des vides sera fonction du diamètre des alvéoles. En effet, plus leur diamètre est faible et plus il sera complexe de mettre en place des moyens techniques de comblement des vides entre les colis et de vérification de leur efficacité. Pour réaliser le comblement des vides dans les alvéoles, des dispositions telles que la mise en place de blocs coulés en place ou préfabriqués à la construction, de matériau granulaire ou coulis injecté pendant ou après la mise en place des colis pourraient être envisagées. Dans le cas d'une mise en place au fur et à mesure que les colis sont disposés, les risques de coactivité, d'exposition externe aux rayonnements ionisants devront être analysés en particulier. De plus, la nécessité de maintenir la ventilation dans les alvéoles pour réaliser ces opérations constituera une difficulté supplémentaire à étudier.

Il apparaît donc nécessaire de développer, dans une phase ultérieure, des modélisations permettant d'évaluer précisément les perturbations mécaniques au sein de la couverture en fonction des volumes de vides et de leur répartition dans les alvéoles de stockage. Si un effet important est observé, les moyens de réduction des vides devront être étudiés dans les prochaines phases du projet.

7.5 Choix et hypothèses prises pour les architectures de stockage étudiées pour les évaluations de sûreté après-fermeture

En regard de l'analyse présentée ci-avant, les architectures de stockage étudiées à ce stade pour les évaluations de sûreté après-fermeture, objets du chapitre 8 du présent rapport, sont les suivantes :

- une architecture de stockage en souterrain composée d'alvéoles de stockage constitués de galeries de diamètre excavé 6 m et de longueur de l'ordre de 400 m à 500 m selon la typologie de déchets. Le soutènement des alvéoles présente une épaisseur de 40 cm, et les colis sont disposés sur au

moins deux niveaux selon leur géométrie (cf. Figure 7-8 – gauche). Il est fait l'hypothèse que les vides entre les colis sont comblés par des matériaux cimentaires ;

- une architecture de stockage en souterrain composée d'alvéoles de stockage constitués de galeries de diamètre excavé 3 m et de longueur de l'ordre de 700 m à 1 000 m selon la typologie de déchets. Le soutènement des alvéoles présente une épaisseur de 20 cm, et les colis sont disposés sur un niveau (cf. Figure 7 8 – droite). Il est fait l'hypothèse que les vides entre les colis ne sont pas comblés par des matériaux cimentaires ;

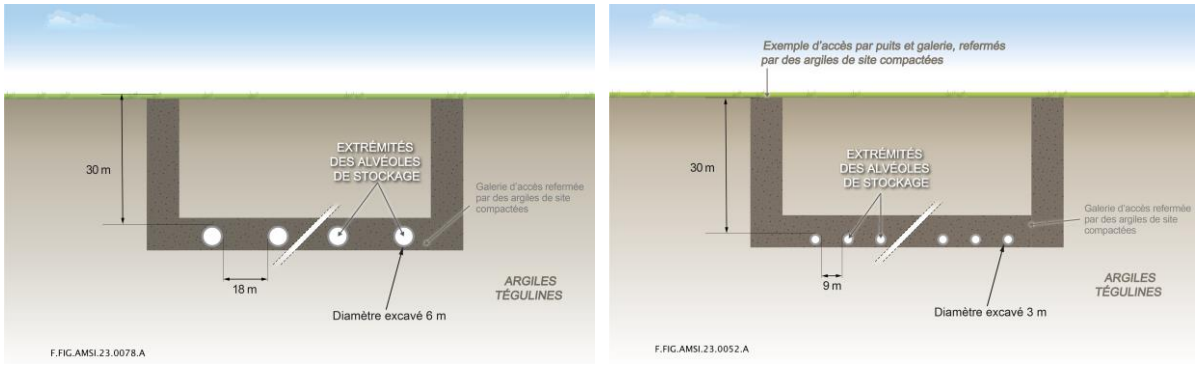


Figure 7-8 *Illustration des architectures de stockage en souterrain étudiées pour les évaluations de sûreté après-fermeture*

Pour ces deux architectures en galeries souterraines, les alvéoles sont considérés espacés entre eux d'une distance correspondant à 3 diamètres excavés (espaces entre les parois des alvéoles). Une zone de perturbation hydromécanique due au creusement s'étend sur une extension d'un diamètre excavé autour de chaque alvéole. Il n'a pas été considéré de perturbations mécaniques liées aux vides dans le stockage à ce stade des études. Les ouvrages de fermeture n'ont pas été représentés à ce stade des études ;

- une architecture de stockage à ciel ouvert de type solution mixte terrassement de 20 m et soutènement de 20 m composée d'alvéoles de stockage parallélépipédiques de hauteur 6 m, de largeur 20 m et de longueur 80 m, dont le radier en béton présente une épaisseur de 80 cm et une dalle en matériau cimentaire de 50 cm d'épaisseur (cf. Figure 7-9). La longueur totale de la ligne d'alvéoles dans la direction perpendiculaire au plan de la figure est de l'ordre de 400 m à 1 150 m selon la typologie de déchets. Les colis sont disposés sur plusieurs niveaux séparés par des plans de pose en matériaux cimentaires de 10 cm d'épaisseur, les vides entre colis sont considérés comblés par un matériau cimentaire. Les parois des alvéoles sont constituées de béton armé de 80 cm d'épaisseur. Leur stabilité mécanique est assurée par des fiches d'ancrage de même épaisseur que les parois et d'une longueur correspondant à la moitié de la hauteur totale des parois. Au niveau des parois et des fiches d'ancrage, une perturbation mécanique d'extension 80 cm est considérée ; il n'est pas considéré de perturbation mécanique au niveau du fond de fouille ni au-dessus des alvéoles à la base de la couverture remaniée du stockage. Les ouvrages une fois fermés sont recouverts par une couverture d'argile de site reconstituée dont le sommet est composé de terre végétale.

  De fait, cette architecture de stockage à ciel ouvert présente une compacité plus forte, et donc une emprise plus restreinte, que les architectures en galeries souterraines.

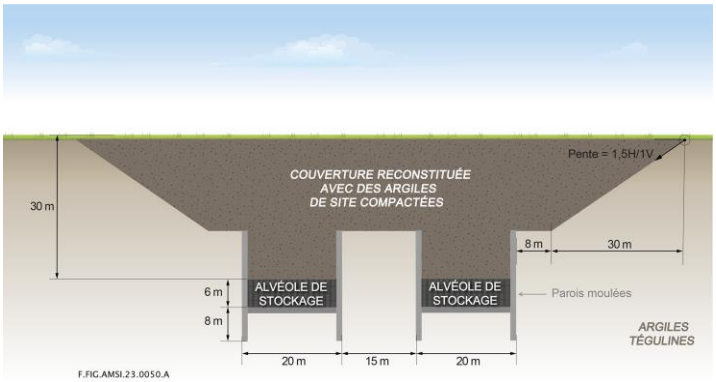


Figure 7-9 *Illustration de l'architecture de stockage à ciel ouvert étudiée pour les évaluations de sûreté après-fermeture*

7.6 Conclusion

La revue des techniques constructives n'a pas mis en évidence de technique rédhibitoire à ce stade, si l'on considère uniquement des critères liés à leur faisabilité technique en termes de réalisation et d'exploitation. Les techniques de construction décrites dans ce chapitre sont utilisées couramment dans le domaine industriel et peuvent être mises en œuvre sur le site de la CCVS compte tenu des propriétés géomécaniques des Argiles tégulines connues à ce jour et qui devront être consolidées. En effet, la revue a mis en évidence le besoin de mener des reconnaissances géotechniques supplémentaires, par campagne de sondages et forages, dans les Argiles tégulines situées au-delà de 20 m de profondeur.

Les principales dispositions nécessaires à l'exploitation du stockage et qui seraient susceptibles de contraindre la conception des ouvrages ont fait l'objet d'une première analyse qualitative, au niveau des grands principes, de façon à identifier d'éventuelles limites associées aux techniques constructives. Elle met en évidence que la maîtrise des risques d'inondation d'origine externe liés en particulier aux intempéries constitue un enjeu important pour les ouvrages à ciel ouvert et pour les ouvrages d'accès des alvéoles de stockage en souterrain. Pour les ouvrages souterrains, la maîtrise des risques de dispersion de substances radioactives et des risques d'incendie et d'explosion revêtent une importance particulière compte tenu de l'environnement confiné rencontré dans les ouvrages souterrains. Cette analyse sera menée de façon plus approfondie pour le futur DOS.

Pour le cas où une architecture à ciel ouvert est retenue, des études sur la réalisation de la couverture remaniée devront être menées. Les différentes pistes techniques présentées devront faire l'objet d'études. En outre, des calculs de dimensionnement des ouvrages seront à effectuer sur la base des nouvelles données géotechniques acquises.

Dans le cas d'un concept souterrain, la faisabilité du comblement des vides est un enjeu important pour éviter des tassements différentiels et reste à confirmer lorsque le diamètre utile des alvéoles sera défini notamment en fonction des résultats des évaluations de sûreté en après fermeture. Les études pourront également porter sur des leviers techniques permettant de limiter les déformations de la couverture.

Quel que soit le concept, l'évolution à long terme de la couverture (risques de déformations et de fissurations) sera à évaluer, en fonction des taux de vides au sein des alvéoles. Les déformations admissibles au sein de la couverture devront être définies, permettant de déterminer un taux de vide maximum admissible dans le stockage, puis d'éclairer sur les taux de vides maximums admissibles dans les colis. Par ailleurs, les effets de la construction d'ouvrages de stockage (mise en place de parois de soutènement et fiches d'ancrage, creusement de galerie, décompression du fond de fouille…), d'une part sur les Argiles tégulines et l'endommagement de ses propriétés mécaniques et chimiques (perturbations mécaniques engendrées), d'autre part sur le transfert des solutés, devra être étudié.

Sur la base des données d'entrée consolidées et des exigences de sûreté en exploitation et à long terme, des études de conception de niveau esquisse puis d'avant-projet seront menées pour définir des architectures de stockage adaptées à l'inventaire de déchets à stocker sur le site de la CCVS et en vue d'alimenter les évaluations de sûreté pour le dossier d'options de sûreté. Ces études intégreront des analyses technico-économiques et des études relatives au « coût environnemental » des différentes architectures de stockage.

8

Évaluations de sûreté après-fermeture

8.1 Démarche de sûreté après-fermeture *118*
8.2 Évaluations de sûreté sur la période allant jusqu'à 50 000 ans *122*
8.3 Évaluations de sûreté sur la période au-delà de 50 000 ans : évaluations de situations conventionnelles *160*

8.1 Démarche de sûreté après-fermeture

La démarche de sûreté de l'Andra met en œuvre un processus itératif d'évaluation de la sûreté de l'installation de stockage après sa fermeture qui s'appuie sur différents volets de connaissances relatifs au site potentiel d'accueil du stockage, aux déchets étudiés et à leur conditionnement, ainsi qu'aux études de conception.

Le rapport d'étape 2015 (1) est le premier dossier d'étude d'un stockage à faible profondeur de déchets FA-VL fondé sur des caractéristiques de site réelles. Il a été l'occasion de mener une première évaluation de la faisabilité d'un tel stockage sur le site de la CCVS et a permis de conclure qu'aucun point rédhibitoire à la poursuite des études n'avait été identifié. Les évaluations exploratoires de performance et de sûreté menées en support à ce rapport étaient, de manière préliminaire, centrées sur les valeurs des paramètres issues du meilleur de la connaissance scientifique et technologique. Elles avaient également permis d'identifier les valeurs restant à consolider (notamment le terme source du carbone 14) et les paramètres sensibles influant les résultats, en les testant sur leurs plages de variabilité.

Dans le rapport « Les enjeux et exigences préliminaires de sûreté d'un stockage à faible profondeur pour les déchets FA-VL » (43) produit en 2019 dans le cadre du PNGMDR 2016-2018 (44), l'Andra rappelait que l'enjeu principal d'un stockage à faible profondeur pour des déchets de faible activité à vie longue est d'apporter une démonstration de la sûreté proportionnée aux enjeux de la faible activité des déchets tout en conjuguant, d'une part la sensibilité du stockage de faible profondeur aux évolutions géodynamiques, d'autre part les longues durées de vie des radionucléides contenus dans les déchets concernés.

Un groupe de travail (GT) pluraliste piloté par l'ASN sur la période 2018-2019 dans l'objectif de mettre à jour la note d'orientations a permis de partager les enjeux de sûreté d'un stockage à faible profondeur des déchets FA-VL avec les évaluateurs, les producteurs de déchets ainsi que des représentants de la société civile. Les conclusions de ce GT ont permis de préciser certains éléments de la démonstration de sûreté. L'Andra, sur ces bases, a développé une démarche de sûreté après fermeture adaptée à la faible profondeur. L'ensemble de ces éléments ont été présentés au Groupe permanent déchet (GPD) de mars 2021. Dans son avis (6), le GPD n'a pas émis d'objection à la proposition de l'Andra pour adapter la démonstration de sûreté et ainsi proposer un mode de gestion des incertitudes aux grandes échelles de temps et a reprécisé les modalités de prise en compte des intrusions humaines banales dans la conception du stockage et dans la démonstration de sûreté.

Les études en support au rapport article 33 ont ainsi pris en compte, pour l'inventaire des déchets étudiés présenté au chapitre 3 du présent rapport, les nouvelles connaissances scientifiques et technologiques sur l'évolution du stockage sur le long terme. L'influence des perturbations chimiques et mécaniques causées par la présence des déchets et/ou des matériaux cimentaires et la réalisation des ouvrages sur les performances du système de stockage a été prise en compte. Ce chapitre présente en outre la déclinaison de la démarche de sûreté proposée par l'Andra et présentée au GPD pour la gestion des incertitudes aux grandes échelles de temps adaptées au stockage de faible profondeur. Elle couvre les phases de surveillance et de post-surveillance du stockage.

8.1.1 Principes et fonctions de sûreté pour un stockage à faible profondeur de déchets FA-VL

La conception d'un stockage à faible profondeur est fondée sur les orientations générales de sûreté de 2008 émises par l'ASN (2) qui précisent les objectifs de sûreté et les échelles de temps associées compte tenu (i) de la décroissance de la radiotoxicité des déchets FA-VL et (ii) de la sensibilité d'un stockage à faible profondeur aux évolutions géodynamiques externes.

Les orientations générales de sûreté de l'ASN recommandent de concevoir l'installation de stockage des déchets FA-VL principalement pour confiner les déchets efficacement pendant quelques dizaines de milliers d'années. Sur cette durée, l'objectif fondamental de protection de l'homme et de l'environnement se décline par le respect des grandes fonctions de sûreté après fermeture suivantes :

- isoler les déchets de l'homme et de la biosphère, eu égard aux phénomènes d'érosion climatiques et aux activités humaines banales ;
- limiter le transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques susceptibles de migrer sous forme de solutés ou sous forme gazeuse.

Les dispositifs mis en œuvre pour assurer ces fonctions doivent rester disponibles et efficaces sur une durée de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'années, de manière passive, c'est-à-dire sans nécessiter d'action humaine au-delà de la période de surveillance.

Au terme de cette durée, la protection de l'homme et de l'environnement ne reposera plus sur les fonctions de sûreté précitées et l'activité contenue dans les déchets devra alors 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 du stockage. Ainsi, au-delà de quelques dizaines de milliers d'années, la protection de l'homme et de l'environnement dépendra de dispositions de limitation de l'activité radiologique totale introduite dans le stockage, accompagnées le cas échéant de règles de répartition de cette activité dans le volume total de stockage. Ces exigences se déclinent au niveau des colis de déchets, des ouvrages de stockage ou encore du stockage dans sa globalité.

8.1.2 Prise en compte de l'évolution géomorphologique du stockage dans la démonstration de sûreté

Par définition, les déchets FA-VL comportent des radionucléides à vie longue, voire très longue, certaines périodes radioactives allant au-delà de plusieurs dizaines de milliers d'années. Pour ces échelles de temps, l'évolution géomorphologique (érosion/dépôt, altération…) d'un site de stockage à faible profondeur constitue l'un des phénomènes majeurs à prendre en compte pour la démonstration de sûreté après fermeture.

L'évolution géomorphologique d'un stockage de déchets FA-VL à faible profondeur s'établit au regard des grands changements climatiques, moteurs de l'évolution géodynamique externe et des incertitudes qui en résultent. Le climat et son évolution au cours du temps déterminent en effet les processus d'altération, d'érosion et de dépôt dont découle l'évolution future du site. Deux scénarios d'évolution climatique sont considérés par l'Andra pour couvrir le domaine du possible au niveau du site et sont décrits au chapitre 4.7.1 du présent rapport.

La démarche de l'Andra consiste ainsi à considérer deux périodes dans la démonstration de sûreté après fermeture :

- l'une allant jusqu'à 50 000 ans, au cours de laquelle l'état des connaissances permet de justifier le maintien des principales fonctions de sûreté du système de stockage et de proposer une représentation du stockage fondée sur des connaissances scientifiques étayées (*i.e.* avec un niveau d'incertitudes résiduelles limité). Pour cette période, l'érosion diffuse moyenne est considérée à l'échelle de chaque zone de stockage dédiée à une typologie de déchets (*i.e.* plateforme de stockage dans la suite du texte) pour les transferts impliquant la voie eau ; une érosion localisée, plus importante, est prise en compte pour le traitement des scénarios d'intrusion humaine involontaire ;
- l'autre débutant au-delà de 50 000 ans, au cours de laquelle les incertitudes sur l'évolution géomorphologique (érosion, dégradation des propriétés des formations…) ne permettent pas de garantir le maintien des fonctions de sûreté du stockage.

8.1.3 Établissement de la démonstration de sûreté du stockage en fonction des échelles de temps

Sur la première période (allant de 0 an à 50 000 ans), les connaissances acquises à ce stade permettent de garantir que les principales fonctions de sûreté sont satisfaites ; il s'agit de l'isolement des déchets de l'homme et de la biosphère ainsi que de la limitation du transfert des radionucléides et substances toxiques chimiques vers l'environnement sous formes de solutés ou sous forme gazeuse.

Sur cette première période de 50 000 ans, l'Andra démontre la sûreté du stockage en s'appuyant sur les différents scénarios décrits dans les orientations générales de sûreté de l'ASN établies en 2008 (2) : scénario d'évolution normale pour représenter les conséquences potentielles de l'évolution la plus vraisemblable du stockage, fondée sur la connaissance phénoménologique et les incertitudes associées, des scénarios d'évolution altérée et ceux associés à des intrusions humaines involontaires. À noter que l'étude de scénarios d'évolution altérée (SEA) du stockage, au sens de la note d'orientation de l'ASN (2), n'est pas menée dans ce rapport car ces études ne sont pas jugées dimensionnantes pour les travaux en cours. En effet, la capacité d'accueil du stockage en activité totale est évaluée au regard du scénario

d'évolution normale et la compatibilité de chacune des familles de déchets avec un stockage à faible profondeur sur la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines est appréciée au regard des scénarios d'intrusion humaine involontaire. L'étude de scénarios d'évolution altérée, permettant d'apprécier la robustesse du concept vis-à-vis de certains aléas et incertitudes de connaissance, sera menée dans le cadre ultérieur des études des options de sûreté (DOS), une fois les architectures de stockage définies et les performances des différents composants impliqués dans la réalisation des fonctions de sûreté mieux caractérisées. Dans ce cadre, les évaluations des scénarios SEA ne sont pas jugées pertinentes pour étudier la faisabilité du stockage ou pour définir l'inventaire d'étude au stade actuel de ce dossier d'options techniques et de sûreté.

Pour la période au-delà de 50 000 ans, l'Andra propose de définir de manière conventionnelle des représentations fonctionnelles « extrêmes » de l'état géométrique et physico-chimique du stockage. Ces situations conventionnelles ont pour objectif de borner, selon une approche raisonnablement majorante, les impacts radiologiques potentiels du stockage sur le très long terme, et également de consolider les capacités d'accueil radiologiques du stockage. Ceci amène à proposer les deux situations extrêmes et conventionnelles suivantes :

- une dégradation significative des propriétés de confinement de la couverture du stockage (remaniée ou en place) : situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides vers l'homme et l'environnement » ;
- une érosion totale de la couverture argileuse dégradant fortement sa capacité d'isolement : situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler les déchets de l'homme et de l'environnement ».

8.1.4 Les indicateurs de protection en fonction des échelles de temps

Pour la première période de vie du stockage, jusqu'à 50 000 ans

Concernant les impacts radiologiques potentiels, une limite de dose de 0,25 mSv/an est associée au scénario d'évolution normale (SEN). Pour les scénarios d'évolution altérée (non étudiés dans ce rapport), il s'agit de garantir que l'on se situe à des impacts très inférieurs au seuil des effets déterministes. L'Andra a retenu 10 mSv/an comme borne haute pour apprécier ce type de situation. Enfin, pour les scénarios d'intrusion humaine0, l'acceptabilité des conséquences de ces intrusions est jugée en regard de la limite de 20 mSv/an, en se fondant sur le SSR5 de l'AIEA ainsi que sur le rapport IRSN n° 2020-00962 (12), présentant les conclusions du groupe de travail de l'ASN précité qui indique que « *l'impact d'un scénario d'intrusion humaine involontaire ne doit pas excéder 20 mSv/an. En outre, tant que cet impact conduit à des doses annuelles comprises entre 1 mSv/an et 20 mSv/an, des efforts raisonnables seront alloués pour réduire la probabilité d'occurrence du scénario ou en limiter les conséquences, en optimisant la conception de l'installation*. »

Dans le cas de déchets générant du radon, la concentration volumique en radon dans l'habitation est comparée au niveau de référence de 300 $Bq.m^{-3}$ (article R. 1333-28 du code de la santé publique). À cet égard, l'IRSN dans son rapport n° 2020-00962 indique que « *le risque lié au radon pour les scénarios d'habitation visera, dans un objectif d'optimisation, davantage à comparer différents concepts qu'à dimensionner le stockage* ». Dans ce cadre, un léger dépassement de la valeur de référence de 300 $Bq.m^{-3}$ ne conduit pas nécessairement à rejeter la famille de déchets ou le concept considéré, mais constitue un indicateur à prendre en compte en termes de hiérarchisation des solutions de gestion.

S'agissant des impacts associés aux substances toxiques chimiques, la démarche s'appuie sur le guide de l'Ineris sur l'évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires (45). Il s'agit dans une première approche de s'assurer du respect des normes de qualité des milieux impactés (normes de potabilité pour le compartiment eau selon l'arrêté du 11 janvier 2007 modifié par l'arrêté du 30 décembre 2022 (46, 47), et valeurs de référence pour le compartiment sol fondées de manière prioritaire sur les campagnes de caractérisation du site (48, 49) et sur les valeurs nationales de référence « ASPITET » de la méthodologie nationale des sites et sols pollués (50) si les données n'étaient pas disponibles). Si des valeurs évaluées dépassent ces normes, alors les évaluations sont poursuivies en vue d'établir les valeurs de quotient de danger (QD) et d'excès de risque individuel (ERI) en fonction de la substance toxique chimique considérée.

Dans ce cadre, les valeurs suivantes sont retenues comme indicateurs :

- pour le scénario d'évolution normale (SEN) :
  - ✓ espèces non cancérigènes et espèces cancérigènes à seuil, QD <1 ;
  - ✓ espèces cancérigènes sans seuil, ERI $<10^{-5}$ (soit 1 cas supplémentaire pour 100 000 individus exposés).
- pour les scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI) :
  - ✓ indicateur de référence 1 (ce qui est recherché en termes d'optimisation) : QD <1 et ERI $<10^{-5}$;
  - ✓ indicateur de référence 2 (ce qui est acceptable) : QD <5 et ERI $<10^{-4}$.

Pour la période au-delà de 50 000 ans

Un enjeu de la démonstration de sûreté est l'appréciation des impacts associés aux situations conventionnelles, au regard de l'échelle de temps et en considérant la valeur de 0,25 mSv/an non pas comme une limite, mais comme une valeur de référence. Cette approche est celle préconisée par le GPD qui a recommandé de conserver cette valeur comme une valeur de référence pour le très long terme tout en soulignant que « *l'acceptabilité des écarts éventuels entre les impacts estimés et ce niveau de référence doit être appréciée au regard du niveau de conservatisme des hypothèses considérées dans les scénarios évalués.* » (6).

Dans le cadre d'une démarche proportionnée aux enjeux, les éléments à prendre en compte pour juger *in fine* de l'acceptabilité d'un impact potentiel aux grandes échelles de temps seront notamment (i) le caractère suffisant des dispositions de conception prises pour assurer un confinement de la radioactivité durant une période aussi longue que possible et raisonnablement démontrable, (ii) le niveau des conservatismes de la démarche d'évaluation de sûreté, et (iii) le caractère « conventionnel » de ces situations post 50 000 ans.

Au vu des études présentées, du niveau des conservatismes pris en compte pour ces situations et leur caractère conventionnel conduisant à altérer soudainement les fonctions de sûreté du stockage, l'Andra considère que des niveaux d'impacts, de l'ordre de grandeur de la valeur de référence et pouvant aller jusqu'à quelques mSv/an, ce qui est comparable au niveau d'exposition moyen aux rayonnements ionisants dus à la radioactivité naturelle en France (estimée autour de 5 mSv/an selon le rapport de l'IRSN relatif à l'exposition de la population française aux rayonnements ionisants (51)) restent acceptables en regard des objectifs fixés par le GPD.

8.1.5 Synthèse des évaluations de sûreté après-fermeture réalisées

Les évaluations de sûreté réalisées en support au présent rapport couvrent, d'une part la période allant de 0 an à 50 000 ans, d'autre part la période au-delà de 50 000 ans. Pour ces deux périodes, les scénarios de sûreté étudiés sont les suivants :

- sur la période 0 – 50 000 ans (cf. Chapitre 8.2 du présent rapport) :
  - ✓ un scénario de transfert par l'eau des radionucléides et des substances toxiques chimiques pour une évolution normale du stockage (SEN), pour deux jeux de paramétrage correspondant chacun (i) à une situation de référence et (ii) à une situation enveloppe (cf. Chapitre 8.2.1 du présent rapport) ;

    Les impacts radiologiques obtenus sont appréciés au regard de la limite de dose de 0,25 mSv/an ;
  - ✓ des scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI) impliquant :
    - une exposition par des matériaux directement issus du stockage et contenant des radionucléides et des substances toxiques chimiques provenant des déchets (cf. Chapitre 8.2.2.1 du présent rapport) ;
    - et des transferts des radionucléides selon la voie eau *via* un forage traversant le stockage (cf. Chapitre 8.2.2.3 du présent rapport).

    L'acceptabilité des impacts radiologiques obtenus pour ces SIHI est appréciée en regard de la limite de dose de 20 mSv/an ;

- sur la période au-delà de 50 000 ans (cf. Chapitre 8.3 du présent rapport), deux situations conventionnelles représentant chacune de manière conventionnelle une altération soudaine et extrême de l'une ou l'autre des grandes fonctions de sûreté du stockage (i) limiter le transfert des radionucléides vers l'homme et l'environnement et (ii) isoler les déchets de l'homme et de l'environnement. Les impacts ainsi évalués sont à comparer à la valeur de référence de 0,25 mSv/an ; des valeurs d'impacts de quelques mSv/an comparables au niveau d'exposition moyen aux rayonnements ionisants dus à la radioactivité naturelle en France sont considérés acceptables par l'Andra.

L'étude de ces scénarios vise à éclairer sur la capacité d'accueil du stockage en activité totale et en substances toxiques chimiques totales, ainsi que sur la compatibilité intrinsèque des déchets avec un stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS.

8.2 Évaluations de sûreté sur la période allant jusqu'à 50 000 ans

Les évaluations sont menées sur la base des données et inventaires des déchets, en radionucléides, substances toxiques chimiques et substances complexantes, fournis par les producteurs sur la base de leurs connaissances à date (cf. Chapitre 3 du présent rapport).

8.2.1 Évaluation des transferts par l'eau pour une évolution normale du stockage (SEN)

La démarche de sûreté de l'Andra pour la phase de post fermeture sur le long terme préconise de définir deux situations pour le Scénario d'évolution normale (SEN) :

- une situation de référence, pour laquelle les choix des processus et des valeurs de paramètres sont fondés sur le meilleur de la connaissance disponible ;
- une situation enveloppe, qui veille à retenir les processus conduisant à ne pas sous-estimer les impacts obtenus et en retenant des valeurs de paramètres choisis parmi les valeurs conservatives[31] issues de la connaissance disponible.

La situation enveloppe permet de définir la capacité d'accueil radiologique du stockage de déchets FA-VL, en se fondant sur le respect de la limite de dose de 0,25 mSv/an pour les impacts radiologiques sur la première période de 50 000 ans après la fermeture du stockage.

Un transfert des solutés basé sur la situation de référence va conduire à un terme source résiduel dans le stockage à 50 000 ans plus important que celui obtenu à l'issue d'un transfert basé sur la situation enveloppe. Ainsi, la situation de référence, générant le terme source résiduel à 50 000 ans le plus élevé, est retenue pour la situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler » définie au chapitre 8.1.3 du présent rapport.

Par ailleurs, par choix conservatif vis-à-vis des transferts des radionucléides et substances toxiques chimiques sous forme de solutés, le transitoire hydraulique-gaz n'a pas été considéré dans les évaluations du SEN.

8.2.1.1 Cadre des évaluations

Pour évaluer les performances du stockage en matière de confinement vis-à-vis des transferts par l'eau, une modélisation de l'évolution du stockage, de la circulation des eaux souterraines et de la migration des solutés (radionucléides, substances toxiques chimiques) a été réalisée. En cohérence avec les fonctions de sûreté en après-fermeture (cf. Chapitre 8.1.1 du présent rapport), 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 performance et de sûreté tels que les débits molaires de solutés en sortie de composant de stockage et les impacts radiologiques et/ou concentrations aux exutoires permettent d'analyser le fonctionnement du stockage selon les différentes options étudiées.

[31] Conservatifs(ves) : on entend par la notion conservatifs(ves) des données ou valeurs prises dans l'objectif de couvrir les incertitudes et de majorer les transferts de radionucléides et substances toxiques chimiques vers la biosphère en excluant des valeurs extrêmes qui n'ont pas de réalité physique.

Les évaluations de performance et de sûreté réalisées en support de ce dossier constituent une étape préalable à celle du Dossier d'options de sûreté (DOS). Ces évaluations sont mises en regard des indicateurs de protection rappelés *supra* (cf. Chapitre 8.1.4 du présent rapport) pour les radionucléides et les substances toxiques chimiques en fonction des différentes périodes temporelles.

Les hypothèses et les résultats des évaluations des transferts par l'eau de ce chapitre correspondent à la période temporelle de 0 an à 50 000 ans. Les choix de paramétrage retenus de manière conventionnelle pour la période au-delà de 50 000 ans sont précisés au chapitre 8.3.1 du présent rapport.

8.2.1.2 Paramètres considérés

Prise en compte de l'érosion

Sur la base de la description du scénario d'évolution normale sur la période 0 – 50 000 ans et des éléments de connaissance présentés dans le chapitre 4.7 du présent rapport, l'érosion considérée pour l'évaluation du transfert impliquant la voie eau est de 5 m (épaisseur des formations superficielles) sur la première dizaine de milliers d'années et de 5 m supplémentaires entre 10 000 ans et 50 000 ans, soit une érosion totale de 10 m à 50 000 ans. Ces ordres de grandeur d'érosion permettent de prendre en compte les hétérogénéités et incertitudes. En termes de conceptualisation strictement numérique, la prise en compte de l'érosion (disparition des épaisseurs érodées) se traduit par une dégradation spatio-temporelle des valeurs des paramètres d'écoulement et de transfert des solutés (évolution progressive du gradient de charge dans les Argiles tégulines, évolution de la conductivité hydraulique, de la diffusion, de la porosité et du coefficient de retard dans les épaisseurs d'argiles soumises à l'érosion sur 10 000 ans et 50 000 ans). *In fine*, il convient de préciser que les effets de surface (liés à l'érosion) sur les débits de solutés en sortie de la garde inférieure d'argile sont faibles.

Propriétés du milieu géologique

Quelle que soit l'option de concept étudiée (en galeries souterraines, à ciel ouvert), le stockage est implanté à une profondeur de 30 m (au toit des alvéoles). Compte tenu des épaisseurs d'argiles considérées (60 m en référence, 70 m en étude de sensibilité), de l'épaisseur des formations superficielles (5 m en moyenne) incluses dans l'épaisseur d'argiles précitée, et de l'épaisseur du stockage (6 m ou 3 m), les gardes inférieures d'argile, c'est-à-dire les épaisseurs d'argiles en place sous les plateformes de stockage, sont les suivantes :

- architecture de stockage en souterrain (alvéole de diamètre excavé 6 m) : 24 m en référence et 34 m en sensibilité ;
- architecture de stockage en souterrain (alvéole de diamètre excavé 3 m) : 27 m en référence et 37 m en sensibilité ;
- architecture de stockage à ciel ouvert (hauteur 6 m) : 24 m en référence et 34 m en sensibilité.

Les propriétés hydro-dispersives et géochimiques du milieu géologique ont été calées sur la base (i) des résultats des différentes mesures réalisées à partir des échantillons issus des campagnes de forages, concernant notamment les données de conductivité hydraulique et de diffusion (cf. Chapitre 4 du présent rapport), (ii) de mesures de coefficient de partage solide-liquide (Kd) et (iii) de calculs de spéciation.

Au-delà des perturbations mécaniques et chimiques pouvant affecter les performances du système de stockage détaillées ci-après, la formation des Argiles tégulines a été considérée avec des propriétés hydro-dispersives et géochimiques homogènes sur son épaisseur, compte tenu de la variabilité spatiale relativement peu marquée des mesures, en retenant les valeurs conservatives (situation enveloppe) ou les valeurs au meilleur de la connaissance (situation de référence) pour les différents paramètres associés. Des conditions réductrices ont été considérées dans l'argile naturelle. Issues des données acquises *via* les forages réalisés, la valeur de conductivité hydraulique retenue est de $2{,}4 \times 10^{-11}$ m/s en situation de référence (valeur moyennée des mesures en forages, identique à celle utilisée lors du rapport d'étape 2015), et de 6×10^{-11} m/s en situation enveloppe, valeur plus élevée d'un facteur 2,5 par rapport à celle considérée en référence, afin de tenir compte de l'incertitude liée à la variabilité. De la même façon, les valeurs de coefficient de diffusion effectif retenues sont de l'ordre de :

- en situation de référence : 5×10^{-11} m²/s pour les anions les plus mobiles (chlore, iode) et 10^{-10} m²/s pour les cations/neutres tels que (potassium, césium, tritium…) ;
- en situation enveloppe : des valeurs plus élevées d'un facteur 2 tenant compte de l'incertitude liée à la variabilité spatiale, soit 10^{-10} m²/s pour les anions les plus mobiles et 2×10^{-10} m²/s pour les cations/neutres cités ci-avant.

Pour tenir compte des différences de coefficients de diffusion dans l'eau libre entre solutés, des facteurs correctifs ont été appliqués : à savoir un facteur 0,5 appliqué par rapport aux valeurs indiquées ci-avant aux anions autres que le chlore et l'iode (c'est le cas du carbone et du sélénium) et pour les cations/neutres complexes (c'est notamment le cas des éléments des chaînes de filiation). Enfin, un gradient de charge hydraulique vertical descendant maximal de -0,3 m/m a été retenu, ce qui constitue un choix raisonnablement conservatif excluant la zone très localisée présentant un gradient de charge d'intensité légèrement supérieure. Aucun effet de variabilité géochimique depuis la surface (présence d'une frange d'altération) n'a été pris en compte du fait des effets moindres mesurés et des valeurs conservatives considérées.

La perturbation mécanique causée par la réalisation des ouvrages est prise en compte en considérant une dégradation des propriétés hydro-dispersives des argiles par rapport à leur état initial (conductivité hydraulique et coefficient de diffusion multipliés par un facteur 10 et un facteur 3 respectivement à dires d'experts à ce stade des études), sur une extension correspondant à un diamètre excavé autour des alvéoles de l'option de stockage en souterrain, soit 6 m ou 3 m selon le concept (alvéoles de grand ou petit diamètre). Concernant l'option de stockage à ciel ouvert, la seule perturbation mécanique prise en compte est celle associée à la présence des parois moulées et des fiches d'ancrage de ces parois, au droit desquelles une perturbation du même type que celle décrite ci-avant est considérée, sur une extension correspondant à l'épaisseur des parois/fiches (80 cm). Pour ce concept, aucune dégradation de la conductivité hydraulique, ni de la diffusion *a fortiori*, n'a été considérée sous la base du stockage (en « fond de fouille »), du fait que cette dégradation serait faible et *in fine* largement compensée par la reprise de la charge mécanique liée à la mise en place des colis et de la couverture remaniée sur une grande épaisseur (30 m).

Les perturbations chimiques dans la formation argileuse causées par la présence des déchets et/ou des matériaux cimentaires sont diverses et leur prise en compte est spécifique. Les bases de l'évaluation sont (i) la détermination préalable de l'extension et de l'intensité de la perturbation *via* la modélisation du transfert des espèces concernées sur la base du paramétrage de la situation de référence, (ii) la paramétrisation spécifique du transfert des solutés dans les extensions de perturbation obtenues, et (iii) le transfert des solutés intégrant l'altération des paramètres de transfert concernés dans les zones perturbées, sans prise en compte d'une modélisation géochimique couplant explicitement les perturbations et le transfert des solutés. Les perturbations chimiques sont les suivantes :

- la perturbation alcaline est induite par la présence des matériaux cimentaires et concerne toutes les plateformes de déchets et configurations de stockage (souterrain et ciel ouvert) ; elle est évaluée sur la base de la modélisation du transfert d'alcalins tels que le potassium : dans une extension de quelques mètres autour des alvéoles de stockage, elle se traduit par une altération d'un ordre de grandeur des propriétés de rétention géochimique dans l'argile (coefficient de partage (Kd), limite de solubilité (Csat)) pour les éléments alcalins (potassium, césium…) et alcalino-terreux (radium, béryllium, calcium…) sensibles à la compétition avec les ions alcalins. À noter que l'augmentation de pH qui accompagne la perturbation alcaline a un effet positif sur la sorption qui, de manière conservative, n'est pas pris en compte. Il n'a pas été considéré de phénomènes de modification des propriétés hydro-dispersives, modification jugée faible et couverte par la perturbation mécanique ;
- la perturbation saline est induite par la présence des sels contenus dans certaines typologies de déchets (nitrates d'ammonium (sels solubles) et sulfates de baryum (sels peu solubles) des déchets radifères, nitrates et sulfates de sodium (sels solubles) des déchets bitumés et technologiques) : dans les composants cimentaires, elle se traduit par une altération d'un ordre de grandeur des propriétés de rétention géochimique dans tous les composants en béton de l'alvéole pour tous les éléments chimiques, et dans l'argile, elle est évaluée sur la base de la modélisation du transfert des espèces salines dans le système de stockage, se traduisant par une altération d'un ordre de grandeur des propriétés de rétention géochimique pour les éléments alcalins et alcalino-terreux, sur des

extensions dans l'argile allant du mètre à quelques dizaines de mètres : (i) pour les déchets radifères, l'extension la plus notable est d'environ la quinzaine de mètres dans la garde inférieure d'argile, (ii) pour les déchets bitumés, les extensions les plus notables dans la garde inférieure d'argile sont d'environ la dizaine de mètres pour le stockage souterrain grand diamètre et la vingtaine de mètres pour le stockage à ciel ouvert, et (iii) pour les déchets technologiques, l'extension la plus notable est d'environ la dizaine de mètres dans la garde inférieure d'argile ;

- la perturbation organique est induite par la présence de substances/matières organiques dans certaines typologies de déchets. Certaines de ces substances/matières génèrent des molécules organiques connues comme complexantes (au-delà d'une concentration seuil). Les plus notables sont le tributyl phosphate (TBP) dans les déchets bitumés, l'acide iso-saccharinique (ISA) et l'acide phtalique (phtalates) dans les déchets technologiques, issus respectivement de la dégradation de la cellulose, et de celle des plastiques et PVC ; elle se traduit par une altération d'un ordre de grandeur des propriétés de rétention géochimique de certains éléments dont la plupart des actinides (actinium, thorium, uranium, neptunium, plutonium, américium, curium…) et certains métaux (nickel, palladium…), sur des extensions de perturbation associées évaluées par modélisations préalables (i) d'environ 3 m pour le TBP dans la garde inférieure d'argile du stockage à ciel ouvert, (ii) de l'ordre de 7 m pour l'ISA et les phtalates dans la garde inférieure d'argile des stockages à ciel ouvert et en souterrain de grand diamètre, et (iii) de l'ordre de la quinzaine de mètres dans la garde inférieure d'argile en souterrain de petit diamètre.

Les perturbations mécaniques et chimiques décrites précédemment sont prises en compte de façon identique pour chacune des deux situations (référence, enveloppe) du SEN.

Couverture d'argile au-dessus des alvéoles de stockage

Dans le cas d'une architecture de stockage à ciel ouvert, les alvéoles de stockage seront recouvertes après leur fermeture par une couverture remaniée à partir des Argiles tégulines excavées. Les hypothèses suivantes ont été considérées à ce stade des études. Selon la direction verticale, la couverture est constituée :

- d'une première couche d'argile de 10 m d'épaisseur avec une conductivité hydraulique de 10^{-9} m/s en situation de référence et de 5×10^{-9} m/s en situation enveloppe (valeurs correspondant respectivement à la moyenne et à la borne haute des valeurs mesurées sur des argiles de site compactées) ;
- d'une deuxième couche de 18 m d'épaisseur avec une conductivité hydraulique de 10^{-8} m/s (valeur correspondant à un choix prudent) appliquée pour chacune des deux situations ;
- d'une couche de terre végétale de 2 m d'épaisseur en surface avec une conductivité hydraulique de 10^{-6} m/s appliquée pour chacune des deux situations.

Dans la première couche d'argile, les valeurs de coefficient de diffusion effectif retenues sont (i) en situation de référence, de $1{,}2 \times 10^{-10}$ m²/s pour les anions les plus mobiles (chlore, iode) et $1{,}5 \times 10^{-10}$ m²/s pour les cations/neutres tels que (potassium, césium, tritium…), et (ii) en situation enveloppe, des valeurs plus élevées d'un facteur 2 tenant compte de l'incertitude, soit $2{,}4 \times 10^{-10}$ m²/s pour les anions les plus mobiles et 3×10^{-10} m²/s pour les cations/neutres cités ci-avant. Selon le même principe que celui adopté pour la formation argileuse et afin de tenir compte d'une différence de coefficient de diffusion dans l'eau libre des solutés, des facteurs correctifs ont été appliqués. Dans la deuxième couche d'argile, selon le même principe de choix conventionnel prudent qu'à l'étape 2015, des valeurs de coefficient de diffusion effectif deux fois plus élevées que celles de la première couche ont été considérées. Un coefficient de diffusion élevé a été considéré pour la couche de terre végétale en surface. Enfin, des conditions oxydantes ont été considérées dans l'argile remaniée, selon le même principe qu'à l'étape 2015.

Dans le cas d'une architecture de stockage en souterrain, la garde supérieure d'Argiles tégulines a été considérée avec les mêmes caractéristiques que celles des Argiles tégulines en place.

Composants cimentaires

Des matériaux cimentaires sont mis en place dans le stockage au niveau des colis (conteneurs en béton pour les déchets de graphite, bitumés et technologiques) et des alvéoles (remplissage des vides,

radier/dalle de pose des colis et dalle de fermeture pour l'architecture de stockage à ciel ouvert, soutènement/revêtement pour l'architecture de stockage en souterrain). Ces matériaux contribuent au confinement par une rétention géochimique des solutés (radionucléides, substances toxiques chimiques), en particulier le chlore 36 (en situation de référence) et le carbone 14 inorganique des déchets de graphite, les éléments des chaînes de filiation de toutes les typologies de déchets, notamment celles contenant des inventaires significatifs en actinides, et l'élément uranium parmi les substances toxiques chimiques. Selon un choix prudent, les propriétés de rétention de tous les solutés, dans l'ensemble des matériaux cimentaires disposés autour des déchets contenant des quantités significatives de sels (cf. Perturbation saline *supra* issue des déchets radifères, bitumés et technologiques), sont altérées d'un ordre de grandeur : réduction d'un facteur 10 du coefficient de partage (Kd) et augmentation d'un facteur 10 de la limite de solubilité (Csat). La performance hydraulique des matériaux cimentaires n'est pas prise en compte, selon le même principe qu'à l'étape 2015. Ces composants sont considérés comme des milieux poreux avec une conductivité hydraulique élevée et un coefficient de diffusion élevé (valeur maximale physique pour ce dernier).

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

Pour les déchets radifères, un relâchement labile (c'est-à-dire instantané représenté sur 1 an) sous forme aqueuse des solutés a été retenu, de manière conservative, comme lors du rapport d'étape 2015.

Pour les déchets de graphite, un relâchement labile a été retenu pour l'ensemble des radionucléides à l'exception du carbone 14 des empilements. Pour ce dernier, les tests de lixiviation menés en amont de ce dossier sur des empilements (EDF, CEA) indiquent qu'une fraction de l'ordre de 30 % (pouvant varier selon les réacteurs) du carbone 14 relâché en solution se trouverait sous forme organique, avec une valeur maximale à 50 %. Ils indiquent des taux de relâchement variables en fonction des conditions expérimentales et de la nature de l'échantillon, avec des ordres de grandeur du taux de relâchement variant de quelques 10^{-5} an^{-1} à 6×10^{-4} an^{-1} selon les familles d'empilements. La représentation du relâchement des empilements concernés se traduit par un taux de relâchement « moyen » basé sur les valeurs de taux de relâchement en phase aqueuse des différentes familles d'empilements[32] (incluant les incertitudes), pondérées par les activités radiologiques en carbone 14, soit un taux d'environ $1,7 \times 10^{-4}$ an^{-1}. Le relâchement du carbone 14 organique finalement retenu pour les évaluations est la combinatoire :

- (i) pour la situation de référence, de 30 % de l'inventaire en carbone 14 des empilements (avec le taux de relâchement indiqué ci-avant) et 50 % de celui des chemises (EDF, CEA) et déchets UNGG de La Hague (avec un relâchement sous forme labile) ;
- (ii) pour la situation enveloppe, de 50 % de l'inventaire en carbone 14 des empilements (avec le même taux qu'en situation de référence) et 100 % de celui des chemises et déchets UNGG de La Hague (relâchement sous forme labile).

In fine, ces deux cas correspondent à un inventaire en carbone 14 organique d'environ 32 % de celui en carbone 14 total en situation de référence et 54 % en situation enveloppe.

Pour les déchets bitumés, le relâchement des solutés a été considéré labile. Le rôle de retard au relâchement des solutés joué par la matrice bitume n'a pas été pris en compte dans les évaluations supports à ce dossier.

Pour les déchets technologiques, le relâchement des solutés a été considéré labile.

Exutoires

Trois exutoires vers la biosphère sont considérés (cf. Figure 8-1) : 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[33] et deux exutoires en surface (exutoires rivière et sols

[32] Pour comparaison, dans le rapport d'étape 2015, deux valeurs de taux de relâchement des empilements avaient été considérées : l'une de l'ordre de $7,2 \times 10^{-4}$ an^{-1} associée à des mesures sur des graphites sous forme poudre et l'autre « faible » de l'ordre de 5×10^{-6} an^{-1}, valeur prospective devant être confirmée par des études post-2015 qui n'ont pas abouti à ce niveau de résultat.

[33] À noter qu'un forage réalisé à une profondeur de l'ordre de 100 m est une hypothèse conservative au regard d'un usage par un particulier.

contaminés). Le débit de dilution à l'exutoire puits de pompage dans l'aquifère s'appuie en partie sur les données connues à ce jour de l'aquifère des Sables verts (épaisseur, conductivité hydraulique, gradient de charge hydraulique horizontal) et est de l'ordre de 0,15 m³/h. Le débit de dilution retenu pour l'exutoire rivière est identique à celui considéré à l'étape 2015, soit 36 m³/h, valeur s'appuyant sur le débit moyen des Noues d'Amance au niveau de la zone d'étude. Pour l'exutoire sols contaminés, la surface potentiellement contaminée est celle obtenue par projection verticale de l'emprise du stockage (spécifique à chaque concept étudié).

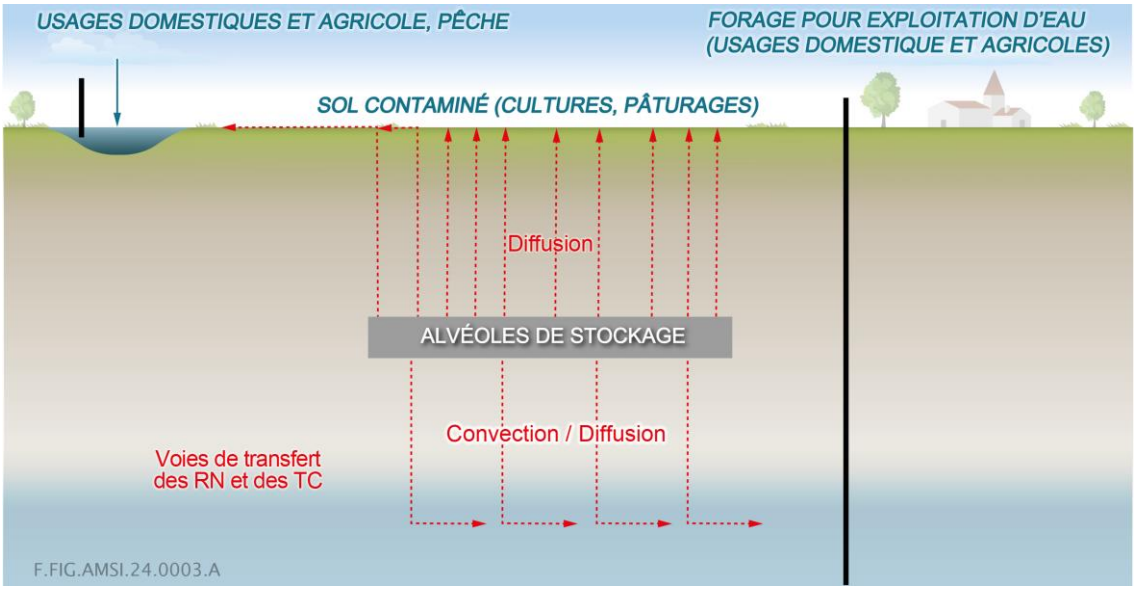


Figure 8-1 Illustration des voies de transfert potentielles et des exutoires retenus

Les calculs d'exposition radiologique individuelle se fondent sur la définition de groupes de référence hypothétiques (les détails correspondants sont fournis dans la dernière section de ce chapitre) 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. À partir des flux de solutés (débits molaires) et des facteurs de conversion biosphère (évalués pour une biosphère tempérée ou chaude avec une période d'accumulation 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. Dans le cas particulier du scénario de forage traversant le stockage dont les résultats sont présentés au chapitre 8.2.2.3 du présent rapport, caractérisé par une date d'occurrence précoce, l'évaluation du transfert dans la biosphère est réalisée en tenant compte notamment de la dynamique de l'accumulation dans le sol des radionucléides d'intérêt, conduisant à des facteurs de conversion biosphère variables dans le temps et donc plus faibles aux horizons temporels plus courts, que les facteurs constants indiqués précédemment.

Biosphère

Compte tenu des échelles de temps retenues pour les évaluations et des éléments de connaissance disponibles, la démarche Andra conduit à considérer toutes les biosphères envisageables de manière non séquentielle et équiprobable, à savoir une biosphère type tempérée, une biosphère type chaude et une biosphère type froide.

Considérant que les évaluations sont menées sur 50 000 ans, il est proposé de ne pas retenir de biosphère froide susceptible d'intervenir ultérieurement. Au stade du dossier article 33, sont ainsi retenues la biosphère tempérée et la biosphère chaude. La biosphère chaude est appliquée uniquement à l'exutoire puits pour le dossier article 33 pour évaluer l'impact maximal associé à ce choix de biosphère.

Conformément à la démarche, le choix des groupes de référence hypothétiques s'appuie sur la description de l'ensemble des caractéristiques des composantes plausibles de la biosphère type retenue (climat, végétation, faune, sols, géomorphologie, géologie, hydrologie, et hydrogéologie, et activités humaines).

Les connaissances acquises en matière de biosphère ainsi que les choix retenus à ce stade pour le site du Centre de Stockage de l'Aube situé à proximité géographique de la zone restreinte sont transposées pour représenter les biosphères type tempérée et chaude, associées au stockage à faible profondeur dans la Communauté de Communes de Vendeuvre-Soulaines.

Groupes de référence hypothétiques

Pour chacun des exutoires, des groupes de référence hypothétiques ont été définis. L'approche retenue pour les définir permet d'explorer des voies d'exposition adaptées aux activités associées à un exutoire défini en tenant compte d'un certain niveau de réalisme quant à l'usage de cet exutoire par un groupe de référence hypothétique. Les classes d'âge retenues sont l'adulte, l'enfant de 10 ans et l'enfant de 1 an. Pour l'enfant de 1 an, il est retenu un régime alimentaire diversifié avec une consommation adaptée. Un niveau d'autarcie de 1 est retenu pour tous les produits consommés et pour l'eau de boisson. Les mêmes voies de transfert sont considérées pour évaluer les impacts associés aux substances toxiques chimiques.

- ***Groupe de référence hypothétique associé à l'exutoire de type puits dans la formation aquifère des Sables verts***

Sur la base du débit de pompage de l'aquifère, c'est un groupe de référence hypothétique dit « villageois » avec jardin potager et basse-cour qui est retenu pour évaluer la dose à l'exutoire de type puits (à l'instar des choix opérés pour le rapport étape 2015 (1)). Ce groupe est représentatif des différentes activités actuellement observées sur la zone restreinte (eau de boisson, jardin potager et basse-cour). Les différentes voies de transfert sont représentées en figure 8-2. Sur la base du débit de pompage de l'aquifère, c'est un groupe de référence hypothétique dit « Villageois » avec jardin potager et basse-cour qui est retenu pour évaluer la dose à l'exutoire de type puits (à l'instar des choix opérés pour le rapport étape 2015). Ce groupe est représentatif des différentes activités actuellement observées sur la zone restreinte (eau de boisson, jardin potager et basse-cour). Les différentes voies de transfert sont représentées en figure 8-2.

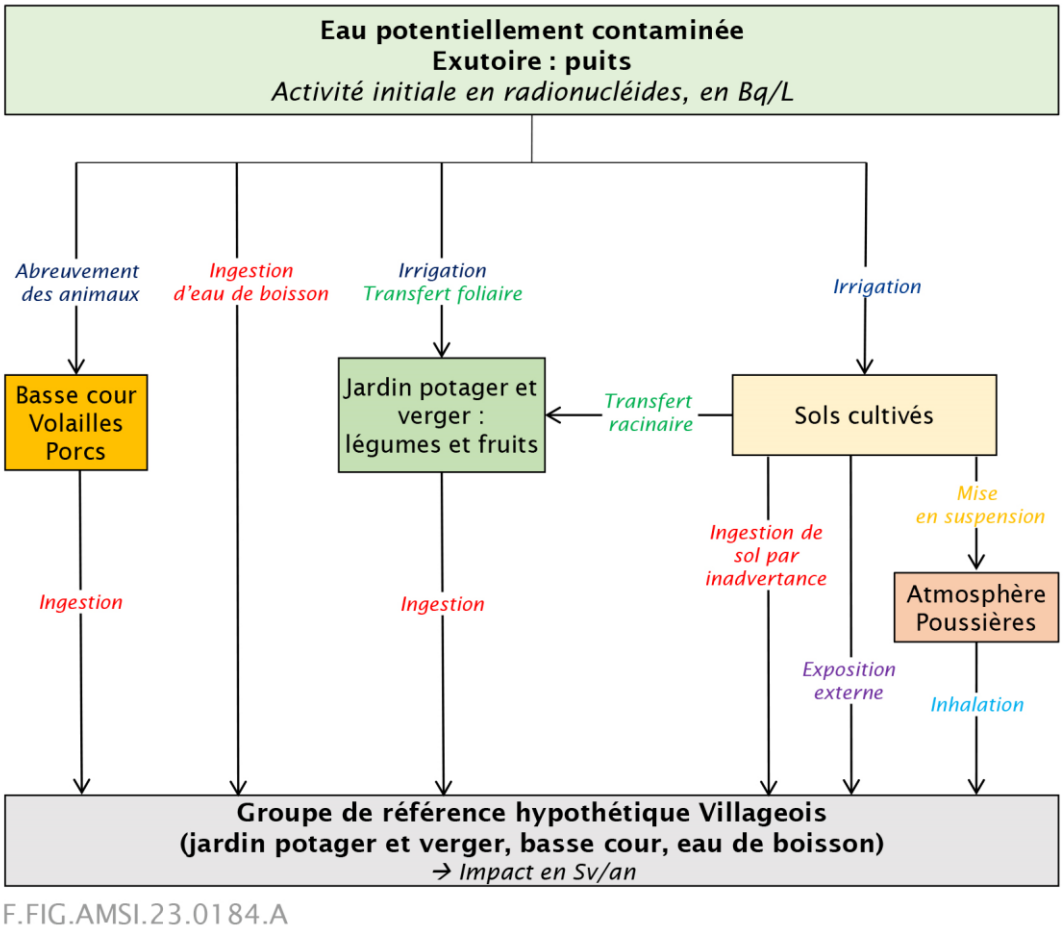


Figure 8-2 *Représentation des voies de transfert associées à l'exutoire « puits » dans le cadre d'un groupe de référence hypothétique « villageois »*

- ***Groupe de référence hypothétique associé à un exutoire de type « rivière »***

Sur la base de la productivité de la rivière retenue comme référence, le groupe de référence hypothétique retenu est un groupe « multi-activités » (à l'instar des choix opérés pour le rapport étape 2015 (1)). Ce groupe est représentatif des différentes activités actuellement observées sur la zone restreinte (activités de grandes cultures de céréales, élevage de bovins, eau de boisson, jardin potager et basse-cour). Son régime alimentaire est toutefois adapté pour tenir compte d'une activité de pêche dans la rivière.

Les différentes voies de transfert sont représentées en figure 8-3.

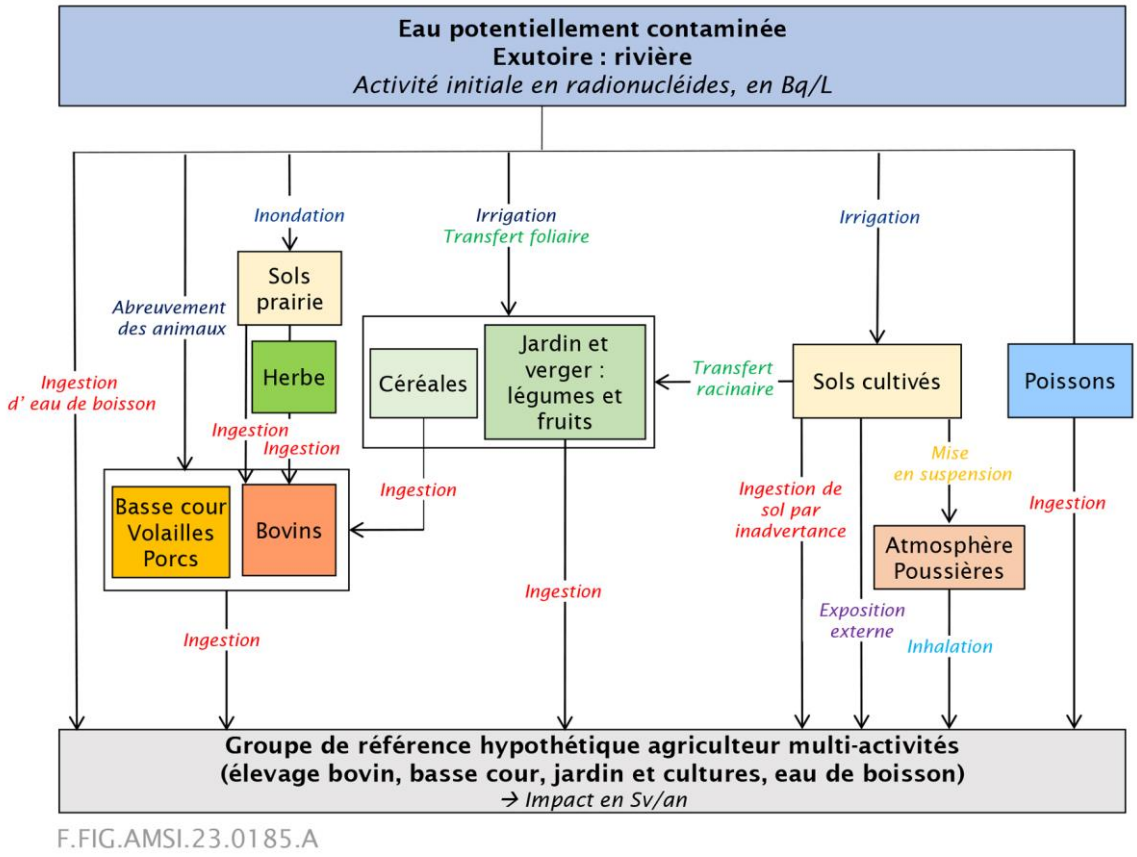


Figure 8-3 *Représentation des voies de transfert associées à l'exutoire « rivière » dans le cadre d'un groupe de référence hypothétique « multi-activités »*

- ***Groupe de référence hypothétique associé à un sol contaminé par remontée diffusive des radionucléides***

Sur la base des usages constatés dans la région, le groupe de référence hypothétique retenu est un groupe type « multi-activités » basé sur le modèle retenu pour l'exutoire de type rivière mais pour lequel la voie de transfert par l'eau n'est pas considérée (à l'instar des choix opérés pour le rapport d'étape 2015 (1)). Les activités considérées sont donc les activités de type grandes cultures de céréales, élevage de bovins, jardin potager et basse-cour.

Les différentes voies de transfert sont représentées en figure 8-4.

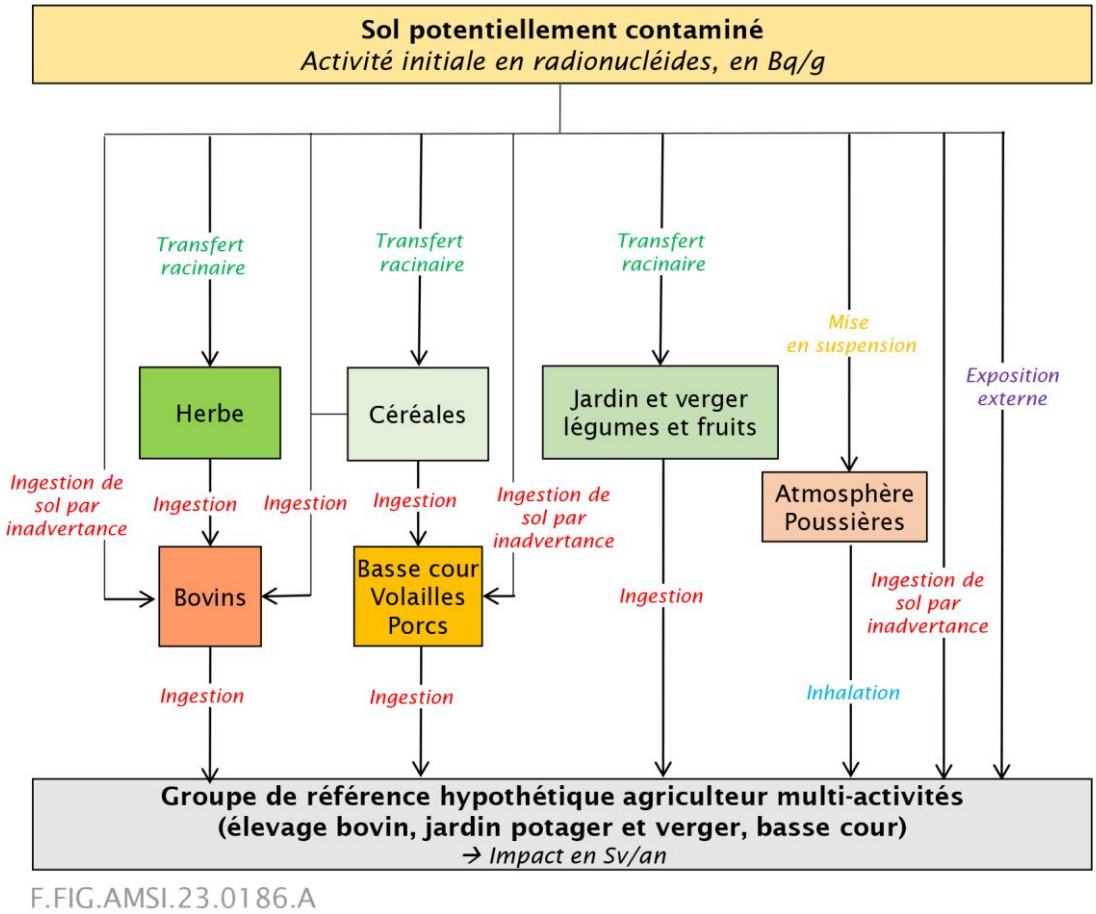


Figure 8-4 *Représentation des voies de transfert associées à l'exutoire « sol contaminé » dans le cadre d'un groupe de référence hypothétique « multi-activités »*

8.2.1.3 Résultats des évaluations

Les résultats sont successivement présentés par plateforme regroupant des déchets de même typologie : déchets radifères, déchets de graphite, déchets bitumés et déchets technologiques.

Fonctionnement hydraulique du stockage

Dans le cas de l'architecture de stockage en souterrain, 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 la formation aquifère des Sables verts. Sur les prochains 50 000 ans, le transfert des solutés reste descendant et convectif dominant.

La voie de transfert par diffusion depuis le stockage vers le toit de la formation argileuse est négligeable. L'option de stockage en souterrain tend donc à mobiliser la garde inférieure des Argiles tégulines pour assurer le confinement.

Dans le cas de l'architecture de stockage à ciel ouvert, 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 remaniée, un contraste de conductivités hydrauliques 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 remaniée est alors codominant convectif descendant et diffusif avec une composante ascendante. Au final, le transfert des solutés dans la couverture remaniée est alors diffusif ascendant,

avec une très faible convection en sens inverse, induite par le gradient de charge hydraulique descendant dans l'argile hôte.

Pour faire le lien avec les résultats d'évaluations présentés ci-après pour les différentes plateformes de déchets, il convient de souligner que le caractère dominant du transfert par convection des solutés dans la garde inférieure d'argile est respectivement plus ou moins prononcé, selon que le soluté est un anion (typiquement le chlore, l'iode, le carbone et le sélénium), ou qu'il appartient à la catégorie regroupant les cations et les neutres (typiquement les éléments des chaînes de filiation).

Déchets radifères

Cas considérant les déchets à l'actuel (dénommé « cas sans élimination des sels » dans la suite du texte)

Les déchets radifères sont caractérisés par leur inventaire radiologique en radioéléments des chaînes naturelles dites 4N (thorium 232 et descendants), 4N+2 (uranium 238 et descendants) et 4N+3 (uranium 235 et descendants). Ces éléments présentent des niveaux de sorption élevés à la fois dans les Argiles tégulines, les matériaux cimentaires et la couverture remaniée. Néanmoins, le radium 226, présent dans la chaîne 4N+2, est moins retenu que ses pères dans ces compartiments ; il est donc relativement plus mobile. Pour les concepts souterrains, le radium 226 initialement présent dans les déchets est suffisamment retardé pour pouvoir bénéficier de sa décroissance radioactive au sein du système de stockage avant qu'il n'atteigne la biosphère. C'est donc le radium 226 issu de la filiation radioactive qui contribue à l'impact à 50 000 ans. Pour le concept à ciel ouvert, le transfert du radium 226 est plus rapide, en lien avec un gradient de charge hydraulique induit dans la garde inférieure plus élevé et une extension de la perturbation saline corrélativement plus importante. De ce fait, le premier pic est issu de l'inventaire initial en radium 226 et le second est en partie associé au radium 226 issu de la filiation radioactive.

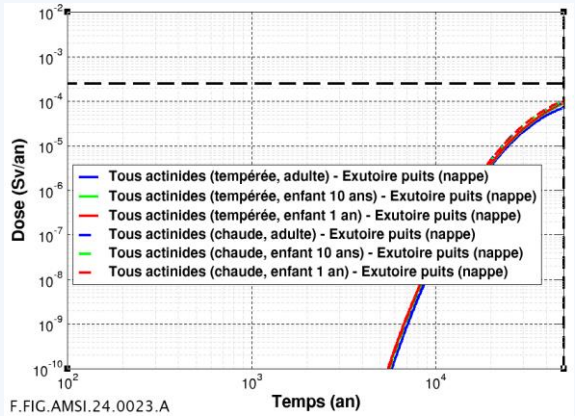
En situation enveloppe et sur la période 0 – 50 000 ans, les débits molaires maximaux des actinides en sortie d'argile hôte au mur de la couche sont de l'ordre de quelques 10^{-3} mol/an à quelques 10^{-2} mol/an pour l'uranium 238 selon le concept de stockage. En situation de référence, les débits molaires maximaux sont négligeables, principalement du fait des fortes capacités de sorption. En situation enveloppe, les débits molaires d'uranium 238 et d'uranium 234 en sortie d'argile hôte au toit de la couche (concept en souterrain de grand diamètre) ou en sortie de couverture (concept à ciel ouvert) sont inférieurs à ceux en sortie d'argile hôte au mur de la couche, respectivement d'un ordre de grandeur et d'un facteur 3.

Avec les hypothèses retenues pour évaluer le transfert des radionucléides de l'exutoire jusqu'à l'homme, le maximum du cumul de dose en situation enveloppe à l'échelle de 50 000 ans dû à l'ensemble des isotopes des 3 chaînes de filiation (4N, 4N+2, 4N+3) serait inférieur à 0,25 mSv/an pour le concept de stockage souterrain grand diamètre (alvéole 6 m) et le concept de stockage à ciel ouvert et supérieur à 0,25 mSv/an d'un facteur 5 pour le concept de stockage souterrain petit diamètre (alvéole 3 m) (cf. Figure 8-5). La dose est significativement plus élevée pour ce dernier concept qui présente une faible épaisseur de béton et de surcroît de moins bonnes performances du fait de l'état carbonaté du béton, ce qui conduit à un faible niveau de sorption des radionucléides concernés. Le maximum du cumul de dose est obtenu à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour la classe d'âge enfant de 1 an en biosphère tempérée dans la plupart des cas. En comparaison, les doses maximales obtenues aux deux exutoires de surface (rivière, sol contaminé) sont faibles, au plus de l'ordre du µSv/an à 50 000 ans.

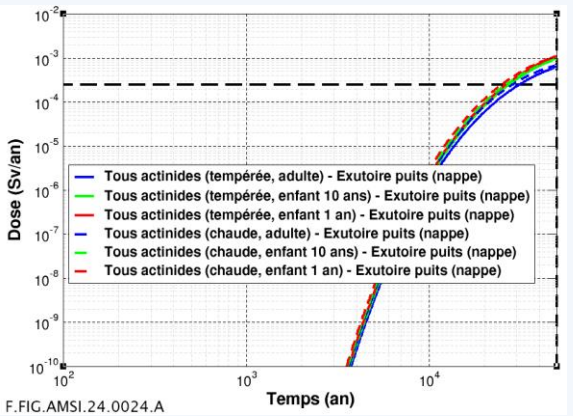
SEN (situation enveloppe) - Déchets radifères (cas sans élimination des sels)

Historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »

Concept de stockage souterrain (alvéole 6 m)



Concept de stockage souterrain (alvéole 3 m)



Concept de stockage à ciel ouvert

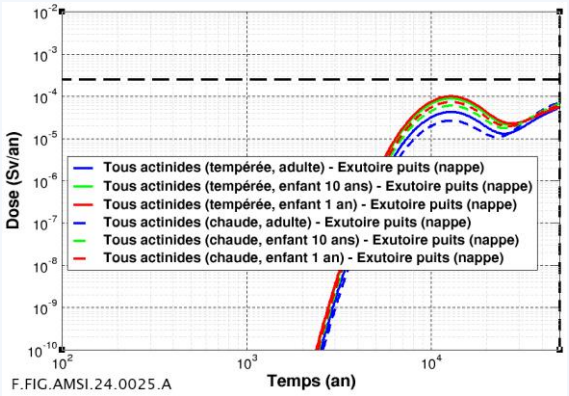


Figure 8-5 *SEN - situation enveloppe, déchets radifères (cas sans élimination des sels), tous actinides : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Enfin, les doses maximales obtenues en situation enveloppe (exemple du concept à ciel ouvert), en lien avec la migration du potassium 40 contenu dans les déchets radifères seraient inférieures à la valeur de référence de 0,25 mSv/an de plus d'un ordre de grandeur, et celles liées à la migration du carbone 14 contenu dans la famille de déchets d'assainissement de sites pollués au carbone 14 (inventaire considéré sous forme labile) seraient inférieures à la valeur de référence de 0,25 mSv/an d'environ un facteur 7 (cf. Figure 8-6).

SEN (situation enveloppe) - Déchets radifères (cas sans élimination des sels)	
Historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »	
Concept de stockage à ciel ouvert	
Potassium 40	Carbone 14

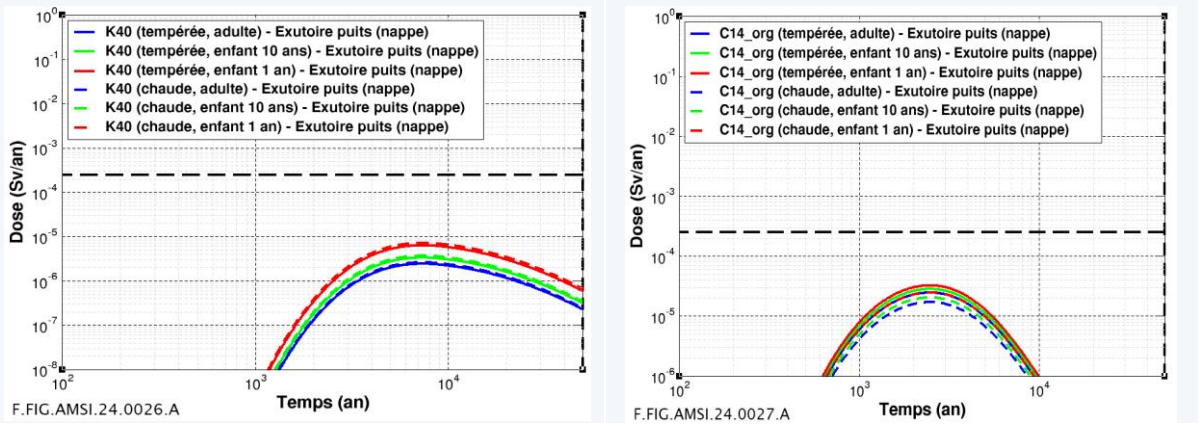


Figure 8-6 *SEN - situation enveloppe, déchets radifères (cas sans élimination des sels), potassium 40 et carbone 14 : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour le concept de stockage à ciel ouvert, pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Le tableau 8-1 présente une synthèse des doses cumulées maximales (tous radionucléides) à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts », obtenues dans le cas « sans élimination des sels des déchets radifères » pour les trois concepts de stockage en situations de référence et enveloppe du SEN sur la période 0 – 50 000 ans. En situation de référence, les doses, associées à des débits molaires négligeables au mur de la couche, sont très faibles, du fait de la forte rétention des radionucléides dans les Argiles tégulines et dans les matériaux cimentaires. En situation enveloppe, les doses maximales sont inférieures à l'objectif de protection de 0,25 mSv/an, à l'exception du concept de stockage souterrain de petit diamètre (alvéole 3 m) qui présente une faible épaisseur de béton et un faible niveau de sorption associé pour les radionucléides concernés. L'écart très important d'au moins 6 ordres de grandeur entre les résultats d'impacts à 50 000 ans pour les deux situations (référence, enveloppe) est en grande partie lié à cet effet de coupure à 50 000 ans, alors même que les courbes de doses sont encore dans une phase ascendante ; l'écart entre les valeurs maximales « théoriques » des impacts associés aux deux situations, à un horizon temporel de plusieurs centaines de milliers d'années, se réduirait au maximum à 2 ou 3 ordres de grandeur, en lien avec la différence de paramètres de rétention décrivant les deux situations.

Les principaux radionucléides contributeurs à l'impact sont un isotope de la chaîne 4N+3 (protactinium 231) et les isotopes de la chaîne 4N+2 hormis le thorium 230 très sorbé (uranium 234, uranium 238, radium 226, plomb 210). La variabilité de la dose à 50 000 ans en situation enveloppe, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est assez peu étendue (au plus un facteur 2 dans le cas du stockage souterrain 3 m), du fait de la sensibilité modérée des radionucléides les plus contributeurs à l'impact, au transfert dans la biosphère.

Tableau 8-1 *SEN - situations de référence et enveloppe, déchets radifères (cas sans élimination des sels) : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale (situation enveloppe) liée au type de biosphère et à la classe d'âge*

Déchets radifères (cas sans élimination des sels)	SEN – période 0 -50 000 ans Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »				
	Situation de référence		Situation enveloppe		
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Plage de variation de la dose maximale (situation enveloppe) liée au type de biosphère et à la classe d'âge
	Principaux radionucléides contributeurs				
Souterrain 6 m	$<10^{-7}$	50 000	0,11	50 000	de 0,07 mSv/an à 0,11 mSv/an
	^{231}Pa (chaîne 4N+3), ^{234}U, ^{238}U, ^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2)				
Souterrain 3 m	$<10^{-5}$	50 000	1,15 (dose>0,25 mSv/an à partir de 25 000 ans)	50 000	de 0,6 mSv/an à 1,15 mSv/an
	^{231}Pa (chaîne 4N+3), ^{234}U, ^{238}U, ^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2)				
Ciel ouvert	$<10^{-10}$	50 000	0,07	50 000	à 50 000 ans : de 0,05 mSv/an à 0,07 mSv/an à 13 000 ans : de 0,025 mSv/an à 0,1 mSv/an
			~ 0,1 mSv/an à 13 000 ans (contribution de l'inventaire initial en ^{226}Ra (cf. Figure 8-5))		
	^{231}Pa (chaîne 4N+3), ^{234}U, ^{238}U, ^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2)				

La plupart des substances toxiques chimiques présente également des propriétés de sorption élevées dans les argiles et les matériaux cimentaires. De ce fait, leur transfert est très limité. Ainsi, leurs concentrations maximales aux exutoires sont inférieures aux Normes de Qualité Environnementale (NQE) et leurs quotients de dangers (QD) et excès de risques individuels (ERI) sont faibles en comparaison des indicateurs indiqués dans le chapitre 8.1.4 du présent rapport. Le transfert des éléments plus mobiles (bore, sélénium, antimoine) ou d'inventaire significatif (uranium) est plus important. Ainsi, la concentration maximale en situation enveloppe dans l'eau de l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » est (i) inférieure à la NQE du bore (1 500 µg/L) ou à celle de l'antimoine (10 µg/L), (ii) supérieure à celle du sélénium (20 µg/L), d'un facteur 2,5 à 4 selon le concept de stockage, (iii) inférieure à celle de l'uranium (30 µg/L), à l'exception du concept souterrain petit diamètre. Les valeurs maximales du QD vis-à-vis de la voie « ingestion » sont inférieures à 1 pour le bore, très inférieures à 1 pour l'antimoine, supérieures à 1 pour le sélénium (QD de l'ordre de 1 à 4,5 selon le concept de stockage et le type de biosphère), inférieures à 1 (de 0,2 à 0,3) pour l'uranium dans le cas du concept de stockage à

ciel ouvert retenant mieux les éléments sorbés (dont l'uranium), mais supérieures à 1 pour l'uranium dans le cas des concepts de stockage en souterrain, en particulier pour celui de petit diamètre retenant peu les éléments sorbés et conduisant à un QD « ingestion » maximal de 15 à 20.

Enfin, les concentrations maximales en substances toxiques chimiques aux exutoires de surface (rivière, sol contaminé) sont très inférieures aux Normes de Qualité Environnementale.

Marquage en sels de la nappe aquifère

La totalité des sels de la plateforme des déchets radifères est contenue dans quatre familles de déchets représentant environ 50 % du nombre de colis ou d'alvéoles de la plateforme : les déchets issus de l'extraction de terres rares par la société Solvay (RRA (résidus radifères), RSB (résidus solides banalisés), HBTh (hydroxydes bruts de thorium) et les déchets thorium produits à partir de monazite par la société Arkema. La quantité globale de sels de la plateforme des déchets radifères s'élève à près de 550 tonnes de nitrates, 2 000 tonnes de sulfates et 150 tonnes d'ammonium. Les concentrations maximales induites dans la nappe par le transfert en situation enveloppe de ces espèces salines sont, selon les concepts de stockage, de l'ordre de 35 mg/L à 90 mg/L en nitrates, 0,1 mg/L en sulfates (contrôle par l'insolubilisation du sulfate de baryum), et de 1,3 mg/L à 3 mg/L en ammonium. Ainsi, la plateforme de déchets radifères conduirait à un marquage potentiel de la nappe aquifère en nitrates et en ammonium, avec une limite de qualité des eaux brutes de toutes origines utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine fixée respectivement à 100 mg/L pour les nitrates (eaux souterraines) et 4 mg/L pour l'ammonium.

Cas de sensibilité avec élimination des sels

Afin d'apprécier l'influence des sels sur le relâchement et le transfert des radionucléides, un cas de sensibilité correspondant à la suppression de la totalité des sels des déchets de la plateforme radifères et basée sur le traitement des 4 familles citées précédemment, a été traité. Ce cas de sensibilité ne couvre que les impacts radiologiques. Cette hypothèse d'élimination totale des sels conduirait, outre la suppression du marquage de l'aquifère, à une réduction importante de la cinétique de transfert de la plupart des éléments des chaînes de filiation, en lien avec la suppression de l'effet de la perturbation saline sur le transfert des solutés dans les matériaux cimentaires et les argiles. Ceci aurait pour effet une réduction importante des débits molaires de ces éléments en sortie d'argile hôte au mur de la couche et des impacts radiologiques associés à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts ». À titre d'exemple, le débit molaire maximal à 50 000 ans au mur de la couche serait réduit d'un facteur 300 pour l'uranium 238 et d'un facteur 200 pour le radium 226 et le plomb 210, et ainsi, la dose maximale à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » associée à l'ensemble des isotopes de la seule chaîne 4N+2, serait réduite d'un facteur proche de 200 ans à 50 000 ans dans le cas du stockage souterrain de grand diamètre (alvéole 6 m). Par contre, le débit molaire maximal à 50 000 ans du protactinium 231 (principal contributeur de la chaîne 4N+3) au mur de la couche et donc la dose maximale associée à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » de l'ensemble des isotopes de la chaîne 4N+3 ne seraient quasiment pas réduits.

Au global (cf. Tableau 8-2), le traitement des déchets radifères (cas avec élimination des sels) conduirait à une réduction de la dose cumulée maximale (tous radionucléides), incluant l'ensemble des isotopes des chaînes de filiation, d'environ un facteur 15 pour le stockage souterrain de grand diamètre (alvéole 6 m) et un facteur 70 pour le stockage à ciel ouvert. La dose resterait inchangée pour le stockage souterrain de petit diamètre (alvéole 3 m), en lien notamment avec une faible épaisseur de béton et un faible niveau de sorption associé pour les isotopes des chaînes de filiation.

Tableau 8-2 *SEN - situations de référence et enveloppe, déchets radifères (cas avec élimination des sels) : doses maximales cumulées (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale (situation enveloppe) liée au type de biosphère et à la classe d'âge*

Déchets radifères (cas avec élimination des sels)	SEN – période 0 -50 000 ans Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »				
	Situation de référence		Situation enveloppe		
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Plage de variation de la dose maximale (situation enveloppe) liée au type de biosphère et à la classe d'âge
	Principaux radionucléides contributeurs				
Souterrain 6 m	$<10^{-11}$	50 000	0,007	50 000	de 0,0045 mSv/an à 0,007 mSv/an
	^{231}Pa (chaîne 4N+3), ^{234}U, ^{238}U, ^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2)				
Souterrain 3 m	$<10^{-5}$	50 000	1,1 (dose >0,25 mSv/an à partir de 25 000 ans)	50 000	de 0,6 mSv/an à 1,1 mSv/an
	^{234}U, ^{238}U, ^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2), ^{231}Pa (chaîne 4N+3)				
Ciel ouvert	$<10^{-11}$	50 000	0,001	50 000	de 0,0007 mSv/an à 0,001 mSv/an
	^{231}Pa (chaîne 4N+3)				

Déchets de graphite

Les déchets de graphite sont caractérisés par leur inventaire radiologique en carbone 14, et dans une moindre mesure en chlore 36, qui sont deux radionucléides anions à vie longue mobiles dans l'argile. Sous sa forme organique, le carbone 14 est mobile dans les matériaux cimentaires et sous sa forme inorganique, il est fortement retenu par sorption dans les matériaux cimentaires du stockage. Le chlore 36 est mobile dans les matériaux cimentaires en situation enveloppe. Par ailleurs, la seule perturbation chimique concernant la plateforme de déchets de graphite est la perturbation alcaline, qui se révèle sans incidence sur le transfert des anions intrinsèquement mobiles carbone 14 et chlore 36.

En situation enveloppe et sur la période 0 - 50 000 ans, les débits molaires maximaux de ces radionucléides mobiles en sortie d'argile hôte au mur de la couche sont atteints en quelques milliers d'années et sont au plus de l'ordre de 5×10^{-3} mol/an pour le carbone 14 organique et de 3×10^{-3} mol/an pour le chlore 36. En situation de référence, les débits molaires maximaux, atteints en une dizaine de milliers d'années, sont inférieurs d'environ un facteur 7 pour le carbone 14 organique et d'un facteur 5 pour le chlore 36. En situation enveloppe, les débits molaires en sortie d'argile hôte au toit de la couche (concept en souterrain de grand diamètre) ou en sortie de couverture (concept à ciel ouvert) sont

inférieurs à ceux en sortie d'argile hôte au mur de la couche, d'environ trois ordres de grandeur pour le carbone 14 organique et deux ordres de grandeur pour le chlore 36.

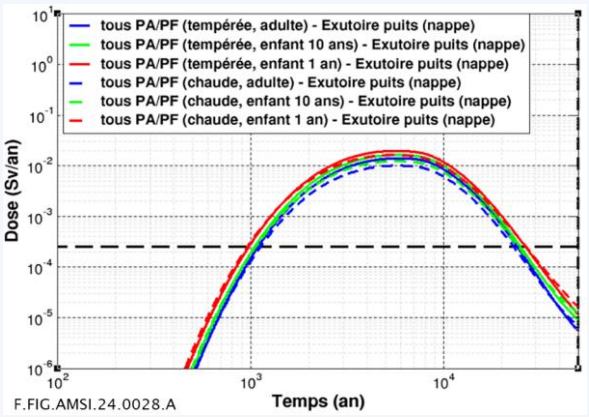
Avec les hypothèses retenues pour évaluer le transfert des radionucléides de l'exutoire jusqu'à l'homme, le maximum du cumul de dose en situation enveloppe sur la période 0 - 50 000 ans dû à l'ensemble des radionucléides hors isotopes des chaînes de filiation est piloté par le carbone 14 organique (90 % du cumul de dose) et dans une moindre mesure par le chlore 36 (10 % du cumul de dose), et il serait d'environ 20 mSv/an et 14 mSv/an pour les concepts de stockage souterrain grand et petit diamètres (alvéole 6 m et 3 m respectivement) et d'environ 38 mSv/an pour le concept de stockage à ciel ouvert (cf. Figure 8-7 et tableau 8-3). La différence d'impact entre les deux stockages souterrains provient de la différence de garde inférieure d'argile (24 m *versus* 27 m, cf. Chapitre 8.2.1.2 du présent rapport), imputable à une différence de la taille de l'alvéole, donc de l'extension de la zone mécaniquement perturbée. L'impact plus important pour le stockage à ciel ouvert provient du gradient de charge hydraulique induit dans la garde inférieure, plus élevé que pour un stockage souterrain. Les occurrences des doses maximales sont de l'ordre de quelques milliers d'années : de 3 000 ans (concept à ciel ouvert) à 5 500 ans ou 7 000 ans (concepts en souterrain grand et petit diamètres). Le maximum du cumul de dose, piloté par le carbone 14 organique, est obtenu à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour la classe d'âge enfant de 1 an en biosphère tempérée. Les doses cumulées maximales obtenues en situation de référence sont globalement 6 à 7 fois inférieures à celles obtenues en situation enveloppe avec une occurrence temporelle plus tardive, mais elles restent néanmoins significativement supérieures à l'objectif de protection de 0,25 mSv/an. La variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 2 quels que soient le concept de stockage et la situation (référence, enveloppe), en lien direct avec la sensibilité globale modérée du carbone 14 (principal radionucléide contributeur à l'impact sous sa forme organique) au transfert dans la biosphère. Enfin, en comparaison, les doses maximales obtenues aux deux exutoires de surface (rivière, sol contaminé) sont au maximum de l'ordre du µSv/an pour le carbone 14 organique (exutoire rivière piloté par la voie « ingestion de poissons » pour ce radionucléide) et de la dizaine de µSv/an pour le chlore 36 (exutoire sol contaminé).

Du fait d'un faible inventaire en radioéléments des quatre chaînes de filiation (4N, 4N+1, 4N+2, 4N+3), les débits molaires en sortie d'argile hôte au mur de la couche à 50 000 ans de l'ensemble des isotopes de ces chaînes sont faibles, et par conséquent, les doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » en situation enveloppe sont également faibles pour tous les concepts de stockage, variant de 6×10^{-4} mSv/an (concept de stockage à ciel ouvert) à 3×10^{-3} mSv/an (concept de stockage en souterrain petit diamètre).

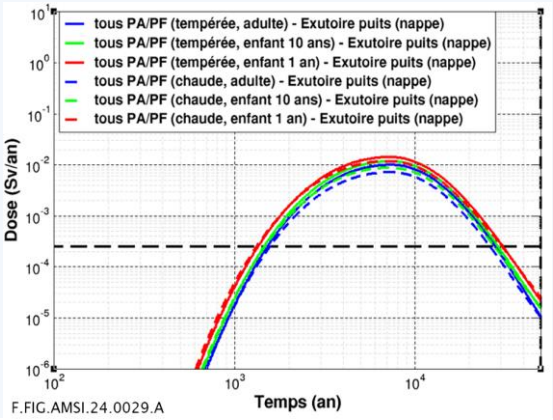
SEN (situation enveloppe) - Déchets de graphite

Historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »

Concept de stockage souterrain (alvéole 6 m)



Concept de stockage souterrain (alvéole 3 m)



Concept de stockage à ciel ouvert

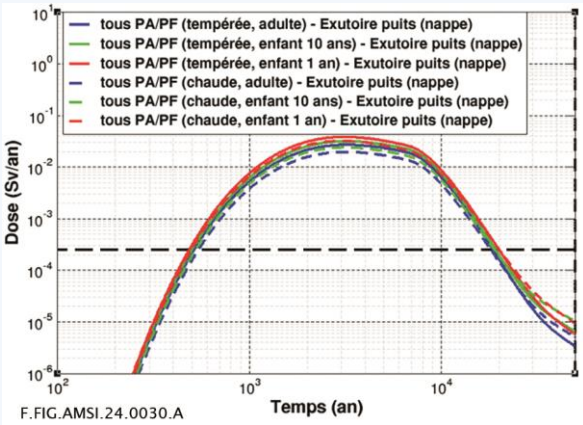


Figure 8-7 *SEN - situation enveloppe, déchets de graphite, tous radionucléides (hors chaînes de filiation) : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Tableau 8-3 *SEN - situations de référence et enveloppe, déchets de graphite : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge*

Déchets de graphite	SEN – période 0 -50 000 ans Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »				
	Situation de référence		Situation enveloppe		Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	
	Principaux radionucléides contributeurs				
Souterrain 6 m	3 (dose >0,25 mSv/an à partir de 3 000 ans)	10 000	20 (dose >0,25 mSv/an à partir de 1 000 ans)	5 500	Référence : de 1,4 mSv/an à 3 mSv/an Enveloppe : de 10 mSv/an à 20 mSv/an
	^{14}C organique (~90 % du cumul) et ^{36}Cl (~10 % du cumul)				
Souterrain 3 m	2 (dose >0,25 mSv/an à partir de 4 000 ans)	12 000	14 (dose >0,25 mSv/an à partir de 1 300 ans)	7 000	Référence : de 0,9 mSv/an à 2 mSv/an Enveloppe : de 7,1 mSv/an à 14 mSv/an
	^{14}C organique (~90 % du cumul) et ^{36}Cl (~10 % du cumul)				
Ciel ouvert	7 (dose >0,25 mSv/an à partir de 1 600 ans)	7 500	38 (dose >0,25 mSv/an à partir de 500 ans)	3 000	Référence : de 3,5 mSv/an à 7 mSv/an Enveloppe : de 19,5 mSv/an à 38 mSv/an
	^{14}C organique (~90 % du cumul) et ^{36}Cl (~10 % du cumul)				

Au moment de la réalisation des évaluations, les expérimentations de lixiviation des empilements étaient encore en cours et les évaluations se sont ainsi appuyées sur les données alors disponibles, donc majorantes. Suite à l'arrêt des expérimentations, il a été évalué l'effet d'une légère diminution du taux de relâchement du carbone 14 (cf. Chapitre 10.7 du présent rapport).

Du fait d'un faible inventaire en substances toxiques chimiques, les concentrations maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » sont faibles pour tous les concepts de stockage et donc inférieures aux Normes de Qualité Environnementale (NQE) pour toutes les substances toxiques chimiques. Il en est *a fortiori* de même pour les concentrations maximales aux exutoires de surface (rivière, sol contaminé), en lien avec des débits molaires plus faibles qu'au mur de la couche.

Déchets bitumés

Les déchets bitumés sont caractérisés par leur inventaire radiologique en sélénium 79, et dans une moindre mesure en iode 129 et en chlore 36, qui sont trois radionucléides anions à vie longue mobiles dans l'argile. En outre, ces trois radionucléides sont également mobiles dans les matériaux cimentaires en situation enveloppe.

En situation enveloppe et sur la période 0 – 50 000 ans, les débits molaires maximaux de ces radionucléides mobiles en sortie d'argile hôte au mur de la couche sont atteints en quelques milliers d'années, et sont au plus de l'ordre de 7×10^{-4} mol/an pour le sélénium 79, de 6×10^{-3} mol/an pour l'iode 129 et de 4×10^{-4} mol/an pour le chlore 36. En situation de référence, les débits molaires maximaux, atteints en une dizaine de milliers d'années, sont inférieurs d'environ un facteur 3 à 4. En situation enveloppe, les débits molaires en sortie d'argile hôte au toit de la couche (concept en souterrain de grand diamètre) ou en sortie de couverture (concept à ciel ouvert) sont inférieurs à ceux en sortie d'argile hôte au mur de la couche, d'environ trois ordres de grandeur pour le sélénium 79 et deux ordres de grandeur pour l'iode 129 et le chlore 36.

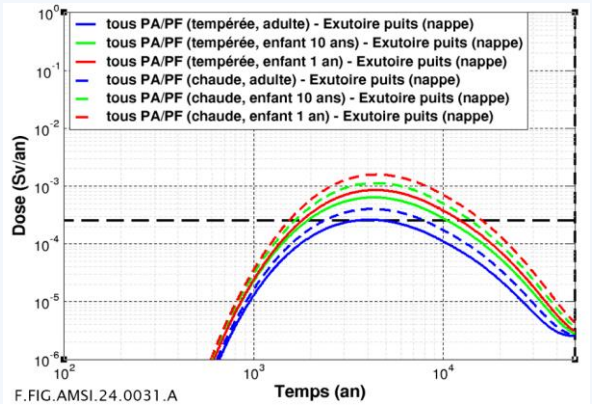
Avec les hypothèses retenues pour évaluer le transfert des radionucléides de l'exutoire jusqu'à l'homme, le maximum du cumul de dose en situation enveloppe sur la période 0 - 50 000 ans dû à l'ensemble des radionucléides hors isotopes des chaînes de filiation est piloté par le sélénium 79 (77 % du cumul de dose) et dans une moindre mesure par le chlore 36 (12 % du cumul de dose) et l'iode 129 (11 % du cumul de dose), et il serait d'environ 1,6 mSv/an et 1,2 mSv/an pour les concepts de stockage souterrain grand et petit diamètres (alvéole 6 m et 3 m respectivement) et d'environ 3,2 mSv/an pour le concept de stockage à ciel ouvert (cf. Figure 8-8 et tableau 8-4). A l'*instar* des déchets de graphite, la différence entre les valeurs d'impact des stockages souterrains est due à la différence d'épaisseur de garde inférieure et l'impact plus important du stockage à ciel ouvert est associé à un gradient de charge hydraulique induit plus élevé dans la garde inférieure. Les occurrences du maximum du cumul de dose sont de l'ordre de quelques milliers d'années : de 2 500 ans (concept à ciel ouvert) à 4 500 ans ou 6 000 ans (concepts en souterrain grand et petit diamètres). Le maximum du cumul de dose, piloté par le sélénium 79, est obtenu à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour la classe d'âge enfant de 1 an en biosphère chaude. Les doses cumulées maximales obtenues en situation de référence sont environ trois fois inférieures à celles obtenues en situation enveloppe avec une occurrence temporelle plus tardive, mais elles restent supérieures à l'objectif de protection de 0,25 mSv/an. La variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 6 quels que soient le concept de stockage et la situation (référence, enveloppe), en lien direct avec la forte sensibilité globale du sélénium 79 (principal radionucléide contributeur à l'impact) au transfert dans la biosphère. Enfin, en comparaison, les doses maximales obtenues aux deux exutoires de surface (rivière, sol contaminé) sont au maximum de l'ordre du μSv/an pour les trois radionucléides mobiles contribuant au cumul de dose.

En situation enveloppe, les débits molaires en sortie d'argile hôte au mur de la couche à 50 000 ans de l'ensemble des isotopes des quatre chaînes de filiation (4N, 4N+1, 4N+2, 4N+3) conduisent à des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » de l'ordre de 0,15 mSv/an (concept de stockage à ciel ouvert), 0,1 mSv/an (concept de stockage en souterrain grand diamètre) et 0,26 mSv/an (concept de stockage en souterrain petit diamètre).

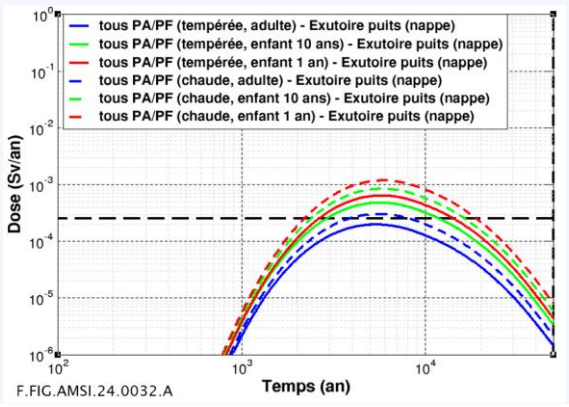
SEN (situation enveloppe) - Déchets bitumés

Historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »

Concept de stockage souterrain (alvéole 6 m)



Concept de stockage souterrain (alvéole 3 m)



Concept de stockage à ciel ouvert

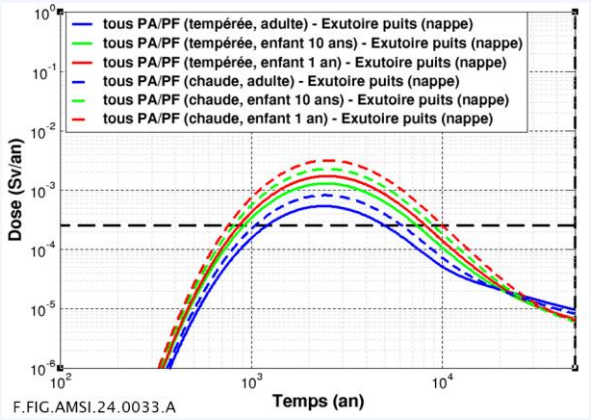


Figure 8-8 *SEN - situation enveloppe, déchets bitumés, tous radionucléides (hors chaînes de filiation) : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Tableau 8-4 *SEN - situations de référence et enveloppe, déchets bitumés : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge*

Déchets bitumés	SEN – période 0 -50 000 ans Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »				
	Situation de référence		Situation enveloppe		Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	
	Principaux radionucléides contributeurs				
Souterrain 6 m	0,5 (dose >0,25 mSv/an à partir de 5 500 ans)	12 000	1,6 (dose >0,25 mSv/an à partir de 1 500 ans)	4 500	Référence : de 0,085 mSv/an à 0,5 mSv/an Enveloppe : de 0,26 mSv/an à 1,6 mSv/an
	^{79}Se (~77 % du cumul), ^{36}Cl (~12 % du cumul) et ^{129}I (~11 % du cumul)				
Souterrain 3 m	0,4 (dose >0,25 mSv/an à partir de 8 000 ans)	15 000	1,2 (dose >0,25 mSv/an à partir de 2 200 ans)	6 000	Référence : de 0,07 mSv/an à 0,4 mSv/an Enveloppe : de 0,2 mSv/an à 1,2 mSv/an
	^{79}Se (~77 % du cumul), ^{36}Cl (~12 % du cumul) et ^{129}I (~11 % du cumul)				
Ciel ouvert	0,9 (dose >0,25 mSv/an à partir de 3 000 ans)	8 000	3,2 (dose >0,25 mSv/an à partir de 750 ans)	2 500	Référence : de 0,15 mSv/an à 0,9 mSv/an Enveloppe : de 0,53 mSv/an à 3,2 mSv/an
	^{79}Se (~77 % du cumul), ^{36}Cl (~12 % du cumul) et ^{129}I (~11 % du cumul)				

A l'*instar* des déchets radifères, la plupart des substances toxiques chimiques présentent des propriétés de sorption élevées dans les argiles et les matériaux cimentaires, et de ce fait, leur transfert est très limité. Ainsi, leurs concentrations maximales aux exutoires sont inférieures aux Normes de qualité environnementale (NQE) et leurs quotients de dangers (QD) et excès de risques individuels (ERI) sont faibles en comparaison des indicateurs indiqués dans le chapitre 8.1.4 du présent rapport. Le transfert des éléments plus mobiles (bore, sélénium, antimoine) ou d'inventaire significatif (uranium) est plus important.

Les concentrations maximales en situation enveloppe dans l'eau de l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » sont inférieures aux NQE du bore (1 500 µg/L), de l'antimoine (10 µg/L) et du sélénium (20 µg/L), et inférieures ou de l'ordre de la NQE de l'uranium (30 µg/L), y compris pour le concept souterrain petit diamètre. Les valeurs maximales du QD vis-à-vis de la voie « ingestion » sont très inférieures à 1 pour le bore et l'antimoine, inférieures à 1 pour le sélénium, inférieures à 1 (de 0,3 à 0,4) pour l'uranium dans le cas du concept de stockage à ciel ouvert retenant mieux les éléments sorbés (dont l'uranium), mais supérieures à 1 pour l'uranium dans le cas des concepts de stockage en

souterrain, en particulier pour celui de petit diamètre retenant peu les éléments sorbés et conduisant à un QD « ingestion » maximal de 10 à 13.

Enfin, les concentrations maximales en substances toxiques chimiques aux exutoires de surface (rivière, sol contaminé) sont très inférieures aux Normes de Qualité Environnementale.

Marquage en sels de la nappe aquifère

La quantité globale de sels de la plateforme des déchets bitumés s'élève à 870 tonnes de nitrates et 1 140 tonnes de sulfates. Les concentrations maximales induites dans la nappe par le transfert en situation enveloppe de ces espèces salines sont, selon les concepts de stockage, de l'ordre de 55 mg/L à 150 mg/L en nitrates et de 70 g/L à 200 mg/L en sulfates. Ainsi, la plateforme de déchets bitumés conduirait à un marquage important de la nappe aquifère en nitrates et en sulfates, avec une limite de qualité des eaux brutes de toutes origines utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine fixée respectivement à 100 mg/L pour les nitrates (eaux souterraines) et 250 mg/L pour les sulfates.

Déchets technologiques

Les déchets technologiques sont caractérisés par leur inventaire radiologique en sélénium 79, en iode 129, et dans une moindre mesure en chlore 36, qui sont trois radionucléides anions à vie longue mobiles dans l'argile. Pour rappel, ces trois radionucléides sont également mobiles dans les matériaux cimentaires en situation enveloppe.

En situation enveloppe et sur la période 0 – 50 000 ans, les débits molaires maximaux de ces radionucléides mobiles en sortie d'argile hôte au mur de la couche sont atteints en quelques milliers d'années, et sont au plus de l'ordre de 3×10^{-4} mol/an pour le sélénium 79, de 2×10^{-2} mol/an pour l'iode 129 et de 6×10^{-4} mol/an pour le chlore 36. En situation de référence, les débits molaires maximaux, atteints en une dizaine de milliers d'années, sont inférieurs d'environ un facteur 3 à 4. En situation enveloppe, les débits molaires en sortie d'argile hôte au toit de la couche (concept en souterrain de grand diamètre) ou en sortie de couverture (concept à ciel ouvert) sont inférieurs à ceux en sortie d'argile hôte au mur de la couche, d'environ trois ordres de grandeur pour le sélénium 79 et deux ordres de grandeur pour l'iode 129 et le chlore 36.

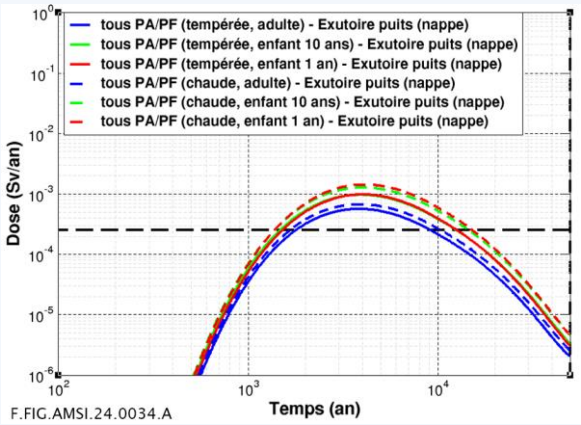
Avec les hypothèses retenues pour évaluer le transfert des radionucléides de l'exutoire jusqu'à l'homme, le maximum du cumul de dose en situation enveloppe sur la période 0 - 50 000 ans dû à l'ensemble des radionucléides hors isotopes des chaînes de filiation est piloté par le sélénium 79 (37 % du cumul de dose) et l'iode 129 (34 % du cumul de dose), et dans une moindre mesure par le chlore 36 (23 % du cumul de dose) et le carbone 14 (6 % du cumul de dose), et serait d'environ 1,4 mSv/an et 1,1 mSv/an pour les concepts de stockage souterrain grand et petit diamètres (alvéole 6 m et 3 m respectivement) et d'environ 3 mSv/an pour le concept de stockage à ciel ouvert (cf. Figure 8-9 et tableau 8-5). Il convient de préciser que plus de 65 % du maximum du cumul de dose des radionucléides mobiles provient de la famille CEA de déchets magnésiens briquetés (qui représente environ 16 % en volume de l'ensemble des déchets technologiques étudiés) et qu'environ 20 % provient de la seule famille de déchets technologiques d'Orano en colis CBF-C'2 (représentant également environ 16 % en volume de l'ensemble des déchets technologiques étudiés). Les occurrences du maximum du cumul de dose sont de l'ordre de quelques milliers d'années : de 2 500 ans (ciel ouvert) à 4 000 ans ou 5 500 ans (concepts en souterrain grand et petit diamètres). Le maximum du cumul de dose, piloté par le sélénium 79 et l'iode 129, est obtenu à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les classes d'âge enfant (1 an, 10 ans) en biosphère chaude. Les doses cumulées maximales obtenues en situation de référence sont environ trois à quatre fois inférieures à celles obtenues en situation enveloppe avec une occurrence temporelle plus tardive, mais elles restent supérieures à l'objectif de protection de 0,25 mSv/an. La variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 2,5 quels que soient le concept de stockage et la situation (référence, enveloppe), en lien avec la sensibilité combinée du sélénium 79 et de l'iode 129 (principaux radionucléides contributeurs à l'impact) au transfert dans la biosphère. Enfin, en comparaison, les doses maximales obtenues aux deux exutoires de surface (rivière, sol contaminé) sont au maximum de l'ordre du µSv/an à quelques µSv/an pour les principaux radionucléides mobiles contribuant au cumul de dose.

En situation enveloppe, les débits molaires en sortie d'argile hôte au mur de la couche à 50 000 ans de l'ensemble des isotopes des quatre chaînes de filiation (4N, 4N+1, 4N+2, 4N+3) conduisent à des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » de l'ordre de 0,04 mSv/an (concept de stockage à ciel ouvert), 0,075 mSv/an (concept de stockage en souterrain grand diamètre) et 0,42 mSv/an (concept de stockage en souterrain petit diamètre).

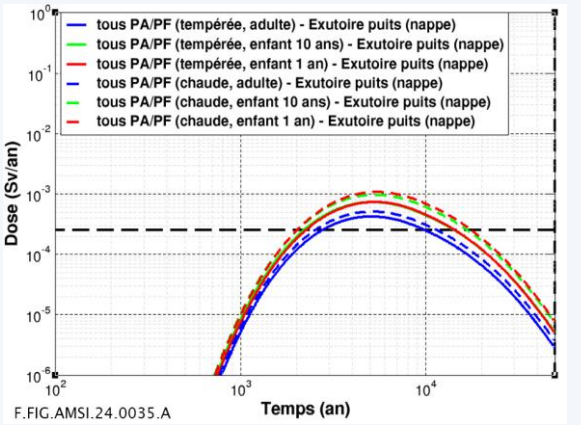
SEN (situation enveloppe) – Déchets technologiques

Historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »

Concept de stockage souterrain (alvéole 6 m)



Concept de stockage souterrain (alvéole 3 m)



Concept de stockage à ciel ouvert

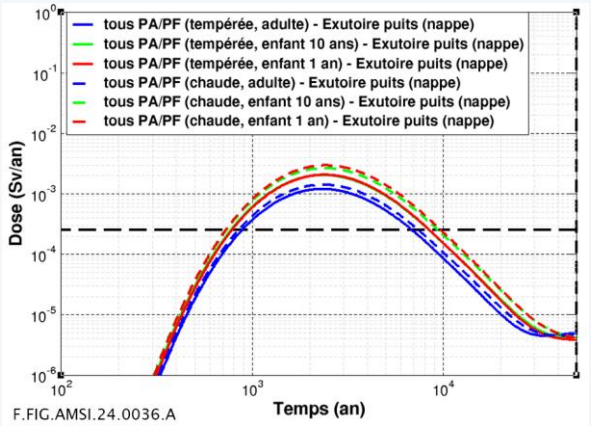


Figure 8-9 *SEN - situation enveloppe, déchets technologiques, tous radionucléides (hors chaînes de filiation) : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Tableau 8-5 *SEN - situations de référence et enveloppe, déchets technologiques : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge*

Déchets technologiques	SEN – période 0 -50 000 ans Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »				
	Situation de référence		Situation enveloppe		Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	
	Principaux radionucléides contributeurs				
Souterrain 6 m	0,45 (dose >0,25 mSv/an à partir de 5 000 ans)	9 500	1,4 (dose >0,25 mSv/an à partir de 1 400 ans)	4 000	Référence : de 0,18 mSv/an à 0,45 mSv/an Enveloppe : de 0,55 mSv/an à 1,4 mSv/an
	^{79}Se (~37 % du cumul), ^{129}I (~34 % du cumul), ^{36}Cl (~23 % du cumul) et ^{14}C (~6 % du cumul)				
Souterrain 3 m	0,35 (dose >0,25 mSv/an à partir de 7 000 ans)	13 000	1,1 (dose >0,25 mSv/an à partir de 2 000 ans)	5 500	Référence : de 0,14 mSv/an à 0,35 mSv/an Enveloppe : de 0,45 mSv/an à 1,1 mSv/an
	^{79}Se (~37 % du cumul), ^{129}I (~34 % du cumul), ^{36}Cl (~23 % du cumul) et ^{14}C (~6 % du cumul)				
Ciel ouvert	0,8 (dose >0,25 mSv/an à partir de 2 500 ans)	6 500	3 (dose >0,25 mSv/an à partir de 700 ans)	2 500	Référence : de 0,35 mSv/an à 0,8 mSv/an Enveloppe : de 1,2 mSv/an à 3 mSv/an
	^{79}Se (~37 % du cumul), ^{129}I (~34 % du cumul), ^{36}Cl (~23 % du cumul) et ^{14}C (~6 % du cumul)				

A l'instar des déchets radifères et bitumés, la plupart des substances toxiques chimiques présentent des propriétés de sorption élevées dans les argiles et les matériaux cimentaires, et de ce fait, leur transfert est très limité. Ainsi, leurs concentrations maximales aux exutoires sont inférieures aux Normes de Qualité Environnementale (NQE) et leurs quotients de dangers (QD) et excès de risques individuels (ERI) sont faibles en comparaison des indicateurs indiqués dans le chapitre 8.1.4 du présent rapport. Le transfert des éléments plus mobiles (bore, sélénium, antimoine) ou d'inventaire significatif (uranium) est plus important. Les concentrations maximales en situation enveloppe dans l'eau de l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » sont inférieures aux NQE du bore (1 500 µg/L), de l'antimoine (10 µg/L) et du sélénium (20 µg/L), et inférieures ou de l'ordre de la NQE de l'uranium (30 µg/L), y compris pour le concept souterrain petit diamètre. Les valeurs maximales du QD vis-à-vis de la voie « ingestion » sont très inférieures à 1 pour le bore et l'antimoine, inférieures à 1 pour le sélénium, inférieures à 1 (de 0,3 à 0,4) pour l'uranium dans le cas du concept de stockage à ciel ouvert et du concept de stockage souterrain grand diamètre, mais supérieures à 1 pour l'uranium dans le cas du concept de stockage

souterrain petit diamètre retenant peu l'uranium et conduisant à un QD « ingestion » maximal de 12 à 15.

Enfin, les concentrations maximales en substances toxiques chimiques aux exutoires de surface (rivière, sol contaminé) sont très inférieures aux Normes de Qualité Environnementale.

Marquage en sels de la nappe aquifère

La totalité des sels de la plateforme des déchets technologiques est contenue dans 6 à 8 familles de déchets représentant environ 60 % du nombre de colis ou d'alvéoles de la plateforme. La quantité globale de sels de la plateforme des déchets technologiques s'élève à 80 tonnes de nitrates et 60 tonnes de sulfates. Les concentrations maximales induites dans la nappe par le transfert en situation enveloppe de ces espèces salines sont, selon les concepts de stockage, de l'ordre de 5 mg/L à 13 mg/L en nitrates et de 4 g/L à 10 mg/L en sulfates. Ainsi, la plateforme de déchets technologique conduirait à un faible marquage de la nappe aquifère en nitrates et en sulfates, inférieur d'environ un ordre de grandeur au marquage induit par les sels des déchets bitumés, avec une limite de qualité des eaux brutes de toutes origines utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine fixée respectivement à 100 mg/L pour les nitrates (eaux souterraines) et 250 mg/L pour les sulfates.

8.2.2 Évaluation de situations d'intrusion humaine involontaire dans le stockage

Le contrôle institutionnel et les dispositions de maintien de la mémoire du stockage et du danger qu'il présente rendent peu plausibles une situation d'intrusion humaine involontaire dans le stockage sans pour autant qu'elle puisse être totalement écartée. Selon les recommandations des orientations générales de l'ASN de 2008, l'Andra se doit d'évaluer les conséquences d'une intrusion involontaire dans le stockage et de s'assurer qu'elles ne soient pas inacceptables. La date de 500 ans a été retenue sur la base du guide ASN n° 1 comme date de première occurrence potentielle d'une intrusion humaine dans le stockage.

Par ailleurs, dans son avis (6), le Groupe Permanent donne une définition des intrusions humaines banales « *Le groupe permanent souligne que le terme « banal » qualifiant l'intrusion humaine englobe tous les types de scénarios liés à une intrusion limitée en profondeur (e.g. résidence, chantier routier, jeux d'enfants) ; il exclut par conséquent le scénario de type « forage profond* ». Le Groupe permanent complète cet avis en indiquant que *« La démonstration de sûreté peut ainsi s'affranchir des scénarios d'intrusion humaine banale si le stockage se situe à une profondeur suffisante.* »

Le groupe permanent estime également « *en cohérence avec les pratiques recommandées à l'international, qu'une profondeur de l'ordre de 30 m devrait être retenue pour représenter de manière conventionnelle les intrusions humaines banales, quelle que soit l'échéance à laquelle elles sont considérées* ».

Dans ce cadre, le choix d'implantation à 30 m de profondeur permet ainsi de se prémunir des intrusions humaines banales de type chantier routier, construction de résidence et jeux d'enfants durant toute la durée de la première phase de vie du centre de 50 000 ans, y compris en considérant une érosion progressive de la couverture. En revanche, une implantation à 30 mètres de profondeur ne permet pas de s'affranchir totalement des risques présentés par la réalisation de forage de faible profondeur de type reconnaissance géotechnique qu'il est usuel de réaliser au préalable d'une construction de bâtiment.

L'Andra s'assure donc que les impacts potentiels associés à la réalisation d'un forage géotechnique traversant le stockage restent dans le domaine acceptable sur toute la durée de la première phase de vie du stockage, soit 50 000 ans en considérant une érosion progressive de la couverture du stockage.

Les scénarios d'intrusion humaine involontaire permettent d'apprécier la compatibilité des activités massiques ou des teneurs en substances toxiques chimiques des familles de déchets avec un stockage à faible profondeur sans pour autant se prononcer sur leur acceptabilité en stockage en regard de leurs inventaires totaux. L'appréciation de la capacité d'accueil du site en termes d'activité totale ou quantité totale en substances toxiques chimiques est évaluée au travers des scénarios mettant en œuvre un transfert par la voie eau (scénario d'évolution normale – cf. Chapitre 8.2.1 du présent rapport).

Les évaluations sont réalisées sur les activités moyennées des déchets ou colis de déchets à l'échelle des familles déclarées par les producteurs. Elles ne peuvent donc rendre compte de la compatibilité de chacun des colis de la famille. Par ailleurs, dans la mesure où l'architecture du stockage n'est pas encore

finalisée, les choix de conditionnement pas totalement arrêtés, les hypothèses sous tendant l'évaluation de ces scénarios d'intrusion humaine involontaire peuvent être amenées à évoluer.

À ce stade, les résultats des évaluations permettront donc d'apporter des éléments de réflexion sur la compatibilité des déchets étudiés dans un centre de stockage à faible profondeur sur la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines selon la logique suivante en distinguant :

- les déchets pour lesquels la compatibilité avec un stockage à faible profondeur, en termes d'activité massique ou teneur en substances toxiques chimiques, est acquise au regard des intrusions humaines involontaires ;
- les déchets pour lesquels un stockage en faible profondeur ne peut pas être envisagé en regard de leurs activités massiques ou de leur teneur en substances toxiques chimiques ;
- les déchets pour lesquels il sera nécessaire de mettre en œuvre des actions d'optimisation (actions constructives par exemple) afin de réduire le niveau d'impact potentiel évalué. Ces actions pourront concerner un tri dans les inventaires candidats de cette étude (exclusion de colis de certaines familles), les modalités de conditionnement des déchets, leur répartition dans le stockage, mais également amener à consolider la caractérisation de l'inventaire radiologique ou en substances toxiques chimiques, et la consolidation de la caractérisation du site d'accueil.

Les résultats de ces évaluations permettront ainsi d'émettre des orientations en termes d'exigences associées à la conception ou vis-à-vis des modalités de conditionnement des déchets.

8.2.2.1 Description des scénarios d'intrusion humaine involontaire traités (hors « voie eau »)

L'évolution géodynamique du site conduit à prendre en compte l'aléa érosif pour définir les scénarios d'intrusion, notamment leur date d'occurrence. En effet, la prise en compte de l'aléa érosif peut conduire à une diminution de l'épaisseur de la couverture du stockage au cours du temps et le rendre ainsi plus vulnérable aux intrusions humaines banales. Dans ce cadre, les scénarios d'intrusion humaine involontaire suivants (cf. Figure 8-10) sont évalués :

- un forage géotechnique ramenant en surface un mélange homogène de déchets et de couverture, suivi de l'implantation d'une résidence sur le terrain contaminé par les déblais du forage ou de jeux d'enfants sur les déblais de forage. Cet évènement est évalué sur la période entre 500 ans et 50 000 ans après la fermeture du stockage ;
- 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 ou de jeux d'enfants. Cet événement est évalué à l'échéance de 50 000 ans après la fermeture du stockage, de manière conservative, en considérant une érosion de 20 m et donc une couverture résiduelle de 10 m d'épaisseur.

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. Pour le scénario « résidence » un apport de sol non contaminé a été pris en compte pour la construction de la résidence.

Les évaluations des SIHI ont été réalisées de manière itérative selon une démarche proportionnée aux enjeux. La première étape de l'évaluation a considéré, de manière simplificatrice, deux teneurs en déchets dans le stockage, conservatives, utilisées dans le rapport d'étape 2015 pour chacune des familles de colis de déchets selon leur mode de conditionnement (vrac ou bloqué). Lorsque ces premiers résultats n'étaient pas compatibles avec les indicateurs de protection, alors une deuxième évaluation a été menée se basant sur des données plus réalistes de teneurs en déchets fondées sur les déclarations des producteurs et leurs choix de conditionnement détaillés. C'est sur la base des derniers résultats évalués que les analyses de compatibilité intrinsèque des déchets avec un stockage à faible profondeur sont menées.

Compte tenu du niveau des conservatismes inhérents au traitement des scénarios et des incertitudes sur les inventaires en substances toxiques chimiques et les spéciations retenues pour mener les évaluations, les résultats d'évaluation d'impact sanitaire associés à la présence de substances toxiques chimiques ne seront pas retenus à ce stade comme seuls indicateurs pour juger de la bonne orientation du déchet dans la filière. Ce choix se rapporte, notamment, au cas particulier des familles qui présenteraient des

résultats d'impact radiologique compatibles avec les indicateurs de protection, mais dont les résultats d'évaluation d'impact sanitaire associés aux substances toxiques chimiques, eux, ne le seraient pas.

Le scénario « chantier routier » a été traité en considérant deux cas de figure. Le premier cas considère les déchets répartis en mélange à l'échelle de la plateforme de stockage pour la typologie de déchets considérés (graphites, radifères, bitumes et déchets technologiques). Ce cas nous permet de démontrer la robustesse de la démonstration de sûreté du stockage au regard des intrusions humaines involontaires vis-à-vis des inventaires moyennés à l'échelle de la typologie de déchets.

Le deuxième cas, évalue l'impact associé à chaque famille considérée seule dans le stockage. Cette hypothèse n'est pas représentative d'un remplissage réaliste car le volume de certaines familles n'est pas en mesure de remplir une longueur d'alvéole. Les impacts évalués de cette façon permettent d'identifier les points chauds éventuels et peuvent conduire à établir des règles de répartition dans le stockage.

Concernant l'évaluation de la concentration en radon dans l'habitation (scénario résidence à la suite d'un forage ou d'un chantier routier), deux cas de calculs ont été étudiés, le premier prend en compte une atténuation de 80 % apportée par la dalle en béton de l'habitation tandis que le second cas considère que la totalité du flux d'exhalaison de radon provenant du sol pénètre directement dans l'habitation.

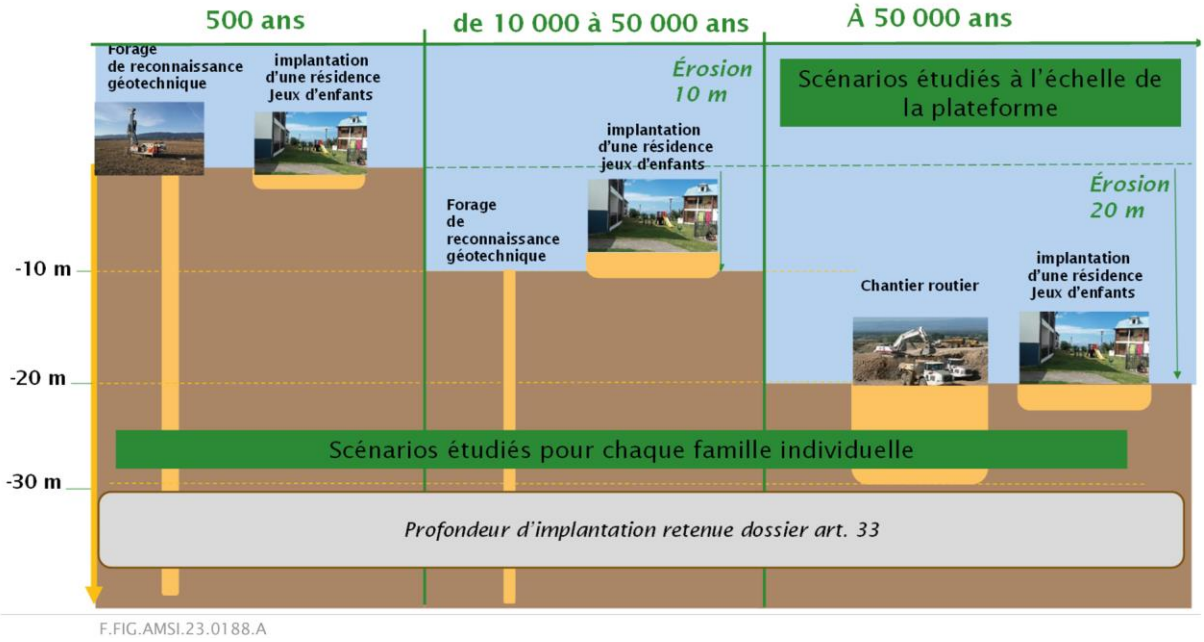


Figure 8-10 Illustration des scénarios d'intrusion humaine involontaire étudiés

8.2.2.2 Résultats des évaluations des scénarios d'intrusion humaine involontaire

Des conservatismes sont associés à ces scénarios qu'il nous paraît pertinent de souligner :

- il n'est pas considéré de transfert par la voie eau des solutés en amont des scénarios afin de couvrir les incertitudes sur le taux de saturation du stockage. Ce choix conservatif tend à maximiser la quantité d'activité et de substances toxiques chimiques présentes dans le stockage ;
- à ce stade de la conception du stockage, les épaisseurs de matériaux inactifs entre les alvéoles de stockage n'ont pas été prises en compte pour l'évaluation du scénario « chantier routier ». Ce choix tend également à maximiser la teneur en radionucléides et substances toxiques chimiques dans les matériaux issus du stockage ;

- l'inventaire en substances toxiques chimiques considéré comme disponible à l'inhalation et l'ingestion s'appuie sur les principes suivants :
  - ✓ la totalité de l'inventaire en substances toxiques chimiques est considérée comme disponible à l'inhalation et l'ingestion (stockage considéré à l'état détritique et homogène) ;
  - ✓ l'intégralité des pièces en acier inoxydable ou plomb est considérée comme disponible à l'inhalation et l'ingestion par le groupe de référence hypothétique sans tenir compte de leur épaisseur et de leur cinétique de corrosion ;
  - ✓ l'intégralité de l'inventaire en substances toxiques chimiques disponible à l'inhalation et/ou l'ingestion est considérée comme bioaccessible et biodisponible.

Les évaluations ont été menées pour deux représentations du stockage, une considérant les colis gerbés sur 6 m, correspondant à la configuration de stockage sous couverture remaniée et la configuration souterraine de grand diamètre et l'autre sur 3 m, correspondant à la configuration souterraine de petit diamètre. Les évaluations peuvent donner des impacts plus ou moins élevés selon le caractère plus ou moins dense de l'architecture évaluée. À ce titre, les valeurs d'impact présentées ci-après concernent les architectures comprenant un gerbage des colis sur 6 m de hauteur, ce qui correspond aux valeurs les plus élevées.

Résultats pour la plateforme de déchets radifères

À l'échelle de la plateforme, en considérant un mélange homogène de l'ensemble des déchets radifères, les impacts radiologiques sont faibles et ne dépassent pas 2 mSv/an. La concentration en radon dans l'habitation est inférieure à 100 $Bq.m^{-3}$ et reste de l'ordre de grandeur de la valeur de référence, y compris en considérant que le radier en béton de l'habitation n'atténue en aucune façon le transfert par le sol. Les impacts associés aux substances toxiques chimiques restent dans la gamme des valeurs considérées comme compatibles pour les scénarios d'intrusion humaines involontaire, les principaux contributeurs à l'impact sont l'uranium et le plomb.

Les évaluations menées à l'échelle de chaque famille considérée de manière individuelle conduisent pour la grande majorité des déchets radifères « historiques » à des valeurs d'impact radiologique inférieures ou de l'ordre du $mSv.an^{-1}$. Pour ces familles, les concentrations en radon restent faibles et bien inférieures à la valeur de référence.

Certaines familles en revanche présentent des valeurs d'impact significativement supérieures aux indicateurs de protection. Il s'agit notamment, pour un volume de l'ordre de 660 m^3, des déchets de sulfates de plomb radifères du CEA, initialement catégorisés MA-VL, qui présentent des dépassements tant vis-à-vis des impacts radiologiques que des substances toxiques chimiques. Pour un plus faible volume (de l'ordre de quelques m^3), les déchets de la défense nationale et des colis de regroupements de sources au radium, paratonnerres ou détecteurs incendie, présentent des impacts radiologiques qui dépassent également les indicateurs de protection radiologique. Pour ces familles représentant un volume très faible de colis, il n'a pas été identifié à ce stade, de levier permettant de réduire suffisamment les impacts associés aux scénarios d'intrusion humaine involontaire.

Par ailleurs, les déchets FA-VL de Framatome (site de Jarrie), tout en présentant des résultats d'impact radiologique compatibles avec les indicateurs de protection, induisent toutefois des impacts sanitaires associés à la toxicité chimique de l'uranium, significativement supérieurs aux objectifs de protection. Compte tenu des conservatismes associés à l'évaluation des impacts sanitaires des substances toxiques chimiques rappelés ci-dessus (cf. Également chapitre 8.2.2.1 du présent rapport), des études sont nécessaires pour réduire les incertitudes associées à ces évaluations d'impact, avant de pouvoir se prononcer sur le caractère compatible avec la faible profondeur de cette famille de déchets.

Résultats pour la plateforme de déchets de graphite

À l'échelle de la plateforme, en considérant un mélange homogène de l'ensemble des déchets de graphite, les impacts radiologiques sont faibles et ne dépassent pas 1 mSv/an. La concentration en radon est également très faible (inférieure à 1 $Bq.m^{-3}$). Les impacts associés aux substances toxiques chimiques sont également très faibles et bien inférieurs aux indicateurs de protection.

Les évaluations menées à l'échelle de chaque famille considérée de manière individuelle conduisent pour la totalité des empilements et chemises des réacteurs UNGG du CEA et d'EDF à des résultats compatibles avec les objectifs de protection et bien inférieurs à ces objectifs pour la grande majorité d'entre eux.

Compte tenu des niveaux d'activité massique plus élevés en plutonium 239, plutonium 240 et américium 241, deux familles de déchets issus d'opérations d'assainissement et de démantèlement des ateliers de l'usine UP2-400 d'Orano La Hague dans laquelle des combustibles UNGG ont été traités (déchets de faible granulométrie du silo 115 et dépôt de fond de fosse 211) présentent des valeurs d'impacts radiologiques supérieures aux indicateurs de protection. La teneur en uranium conduit également à des dépassements des indicateurs de protection pour les impacts associés à sa composante toxique chimique pour la famille de déchets de faible granulométrie du silo 115.

Pour la famille de déchets de faible granulométrie du silo 115, Orano a apporté des éléments complémentaires susceptibles de modifier les présents résultats et qui, à ce titre, justifieraient de mener de nouvelles évaluations.

Pour la famille de déchets de dépôts de fond de fosse 211, dont les résultats ne sont pas compatibles à ce stade avec les indicateurs de protection, des caractérisations complémentaires sont prévues pour préciser les caractéristiques radiologiques de ces déchets dans la mesure où les déchets n'ont pas encore été repris ni conditionnés.

Résultats pour la plateforme de déchets bitumés

À l'échelle de la plateforme, en considérant un mélange homogène de l'ensemble des déchets bitumés, les impacts radiologiques ne dépasseraient pas 2 mSv/an pour toutes les configurations de stockage étudiées. La concentration en radon dans l'habitation reste par ailleurs inférieure à 100 $Bq.m^{-3}$, y compris en considérant une absence totale d'atténuation apportée par le radier en béton. L'impact sanitaire associée à la composante chimique de l'uranium présente un léger dépassement de la valeur visée du QD de 1 mais reste inférieure à la valeur maximale tolérée de 5.

Les évaluations menées à l'échelle de chaque famille considérée de manière individuelle conduisent à des impacts maximaux inférieurs à 10 mSv/an et des impacts sanitaires associés à la présence de substances toxiques chimiques en deçà des valeurs maximales tolérées. Ces valeurs sont toutes inférieures à l'indicateur de protection de 20 mSv/an.

Résultats pour la plateforme de déchets technologiques

À l'échelle de la plateforme, en considérant un mélange homogène de l'ensemble des déchets technologiques, les impacts radiologiques obtenus sont tous inférieurs à 5 mSv/an, et donc à l'indicateur de protection de 20 mSv/an et la concentration en radon est faible, inférieure à 100 $Bq.m^{-3}$. Les impacts sanitaires associés aux substances toxiques chimiques sont supérieurs aux indicateurs de protection, notamment vis-à-vis du quotient de danger relatif à l'inhalation de l'uranium, du nickel et du chrome. Compte tenu des incertitudes citées *supra*, des études sont nécessaires pour réduire les incertitudes associées à ces évaluations d'impact avant de pouvoir se prononcer sur cette base sur le caractère compatible avec la faible profondeur des familles de déchets concernées.

La famille des déchets technologiques d'Orano conditionnés en CBF-C'2 est constituée en partie de déchets déjà étudiés dans le cadre du rapport d'étape 2015 (1) (« FA-VL historiques ») et de nouveaux déchets anciennement catégorisés « MA-VL » pour l'autre partie. Pour cette famille concernant 4 144 m^3 de déchets conditionnés, les résultats d'impact radiologique ne dépassent pas 6 mSv/an et sont donc compatibles avec un stockage en faible profondeur. Les évaluations des impacts sanitaires associés aux substances toxiques chimiques présentent des résultats élevés pour le chrome et le nickel mais ne sont

pas suffisants, à ce stade des connaissances acquises, pour écarter ces déchets du périmètre du DOS ; des études seront nécessaires pour réduire le champ des incertitudes sur le sujet.

Les autres déchets étudiés étaient initialement catégorisés MA-VL. Parmi ceux-ci, les 3 429 m^3 de déchets de procédé cimentés du CEA présentent des résultats compatibles avec les indicateurs de protection. Pour les déchets de certaines familles du CEA (déchets divers alpha Pu conditionnées en fûts de 870 L, déchets divers conditionnés en fûts de 500 L, les concentrats ou boues cimentées en fûts de 500 L), les résultats d'impact radiologiques sont incompatibles avec les indicateurs de protection. D'autres familles de déchets du CEA, conditionnées en caisson à parois pleines (les concentrats d'évaporation, les déchets métalliques produits après 1994, les boues de filtration bitumées, déchets divers alpha, les déchets bloqués ciment-bitume, les déchets de concentrats bloqués dans des liants ciment-bitume) présentent des résultats d'évaluation d'impact radiologique compatibles avec un stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS.

D'autres déchets présentent des impacts radiologiques inférieurs à 20 mSv/an mais des impacts toxicologiques jugés élevés, en raison de la présence de chrome, de nickel et/ou d'uranium en forte quantité dans leur composition ; c'est le cas de certains déchets métalliques du CEA et des déchets d'Orano conditionnés en coque amiante/ciment (déchets CAC). Comme indiqué *supra*, des études pourraient permettre notamment de préciser les effets de ces substances toxiques chimiques au travers de la prise en compte de leur bioaccessibilité et biodisponibilité, afin de confirmer ou non leur caractère compatible avec le stockage.

8.2.2.3 Cas particulier du scénario de forage traversant le stockage en vue de l'exploitation en eau de l'aquifère sous-jacent (forage « voie eau »)

Le scénario considère l'hypothèse d'un forage traversant le stockage jusqu'à atteindre l'aquifère des Sables verts qui serait exploité puis abandonné. Ce forage va provoquer un court-circuit de la barrière géologique et constituer ainsi un chemin préférentiel pour le transfert des solutés vers la nappe. Un autre forage est réalisé à l'aval hydraulique de l'alvéole et l'eau pompée est utilisée à des fins domestiques dans le cadre d'un groupe de référence hypothétique de type villageois. L'hypothèse retenue est que le forage ne remet pas en cause l'indépendance hydraulique de chaque alvéole de stockage.

Le terme source potentiel considéré est associé à l'inventaire contenu dans l'alvéole de stockage intercepté par le forage, la concentration dans les colis résultant d'une homogénéisation de l'inventaire à l'échelle de la plateforme, selon le même principe que celui retenu pour l'évaluation du SEN.

Le scénario de forage traversant est évalué sur la base du paramétrage de la situation enveloppe. Le forage est supposé intervenir à 500 ans (date de première occurrence potentielle de l'intrusion) ; il possède un diamètre de 300 mm qui est une valeur conservative correspondant à l'ordre de grandeur habituellement retenu pour des forages visant une profondeur comprise entre 50 m et 100 m. Le forage est représenté comme un milieu poreux avec de fortes propriétés hydro-dispersives (conductivité hydraulique, diffusion) et aucune capacité de rétention géochimique. Comme indiqué dans le chapitre 8.2.1.2 du présent rapport (section « Exutoires »), spécifiquement pour ce scénario forage d'occurrence précoce, le transfert des solutés dans la biosphère est pris en compte de manière « dynamique » sur la base de facteurs de conversion biosphère variables dans le temps. Enfin, la conceptualisation retenue pour le scénario forage s'appuie sur une représentation tridimensionnelle détaillée de l'alvéole intercepté par le forage, incluant notamment les colis, le béton entre piles de colis, le remplissage béton de l'alvéole et le forage. À ce stade, il convient de souligner que les résultats de ce scénario de forage exposés ci-après dépendent notamment de la compacité du stockage, spécifique du concept de stockage étudié, se traduisant notamment par le nombre de colis dans la section d'alvéole : de l'ordre de 16 à 20 colis par section d'alvéole dans le cas du concept à ciel ouvert, 4 colis par section d'alvéole dans le cas du concept en souterrain de grand diamètre et 1 colis par section d'alvéole dans le cas du concept en souterrain de petit diamètre.

<u>Déchets radifères</u>

Cas sans élimination des sels

Les doses maximales associées à un forage interceptant un alvéole de stockage de déchets radifères (cas sans traitement des déchets) sont obtenues à « court terme » (peu après 500 ans ou autour du millier

d'années) et pilotées pour l'essentiel par le radium 226 et le plomb 210 (chaîne 4N+2) contenus initialement à plus de 75 % dans les deux familles de sulfates de plomb radifères, qui représentent moins d'1 % du volume de déchets conditionnés de la plateforme des déchets radifères. Le maximum du cumul de dose obtenu est supérieur à l'objectif de 20 mSv/an retenu pour les scénarios d'intrusion de type forage : environ 265 mSv/an pour le concept à ciel ouvert et respectivement 50 mSv/an et 24 mSv/an pour les concepts en souterrain de grand et petit diamètre (cf. Partie haute du tableau 8-6). La variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 3 à 4 quel que soit le concept de stockage, en lien avec la sensibilité combinée des isotopes 226 et 228 du radium et du plomb 210 au transfert dans la biosphère. A « moyen terme » ou plus « long terme » (après quelques milliers ou la dizaine de milliers d'années), le cumul de dose se stabilise et n'est plus associé qu'à la contribution du seul radium 228 (produit par filiation du thorium 232 dans la chaîne 4N), avec des niveaux compris entre 15 mSv/an (concepts en souterrain) et 45 mSv/an (concept à ciel ouvert).

Cas avec élimination des sels

Avec un traitement des déchets correspondant à l'élimination de la totalité des sels des quatre familles de déchets concernés (cf. Chapitre 8.2.1.3 du présent rapport, section « *Déchets radifères* »), le maximum du cumul de dose est réduit d'un facteur 2 à un facteur 4,5 par rapport aux résultats indiqués ci-avant (cas sans élimination des sels). Il est ainsi d'environ 60 mSv/an (concept à ciel ouvert) et de 11 mSv/an à 13 mSv/an (concepts en souterrain) (cf. Partie basse du tableau 8-6).

Tableau 8-6 *Scénario de forage traversant le stockage « voie eau » - situation enveloppe, déchets radifères (sans ou avec élimination des sels) : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge*

Déchets radifères	Scénario de forage traversant le stockage « voie eau » Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »		
	Situation enveloppe		
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge
	Principaux radionucléides contributeurs		
Cas sans élimination des sels			
Souterrain 6 m	50	510	de 15,5 mSv/an à 50 mSv/an
	^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2), ^{228}Ra (chaîne 4N)		
Souterrain 3 m	24	510	de 7,5 mSv/an à 24 mSv/an
	^{228}Ra (chaîne 4N), ^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2)		
Ciel ouvert	265	1 300	de 70 mSv/an à 265 mSv/an
	^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2)		
Cas avec élimination des sels			
Souterrain 6 m	13	750	de 4,5 mSv/an à 13 mSv/an
	^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2), ^{228}Ra (chaîne 4N)		
Souterrain 3 m	11	520	de 3,3 mSv/an à 11 mSv/an
	^{228}Ra (chaîne 4N), ^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2)		
Ciel ouvert	60	2 000	de 13 mSv/an à 60 mSv/an
	^{226}Ra et ^{210}Pb (chaîne 4N+2)		

Déchets de graphite

Les doses maximales associées à un forage interceptant un alvéole de stockage de déchets de graphite sont obtenues à 500 ans (date d'occurrence du forage) et pilotées pour l'essentiel (i) par le carbone 14 organique (contenu à environ 60 % dans 3 familles d'empilements d'EDF) et dans une moindre mesure par le molybdène 93 (contenu principalement dans les déchets de chemises EDF et CEA ainsi que dans les familles de déchets des silos 115 et 130 d'Orano) pour le concept à ciel ouvert et le concept en souterrain de grand diamètre, ou (ii) par les isotopes 239 et 240 du plutonium contenus dans les déchets UNGG de La Hague (silos 115 et 130, fonds de fosses) et dans une moindre mesure par le molybdène 93 et le carbone 14 organique pour le concept en souterrain de petit diamètre. Le maximum du cumul de dose obtenu est de l'ordre ou inférieur à l'objectif de 20 mSv/an retenu pour les scénarios d'intrusion de type forage : environ 25 mSv/an pour le concept à ciel ouvert et respectivement 6 mSv/an et 5 mSv/an pour les concepts en souterrain de grand et petit diamètre (cf. Tableau 8-7). La variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 1,5 à 2,5.

Tableau 8-7 *Scénario de forage traversant le stockage « voie eau » - situation enveloppe, déchets de graphite : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge*

Déchets de graphite	Scénario de forage traversant le stockage « voie eau » Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »		
	Situation enveloppe		
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge
	Principaux radionucléides contributeurs		
Souterrain 6 m	6	500	de 4 mSv/an à 6 mSv/an
	^{14}C organique, ^{93}Mo et ^{239}Pu (chaîne 4N+3)		
Souterrain 3 m	5	500	de 2 mSv/an à 5 mSv/an
	^{239}Pu (chaîne 4N+3), ^{240}Pu (chaîne 4N), ^{93}Mo et ^{14}C organique		
Ciel ouvert	25	500	de 17 mSv/an à 25 mSv/an
	^{14}C organique et ^{93}Mo		

Déchets bitumés

Les doses maximales associées à un forage interceptant un alvéole de stockage de déchets bitumés sont obtenues à environ 500 ans ou 700 ans pour les concepts en souterrain, à quelques milliers d'années pour le concept à ciel ouvert, et sont pilotées pour l'essentiel par les isotopes 239 et 240 du plutonium. Le maximum du cumul de dose obtenu est supérieur à l'objectif de 20 mSv/an retenu pour les scénarios d'intrusion de type forage pour le concept à ciel ouvert (environ 46 mSv/an) et inférieur à cet objectif pour les concepts en souterrain de grand et petit diamètre (environ 15 mSv/an) (cf. Tableau 8-8). La variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 1,5 à 2.

Tableau 8-8 *Scénario de forage traversant le stockage « voie eau » - situation enveloppe, déchets bitumés : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge*

Déchets bitumés	Scénario de forage traversant le stockage « voie eau » Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »		
	Situation enveloppe		
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge
	Principaux radionucléides contributeurs		
Souterrain 6 m	15	770	de 10 mSv/an à 15 mSv/an
	^{239}Pu (chaîne 4N+3) et ^{240}Pu (chaîne 4N)		
Souterrain 3 m	14	500	de 10 mSv/an à 14 mSv/an
	^{239}Pu (chaîne 4N+3) et ^{240}Pu (chaîne 4N)		
Ciel ouvert	46	6 000	de 21 mSv/an à 46 mSv/an
	^{239}Pu (chaîne 4N+3) et ^{240}Pu (chaîne 4N)		

Déchets technologiques

Les doses maximales associées à un forage interceptant un alvéole de stockage de déchets technologiques sont obtenues à environ 500 ans pour les concepts en souterrain et quelques milliers d'années pour le concept à ciel ouvert, et sont pilotées pour l'essentiel par les isotopes 239 et 240 du plutonium, contenus à plus de 75 % dans 4 familles de déchets du CEA dont la famille de déchets magnésiens briquetés. Le maximum du cumul du dose obtenu est supérieur à l'objectif de 20 mSv/an retenu pour les scénarios d'intrusion de type forage : environ 84 mSv/an pour le concept à ciel ouvert et environ 45 mSv/an pour les concepts en souterrain de grand et petit diamètre (cf. Tableau 8-9). La variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 1,5 à 2.

Tableau 8-9 *Scénario de forage traversant le stockage « voie eau » - situation enveloppe, déchets technologiques : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge*

Déchets technologiques	Scénario de forage traversant le stockage « voie eau » Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »		
	Situation enveloppe		
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge
	Principaux radionucléides contributeurs		
Souterrain 6 m	45	500	de 33 mSv/an à 45 mSv/an
	^{239}Pu (chaîne 4N+3) et ^{240}Pu (chaîne 4N)		
Souterrain 3 m	43	500	de 30 mSv/an à 43 mSv/an
	^{239}Pu (chaîne 4N+3) et ^{240}Pu (chaîne 4N)		
Ciel ouvert	84	6 000	de 40 mSv/an à 84 mSv/an
	^{239}Pu (chaîne 4N+3) et ^{240}Pu (chaîne 4N)		

8.2.3 Analyse des résultats des évaluations pour la période 0-50 000 ans

8.2.3.1 Analyse des évaluations du scénario d'évolution normale (SEN)

Le scénario d'évolution normale du stockage permet d'obtenir une indication sur la capacité d'accueil du stockage en activité totale.

Les évaluations sont menées en considérant chaque plateforme de stockage de manière indépendante. Les impacts sont ainsi évalués pour les inventaires candidats proposés par les producteurs pour chaque grande typologie de déchets, sans être cumulés à ce stade de l'analyse. À terme, une fois que l'implantation du stockage aura été établie, les impacts des différentes plateformes devront potentiellement être cumulés en fonction de leurs exutoires.

La maîtrise des risques sur le long terme après-fermeture se base sur une représentation du stockage dans les scénarios de sûreté qui permet de couvrir les incertitudes en amont de l'évaluation des indicateurs d'impact sur l'Homme. Dans ce cadre, l'évaluation du SEN intègre notamment la prise en compte d'un stockage en conditions saturées dès le début des évaluations de sûreté ce qui est conservatif et tend à majorer le transfert des solutés selon la voie eau. De ce fait, la phase transitoire hydraulique-gaz est négligée.

Selon la démarche présentée au chapitre 8.1 du présent rapport, le scénario d'évolution normale est décliné en deux situations :

- la situation de référence du SEN qui vise à représenter, d'une part le système de stockage tel qu'envisagé par le concepteur, d'autre part son environnement au regard de la connaissance acquise ;
- la situation enveloppe, dont l'objectif est de majorer le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'à la biosphère. Cette évaluation constitue ainsi une estimation conservative, et robuste vis-à-vis des incertitudes, des impacts en situation d'évolution normale du stockage.

Les évaluations menées pour les différentes options de conception ont permis d'illustrer le rôle des composants cimentaires vis-à-vis de la fonction « limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques ». En effet, pour les éléments présentant une sorption avec ces matériaux, le retard apporté permet de limiter le niveau de l'impact maximal et de le décaler dans le temps. De ce fait, le niveau d'atténuation est ainsi dépendant des épaisseurs de béton présents selon les architectures considérées et les conditionnements considérés. Pour les éléments présentant une forte affinité avec les composants cimentaires, des épaisseurs de béton suffisantes devront être considérées dans les architectures de stockage.

Le cas de sensibilité considérant une puissance de formation hôte plus importante, de l'ordre de la dizaine de mètres, n'a pas mis en évidence d'effet significatif de la hauteur de garde inférieure d'argile sur le transfert des radionucléides mobiles vers le mur de la couche, alors que pour les éléments présentant des propriétés de sorption dans l'argile, une atténuation sensible du transfert a pu être remarquée. Ces éléments pourront être exploités dans le choix des localisations des plateformes de stockage sur la zone restreinte de la CCVS.

Pour les déchets de graphite, bitumés et technologiques, l'indicateur de protection de 0,25 mSv/an est dans certains cas dépassé dès 500 ans après la fermeture du stockage, et jusqu'à environ 30 000 ans en lien avec les radionucléides mobiles à vie longue présents dans ces déchets. En outre, les impacts de ces radionucléides mobiles présentent leur maximum aux mêmes périodes temporelles et doivent donc être cumulés pour être comparés aux objectifs de protection. L'inventaire de l'ensemble des déchets concernés devra donc être réduit, de façon à ce que l'impact total du stockage demeure acceptable.

Pour les déchets radifères, les impacts radiologiques maximaux sont attendus à 50 000 ans, ils seront également à sommer à cette échéance avec les impacts des radionucléides de filiation des autres typologies de déchets, pour être comparés à la limite de dose de 0,25 mSv/an.

L'élimination des sels chimiques contenus dans certaines familles de déchets radifères, permet de réduire de manière très significative, les impacts à 50 000 ans pour les configurations sous couverture remaniée ou souterraine de diamètre 6 m et de ce fait limitent fortement le marquage de la nappe aquifère par les nitrates.

Ainsi, en complément des déchets radifères compatibles avec le stockage, une partie des déchets de graphite, bitumés et technologiques pourra être intégrée à l'inventaire d'étude dans le respect de la contrainte de dose sur la période 0 – 50 000 ans.

8.2.3.2 Analyse des évaluations des scénarios d'intrusion humaines involontaires (SIHI)

SIHI impliquant une exposition directe avec les déchets

Les scénarios d'intrusion humaine involontaire impliquant une exposition (externe, par ingestion ou par inhalation) par des matériaux directement issus du stockage permettent d'obtenir des indications sur le caractère compatible de l'activité massique des déchets avec le stockage sur la CCVS selon l'architecture étudiée. Ainsi, selon le caractère plus ou moins dense de l'architecture, les évaluations peuvent donner des impacts plus ou moins élevés. Ces scénarios ne donnent pas d'indication sur le caractère acceptable de la totalité de l'activité stockée.

Les évaluations ont été réalisées en considérant des hypothèses simplificatrices fondées sur le retour d'expérience des centres existant en matière de remplissage des alvéoles de stockage, considéré à l'identique pour chacune des architectures étudiées. Sur cette base, les impacts sont d'autant plus élevés que la hauteur de gerbage des colis est importante. De ce fait, les configurations présentant une hauteur de stockage de 6 mètres (ciel ouvert et souterrain 6 m) donnent des résultats d'impacts identiques et systématiquement plus élevés que pour la configuration avec une hauteur de gerbage de 3 mètres.

Le niveau des impacts potentiels dépend de trois phénomènes : la décroissance radioactive, la filiation et l'érosion qui diminue l'épaisseur de couverture surplombant le stockage. En effet, selon la période radioactive des radionucléides contenus dans les déchets et leur filiation potentielle, les impacts les plus élevés peuvent se présenter, toutes choses égales par ailleurs :

- à l'échéance la plus courte pour les radionucléides qui décroissent sur la période sans générer de filiations (niobium 94, …) ;
- à l'échéance la plus éloignée pour les radionucléides à vie très longue accompagnés de filiations (uranium 238, thorium 232, …).

L'ensemble des classes d'âge étudiées permet de montrer la sensibilité accrue du public enfant, vis-à-vis des trois voies d'exposition : l'exposition externe (de par sa taille, l'enfant est plus proche du sol), l'inhalation (taux d'empoussièrement plus important du fait des activités en « jeux d'enfant » à l'extérieur) et l'ingestion (la quantité de poussières ingérées est statistiquement plus importante chez les enfants que chez les adultes). En particulier, sont considérés :

- l'enfant de 10 ans du scénario « forage géotechnique » ramenant en surface un mélange homogène de déchets et de couverture, suivi de l'implantation de jeux d'enfants sur les déblais de forage (voie principale d'exposition : exposition externe) ;
- l'enfant de 1 an du scénario « forage géotechnique » ramenant en surface un mélange homogène de déchets et de couverture, suivi de l'implantation d'une résidence sur le terrain contaminé par les déblais du forage (voie principale d'exposition : ingestion de poussières contaminées).

Vis-à-vis des impacts générés par les substances toxiques chimiques, notons que l'inventaire est considéré stable sur toute la période d'évaluation et ne prend pas en compte la cinétique de dégradation des matériaux massifs ainsi que les phénomènes de transfert. Le niveau des impacts constaté est directement corrélé à la teneur en substances toxiques chimiques dans les sols et donc au caractère plus ou moins dense du stockage et de l'épaisseur de couverture résiduelle à la date d'occurrence du scénario.

SIHI impliquant la voie de transfert par l'eau

Le scénario du « forage traversant le stockage en vue de l'exploitation en eau de l'aquifère sous-jacent » a été traité avec le paramétrage de la situation enveloppe qui majore le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques depuis les colis stockés jusqu'à la biosphère. Cette évaluation constitue ainsi une estimation conservative et robuste vis-à-vis des incertitudes, des impacts associés à un forage traversant le stockage.

Ce scénario implique un transfert par la voie eau et permet ainsi d'obtenir des indications sur la capacité d'accueil d'un ouvrage de stockage. Dans ce cadre, plus les ouvrages de stockage sont de grande compacité (exemple des alvéoles de stockage sous couverture remaniée qui présentent un plus grand nombre de colis par section d'alvéole), plus les impacts associés sont élevés.

Ce scénario étant traité dès 500 ans, il ne permet pas de bénéficier de la décroissance radioactive des radionucléides. Il met par ailleurs en évidence, pour les déchets radifères, la forte sensibilité des résultats à la présence de sels pouvant accélérer le transfert des radionucléides au sein de l'alvéole jusqu'au forage.

8.3 Évaluations de sûreté sur la période au-delà de 50 000 ans : évaluations de situations conventionnelles

8.3.1 Description des situations conventionnelles

Comme indiqué *supra* (cf. Chapitre 8.1.3 du présent rapport), les évaluations des situations conventionnelles poursuivent et complètent la démonstration de sûreté lorsque les incertitudes liées à l'évolution géodynamique du stockage deviennent trop importantes. À cet égard, le groupe permanent « *n'a pas d'objection à ce que les incertitudes soient traitées au travers de scénarios qualifiés de conventionnels par l'Andra dès lors qu'ils constituent une évaluation raisonnablement majorante des évolutions potentielles du stockage* » *(6).*

Ces situations conventionnelles permettront de consolider les capacités d'accueil du stockage tant vis-à-vis des activités totales que massiques des colis de déchets, capacités issues de l'analyse réalisée sur la première phase de vie de 50 000 ans du stockage.

C'est dans ce cadre que l'Andra a défini les deux situations conventionnelles suivantes :

- Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides »

  La situation conventionnelle considérant la dégradation de la fonction « limiter le transfert » s'appuie sur le paramétrage de la situation enveloppe du SEN et consiste à dégrader les propriétés de confinement (paramètres de transfert hydro-dispersifs et d'interactions des solutés) des composants argileux du stockage sans que la fonction d'isolement soit perdue, la couverture (en place ou remaniée) demeurant suffisante pour protéger les déchets d'un accès direct à l'homme et l'environnement. L'évaluation est menée de 50 000 ans à 100 000 ans, et poursuivie au besoin jusqu'à l'atteinte des maximas. Les transferts en radionucléides sont évalués en considérant, de manière conservative, une dégradation instantanée à 50 000 ans des propriétés hydro-dispersives nominales pour la couverture résiduelle au-dessus des ouvrages de stockage, qu'elle soit en place ou remaniée, selon les choix suivants :

  - ✓ dégradation de la conductivité hydraulique d'un facteur 100 sur toute l'épaisseur de la couverture résiduelle ;
  - ✓ dégradation du coefficient de diffusion effectif d'un facteur 10 sur cette même épaisseur de couverture résiduelle (selon la logique phénoménologique qui lie la conductivité hydraulique et le coefficient de diffusion, à savoir une évolution du coefficient de diffusion selon la racine carrée de l'évolution de la conductivité hydraulique) ;
  - ✓ aucune dégradation des performances de rétention géochimique, sachant que celle-ci serait modérée si elle advenait, et qu'elle est par ailleurs déjà couverte par les choix sous-tendant la définition de la situation enveloppe.

De manière conservative, cette situation conventionnelle est traitée en se basant sur le paramétrage de la situation enveloppe qui maximise le transfert des solutés et donc le débit molaire en sortie d'argile hôte au mur de la couche. Pour évaluer l'impact potentiel de cette situation, le groupe de référence hypothétique « villageois » associé à l'exutoire puits est retenu (cf. Chapitre 8.2.1.2 du présent rapport).

- Situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler les déchets de l'homme et de l'environnement »

  L'érosion progressive de la couverture (remaniée ou en place) peut conduire à découvrir le stockage et le faire affleurer en surface du sol. Les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de caractériser les conséquences d'une telle érosion sur le stockage de manière précise à ces échelles de temps. De manière très conservative, la situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler » s'appuie sur le cas d'une érosion accélérée conduisant à la mise à nu du stockage.

Le terme source pour cette évaluation est l'activité résiduelle contenue dans les matériaux cimentaires du stockage à 50 000 ans, répartie sur l'ensemble de l'emprise volumique de la plateforme des déchets considérés (hauteur de stockage comprenant les composants cimentaires multipliée par l'emprise horizontale de la plateforme). Dans ce cadre, les activités des radionucléides ayant migré, soit dans la garde inférieure d'argile, soit dans la couverture (naturelle ou remaniée), ne sont pas prises en compte pour la définition du terme source. Enfin, il est considéré un apport de sol non contaminé à l'*instar* de ce qui est considéré dans le cadre des scénarios d'intrusion humaine involontaire pour l'implantation d'une résidence.

De manière conservative, cette situation conventionnelle est traitée en se basant sur le paramétrage de la situation de référence qui maximise le terme source résiduel dans le stockage à 50 000 ans (cf. Précision apportée au chapitre 8.2.1 du présent rapport).

Pour évaluer l'impact potentiel de cette situation, le groupe de référence hypothétique « multi-activités » associé à l'exutoire sol contaminé est retenu (cf. Chapitre 8.2.1.2 du présent rapport).

8.3.2 Résultats des situations conventionnelles

Déchets radifères

Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides »

Pour les déchets radifères dans le cas sans élimination des sels (cf. Figure 8-11 et la partie gauche du tableau 8-10), le maximum du cumul de dose à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » de l'ensemble des actinides en situation enveloppe est obtenu au-delà de la centaine de milliers d'années (jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années pour le concept à ciel ouvert), associé à l'enfant de 1 an et pour l'essentiel piloté par les deux isotopes de fin de chaîne 4N+2 (radium 226 (50 % du cumul), plomb 210 (30 % du cumul)) ; le maximum du cumul de dose est de l'ordre de 0,6 mSv/an pour le concept à ciel ouvert, 1 mSv/an pour le concept souterrain de grand diamètre et 4 mSv/an pour le concept souterrain de petit diamètre. La différence de résultat est en grande partie liée à la plus ou moins grande épaisseur de béton dans chacune des architectures étudiées, offrant une rétention plus ou moins importante des radionucléides concernés.

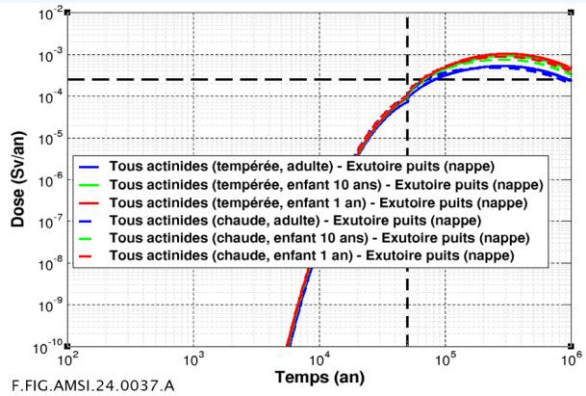
Enfin, la variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 2, en lien avec la sensibilité combinée du radium 226 et du plomb 210 au transfert dans la biosphère.

Dans le cas d'une absence totale de sels dans les déchets radifères et sur la base de la réduction de certains débits molaires et des niveaux d'impacts associés sur la période 0 – 50 000 ans dans ce cas, il est possible d'extrapoler que les doses maximales obtenues au-delà de 50 000 ans en situation enveloppe seraient en principe significativement plus faibles que celles indiquées ci-avant (cas sans traitement des déchets), à l'exception du concept de stockage souterrain de petit diamètre présentant une faible épaisseur de béton et pour lequel la dose maximale resterait similaire à celle obtenue dans le cas sans élimination des sels.

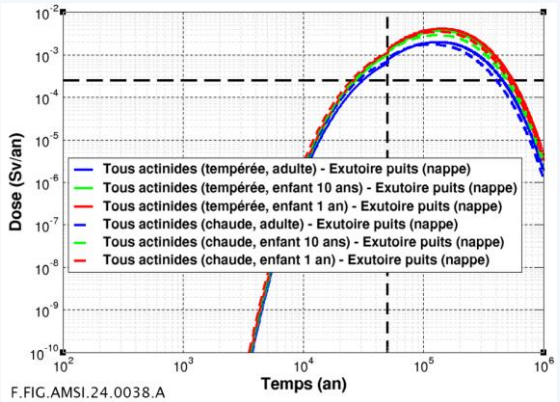
Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » (situation enveloppe) - Déchets radifères (cas sans élimination des sels)

Historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »

Concept de stockage souterrain (alvéole 6 m)



Concept de stockage souterrain (alvéole 3 m)



Concept de stockage à ciel ouvert

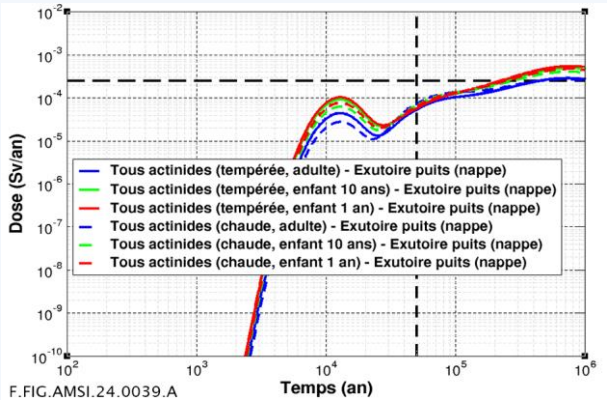


Figure 8-11 *Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » - situation enveloppe, déchets radifères (cas sans élimination des sels), tous actinides : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler les déchets »

Pour les déchets radifères dans le cas sans élimination des sels (cf. Partie droite du tableau 8-10), le maximum du cumul de dose associé à l'exutoire « sol contaminé » de l'ensemble des actinides et résultant des activités volumiques encore présentes dans le stockage à 50 000 ans, est associé à l'enfant de 1 an et piloté par les isotopes de fin de chaînes (plomb 210 (jusqu'à 60 % du cumul selon le concept) et/ou radium 228 (jusqu'à 75 % du cumul selon le concept), radium 226 dans une moindre mesure) ; le maximum du cumul de dose est de l'ordre de 16,5 mSv/an pour le concept à ciel ouvert, 3,5 mSv/an pour le concept souterrain de grand diamètre et 0,75 mSv/an pour le concept souterrain de petit diamètre.

La dose maximale associée au concept souterrain de petit diamètre est plus faible que celle du concept souterrain de grand diamètre, du fait d'un inventaire restant dans le stockage à 50 000 ans nettement plus faible, pour un volume de stockage quasi-identique entre les deux concepts souterrains. La dose

maximale associée au concept à ciel ouvert est environ cinq fois plus élevée que celle du concept souterrain de grand diamètre, du fait d'une compacité plus importante (facteur 4,5 environ), pour un inventaire restant dans le stockage à 50 000 ans similaire entre les deux concepts.

Enfin, la variabilité de la dose maximale liée à la seule classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an) est d'environ un facteur 2,5, en lien avec la sensibilité combinée du radium 228 et du plomb 210 au transfert dans la biosphère.

Dans le cas d'une absence totale de sels dans les déchets radifères, les transferts sur la période temporelle de 0 an à 50 000 ans étant réduits, le terme source résiduel dans le stockage à 50 000 ans serait légèrement majoré, mais relativement peu différent du terme source résiduel obtenu dans le cas avec présence des sels, du fait d'une rétention dans le béton qui reste significative même en présence de sels. Ceci conduirait ainsi à une augmentation des doses de l'ordre de la quinzaine de pourcents tout au plus.

Tableau 8-10 *Situations conventionnelles post-50 000 ans, déchets radifères (cas sans élimination des sels) : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales aux exutoires « puits de pompage dans les Sables verts » ou « sol contaminé » (selon la situation conventionnelle), pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et/ou à la classe d'âge*

Déchets radifères (cas sans élimination des sels)	Situations conventionnelles – période post-50 000 ans				
	Altération de la fonction « limiter le transfert » (situation enveloppe) Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »			Altération de la fonction « isoler les déchets » (situation de référence) Exutoire « sol contaminé »	
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge	Dose cumulée tous radionucléides à 50 000 ans (mSv/an)	Plage de variation de la dose maximale liée à la classe d'âge
	Principaux radionucléides contributeurs			Principaux radionucléides contributeurs	
Souterrain 6 m	1	300 000	de 0,5 mSv/an à 1 mSv/an	3,5	de 1,4 mSv/an à 3,5 mSv/an
	^{226}Ra (50 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{210}Pb (60 % du cumul) et ^{228}Ra (25 % du cumul)	
Souterrain 3 m	4	140 000	de 1,7 mSv/an à 4 mSv/an	0,75	de 0,3 mSv/an à 0,75 mSv/an
	^{226}Ra (50 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{228}Ra (75 % du cumul) et ^{228}Th (7 % du cumul)	
Ciel ouvert	0,6	750 000	de 0,26 mSv/an à 0,6 mSv/an	16,5	de 6,5 mSv/an à 16,5 mSv/an
	^{226}Ra (50 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{210}Pb (62 % du cumul) et ^{228}Ra (23 % du cumul)	

Déchets de graphite

Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides »

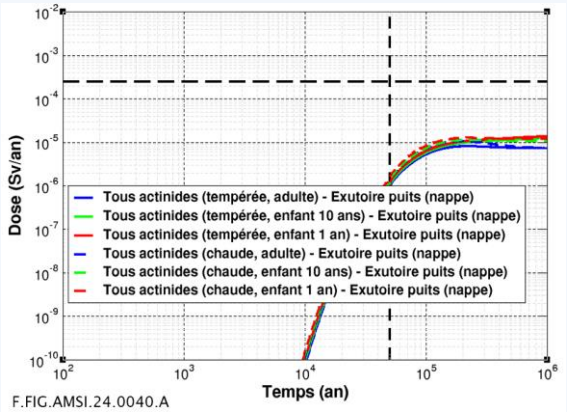
Pour les déchets de graphite (cf. Figure 8-12 et partie gauche du tableau 8-11), le maximum du cumul de dose à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » de l'ensemble des actinides en situation enveloppe est obtenu à plusieurs centaines de milliers d'années, associé à l'enfant de 1 an et pour l'essentiel piloté par les deux isotopes de fin de chaîne 4N+2 (radium 226 (45 % du cumul), plomb 210 (30 % du cumul)) pour les concepts en souterrain et par deux isotopes de la chaîne 4N+1 (neptunium 237 (45 % du cumul), uranium 233 (40 % du cumul)) pour le concept à ciel ouvert ; le maximum du cumul de dose obtenu est faible, de l'ordre de 0,006 mSv/an pour le concept à ciel ouvert, 0,014 mSv/an pour le concept souterrain de grand diamètre et 0,035 mSv/an pour le concept souterrain de petit diamètre.

La variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 1,5 à 2, en lien avec la sensibilité combinée du radium 226 et du plomb 210 ou bien du neptunium 237 et de l'uranium 233, au transfert dans la biosphère.

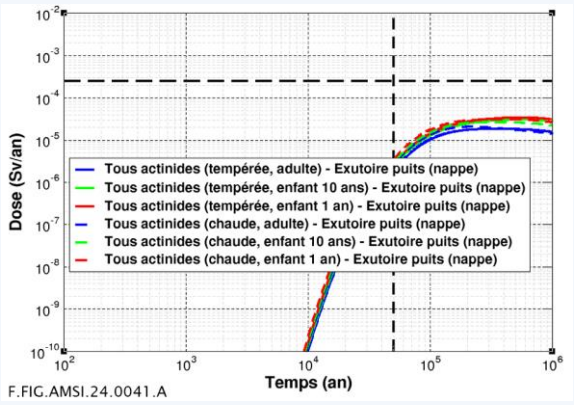
Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » (situation enveloppe) - Déchets de graphite

Historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »

Concept de stockage souterrain (alvéole 6 m)



Concept de stockage souterrain (alvéole 3 m)



Concept de stockage à ciel ouvert

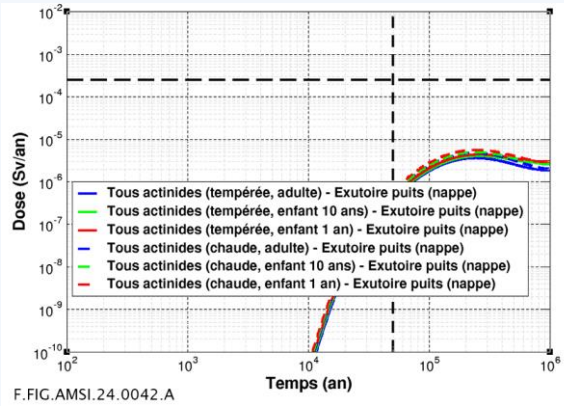


Figure 8-12 *Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » - situation enveloppe, déchets de graphite, tous actinides : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler les déchets »

Pour les déchets de graphite (cf. Partie droite du tableau 8-11), le maximum du cumul de dose associé à l'exutoire « sol contaminé » de l'ensemble des actinides et résultant des activités volumiques encore présentes dans le stockage à 50 000 ans, est indépendant de la classe d'âge et piloté à parts sensiblement égales d'une part par le carbone 14 (sous sa forme inorganique) et le niobium 94 dans une moindre mesure, et d'autre part par deux isotopes des chaînes de filiation (plutonium 239, plomb 210) ; le maximum du cumul de dose est de l'ordre de 0,54 mSv/an pour le concept à ciel ouvert, 0,16 mSv/an pour le concept souterrain de grand diamètre et 0,15 mSv/an pour le concept souterrain de petit diamètre.

Comme pour les déchets radifères, la dose maximale associée au concept à ciel ouvert est significativement plus élevée que celle du concept souterrain de grand diamètre, du fait d'une compacité plus importante (facteur 3 environ), pour un inventaire restant dans le stockage à 50 000 ans similaire entre les deux concepts.

Tableau 8-11 *Situations conventionnelles post-50 000 ans, déchets de graphite : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales aux exutoires « puits de pompage dans les Sables verts » ou « sol contaminé » (selon la situation conventionnelle), pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et/ou à la classe d'âge*

Déchets de graphite	Situations conventionnelles – période post-50 000 ans				
	Altération de la fonction « limiter le transfert » (situation enveloppe) Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »			Altération de la fonction « isoler les déchets » (situation de référence) Exutoire « sol contaminé »	
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge	Dose cumulée tous radionucléides à 50 000 ans (mSv/an)	Plage de variation de la dose maximale liée à la classe d'âge
	Principaux radionucléides contributeurs			Principaux radionucléides contributeurs	
Souterrain 6 m	0,014	1 000 000	de 0,01 mSv/an à 0,014 mSv/an	0,16	de 0,14 mSv/an à 0,16 mSv/an
	^{226}Ra (45 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{14}C inorganique +^{94}Nb (45 % du cumul), ^{239}Pu+^{210}Pb (45 % du cumul)	
Souterrain 3 m	0,035	500 000	de 0,02 mSv/an à 0,035 mSv/an	0,14	de 0,12 mSv/an à 0,14 mSv/an
	^{226}Ra (45 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{14}C inorganique +^{94}Nb (50 % du cumul), ^{239}Pu+^{210}Pb (40 % du cumul)	
Ciel ouvert	0,006	250 000	de 0,0035 mSv/an à 0,006 mSv/an	0,54	de 0,47 mSv/an à 0,54 mSv/an
	^{237}Np (45 % du cumul) et ^{233}U (40 % du cumul)			^{14}C inorganique +^{94}Nb (45 % du cumul), ^{239}Pu+^{210}Pb (45 % du cumul)	

Déchets bitumés

Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides »

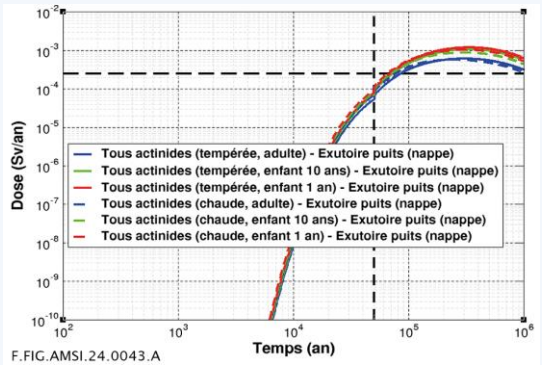
Pour les déchets bitumés (cf. Figure 8-13 et partie gauche du tableau 8-12), le maximum du cumul de dose à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » de l'ensemble des actinides en situation enveloppe est obtenu à plusieurs centaines de milliers d'années, associé à l'enfant de 1 an et pour l'essentiel piloté par les deux isotopes de fin de chaîne 4N+2 (radium 226 (50 % du cumul), plomb 210 (30 % du cumul)) ; le maximum du cumul de dose est de l'ordre de 1,6 mSv/an pour le concept à ciel ouvert, 1,2 mSv/an pour le concept souterrain de grand diamètre et 2,2 mSv/an pour le concept souterrain de petit diamètre.

Enfin, la variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 2, en lien avec la sensibilité combinée du radium 226 et du plomb 210 au transfert dans la biosphère.

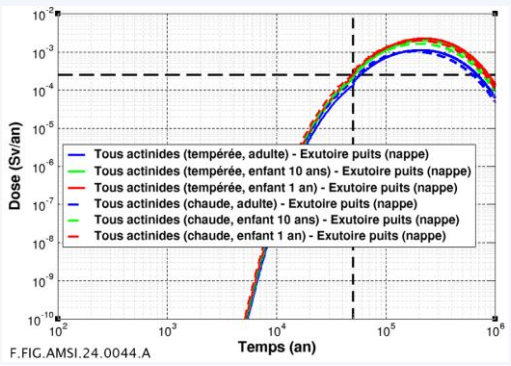
Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » (situation enveloppe) – Déchets bitumés

Historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »

Concept de stockage souterrain (alvéole 6 m)



Concept de stockage souterrain (alvéole 3 m)



Concept de stockage à ciel ouvert

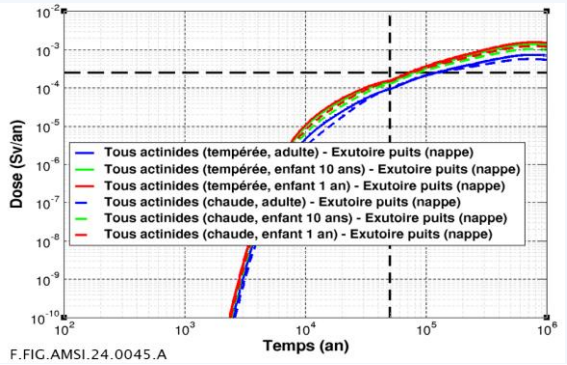


Figure 8-13 *Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » - situation enveloppe, déchets bitumés, tous actinides : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler les déchets »

Pour les déchets bitumés (cf. Partie droite du tableau 8-12), le maximum du cumul de dose associé à l'exutoire « sol contaminé » de l'ensemble des actinides et résultant des activités volumiques encore présentes dans le stockage à 50 000 ans, est associé à l'enfant de 1 an et piloté par trois isotopes des chaînes de filiation (plomb 210 (65 % à 70 % du cumul selon le concept), plutonium 239 et radium 226 dans une moindre mesure) ; le maximum du cumul de dose est de l'ordre de 3,2 mSv/an pour le concept à ciel ouvert, 1 mSv/an pour le concept souterrain de grand diamètre et 0,5 mSv/an pour le concept souterrain de petit diamètre.

Comme pour les déchets radifères, (i) la dose maximale associée au concept souterrain de petit diamètre est plus faible que celle du concept souterrain de grand diamètre, du fait d'un inventaire restant dans le stockage à 50 000 ans plus faible, pour un volume de stockage quasi-identique entre les deux concepts souterrains, et (ii) la dose maximale associée au concept à ciel ouvert est significativement plus élevée que celle du concept souterrain de grand diamètre, du fait d'une compacité plus importante (facteur 3 environ), pour un inventaire restant dans le stockage à 50 000 ans similaire entre les deux concepts.

La variabilité de la dose maximale liée à la seule classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an) est d'environ un facteur 1,3 en lien avec la sensibilité du plomb 210 au transfert dans la biosphère.

Tableau 8-12 *Situations conventionnelles post-50 000 ans, déchets bitumés : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales aux exutoires « puits de pompage dans les Sables verts » ou « sol contaminé » (selon la situation conventionnelle), pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et/ou à la classe d'âge*

Déchets bitumés	Situations conventionnelles – période post-50 000 ans				
	Altération de la fonction « limiter le transfert » (situation enveloppe) Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »			Altération de la fonction « isoler les déchets » (situation de référence) Exutoire « sol contaminé »	
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge	Dose cumulée tous radionucléides à 50 000 ans (mSv/an)	Plage de variation de la dose maximale liée à la classe d'âge
	Principaux radionucléides contributeurs			Principaux radionucléides contributeurs	
Souterrain 6 m	1,2	300 000	de 0,55 mSv/an à 1,2 mSv/an	1	de 0,8 mSv/an à 1 mSv/an
	^{226}Ra (50 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{210}Pb (70 % du cumul)	
Souterrain 3 m	2,2	200 000	de 1 mSv/an à 2,2 mSv/an	0,5	de 0,4 mSv/an à 0,5 mSv/an
	^{226}Ra (50 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{210}Pb (65 % du cumul)	
Ciel ouvert	1,6	800 000	de 0,6 mSv/an à 1,6 mSv/an	3,2	de 2,7 mSv/an à 3,2 mSv/an
	^{226}Ra (50 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{210}Pb (70 % du cumul)	

Déchets technologiques

Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides »

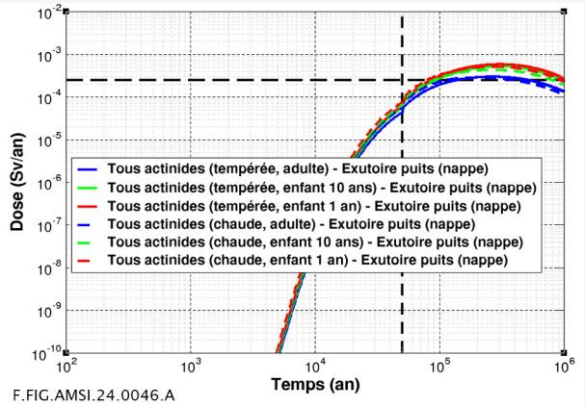
Pour les déchets technologiques (cf. Figure 8-14 et partie gauche du tableau 8-13), le maximum du cumul de dose à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » de l'ensemble des actinides en situation enveloppe est obtenu au-delà de la centaines de milliers d'années (jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années pour le concept à ciel ouvert), associé à l'enfant de 1 an et pour l'essentiel piloté par les deux isotopes de fin de chaîne 4N+2 (radium 226 (50 % du cumul), plomb 210 (30 % du cumul)) ; le maximum du cumul de dose est de l'ordre de 0,3 mSv/an pour le concept à ciel ouvert, 0,6 mSv/an pour le concept souterrain de grand diamètre et 1,2 mSv/an pour le concept souterrain de petit diamètre.

La variabilité de la dose maximale, associée au type de biosphère (tempérée, chaude) et à la classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an), est d'environ un facteur 2, en lien avec la sensibilité combinée du radium 226 et du plomb 210 au transfert dans la biosphère.

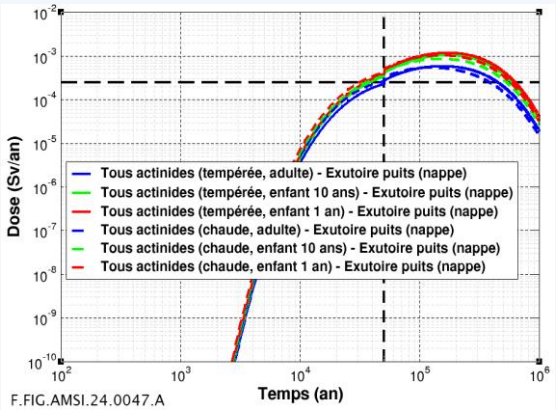
Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » (situation enveloppe) - Déchets technologiques

Historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »

Concept de stockage souterrain (alvéole 6 m)



Concept de stockage souterrain (alvéole 3 m)



Concept de stockage à ciel ouvert

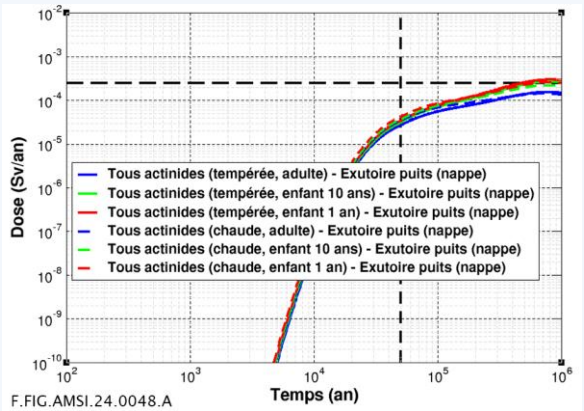


Figure 8-14 *Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » - situation enveloppe, déchets technologiques, tous actinides : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)*

Situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler les déchets »

Pour les déchets technologiques (cf. Partie droite du tableau 8-13), le maximum du cumul de dose associé à l'exutoire « sol contaminé » de l'ensemble des actinides et résultant des activités volumiques encore présentes dans le stockage à 50 000 ans, est associé à l'enfant de 1 an et piloté par trois isotopes des chaînes de filiation (plomb 210 (70 % du cumul), plutonium 239 et radium 226 dans une moindre mesure) ; le maximum du cumul de dose est de l'ordre de 5 mSv/an pour le concept à ciel ouvert, 1,6 mSv/an pour le concept souterrain de grand diamètre et 0,7 mSv/an pour le concept souterrain de petit diamètre.

Comme pour les déchets radifères et les déchets bitumés, (i) la dose maximale associée au concept souterrain de petit diamètre est plus faible que celle du concept souterrain de grand diamètre, du fait d'un inventaire restant dans le stockage à 50 000 ans plus faible, pour un volume de stockage quasi-identique entre les deux concepts souterrains, et (ii) la dose maximale associée au concept à ciel ouvert est significativement plus élevée que celle du concept souterrain de grand diamètre, du fait d'une compacité plus importante (facteur 3 environ), pour un inventaire restant dans le stockage à 50 000 ans similaire entre les deux concepts.

Enfin, la variabilité de la dose maximale liée à la seule classe d'âge (adulte, enfant de 10 ans, enfant de 1 an) est d'environ un facteur 1,3 en lien avec la sensibilité du plomb 210 au transfert dans la biosphère.

Tableau 8-13 *Situations conventionnelles post-50 000 ans, déchets technologiques : doses cumulées maximales (tous radionucléides) et occurrences des doses maximales aux exutoires « puits de pompage dans les Sables verts » ou « sol contaminé » (selon la situation conventionnelle), pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), principaux radionucléides contributeurs et plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et/ou à la classe d'âge*

Déchets technologiques	Situations conventionnelles – période post-50 000 ans				
	Altération de la fonction « limiter le transfert » (situation enveloppe) Exutoire « puits de pompage dans les Sables verts »			Altération de la fonction « isoler les déchets » (situation de référence) Exutoire « sol contaminé »	
Concept de stockage	Dose cumulée maximale tous radionucléides (mSv/an)	Date de dose maximale (an)	Plage de variation de la dose maximale liée au type de biosphère et à la classe d'âge	Dose cumulée tous radionucléides à 50 000 ans (mSv/an)	Plage de variation de la dose maximale liée à la classe d'âge
	Principaux radionucléides contributeurs			Principaux radionucléides contributeurs	
Souterrain 6 m	0,6	300 000	de 0,3 mSv/an à 0,6 mSv/an	1,6	de 1,3 mSv/an à 1,6 mSv/an
	^{226}Ra (50 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{210}Pb (70 % du cumul)	
Souterrain 3 m	1,2	170 000	de 0,55 mSv/an à 1,2 mSv/an	0,7	de 0,45 mSv/an à 0,7 mSv/an
	^{226}Ra (50 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{210}Pb (70 % du cumul)	
Ciel ouvert	0,3	800 000	de 0,15 mSv/an à 0,3 mSv/an	5	de 4 mSv/an à 5 mSv/an
	^{226}Ra (50 % du cumul) et ^{210}Pb (30 % du cumul)			^{210}Pb (70 % du cumul)	

8.3.3 Analyse des évaluations post 50 000 ans

La prise en compte des situations conventionnelles dans la démonstration de sûreté permet de la rendre robuste vis à vis des incertitudes sur l'évolution géodynamique du stockage aux grandes échelles de temps, au-delà de 50 000 ans.

L'évaluation des impacts radiologiques a en effet été poursuivie jusqu'à l'atteinte des *maxima* de dose même si la date d'occurrence ne présente pas réellement de sens physique pour un stockage à faible profondeur, dans la mesure où les *maxima* de dose sont atteints à plusieurs centaines de milliers d'années pour la situation d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides ». Les résultats de ces évaluations visent également à conforter les évaluations menées pour le scénario d'évolution normale et notamment au regard de la situation enveloppe du SEN, pour apprécier l'acceptabilité en stockage des inventaires en activité totale en regard de la valeur de référence de 0,25 mSv/an.

Ces situations conventionnelles ont été définies en répondant à l'objectif d'être raisonnablement majorantes, pour ne pas sous-estimer l'impact potentiel du stockage et en se basant sur les données de connaissance disponibles. Dans ce cadre, le caractère majorant est supporté par les choix conservatifs suivants :

- le fait de considérer l'occurrence de ces situations de manière instantanée dès 50 000 ans ;
- le fait de s'appuyer sur le paramétrage de la situation enveloppe du SEN qui se veut conservatif vis-à-vis du transfert des radionucléides, pour évaluer la situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » ;
- le fait de s'appuyer sur la situation de référence du SEN pour définir l'inventaire résiduel à 50 000 ans contenu dans le stockage pour la situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler les déchets de l'homme et de l'environnement ».

Le caractère raisonnable de ces situations repose sur la prise en compte d'éléments suivants :

- l'extension et le niveau de dégradation des performances de la couverture résiduelle du stockage à 50 000 ans considérés dans la situation d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides », issue de la connaissance scientifique ;
- la prise en compte d'un apport de sol non contaminé en supplément des gravats détritiques du stockage pour la composition du sol dans le cadre de la situation d'altération de la fonction « isoler les déchets de l'homme et de l'environnement », issue des règles de l'art sur le sujet.

L'analyse de la situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » a permis de mettre en évidence la robustesse du concept de stockage à faible profondeur étudié au regard des phénomènes d'altération de l'argile de la couverture (remaniée ou en place) et donc de dégradation des propriétés hydro-dispersives de cette couverture. En effet, les niveaux d'impact potentiel associés à cette situation restent inférieurs ou de l'ordre de grandeur du mSv/an (ce qui correspond à la limite réglementaire actuelle pour le public), et en tout état de cause, ne dépassent pas la dose associée au niveau d'exposition moyen aux rayonnements ionisants dus à la radioactivité naturelle en France (estimée autour de 5 mSv/an selon le rapport de l'IRSN relatif à l'exposition de la population française aux rayonnements ionisants (51)) :

- déchets radifères : les impacts obtenus pour cette situation conventionnelle sont supérieurs à ceux évalués en SEN pour chacune des architectures étudiées mais restent de l'ordre du mSv/an pour la configuration sous couverture remaniée et la configuration souterraine de 6 m de diamètre. Ils peuvent atteindre 4 mSv/an pour la configuration souterraine de 3 m de diamètre ;
- déchets de graphite : les impacts sont très significativement inférieurs à ceux évalués en SEN ;
- déchets bitumés : les impacts sont de l'ordre de grandeur des impacts évalués en SEN ;
- déchets technologiques : les impacts sont de l'ordre de grandeur ou inférieurs à ceux évalués en SEN.

L'Andra considère ces niveaux d'impacts potentiels globalement acceptables, compte tenu du caractère conservatif des hypothèses associées à la définition de cette situation conventionnelle ainsi que des dates d'occurrence des *maxima*.

Ces éléments mettent en évidence que cette situation ne pourrait être discriminante que pour les radionucléides fortement sorbés notamment les isotopes des chaînes de filiation.

L'analyse de la situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler les déchets de l'homme et de l'environnement » permet de juger de la robustesse du concept retenu vis-à-vis d'une érosion totale de la couverture et apporte des éléments d'appréciation vis-à-vis des différentes architectures étudiées. Il apparaît que plus le stockage est compact, plus les impacts évalués sont importants. Ainsi, la configuration de stockage avec couverture remaniée présente les impacts les plus importants, notamment au regard de sa forte compacité (faible emprise) mais également du fait de la présence significative de composants cimentaires, qui contribuent à retenir certains radionucléides au plus près des ouvrages de stockage durant toute la période de 0 an à 50 000 ans et qui, de ce fait, majorent l'inventaire résiduel à 50 000 ans dans le stockage.

Ainsi, ce sont les configurations de stockage sous couverture remaniée qui conduisent aux impacts potentiels les plus importants en comparaison avec les configurations souterraines :

- déchets radifères : les impacts sont compris entre 0,75 mSv/an et 3,5 mSv/an pour les architectures souterraines, alors qu'ils atteignent 16,5 mSv/an pour le concept sous couverture remaniée ;
- déchets de graphite : les impacts sont inférieurs à 0,25 mSv/an pour les architectures souterraines et l'impact est de 0,5 mSv/an pour la configuration sous couverture remaniée ;
- déchets bitumés : les impacts sont de l'ordre du mSv/an pour les architectures souterraines et de 3 mSv/an pour la configuration de stockage avec couverture remaniée ;
- déchets technologiques : les impacts sont de l'ordre du mSv/an pour les architectures souterraines et de 5 mSv/an pour la configuration de stockage avec couverture remaniée.

L'Andra considère que les valeurs d'impact obtenues pour les déchets de graphite et bitumés sont acceptables quelle que soit l'architecture étudiée. Pour les déchets technologiques, l'impact obtenu avec la configuration à ciel ouvert correspond à la borne haute proposée par l'Andra pour juger de l'acceptabilité. En revanche, l'Andra considère que les valeurs d'impact obtenues pour les déchets radifères, dans le cadre de la configuration de stockage sous couverture remaniée telle que définie dans le chapitre 7.5 du présent rapport, ne sont pas compatibles, en l'état des évaluations réalisées, avec les objectifs de protection que se fixe l'Andra pour les situations conventionnelles.

9

Enseignements tirés des différentes études en vue de la poursuite du projet

9.1 Rappel du cadre de l'étude *176*

9.2 Principaux déterminants phénoménologiques et de conception pilotant les indicateurs de performance et de sûreté en après-fermeture *176*

9.3 Secteurs géographiques de la zone d'étude à conserver pour étudier l'implantation d'un stockage *182*

9.4 Enseignements sur les architectures de stockage *184*

9.5 Enseignements sur les inventaires de déchets et sur leur conditionnement *187*

9.6 Enseignements concernant un site complémentaire adapté à un autre stockage à faible profondeur *196*

9.7 Synthèse des enseignements appliquée à la poursuite du projet *198*

9.1 Rappel du cadre de l'étude

Les études menées dans le cadre du présent rapport visent à tirer des enseignements sur la faisabilité technique d'un stockage à faible profondeur de déchets de faible activité à vie longue.

À cette fin, ont en particulier été analysés : les enjeux environnementaux existants sur la zone d'étude ainsi que les règles juridiques applicables au territoire, les techniques constructives pouvant être mises en œuvre pour la réalisation d'un tel stockage et l'évolution géodynamique du site sur le long terme. Des évaluations de sûreté après fermeture ont été menées afin d'évaluer les impacts radiologiques et ceux liés aux substances toxiques chimiques contenues dans les déchets étudiés, sur une période allant de la fermeture du stockage à au-delà de 50 000 ans compte tenu de la période radioactive des radionucléides contenus dans les déchets. Ces évaluations de sûreté visent à vérifier la compatibilité intrinsèque des déchets avec le stockage et à définir ses capacités d'accueil en activité totale pour les principaux radionucléides à vie longue pilotant les impacts radiologiques sur la période précitée. Elles ont été réalisées pour un inventaire de déchets établi en lien avec les producteurs de déchets qui ont fourni à l'Andra les données relatives à la connaissance des déchets, notamment les conditionnements des déchets en vue de leur stockage (conditionnements existants, envisagés à ce stade ou pris pour hypothèse à ce stade des études en l'absence de définition de conditionnement par leur producteur). L'inventaire étudié est constitué de déchets catégorisés FA-VL à l'Inventaire national ainsi que de déchets MA-VL dont les niveaux d'activités pourraient justifier l'étude de leur stockage à faible profondeur.

Les principaux éléments cadrant ces études sont :

- les contours de la zone d'étude, située entre les communes de Juzanvigny et d'Épothémont, et représentés sur la figure 4-4 et la figure 4-9 ;
- une profondeur d'implantation du stockage de 30 m au toit des alvéoles de stockage, au sein de la couche d'Argiles tégulines dont le mur est situé entre 30 m et 70 m de la surface (cf. Chapitre 2.4.2.3 du présent rapport) ;
- l'étude de trois types d'architectures de stockage, pour les évaluations de sûreté après-fermeture, définies en cohérence avec les solutions techniques envisageables selon l'état de l'art pour la réalisation d'un stockage situé à 30 m de profondeur : une architecture à ciel ouvert et deux architectures souterraines constituées de galeries de diamètres 6 m et 3 m (cf. Chapitre 7.5 du présent rapport).

Les enseignements tirés de l'ensemble de ces études, applicables dans le cadre rappelé ci-avant, sont présentés dans le présent chapitre.

9.2 Principaux déterminants phénoménologiques et de conception pilotant les indicateurs de performance et de sûreté en après-fermeture

Les évaluations préliminaires de sûreté après-fermeture réalisées en 2013-2015 et présentées dans le rapport d'étape de 2015 (1) ont été menées de façon exploratoire, en s'appuyant notamment sur l'état des connaissances relatives aux caractéristiques des colis de déchets et de la zone restreinte définie alors. Ces évaluations s'inscrivaient dans le cadre d'une démarche itérative de la démonstration de sûreté du projet de stockage, afin notamment d'éclairer les impacts en après-fermeture des déchets FA-VL étudiés pour cette étape et d'identifier les paramètres les plus sensibles sur les transferts de solutés. Ces évaluations reposaient sur la prise en compte de valeurs de paramètres correspondant au meilleur de la connaissance et d'études de cas de sensibilité, afin d'identifier pour chaque typologie de déchets les axes d'études à poursuivre pour préciser les impacts potentiels du stockage.

Les évaluations de sûreté présentées dans le présent rapport permettent d'étayer, par la quantification du SEN (situations de référence et enveloppe), des situations conventionnelles post-50 000 ans et du scénario d'intrusion humaine involontaire traversant le stockage (SIHI « voie eau »), les paramètres et processus clés pilotant les indicateurs de performance et de sûreté en après-fermeture.

Cette analyse est déclinée en distinguant :

- deux catégories de plateformes de stockage :
  - ✓ les plateformes de déchets de graphite, déchets bitumés et déchets technologiques, dont l'impact radiologique à l'exutoire principal de puits de pompage dans les Sables verts est piloté, notamment sur la période 0 - 50 000 ans, par les radionucléides mobiles et à vie longue. La similitude de comportement de ces radionucléides conduit à regrouper l'analyse des déterminants pour ces 3 plateformes de déchets (cf. Tableau 9-1) ;
  - ✓ la plateforme de déchets radifères, dont l'impact radiologique à l'exutoire principal de puits de pompage dans les Sables verts est principalement piloté par les isotopes des chaînes de filiation (cf. Tableau 9-2).
- deux catégories de paramètres :
  - ✓ les paramètres intrinsèques aux composants colis et au site (Argiles tégulines) : taux de relâchement de la matrice, performance du béton de colis (rétention), influence des perturbations chimiques dans les différents matériaux, propriétés hydro-dispersives (conductivité hydraulique, coefficient de diffusion, gradient de charge hydraulique…) et de rétention des différents éléments dans les argiles (coefficient de retard, limite de solubilité), phénomènes d'altération de surface (érosion…) ;
  - ✓ les paramètres relatifs aux éléments d'architecture et de conception, liés aux matériaux de conception et aux géométries : garde inférieure d'argile (*versus* positionnement vertical des ouvrages dans la couche d'argiles), épaisseur de béton (et rétention géochimique associée), compacité du stockage (*versus* espacement entre alvéoles et/ou nombre de colis par section d'alvéole), propriétés de la couverture remaniée (conductivité hydraulique, coefficient de diffusion, rétention géochimique).
- les scénarios/situations étudiés selon les plages de temps :
  - ✓ pour la période 0 - 50 000 ans, le SEN (situations de référence et enveloppe) et le SIHI « voie eau » ; dans le cas particulier des déchets radifères, l'analyse est menée sur les valeurs à 50 000 ans, les maximas « théoriques » des indicateurs de performance et de sûreté étant atteints au-delà ;
  - ✓ pour la période post-50 000 ans, les deux situations conventionnelles d'altération des fonctions « limiter le transfert des radionucléides » et « isoler les déchets ».

Les paramètres liés aux Sables verts (notamment les propriétés hydrauliques pilotant la capacité de dilution) ainsi que ceux du compartiment biosphère (facteurs de conversion) ne sont pas pris en compte dans l'analyse. Le principal indicateur retenu ici pour l'analyse est le flux de solutés sortant au mur de la couche d'argile, en lien avec l'exutoire principal de pompage dans les Sables verts, à l'exception de la situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler » pour laquelle l'indicateur retenu est l'activité volumique résiduelle dans le stockage à 50 000 ans.

Pour chaque combinatoire de {catégorie de plateforme}/{processus/paramètres}/{scénario/situation}, une analyse du poids des différents paramètres (en termes d'influence) sur les indicateurs de performance et de sûreté en après-fermeture est indiquée selon la gradation suivante :

- « Ø » : influence nulle ou marginale du paramètre ;
- « X » : faible influence du paramètre ;
- « XX » : forte influence du paramètre ;
- « XXX » : très forte influence du paramètre.

Quels que soient la plateforme et le type d'architecture de stockage étudiés (souterrain, ciel ouvert), le fonctionnement général du système de stockage est le suivant, tel qu'illustré sur la figure 9-1 :

- la voie de transfert principale des solutés depuis les ouvrages de stockage est celle à travers la garde inférieure d'argiles, par convection verticale descendante vers la nappe aquifère des Sables verts, sous-jacente à la couche des Argiles tégulines. Ce transfert est gouverné par la conductivité hydraulique des Argiles tégulines du site de la CCVS et le gradient de charge hydraulique vertical descendant ;

- en lien avec l'item précédent :
  - ✓ les exutoires de surface, issus du transfert vertical diffusif ascendant dans la couverture en place ou remaniée sont négligeables par rapport à l'exutoire de puits de pompage dans les Sables verts ;
  - ✓ les effets liés aux altérations de surface (érosion…) sur les flux de solutés en sortie de la garde inférieure d'argile sont faibles.
- les temps de transfert jusqu'à l'exutoire principal des Sables verts sont :
  - ✓ pour les solutés mobiles (principalement les radionucléides à vie longue carbone 14 sous forme organique, chlore 36, sélénium 79 et iode 129, et les substances toxiques chimiques, en particulier le sélénium), en moyenne de l'ordre de quelques milliers d'années en situation enveloppe, et de l'ordre de la dizaine de milliers d'années pour la situation de référence :
    - compte tenu des temps de transfert de ces radionucléides, et du caractère convectif dominant du transfert, une augmentation de l'ordre de la dizaine de mètres de la garde inférieure sous le stockage de déchets de graphite, bitumés ou technologiques, ne contribuerait que très faiblement à atténuer les niveaux *maxima* d'impacts.
  - ✓ pour les solutés sorbés des chaînes de filiation (majoritairement présents dans les inventaires radiologiques des déchets radifères et dans une moindre mesure dans ceux des déchets bitumés et technologiques), de l'ordre ou supérieurs à la centaine de milliers d'années pour les situations de référence et enveloppe. Ils bénéficient de capacités de rétention importantes dans les matériaux cimentaires et les Argiles tégulines :
    - compte tenu des temps de transfert de ces radionucléides, une augmentation de l'épaisseur de garde inférieure contribuerait à atténuer de manière plus significative les niveaux *maxima* d'impact (jusqu'à un facteur 10 d'atténuation pour une augmentation de la garde inférieure de l'ordre de la dizaine de mètres).

L'analyse de l'influence des autres paramètres conduit aux éléments suivants :

- la principale influence des perturbations chimiques sur les radionucléides d'intérêt ne concerne que les isotopes des chaînes de filiation des déchets radifères, en particulier les perturbations alcaline et saline dans les matériaux cimentaires (tous radionucléides) et dans les Argiles tégulines (isotopes du radium). Les perturbations chimiques (alcaline, saline, organique) n'affectent pas les impacts radiologiques *maxima* des autres plateformes pilotés par des radionucléides mobiles ;
- pour les radionucléides sorbés dans les bétons des ouvrages et contribuant aux impacts radiologiques *maxima* (principalement les isotopes des chaînes de filiation des déchets radifères), les épaisseurs de béton des ouvrages (et leur niveau de sorption lié à l'état de dégradation chimique retenu) contribuent à limiter les flux de solutés au mur de la couche ;
- la perturbation mécanique associée aux alvéoles souterraines, et considérant des paramètres hydro-dispersifs dégradés, a une influence négligeable sur les flux de solutés en sortie de couche, compte tenu de son extension limitée (de l'ordre du diamètre excavé des alvéoles) en regard de la garde inférieure d'argile ;
- la compacité du stockage (activité volumique), n'a pas d'influence en SEN et pour la situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides ». En revanche, ce paramètre est influent (i) pour le SIHI « voie eau » vis-à-vis du nombre de colis par section d'alvéole, et (ii) pour la situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler les déchets » vis-à-vis de l'emprise du stockage.

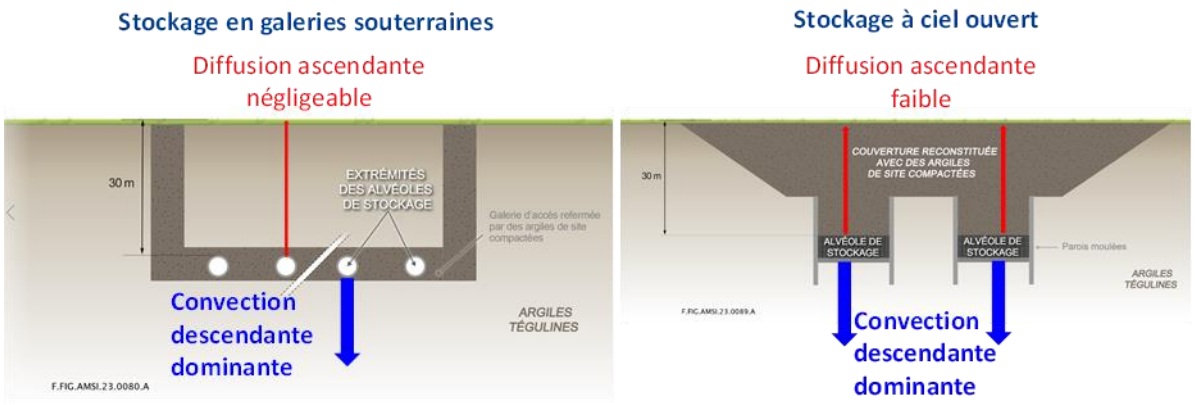


Figure 9-1 *Illustration des voies et modes de transfert des solutés depuis les ouvrages de stockage*

Tableau 9-1 *Plateformes des déchets de graphite, déchets bitumés et déchets technologiques (radionucléides mobiles) : poids des paramètres phénoménologiques et de conception pilotant les indicateurs de performance et de sûreté en après-fermeture*

<table>
<tr><th colspan="4">Plateformes des déchets de graphite, déchets bitumés et déchets technologiques
(radionucléides mobiles : carbone 14, chlore 36, iode 129, sélénium 79)</th></tr>
<tr><th colspan="2" rowspan="2"></th><th colspan="2">0 – 50 000 ans</th><th colspan="2">Post-50 000 ans
(situations conventionnelles)</th></tr>
<tr><th>SEN</th><th>SIHI - Forage « voie eau »</th><th>Altération de la fonction « limiter le transfert »</th><th>Altération de la fonction « isoler »</th></tr>
<tr><td colspan="6">Phénoménologie intrinsèque aux composants colis et au site</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Performance du colis</td><td>Taux de relâchement</td><td colspan="2">Ø
(^{14}C des déchets de graphite)</td><td>Sans objet
(^{14}C organique mobile ayant déjà atteint l'aquifère)</td><td>Ø
(^{14}C inorganique)</td></tr>
<tr><td colspan="4">Sans objet
(autres radionucléides mobiles ou typologies de déchets)</td></tr>
<tr><td>Rétention (béton colis)</td><td colspan="4">X
(uniquement ^{36}Cl en situation de référence)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Performance du site</td><td>Conductivité et gradient hydrauliques</td><td>XX</td><td rowspan="3">Sans objet
(forage = court-circuit de la garde inférieure)</td><td>XX</td><td>Sans objet</td></tr>
<tr><td>Diffusion</td><td>X</td><td>X</td><td>Sans objet</td></tr>
<tr><td>Rétention géochimique</td><td>Sans objet</td><td>Sans objet</td><td>Sans objet</td></tr>
<tr><td colspan="2">Perturbations chimiques dans les matériaux cimentaires et dans les argiles</td><td colspan="4">Sans objet
(radionucléides mobiles non concernés)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Phénomènes de surface/érosion</td><td colspan="2">Ø
(effet marginal de l'érosion sur le transfert dans la garde inférieure d'argile)</td><td colspan="2">Sans objet
(Mise à nu du stockage par définition)</td></tr>
<tr><td colspan="6">Paramètres d'architecture et de conception</td></tr>
<tr><td colspan="2">Garde inférieure d'argile (en lien avec l'épaisseur de la couche)</td><td>X</td><td>Sans objet
(forage = court-circuit de la garde inférieure)</td><td colspan="2">Sans objet
(radionucléides mobiles ayant déjà atteint l'aquifère)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Épaisseurs de béton (ouvrages) et rétention géochimique associée</td><td colspan="4">X
(uniquement ^{36}Cl en situation de référence)</td></tr>
</table>

Compacité/emprise du stockage et entraxe alvéoles associé (stockage souterrain)	Ø	XX *(nombre de colis par section d'alvéole)*	Ø	Sans objet *(radionucléides mobiles ayant déjà atteint l'aquifère)*

Tableau 9-2 *Plateforme des déchets radifères (radionucléides sorbés des chaînes de filiation) : poids des paramètres phénoménologiques et de conception pilotant les indicateurs de performance et de sûreté en après-fermeture*

Plateforme des déchets radifères (radionucléides sorbés des chaînes de filiation)					
		0 – 50 000 ans		**Post-50 000 ans (situations conventionnelles)**	
		SEN	**SIHI - Forage « voie eau »**	**Altération de la fonction « limiter le transfert »**	**Altération de la fonction « isoler »**
Phénoménologie intrinsèque aux composants colis et au site					
Performance du colis	**Taux de relâchement**	Sans objet *(relâchement labile)*			
	Rétention (béton colis)	Sans objet *(pas de béton de colis considéré pour les déchets radifères)*			
Performance du site	**Conductivité et gradient hydrauliques**	**XX**	Sans objet *(forage = court-circuit de la garde inférieure)*	**XX**	Sans objet
	Diffusion	**X**		**X**	Sans objet
	Rétention géochimique	**XXX**		**XXX**	Sans objet
Perturbations chimiques dans les matériaux cimentaires et dans les argiles		**XXX** *(matériaux cimentaires : tous les radionucléides)* **XX** *(argiles : uniquement ^{226}Ra et ^{228}Ra (alcalino-terreux) dans les extensions de perturbations alcaline/saline définies)*			
Phénomènes de surface/érosion		Ø *(effet marginal de l'érosion sur le transfert dans la garde inférieure d'argile)*			Sans objet *(Mise à nu du stockage par définition)*
Paramètres d'architecture et de conception					
Garde inférieure d'argile (en lien avec l'épaisseur de la couche)		**XX**	Sans objet *(forage = court-circuit de la garde inférieure)*	**XX**	Ø

Épaisseurs de béton (ouvrages) et rétention géochimique associée	**X** ou **XX** ou **XXX** *(selon le niveau de rétention des radionucléides sorbés, en lien avec les épaisseurs de béton des différentes architectures de stockage et les états de dégradation chimique du béton associés)*			
Compacité/emprise du stockage et entraxe alvéoles associé (stockage souterrain)	Ø	**XX** *(nombre de colis par section d'alvéole)*	Ø	**XX** *(emprise horizontale du stockage)*

Ces paramètres permettent d'établir une grande partie des enseignements présentés dans la suite de ce chapitre, sur le plan des secteurs géographiques d'implantation du stockage (cf. Chapitre 9.3 du présent rapport), des architectures du stockage (cf. Chapitre 9.4 du présent rapport), de la capacité d'accueil du site et de la compatibilité intrinsèque des déchets étudiés (cf. Chapitre 9.5 du présent rapport). Ils aident de plus à la définition des caractéristiques recherchées d'un site complémentaire pour accueillir les déchets qui ne pourraient être stockés sur le site de la CCVS (cf. Chapitre 9.6 du présent rapport).

9.3 Secteurs géographiques de la zone d'étude à conserver pour étudier l'implantation d'un stockage

Pour identifier les secteurs géographiques où un stockage de déchets FA-VL pourrait être implanté au sein de la zone d'étude et justifier des choix retenus, différents enjeux et contraintes sont à intégrer, notamment les enjeux environnementaux, ceux liés aux paramètres du transfert des solutés, à la géologie du site et à son évolution sur une période d'au moins 50 000 ans, au bout de laquelle les incertitudes sur l'évolution géomorphologique (érosion, dégradation des propriétés des formations…) ne permettent pas de garantir le maintien des fonctions de sûreté du stockage. Ces points seront affinés dans la suite des études en fonction notamment de l'inventaire des déchets (quantité et nature) défini pour poursuivre les études et pour élaborer le dossier d'options de sûreté.

L'étude des enjeux environnementaux sur le site de la CCVS et à ses abords, présentée au chapitre 6 du présent rapport, a permis d'en dresser une cartographie. En particulier, ces études n'ont pas conduit à identifier, à ce stade, de zones à forts enjeux de surface importante pour la préservation de la biodiversité qui soient de nature à exclure totalement certains secteurs du site pour le choix de l'implantation future du stockage. En effet, le site Natura 2000 situé au sud-est de la zone d'étude a été évité lors de la définition des contours de celle-ci. Toutefois, des enjeux liés à la biodiversité sont présents sur l'ensemble de la zone d'étude en raison notamment de son classement en zone humide, et en particulier dans les secteurs boisés et forestiers et aux abords des cours d'eau et plans d'eau. Les zones agricoles présentent certes des enjeux moindres pour la biodiversité, mais elles sont sensibles sur le plan paysager et leur usage est actuellement contraint par le schéma de cohérence territoriale (SCOT) des Territoires de l'Aube (29).

Sur le plan des enjeux environnementaux, l'Andra n'identifie pas de secteurs à exclure pour l'implantation du futur stockage, mais relève que les zones boisées présentent les enjeux les plus importants sur le plan de la biodiversité. Par ailleurs, quelle que soit l'implantation qui sera retenue *in fine* et malgré la poursuite nécessaire d'une démarche d'évitement et de réduction, des compensations devront être mises en œuvre en ce qui concerne les zones humides *a minima*, et, en fonction des secteurs de la zone d'étude, les espèces protégées, le défrichement ou l'incidence en zone agricole.

Par ailleurs, la profondeur minimale requise pour l'implantation des alvéoles de stockage est égale à 30 m au toit des alvéoles. En outre, compte tenu des paramètres clés pilotant le transfert des solutés (cf. Chapitre 9.1 du présent rapport), la préservation d'une garde inférieure d'argile sous le stockage d'épaisseur suffisante pour limiter les impacts radiologiques et toxicologiques dus aux transferts des solutés, est nécessaire. Ces éléments renseignent sur les secteurs de la zone d'étude, au sein de laquelle le mur de la couche des Argiles tégulines n'excède pas 70 m de profondeur, présentant une épaisseur de couche d'argile suffisante pour accueillir le stockage.

En conséquence, le maintien d'une épaisseur de garde inférieure minimale de l'ordre de 20 m constitue une exigence. Les zones à retenir pour étudier l'implantation du futur stockage sont celles correspondant aux secteurs où le mur des Argiles tégulines se situe à au moins 60 m de profondeur, c'est-à-dire au nord de la ligne d'isopaque « 60 » sur la carte présentée sur la figure 9-2.

Compte tenu de la présence de la route départementale D400 qui traverse la zone d'étude, un recul d'au minimum 25 m sera observé de part et d'autre de cette route pour étudier l'implantation de la future installation de stockage. De plus, une distance d'éloignement de minimum 200 m des zones urbaines de Juzanvigny située à l'ouest de la zone d'étude et d'Épothémont à l'est de celle-ci, sera établie.

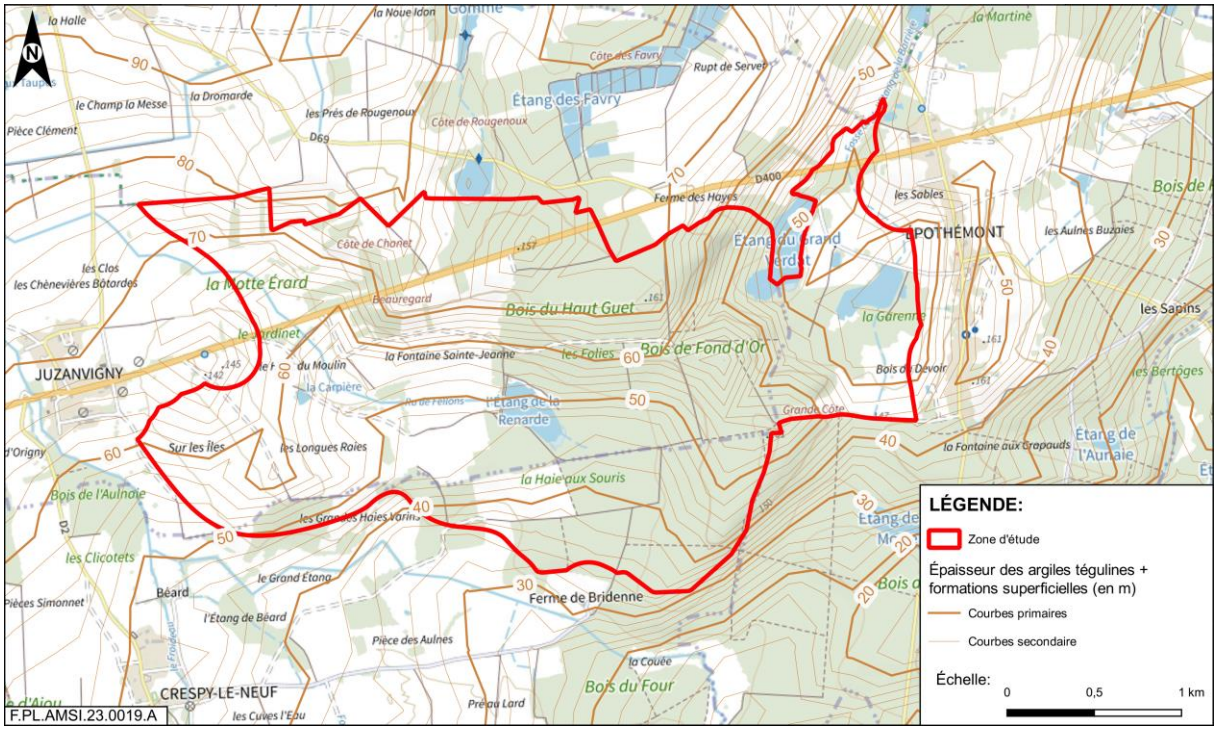


Figure 9-2 *Carte représentant les profondeurs du mur de la couche des Argiles tégulines*

Pour ce qui concerne l'évolution géodynamique à 50 000 ans de la zone d'étude due en particulier aux phénomènes d'érosion, elle a été étudiée selon une approche conservative, en considérant des évolutions climatiques antagonistes afin d'encadrer les effets des évolutions probables futures du climat (cf. Chapitre 4 du présent rapport).

L'approche suivie pour cette étude (utilisation d'un modèle RUSLE) a notamment permis d'estimer des taux d'érosion sur une période allant jusqu'à 50 000 ans, de les extrapoler jusqu'à 100 000 ans et de localiser les lieux géographiques de la zone d'étude les plus sensibles aux phénomènes d'érosion. Ces études ont en particulier mis en évidence l'influence du couvert végétal, qui est le facteur le plus sensible sur les taux d'érosion estimés, qui sont plus importants dans les secteurs de prairie (situées à l'ouest et à l'extrême est de la zone d'étude) que dans les secteurs boisés (partie centrale de la zone d'étude).

Les valeurs moyennes de perte d'épaisseur par érosion sur la zone d'étude, obtenues en considérant la configuration la plus pénalisante (évolution climatique perturbée et couvert végétal de type prairie), varient entre 1 m et 4,2 m sur 50 000 ans. Les épaisseurs maximales obtenues se stabilisent à une vingtaine de mètres de façon très localisée et pour la configuration étudiée la plus pénalisante. Il convient de noter que pour les évaluations de sûreté après fermeture présentées au chapitre 8 du présent rapport, des hypothèses conservatives ont été prises en compte pour tenir compte de la variabilité spatiale des valeurs hautes résultant des évaluations : une épaisseur moyenne de 10 m érodée à 50 000 ans pour modéliser l'évolution normale du stockage, et des épaisseurs érodées maximales localisées de 10 m d'épaisseur à 10 000 ans et 20 m à 50 000 ans pour la définition des scénarios d'intrusion humaine involontaire (cf. Chapitre 8.1.2 du présent rapport).

La localisation des secteurs où l'érosion observée est la plus importante correspond aux zones où les pentes sont les plus fortes, à savoir principalement le secteur du Cirque de la Garenne situé dans le bois du Haut Gué à l'ouest de l'étang du grand Verdat.

Ainsi, il apparait que les phénomènes d'érosion ne conduisent pas à exclure de secteurs pour l'implantation du futur stockage ; néanmoins, le secteur du Cirque de la Garenne étant le plus sensible à ces phénomènes, il est préconisé de l'éviter.

SYNTHÈSE RELATIVE AUX SECTEURS D'IMPLANTATION

L'analyse intégrée des différents enjeux relatifs aux possibilités d'implantation sur la zone d'étude de la CCVS permet de confirmer que l'implantation d'une installation de stockage à faible profondeur est possible sur celle-ci.

Les secteurs de la zone d'étude retenus pour poursuivre les études d'implantation d'une installation de stockage sont ceux situés au nord de la ligne d'isopaque marquant la limite de profondeur du mur des Argiles tégulines à 60 m. Celui du cirque de la Garenne, plus sensible aux effets de l'érosion, est à éviter.

Sur le plan des enjeux environnementaux, les études se poursuivront dans ces secteurs, en particulier pour décliner la séquence « éviter-réduire-compenser » afin de définir les localisations possibles d'implantation d'un stockage. La définition de celles-ci se fera en concertation avec le territoire.

9.4 Enseignements sur les architectures de stockage

Une revue des techniques constructives (cf. Chapitre 7 du présent rapport) a été menée pour dresser la liste des techniques et architectures de stockage envisageables sur le site de la CCVS, identifier leurs limites et points forts et conforter les architectures à étudier pour les évaluations de sûreté après-fermeture. Cette étude a permis de répondre à ces objectifs et les enseignements tirés sont présentés ci-après. Cependant, pour préciser la ou les architectures à retenir pour la suite du projet, qui dépendront des inventaires de déchets à l'étude pour le dossier d'options de sûreté, des études complémentaires des solutions techniques envisageables seront nécessaires, incluant des évaluations des coûts de réalisation, d'exploitation, de fermeture et de surveillance et des évaluations environnementales pour estimer les incidences environnementales des techniques.

Sur le plan de la faisabilité technique, la revue des techniques constructives sur la zone d'étude a permis d'identifier plusieurs solutions qui pourraient être mises en œuvre pour construire un stockage à 30 m de profondeur au toit des alvéoles. Les études montrent que, d'un point de vue de la faisabilité technique, la capacité volumique du site serait, avec les hypothèses prises en compte pour ces études, théoriquement suffisante pour accueillir l'ensemble des déchets étudiés à ce stade.

Chacune des techniques constructives étudiées présente des limites qu'il conviendra d'étudier dans la suite du projet. S'agissant des dispositions de maîtrise des risques lors de la phase d'exploitation du stockage et qui seraient susceptibles de contraindre la conception des ouvrages, une première analyse qualitative, au niveau des grands principes, a mis en évidence que la maîtrise des risques d'inondation d'origine externe liés en particulier aux intempéries constitue un enjeu important pour les ouvrages à ciel ouvert et pour les ouvrages d'accès aux alvéoles de stockage en souterrain. Pour les ouvrages souterrains, la maîtrise des risques de dispersion de substances radioactives et des risques d'incendie et d'explosion revêtent une importance particulière compte tenu de l'environnement confiné rencontré dans les ouvrages souterrains. Par ailleurs, il ressort que la faisabilité des opérations de manutention des colis de déchets de masses importantes et de grandes dimensions (manipulation et introduction dans les alvéoles) dans les galeries souterraines de petit diamètre (diamètre étudié de 3 m) doit être étudiée de façon plus détaillée. C'est par exemple le cas des colis de déchets de graphite d'EDF, pris en référence pour le conditionnement à venir des déchets de graphite, dont la masse dépasse 20 tonnes et dont les dimensions permettraient tout juste leur introduction dans les alvéoles, ce qui questionne sur les moyens à mettre en œuvre pour déplacer les colis dans la longueur des alvéoles pour les y positionner. Si l'architecture en galeries souterraines de petit diamètre est retenue pour stocker ces

déchets, ce concept deviendrait non compatible avec certains conditionnements envisagés par les producteurs.

En outre, d'autres sujets techniques devront être étudiés pour la suite du projet, tel que le remplissage des vides laissés entre les colis dans les alvéoles de stockage : ceci constitue un enjeu important au regard de la maîtrise des risques de déformation à long terme de la couverture du stockage, qui nécessite de minimiser ces vides. Alors que ce sujet dispose d'un bon retour d'expérience au CSA pour les architectures à ciel ouvert, il est particulièrement à étudier pour les architectures en galeries souterraines, pour lesquelles la faisabilité technique de combler efficacement les vides entre les colis mérite d'être étayée. Ceci est d'autant plus nécessaire pour les galeries de petit diamètre pour lesquelles l'introduction de moyens de comblement semble peu aisée, de même que le contrôle de son efficacité. De plus, les perturbations mécaniques des argiles engendrées par le creusement des galeries devront également être étudiées de façon plus approfondie, ainsi que la nature et la quantité de matériaux nécessaires pour la construction des ouvrages qui pourraient être à l'origine de perturbations chimiques. Il conviendra notamment d'optimiser les épaisseurs de béton des parois des ouvrages (i) pour assurer la stabilité mécanique des ouvrages en statique et en dynamique, (ii) pour bénéficier des propriétés de rétention du béton vis-à-vis de certains radionucléides et substances toxiques chimiques, et (iii) pour limiter l'extension de la perturbation alcaline générée par la présence de ce matériau, susceptible d'altérer les performances de la couche d'argile.

Enfin, pour les architectures à ciel ouvert, la couverture remaniée semble être réalisable d'après le retour d'expérience d'ouvrages similaires. Toutefois, sa faisabilité technique devra être confirmée en fonction de son étendue, du besoin de la protéger des intempéries pendant sa mise en place, et des capacités à garantir le contrôle et le maintien dans le temps de ses performances.

La sensibilité des concepts aux risques de déformation ou de fracturation de la couverture vis-à-vis du transitoire hydraulique gaz et notamment à la production d'hydrogène par corrosion des aciers présents dans le stockage devra également être étudiée plus précisément. À cet égard, les études préliminaires, engagées précédemment (2013) des effets des gaz dans la couverture ont montré une sensibilité accrue du concept avec couverture remaniée.

En se fondant sur ces éléments, une architecture en galeries souterraines de petit diamètre ne semble pas compatible avec le stockage de colis de grandes dimensions et de masses élevées. De plus, pour ce type d'architecture, la faisabilité du comblement des vides laissés entre les colis n'est pas acquise et devra être étudiée. Pour une architecture à ciel ouvert, la réalisation de la couverture remaniée constitue un enjeu fort, pour lequel des études complémentaires sont nécessaires.

Sur le plan des enjeux environnementaux, le respect de la séquence réglementaire « éviter, réduire, compenser » implique de privilégier les techniques constructives occasionnant le moins d'atteintes possibles à l'environnement. Ainsi, seraient privilégiées les techniques constructives nécessitant d'excaver des volumes minimums de terre, et de consommer, d'artificialiser et de réduire les usages de surfaces les plus faibles possibles. **Selon ce principe, les architectures en galeries souterraines dont les accès sont réalisés avec un soutènement vertical en particulier de type « puits » et les architectures à ciel ouvert réalisées avec un soutènement vertical ou, dans une moindre mesure, réalisées par terrassement puis mise en place d'un soutènement, sont les plus intéressantes. A l'inverse, les architectures à ciel ouvert réalisées uniquement par terrassement (sans soutènement) ne répondent pas à ce principe.** Par ailleurs, pour les architectures de type souterrain, la réduction des usages des surfaces concernera les terrains situés au droit du périmètre de l'installation de stockage.

Ces éléments devront être consolidés dans la suite des études par une analyse des incidences environnementales de chaque solution technique, pour la construction, l'exploitation et la fermeture du stockage, en particulier pour ce qui concerne la consommation en eau, en surface, en matières premières, sur le plan des émissions et rejets, et sur les incidences sur la biodiversité et le paysage.

Sur le plan de la sûreté après-fermeture, les évaluations de sûreté montrent que la nature des architectures de stockage exerce une influence importante sur les niveaux d'impacts radiologiques et chimiques du stockage, en raison principalement :

- de la densité surfacique de déchets présents dans le stockage plus ou moins importante selon l'architecture et les dimensions des alvéoles prises en compte pour les études ;
- des épaisseurs de béton constituant les parois et radiers des alvéoles de stockage ;
- de l'extension des perturbations, qu'elles soient mécaniques induites par les méthodes de creusement, ou chimiques - dues à la composition de certains déchets (présence de sels et/ou d'espèces organiques) et au béton des ouvrages et des colis.

Par ailleurs, les résultats obtenus mettent en évidence que selon la période considérée (0 – 50 000 ans ou post 50 000 ans) et la nature du scénario de sûreté après-fermeture évalué, les tendances varient, c'est-à-dire qu'une architecture de stockage peu favorable (c'est-à-dire conduisant à des impacts élevés) pour un des scénarii évalués peut s'avérer la plus favorable pour les autres scénarios.

Les évaluations de sûreté en évolution normale (SEN) mettent en évidence que les impacts radiologiques et en substances toxiques chimiques les plus élevés sont obtenus pour l'architecture à ciel ouvert, à l'exception des déchets radifères pour lesquels cette architecture conduit aux impacts les plus faibles, du fait d'une conception offrant des épaisseurs de béton (notamment au niveau du radier) plus favorables et permettant l'atténuation du transfert des solutés retenus dans les matériaux cimentaires (dont les éléments des chaînes de filiation). Pour toutes les autres typologies de déchets, l'architecture en galeries souterraines de diamètre excavé 6 m conduit à obtenir des valeurs d'impacts intermédiaires entre celles obtenues pour l'architecture à ciel ouvert et celles des galeries souterraines de petit diamètre.

L'évaluation des situations d'intrusions humaines involontaires montrent que plus le stockage est dense et la hauteur d'un alvéole est importante, plus les impacts radiologiques et en substances toxiques chimiques du stockage sont élevés. **Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, les études tendent à préconiser de limiter la hauteur de colis dans les alvéoles de stockage dans les cas où la densité en activité des radionucléides ou en masse des substances toxiques chimiques d'intérêt est importante.** Pour le cas du scénario d'intrusion humaine involontaire correspondant à un forage traversant le stockage et atteignant la nappe, les impacts radiologiques les plus élevés sont obtenus pour l'architecture à ciel ouvert du fait de sa plus grande compacité prise en compte dans le cadre de cette étude, quelles que soient les typologies de déchets. L'architecture en galeries souterraines de faible diamètre, dans lesquelles la densité de déchets stockés est moindre que pour les autres configurations, conduit aux valeurs d'impacts radiologiques les plus faibles, qui restent globalement proches de celles évaluées pour l'architecture en galeries souterraines de diamètre plus important.

Pour les situations conventionnelles étudiées au-delà de 50 000 ans, l'architecture à ciel ouvert est la plus défavorable pour toutes les typologies de déchets pour le cas de la situation conventionnelle conduisant à altérer la fonction « isoler », compte tenu également de sa plus grande compacité. L'effet inverse est observé pour l'autre situation conventionnelle (altération de la fonction « limiter le transfert »).

Selon la période et les scénarios étudiés, il n'apparait pas de tendance univoque sur le plan de la sûreté à long terme s'agissant des architectures de stockage. Cependant, il apparait que l'architecture en galeries souterraines de diamètre excavé de 6 m est la configuration intermédiaire au regard des points présentés ci-dessus et de l'impact des scénarios de sûreté après-fermeture. Par ailleurs, pour toutes les typologies de déchets, l'architecture à ciel ouvert prise en compte pour cette étude est la moins favorable pour les scénarios d'intrusion humaine involontaire et la situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler les déchets » en raison de sa compacité. Elles sont cependant plus intéressantes sur le plan des scénarios de transferts par l'eau pour les déchets radifères, en raison des épaisseurs de béton plus importantes au niveau du radier des alvéoles, béton qui permet la sorption des éléments des chaînes de filiation. Selon les déchets à stocker, une solution technique mêlant architectures à ciel ouvert et souterraine pourrait être envisagée.

Par ailleurs, une analyse des risques en exploitation associée à chaque concept et qui sera fonction de la nature des déchets à l'étude, permettra d'évaluer leur robustesse et le niveau des dispositions constructives à mettre en œuvre, notamment pour maîtriser les risques liés aux aléas naturels et les risques d'origine humaine liés par exemple à la coactivité. Enfin, une analyse des coûts de construction, d'exploitation et de fermeture complèterait les éléments permettant de faire les choix des solutions techniques et des options de sûreté à étudier pour la suite du projet.

SYNTHÈSE RELATIVE AUX ARCHITECTURES DE STOCKAGE

Les évaluations de sûreté après-fermeture montrent, pour les architectures et dimensions d'alvéoles étudiées, qu'une architecture de stockage en galeries souterraines (diamètre environ 6 m) est la configuration intermédiaire au regard des impacts observés des scénarios de sûreté après-fermeture ; une architecture de type ciel ouvert serait, sur le plan de la sûreté après-fermeture, intéressante pour les déchets radifères en raison des épaisseurs de béton plus importantes permettant de sorber les éléments des chaînes de filiation.

Sur le plan de la faisabilité technique, les galeries souterraines de petits diamètres imposeraient des contraintes fortes sur le conditionnement des déchets afin d'éviter les colis massifs ou de grandes dimensions ; en outre, des études complémentaires sont à entreprendre pour s'assurer que le comblement des vides laissés entre les colis est réalisable ou que ces vides restent acceptables. Par ailleurs, pour les architectures à ciel ouvert, la réalisation et la garantie du maintien des performances d'une couverture remaniée constituent des enjeux importants.

Sur le plan des enjeux environnementaux, des études complémentaires sont à mener pour évaluer les incidences environnementales des différentes techniques constructives. Cependant, la recherche de la réduction des incidences du stockage, notamment en termes de minimisation de surface modifiées par le projet, plaiderait pour la réalisation d'ouvrages souterrains dont les accès présenteraient des surfaces restreintes (réalisés avec soutènement).

Pour l'élaboration du dossier d'options de sûreté, les études des modalités d'exploitation et de manutention seront approfondies et les enjeux liés à la coactivité seront notamment étudiés. Les études d'analyse de risques en exploitation enrichiront l'analyse sur la robustesse de chacune des solutions techniques présentées.

Les choix à venir pour la ou les architectures de stockage qui seront étudiées dans le cadre du dossier d'options de sûreté seront fonction de l'inventaire des déchets étudiés et de leur conditionnement, et s'appuieront sur ces enseignements. Ces choix s'appuieront également sur des études complémentaires à mener des solutions techniques envisageables, incluant des évaluations des coûts de réalisation, d'exploitation, de fermeture et de surveillance et des évaluations environnementales pour estimer les incidences environnementales des techniques.

9.5 Enseignements sur les inventaires de déchets et sur leur conditionnement

Pour la période allant de 0 an à 50 000 ans, les évaluations de sûreté après-fermeture menées ont permis de tirer nombre d'enseignements pour définir, par la suite, l'inventaire des déchets à étudier pour l'élaboration à venir du dossier d'options de sûreté. Les impacts radiologiques et toxicologiques évalués renseignent, pour chaque typologie de déchets, sur la contribution aux impacts des différentes familles, compte tenu des inventaires radiologiques et en substances toxiques chimiques fournis par les producteurs.

Les évaluations des transferts par l'eau en situation enveloppe apportent des enseignements sur la capacité d'accueil en activité totale du stockage, car elles mobilisent les inventaires totaux pris en compte pour chaque typologie de déchets étudiées indépendamment ; les enseignements sur la capacité d'accueil du stockage sont confortés par les évaluations de la situation d'intrusion du forage traversant le stockage et atteignant la nappe aquifère. Les évaluations des situations d'intrusions humaines involontaires évaluent la compatibilité intrinsèque des familles de déchets avec le stockage tel qu'étudié (architecture de stockage, conditionnement des déchets, quantité de déchets par colis).

Le premier enseignement majeur tiré de ces évaluations est que l'ensemble des déchets étudiés pour le présent rapport ne pourra pas être stocké sur le site de la CCVS. En effet, les impacts radiologiques et toxicologiques dus aux transferts par l'eau des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets sont, en cumul pour tous les déchets et sur certaines plages de temps, très significativement supérieurs aux objectifs de protection. Cela impose de limiter les inventaires des éléments et radionucléides identifiés comme d'intérêt car contributeurs principaux aux impacts.

Pour la période allant au-delà de 50 000 ans, l'étude des situations conventionnelles permet d'éclairer les impacts radiologiques. S'agissant de l'objectif de protection biologique auquel se référer pour ces situations, le GPD a estimé, dans son avis (6), « *qu'il n'y a pas lieu de remettre en cause la valeur de 0,25 mSv/an retenue dans la note d'orientations de 2008* », soulignant en outre « *que l'acceptabilité des écarts éventuels entre les impacts estimés et ce niveau de référence doit être appréciée au regard du niveau de conservatisme des hypothèses considérées dans les scénarios évalués* ». Au vu des études présentées, du niveau des conservatismes pris en compte pour ces situations et de leur caractère conventionnel conduisant à altérer brutalement les fonctions de sûreté du stockage, l'Andra considère que des niveaux d'impacts ne dépassant pas la dose associée au niveau d'exposition moyen aux rayonnements ionisants dus à la radioactivité naturelle en France (de l'ordre de 5 mSv/an) sont compatibles avec les objectifs fixés.

Les études des techniques constructives apportent un deuxième enseignement important relatif au taux de vide présent dans les colis de déchets. Ces études ont montré qu'il est nécessaire de minimiser le taux de vide globalement présent dans le stockage pour limiter les déformations de la couverture induites par les tassements du stockage au cours du temps, tassements qui seront d'autant plus importants que le taux de vide est élevé. Les vides sont principalement de deux origines : les vides laissés entre les colis dans les alvéoles de stockage, et les vides laissés à l'intérieur des colis de déchets. **Ainsi, le deuxième enseignement apporté par ces études est de minimiser les vides contenus dans les colis et de privilégier un remplissage optimisé des colis, pouvant se traduire par un blocage des déchets.**

Dans la suite de ce chapitre, les enseignements sur les déchets et sur leur conditionnement qui peuvent être établis à partir des résultats des évaluations de sûreté sont présentés par typologie de déchets, de façon similaire pour chacune. Ainsi, sont d'abord présentés les enseignements relatifs à la capacité d'accueil de la typologie de déchets concernée, puis ceux relatifs à la compatibilité intrinsèque des familles de déchets de cette catégorie avec le stockage. À cet égard, certaines familles de colis de déchets conduisent à dépasser significativement l'indicateur de protection de 20 mSv/an à respecter pour les situations d'intrusions humaines involontaires ; il est proposé d'exclure tout ou partie ces familles telles que constituées du champ des études futures et de considérer pour ces familles de déchets d'autres solutions de stockage.

9.5.1 Déchets radifères et déchets contenant des substances radioactives d'origine naturelle

Les déchets radifères et les déchets contenant des substances radioactives d'origine naturelle étudiés pour le présent rapport représente environ 42 200 tonnes de déchets, soit 75 000 m^3 de déchets conditionnés (cf. Chapitre 3.1 du présent rapport).

<u>Période allant de 0 an à 50 000 ans</u>

Capacité d'accueil en activité totale du stockage – Influence des sels dans certaines familles de déchets

Les valeurs maximales d'impacts radiologiques des évaluations SEN des déchets radifères sont obtenues à 50 000 ans et sont inférieures à l'objectif de 0,25 mSv/an, excepté pour l'architecture en galeries souterraines de petit diamètre où elles lui sont entre 4 et 5 fois supérieures. Cependant, un des principaux enseignements pour les déchets radifères concerne l'influence des sels chimiques présents dans certaines familles de déchets, principalement du nitrate d'ammonium, en quantités notables dans les déchets produits par Solvay (déchets RRA, RSB et résidus HBTh) et des déchets constitués de déblais contaminés détenus par la société Arkema. Les perturbations chimiques occasionnées par ces sels ont des effets sur la cinétique de transfert de certains solutés en partie responsables des impacts radiologiques et des substances toxiques chimiques, conduisant à des impacts à 50 000 ans beaucoup plus élevés qu'en l'absence de ces sels. Un traitement préalable de ces déchets visant à réduire de façon significative les sels permettrait de diminuer les impacts radiologiques évalués pour l'ensemble des

déchets radifères à une valeur très inférieure à la limite de 0,25 mSv/an sur la période 0 – 50 000 ans, excepté toujours pour l'architecture en galeries souterraines de petit diamètre.

L'évaluation du scénario de forage traversant un alvéole de déchets radifères et atteignant la nappe (forage réalisé à partir de 500 ans après la fermeture du stockage) renforce le constat relatif à l'influence défavorable de la présence de sels chimiques dans les déchets radifères sur les impacts radiologiques dus à ceux-ci. L'élimination des sels dans les déchets radifères qui en contiennent permettrait de réduire les impacts de ce scénario de forage de manière significative, les rendant compatibles avec les indicateurs de protection pour les concepts souterrains. En effet, en présence des sels chimiques, l'évaluation de ce scénario de forage conduit, pour les déchets radifères, à des valeurs d'impacts supérieures à 20 mSv/an pour toutes les configurations étudiées (jusqu'à 1 ordre de grandeur supérieur pour le cas du stockage à ciel ouvert). Dans toutes les configurations étudiées, les impacts radiologiques évalués sont dus majoritairement au radium 226 et au plomb 210, qui sont très majoritairement apportés par la famille des déchets « sulfates de plomb radifères » du CEA (aujourd'hui catégorisés MA-VL, représentant 650 m^3 de déchets conditionnés, soit moins d'1 % du volume de tous les déchets radifères étudiés).

En outre, la présence des sels dans certains déchets stockés conduirait à atteindre, au cours du temps, des concentrations en nitrates et en ammonium proches des limites de qualité des eaux brutes souterraines utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (46).

Enfin, comme évoqué dans le chapitre 9.2 du présent rapport, l'augmentation de l'épaisseur de la garde inférieure d'argile de l'ordre de la dizaine de mètres permettrait une atténuation significative des impacts radiologiques et toxicologiques, selon le niveau de rétention des éléments dans l'argile.

Compatibilité intrinsèque des différentes familles de déchets radifères avec un stockage à faible profondeur

Les impacts radiologiques des situations d'intrusions humaines involontaires évalués pour la typologie des déchets radifères s'ils étaient répartis sur une même zone de stockage sont faibles et compatibles avec les indicateurs de protection correspondant à ces situations, y compris vis à vis de la production de radon. Étudiées individuellement, la majorité des familles de déchets radifères dites « FA-VL historiques » sont jugées compatibles avec un stockage à faible profondeur. Cependant, certaines autres familles occasionnent des impacts radiologiques notablement supérieurs à 20 mSv/an et seraient en tout ou en partie à écarter de la liste des déchets à étudier pour le futur DOS. C'est le cas des déchets actuellement catégorisés MA-VL « sulfates de plomb radifères » du CEA et de certains déchets FA-VL (des colis de regroupements de sources au radium, paratonnerres ou détecteurs incendie, représentant quelques m^3 de déchets conditionnés). Par ailleurs, les déchets produits par l'usine de Framatome Jarrie présentent des impacts radiologiques inférieurs à 20 mSv/an, mais des impacts toxicologiques élevés dus à l'uranium contenu dans ces déchets ; pour ceux-ci, des études visant à préciser les effets toxiques de l'uranium (bioaccessibilité et biodisponibilité) seraient à mener pour s'assurer du caractère acceptable ou non de ces déchets en stockage sur le site de la CCVS, selon le conditionnement envisagé pour ces déchets.

Période post-50 000 ans

Selon la démarche proposée par l'Andra pour évaluer les impacts radiologiques du stockage aux grandes échelles de temps (cf. Chapitre 8.1.2 du présent rapport), des valeurs allant de 0,6 mSv/an à 4 mSv/an sont obtenues à 50 000 ans et au-delà selon la situation conventionnelle et l'architecture de stockage étudiées, excepté pour l'architecture à ciel ouvert pour laquelle l'impact radiologique est évalué à 16,5 mSv/an pour la situation conventionnelle considérant l'altération de la fonction « isoler ». L'Andra considère que les valeurs d'impacts de quelques mSv/an observés pour les architectures souterraines étudiées, de l'ordre de grandeur de la valeur de référence et ne dépassant pas le niveau d'exposition moyen aux rayonnements ionisants dus à la radioactivité naturelle en France, sont compatibles avec les objectifs visés au-delà de 50 000 ans. Pour l'architecture à ciel ouvert étudiée, en l'état actuel des évaluations, les valeurs d'impact sont incompatibles avec les objectifs précités.

Il convient de noter que ces valeurs d'impact ont été estimées en considérant que les sels chimiques n'ont pas été éliminés des déchets. En considérant une absence totale de sels dans les déchets, les transferts sur la première période étant réduits, le terme source résiduel dans le stockage à 50 000 ans se trouverait légèrement majoré et conduirait en principe à des valeurs d'impact potentiel légèrement plus importantes.

SYNTHÈSE CONCERNANT LES DÉCHETS RADIFÈRES

La réduction significative des sels chimiques présents dans certains déchets radifères préalablement à leur stockage, si elle est techniquement opérable, doit être réalisée pour diminuer significativement les impacts radiologiques dus aux déchets radifères sur la période 0 - 50 000 ans à une valeur très inférieure à la limite de 0,25 mSv/an, et pour limiter le marquage des eaux de nappe.

Compte tenu des éléments présentés, une majorité des déchets radifères étudiés est compatible avec un stockage sur le site de la CCVS ; une part limitée de l'inventaire des déchets radifères (constituée des familles de déchets composés de colis de regroupement de sources au radium, paratonnerres ou détecteurs incendie, déchets de la défense nationale, ainsi que tout ou partie des colis de la famille de déchets du CEA des « sulfates de plomb radifères ») devrait être exclue de la suite des études.

Dans ces conditions (réduction significative des sels et exclusion de tout ou partie de certaines familles de déchets), les impacts radiologiques et toxicologiques évalués des déchets radifères seraient compatibles avec les indicateurs de protection pour un type d'architecture étudié, ce qui permettrait d'intégrer la majorité des déchets radifères à l'inventaire d'étude du futur dossier d'options de sûreté.

9.5.2 Déchets de graphite

Les déchets de graphite étudiés pour le présent rapport représentent environ 22 700 tonnes de déchets, soit 86 400 m^3 de déchets conditionnés (cf. Chapitre 3.2 du présent rapport).

<u>Période allant de 0 an à 50 000 ans</u>

Capacité d'accueil en activité totale du stockage

Les radionucléides pilotant les impacts radiologiques dus aux transferts par l'eau pour les déchets de graphite sur la période considérée sont principalement le carbone 14 (fraction relâchée sous sa forme organique) et dans une moindre mesure le chlore 36. Les derniers éléments de connaissance obtenus, d'une part sur les inventaires radiologiques des déchets de graphite pour ces radionucléides spécifiquement, qui ont été significativement diminués depuis les précédentes études menées en 2015, d'autre part sur la cinétique de relâchement du carbone 14 organique, ont été intégrés aux évaluations. Les impacts radiologiques obtenus sont dus à ces deux principaux radionucléides ; ils sont très significativement supérieurs à l'indicateur de protection de 0,25 mSv/an pour l'ensemble des déchets de graphite étudiés (jusqu'à environ deux ordres de grandeur selon les configurations étudiées), y compris pour le cas où l'épaisseur d'argile disponible sur le site de la CCVS est la plus importante. Ces impacts cumulés maximaux sont observés autour de 5 000 ans après la fermeture du stockage. **Ainsi, une réduction très importante de l'inventaire radiologique des déchets en carbone 14 et en chlore 36 est nécessaire, ce qui conduit à limiter très fortement les quantités de déchets de graphite pouvant être stockés sur le site de la CCVS.**

Les valeurs d'impact sont peu sensibles à la nature de l'architecture de stockage étudiée, bien qu'il apparaisse qu'une architecture à ciel ouvert soit moins favorable en comparaison à une architecture souterraine de petit diamètre en raison notamment du gradient de charge hydraulique induit plus élevé dans la garde inférieure pour l'architecture à ciel ouvert étudiée (de par la présence de la couverture remaniée plus perméable que les Argiles tégulines).

L'évaluation du scénario de forage traversant un alvéole de déchets de graphite et atteignant la nappe (forage réalisé à 500 ans après la fermeture du stockage) conduit à des impacts inférieurs à 20 mSv/an, excepté pour la configuration à ciel ouvert étudiée (25 mSv/an). Selon les architectures de stockage, les impacts sont pilotés par le carbone 14 présent majoritairement dans les empilements des réacteurs d'EDF et/ou par les isotopes 239 et 240 du plutonium, présents principalement dans les déchets d'Orano des silos 115, 130 et fonds de fosses.

Compatibilité intrinsèque des différentes familles de déchets de graphite avec un stockage à faible profondeur.

L'évaluation des scénarios d'intrusions humaines involontaires montre que les impacts radiologiques et toxicologiques du scénario d'un chantier routier traversant la zone du stockage dédiée aux déchets de graphite sont très faibles, de l'ordre de 1 mSv/an (valeur très inférieure à l'indicateur de protection de 20 mSv/an). Les impacts radiologiques des situations d'intrusions humaines involontaires évalués pour la majorité des familles de déchets de graphite étudiées individuellement sont également très inférieurs à 20 mSv/an, ce qui montre que la majorité de ces familles est compatible avec un stockage situé à 30 m de profondeur sur le site de la CCVS, dans les conditions étudiées. C'est le cas des familles de déchets issus des empilements des réacteurs UNGG d'EDF et du CEA et les chemises de graphite ainsi que de la plupart des déchets UNGG du site Orano de La Hague.

Deux familles de déchets issus d'opérations d'assainissement et de démantèlement des installations de l'usine UP2-400 d'Orano La Hague dans laquelle des combustibles UNGG ont été traités (déchets de faible granulométrie du silo 115 et dépôts de fond de fosse 211) présentent des valeurs d'impacts radiologiques supérieures aux indicateurs de protection. Pour les déchets de faible granulométrie du silo 115, Orano a apporté des éléments complémentaires susceptibles de modifier les présents résultats. Pour la famille de déchets de dépôts de fond de fosse 211, des caractérisations complémentaires sont prévues pour préciser les caractéristiques radiologiques de ces déchets dans la mesure où ils n'ont pas encore été repris ni conditionnés. Pour ces raisons, l'exclusion ou non de ces familles de déchets, qui représentent environ 350 m^3 de déchets conditionnés sur un total de 86 500 m^3 pour les déchets de graphite (soit 0,4 % du volume des déchets de graphite étudiés), sera déterminée à la lumière de ces éléments.

Période post-50 000 ans

Aux grandes échelles de temps, les impacts radiologiques évalués des situations conventionnelles proposées par l'Andra sont faibles, inférieurs ou de l'ordre de 0,25 mSv/an. La valeur la plus élevée est obtenue pour l'architecture à ciel ouvert pour la situation conventionnelle où la fonction de sûreté « isoler la radioactivité de l'homme et de l'environnement » est altérée, pour laquelle l'impact radiologique atteint environ 0,5 mSv/an. Pour celle-ci, les impacts sont pilotés, d'une part par le carbone 14 sous sa forme inorganique et le niobium 94, d'autre part par les deux isotopes plutonium 239 et plomb 210. Pour l'autre situation conventionnelle (altération de la fonction « limiter le transfert »), ils sont pilotés par le radium 226 et le plomb 210, ou bien le neptunium 237 et l'uranium 233, selon les architectures de stockage. Ces isotopes des chaînes de filiation proviennent principalement des déchets UNGG d'Orano.

L'Andra considère que ces valeurs d'impacts radiologiques évalués sont compatibles avec les objectifs visés à ces échelles de temps.

SYNTHÈSE CONCERNANT LES DÉCHETS DE GRAPHITE

Considérés en globalité, l'ensemble des déchets de graphite pris en compte pour ce rapport ne pourrait pas être stocké sur le site de la CCVS dans les conditions étudiées en raison des impacts radiologiques très élevés dus au carbone 14 sous sa forme organique et dans une moindre mesure, au chlore 36 sur la période 0 – 50 000 ans, compte tenu des propriétés hydro-dispersives de la couche des Argiles tégulines.

Sur le plan des intrusions humaines involontaires, la majorité des familles de déchets de graphite sont jugées intrinsèquement compatibles avec un stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS vis-à-vis des scénarios d'intrusion humaine involontaire. Pour deux familles de déchets de l'usine UP2-400 d'Orano de La Hague (déchets de faible granulométrie du silo 115 et de la fosse 211, qui présentent des valeurs d'impacts radiologiques supérieures aux indicateurs de protection, des évaluations complémentaires pourraient être menées dans la suite des études du stockage sur la CCVS sur la base de données d'inventaires et de caractérisations confortées.

Une très faible proportion des déchets de graphite, qu'il reste à définir, pourrait néanmoins être intégrée à l'inventaire d'étude du futur dossier d'options de sûreté. Ceci devra toutefois tenir compte des impacts dus aux autres typologies de déchets qui contiennent des radionucléides mobiles à vie longue générant des impacts radiologiques au niveau de la nappe, aux mêmes horizons temporels que le carbone 14 organique et le chlore 36 des déchets de graphite (déchets bitumés, déchets « technologiques »).

9.5.3 Déchets bitumés

Les déchets bitumés étudiés pour le présent rapport représentent environ 17 000 tonnes de déchets, soit 90 000 m^3 de déchets conditionnés (cf. Chapitre 3.3 du présent rapport).

<u>Période allant de 0 an à 50 000 ans</u>

Capacité d'accueil en activité totale du stockage

Les radionucléides dominant les impacts radiologiques dus à la voie de transfert par l'eau des déchets bitumés sont les radionucléides à vie longue mobiles dans le système de stockage, à savoir le sélénium 79 qui pilote les impacts radiologiques à plus de 75 %, ainsi que l'iode 129 et le chlore 36 dans une moindre mesure. Les impacts radiologiques maximaux évalués dépassent très significativement la limite de dose de 0,25 mSv/an (de 5 à 13 fois selon la configuration de stockage étudiée) autour de 5 000 ans après la fermeture du stockage. Il convient de noter que pour ces évaluations, un relâchement instantané des radionucléides a été considéré.

A 50 000 ans, ce sont les actinides présents dans la composition radiologique des déchets bitumés qui dominent les impacts ; ceux-ci sont légèrement inférieurs ou de l'ordre de la limite de 0,25 mSv/an. Les impacts toxicologiques dus à l'uranium sur cette période dépassent également les indicateurs de protection, notamment pour l'architecture de stockage en souterrain de petit diamètre.

Les déchets bitumés contiennent d'importantes quantités de sels chimiques solubles, en particulier des nitrates et des sulfates. Pour la totalité des déchets bitumés étudiés, des concentrations très élevées de ces sels dans les eaux souterraines sont obtenues, dépassant significativement les limites de qualité des eaux brutes pour le cas des nitrates. Outre le marquage de la nappe, ces sels ont pour effet de modifier défavorablement les cinétiques de transfert des solutés (radionucléides, substances toxiques chimiques). **Afin d'éviter le marquage des eaux et de limiter l'effet des sels sur le transfert des solutés, il est donc nécessaire de limiter significativement les quantités de sels présentes dans le stockage et de fait de limiter l'inventaire des déchets bitumés à étudier pour le stockage.**

Par ailleurs, les évaluations de sûreté des transferts par l'eau menées montrent que les valeurs d'impacts sont peu sensibles à la nature de l'architecture de stockage étudiée, bien qu'il apparaisse qu'une architecture à ciel ouvert soit moins favorable en comparaison à une architecture souterraine de petit diamètre, en raison notamment du gradient de charge hydraulique induit plus élevé dans la garde inférieure pour l'architecture à ciel ouvert étudiée (de par la présence de la couverture remaniée plus

perméable que les Argiles tégulines). Enfin, elles montrent également que l'augmentation de l'épaisseur de la garde inférieure d'argile, de l'ordre de la dizaine de mètres, permettrait une atténuation significative des impacts radiologiques dus aux isotopes des chaînes de filiation, mais pas de ceux dus aux radionucléides mobiles à vie longue qui dominent les impacts ; ainsi, cela a peu d'effet sur les valeurs des impacts radiologiques.

L'évaluation du scénario de forage traversant le stockage et atteignant la nappe (forage réalisé à partir de 500 ans après la fermeture du stockage dans un alvéole de déchets bitumés) conduit à des impacts inférieurs à 20 mSv/an, excepté pour la configuration à ciel ouvert étudiée (environ 46 mSv/an). Les impacts sont pilotés principalement par les isotopes 239 et 240 du plutonium et par l'américium 241 dans une moindre mesure.

Compatibilité intrinsèque des différentes familles de déchets bitumés avec un stockage à faible profondeur

Sur le plan de l'évaluation des situations d'intrusions humaines involontaires, l'ensemble des déchets bitumés ainsi que chaque famille étudiée individuellement présentent des impacts radiologiques et toxicologiques inférieurs aux indicateurs de protection. Sur ce plan, les déchets bitumés sont jugés compatibles avec un stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS.

Période post-50 000 ans

Aux grandes échelles de temps, les impacts radiologiques obtenus sont pour la plupart de l'ordre du mSv/an, et jusqu'à environ 4,5 mSv/an dans le cas du stockage à ciel ouvert pour la situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler ».

Selon la situation conventionnelle étudiée, les impacts sont principalement dus aux isotopes radium 226 et plomb 210 (situation d'altération de la fonction « limiter le transfert »), ou bien à l'isotope plomb 210 pour l'essentiel (situation d'altération de la fonction « isoler »).

L'Andra considère que ces valeurs d'impacts radiologiques de quelques mSv/an observés pour les architectures souterraines, restant de l'ordre de grandeur de la valeur de référence et ne dépassant pas le niveau d'exposition moyen aux rayonnements ionisants dus à la radioactivité naturelle en France, sont compatibles avec les objectifs visés à ces échelles de temps. Pour l'architecture de stockage à ciel ouvert étudiée les valeurs d'impacts observés pour la situation conventionnelle d'altération de la fonction « isoler » sont cependant supérieures à celles obtenues pour les architectures souterraines. La limitation significative de l'inventaire des déchets bitumés préconisée ci-avant permettrait de réduire le niveau d'impact à des valeurs compatibles avec les objectifs visés à ces échelles de temps.

» SYNTHÈSE CONCERNANT LES DÉCHETS BITUMÉS

Les études montrent que la totalité des déchets bitumés pris en compte pour ce rapport ne pourrait être stockée sur le site de la CCVS dans les conditions étudiées, en raison, d'une part des impacts dus aux radionucléides mobiles à vie longue sur la période 0 – 50 000 ans, compte tenu des propriétés hydro-dispersives de la couche des Argiles tégulines, d'autre part de la présence de sels chimiques (nitrates) en quantité importante dans leur composition, engendrant un marquage des eaux de la nappe.

Vis-à-vis des situations d'intrusion humaine involontaire, les familles de déchets bitumés étudiés sont intrinsèquement compatibles avec un stockage à faible profondeur.

Bien que la totalité des déchets bitumés étudiés ne puissent être stockée sur le site de la CCVS, une faible proportion de déchets bitumés, qu'il reste à définir, pourrait néanmoins être intégrée à l'inventaire d'étude du futur dossier d'options de sûreté. Ceci devra toutefois tenir compte des impacts dus aux autres catégories de déchets qui contiennent des radionucléides mobiles à vie longue générant des impacts radiologiques au niveau de la nappe, aux mêmes horizons temporels que le sélénium 79, l'iode 129 et le chlore 36 des déchets bitumés (déchets de graphite, déchets « technologiques »).

9.5.4 Déchets technologiques

Les déchets technologiques étudiés pour le présent rapport représentent environ 4 400 tonnes de déchets, soit 26 000 m³ de déchets conditionnés (cf. Chapitre 3.4 du présent rapport).

Période allant de 0 an à 50 000 ans

Capacité d'accueil en activité totale du stockage

S'agissant des impacts dus aux transferts par la voie eau avant 50 000 ans, les impacts radiologiques maximaux dépassent très significativement la contrainte de dose de 0,25 mSv/an (de 4 à 12 fois selon la configuration de stockage étudiée), sur une période située autour de 5 000 ans après la fermeture du stockage. Ils sont dus aux radionucléides mobiles à vie longue dans le système de stockage, à savoir le sélénium 79 et l'iode 129, ainsi que le chlore 36. Deux familles de déchets technologiques en particulier contiennent la quasi-totalité de l'inventaire en sélénium 79 et en iode 129 : il s'agit majoritairement des déchets magnésiens briquetés du CEA de Marcoule (environ 4 200 m³ de déchets conditionnés, soit 16 % du volume total des déchets technologique), et dans une moindre mesure des déchets technologiques d'Orano du site de La Hague conditionnés en colis CBF-C'2 (environ 4 150 m³ de déchets conditionnés, soit également 16 % du volume total des déchets technologiques). Par ailleurs, les impacts toxicologiques dus à l'uranium dépassent également les indicateurs de protection, de plus d'un ordre de grandeur pour la configuration en galerie souterraine de petit diamètre ; à cet égard, la majorité de l'inventaire en uranium des déchets technologiques est contenu dans les déchets magnésiens briquetés du CEA de Marcoule (environ 50 % de l'inventaire en uranium) et dans les déchets constitués de boues de filtration enrobées dans un liant hydraulique (environ 37 % de l'inventaire en uranium), cette famille représentant environ 4 300 m³ de déchets conditionnés, soit environ 17 % du volume total des déchets technologiques.

Par ailleurs, les valeurs d'impacts obtenues sont peu sensibles à la nature de l'architecture de stockage étudiée, bien qu'il apparaisse qu'une architecture à ciel ouvert soit moins favorable en comparaison à une architecture souterraine de petit diamètre.

Compatibilité intrinsèque des différentes familles de déchets technologiques avec un stockage à faible profondeur

Vis-à-vis des situations d'intrusions humaines involontaires, plusieurs familles de déchets technologiques étudiées conduisent à des impacts radiologiques et toxicologiques élevés dépassant de façon significative les indicateurs de protection. Il s'agit de déchets du CEA du site de Cadarache conditionnés en fûts de 500 L ou en coques de 870 L, qui seraient en l'état. Les déchets d'Orano conditionnés en colis CBF-C'2 ou en CAC ainsi que certains déchets métalliques du CEA présentent des impacts radiologiques inférieurs à 20 mSv/an, mais des impacts toxicologiques jugés élevés compte tenu des caractéristiques connues à date (déchets du CEA), en raison de la présence de chrome, de nickel et/ou d'uranium dans leur composition. Des études pourraient permettre de préciser les effets de ces substances toxiques chimiques au travers de la prise en compte de leur bioaccessibilité et biodisponibilité, afin de confirmer leur caractère compatible avec le stockage.

Pour les familles de déchets technologiques qui, telles que constituées pour la présente étude, ne sont compatibles avec le stockage étudié, des optimisations des conditionnements des déchets, un tri des colis de déchets pour sélectionner les moins actifs dans chaque famille, pourraient par exemple permettre de préciser les déchets dont la compatibilité permettrait de les étudier dans le cadre du dossier d'options de sûreté.

L'évaluation du scénario de forage traversant le stockage et atteignant la nappe (forage réalisé à partir de 500 ans après la fermeture du stockage dans un alvéole de déchets technologiques) conduit à des impacts supérieurs à 20 mSv/an pour toutes les configurations de stockage étudiées (autour de 45 mSv/an pour les architectures en souterrain et environ 84 mSv/an pour celles à ciel ouvert). Les impacts sont pilotés principalement par les isotopes 239 et 240 du plutonium contenus principalement dans des familles de déchets du CEA (déchets magnésiens briquetés, déchets alpha conditionnés en fûts de 870 L, et déchets de procédé), et dans une moindre mesure par l'américium 241 présent majoritairement dans la famille de déchets magnésiens briquetés du CEA et dans la famille de déchets

technologiques d'Orano conditionnés en colis CBF-C'2, qui représentent respectivement environ 14 800 m³ (déchets du CEA) et 4 150 m³ (colis CBF-C'2) de déchets conditionnés.

Période post-50 000 ans

Les impacts radiologiques obtenus aux grandes échelles de temps sont compris entre 0,3 mSv/an et 1,6 mSv/an pour les architectures souterraines étudiées. Ils sont plus élevés pour le cas d'un stockage à ciel ouvert dans la situation d'altération de la fonction « isoler » pour laquelle l'impact radiologique est évalué à 5 mSv/an.

L'Andra considère que les valeurs d'impacts radiologiques évalués dans les configurations souterraines, de l'ordre de grandeur de la valeur de référence et ne dépassant pas le niveau d'exposition moyen aux rayonnements ionisants dus à la radioactivité naturelle en France, sont compatibles avec les objectifs visés à ces échelles de temps. Elles sont sensiblement plus élevées pour l'architecture à ciel ouvert étudiée. Une réduction significative de l'inventaire des déchets technologiques, telle que préconisée ci-avant, permettrait de rendre les impacts radiologiques à ces échelles de temps compatibles avec les objectifs visés pour l'ensemble des architectures étudiées.

» SYNTHÈSE CONCERNANT LES DÉCHETS TECHNOLOGIQUES

Les évaluations des transferts des radionucléides par l'eau montrent que l'ensemble des déchets technologiques pris en compte pour ce rapport ne pourrait pas être stocké sur le site de la CCVS dans les conditions étudiées, en raison principalement des impacts dus aux radionucléides mobiles à vie longue sur la période 0 – 50 000 ans, compte tenu des propriétés hydro-dispersives de la couche des Argiles tégulines. Ces évaluations, ainsi que celle du scénario de forage traversant le stockage, mettent en évidence l'importante contribution à l'impact radiologique de certaines familles de déchets, en particulier la famille des déchets magnésiens briquetés du CEA et, dans une moindre mesure, les déchets technologiques d'Orano conditionnés en colis CBF-C'2.

Pour les familles de déchets technologiques qui, telles que constituées pour la présente étude, ne sont pas compatibles avec un stockage à faible profondeur vis-à-vis des scénarios d'intrusions humaines involontaires, des optimisations des conditionnements ou le tri des déchets les moins actifs pourraient permettre de rendre une partie des déchets compatibles. Des études sur l'effet de certaines substances toxiques chimiques pourraient également permettre de préciser la compatibilité d'autres familles avec un stockage à faible profondeur.

Une faible proportion de ces déchets, qu'il reste à définir, pourrait cependant être intégrée à l'inventaire d'étude du futur dossier d'options de sûreté. Ceci devra toutefois tenir compte des impacts dus aux autres catégories de déchets qui contiennent des radionucléides mobiles à vie longue générant des impacts radiologiques au niveau de la nappe, aux mêmes horizons temporels que le sélénium 79, l'iode 129 et le chlore 36 des déchets technologiques (déchets de graphite, déchets bitumés).

9.5.5 Ensemble des déchets étudiés

Les impacts radiologiques obtenus par l'évaluation des transferts des radionucléides par l'eau pour chaque typologie de déchets sont à cumuler aux plages de temps correspondantes. Sur la période de 0 an à 50 000 ans, pour les typologies de déchets contenant des radionucléides mobiles à vie longue pilotant les impacts radiologiques (déchets de graphite, déchets bitumés et déchets technologiques), l'indicateur de protection de 0,25 mSv/an est dans certains cas dépassé dès 500 ans après la fermeture du stockage, et jusqu'à environ 30 000 ans. Pour les déchets contenant des inventaires significatifs en isotopes des chaînes de filiation (déchets radifères, déchets bitumés et déchets technologiques), les impacts radiologiques sont également à sommer à 50 000 ans.

L'exclusion de certains déchets ou familles de déchets, jugés non compatibles avec le stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS, de l'inventaire d'étude du futur DOS, permettra de réduire les impacts radiologiques évalués en transfert par l'eau.

Ainsi, en complément des déchets radifères compatibles avec le stockage, une partie des déchets de graphite, bitumés et technologiques pourra être intégrée à l'inventaire d'étude dans le respect de la contrainte de dose sur la période 0 – 50 000 ans.

En outre, l'élimination des sels chimiques contenus dans certaines familles de déchets radifères, qu'il est nécessaire de mettre en œuvre pour limiter le marquage de la nappe aquifère par les nitrates notamment, permettra de réduire de façon notable les impacts radiologiques des déchets radifères et d'intégrer une grande partie de ces déchets à l'inventaire d'étude du futur DOS d'un centre de stockage sur le site de la CCVS.

» SYNTHÈSE SUR L'INVENTAIRE DES DÉCHETS À RETENIR POUR LE FUTUR DOSSIER D'OPTIONS DE SÛRETÉ

Les études montrent que les déchets radifères sont en majorité compatibles avec un stockage sur le site de la CCVS. Concernant les autres typologies de déchets étudiées (déchets de graphite, déchets bitumés, déchets technologiques), qui contiennent des radionucléides mobiles, une quantité très limitée de ceux-ci pourrait être également intégrée à l'inventaire d'étude du futur DOS d'un stockage sur le site de la CCVS.

La définition de cet inventaire d'étude nécessitera un travail partagé avec les producteurs de déchets, qui sera notamment alimenté par les conclusions de l'analyse multicritères et multi-acteurs des options de gestion des déchets FA-VL dans le cadre de l'article n° 29 du PNGMDR.

9.6 Enseignements concernant un site complémentaire adapté à un autre stockage à faible profondeur

Compte tenu du fait que l'ensemble des déchets étudiés pour le présent rapport ne pourra pas être stocké dans un futur stockage implanté sur le site de la CCVS, conclusion qui avait déjà été établie dans le PNGMDR 2016-2018, l'exercice mené dans le cadre de l'article n° 29 du PNGMDR propose différentes options de gestion pour ces déchets. Pour les déchets qui ne pourraient pas être stockés sur le site de la CCVS, un stockage à faible profondeur sur un autre site adapté pourrait être étudié pour en accueillir tout ou partie dans la mesure où une grande partie de ces déchets est intrinsèquement compatible avec un stockage à faible profondeur.

Pour mémoire, lors du processus de recherche d'un site adapté à l'accueil d'un stockage à faible profondeur qui a été conduit à partir de 2006, l'Andra a passé en revue les sites potentiels d'accueil sur la base de connaissances disponibles et de critères de recherche notamment sur le plan géologique et environnemental. La démarche d'appel à candidature engagée en 2008 avait conduit à identifier plusieurs communes présentant une formation géologique favorable à l'accueil d'un stockage implanté à faible profondeur. Par la suite, certaines de ces communes avaient retiré leur candidature et n'avaient donc pas fait l'objet d'études plus détaillées. En revanche, la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines a confirmé en 2013 son accord pour que l'Andra réalise des investigations géologiques sur son territoire, à la suite desquelles un site situé au nord de la CCVS a été défini pour poursuivre les études.

En se fondant sur les résultats des évaluations de sûreté après-fermeture menées pour le présent rapport, il apparaît que ce sont principalement des déchets de graphite, des déchets bitumés et des déchets technologiques qui seraient concernés par un stockage sur un site complémentaire, en raison des impacts radiologiques dus aux radionucléides mobiles à vie longue qu'ils contiennent, pour lesquels les performances au sens large de la couche des Argiles tégulines du site de la CCVS ne sont pas adaptées. Ces évaluations renseignent sur les principales caractéristiques que devrait présenter un site plus favorable pour le stockage de ces déchets. Les caractéristiques à considérer portent à la fois (i) sur les performances mêmes de la formation hôte, en particulier ses propriétés hydro-dispersives (conductivité hydraulique et coefficient de diffusion principalement), (ii) sur les conditions de transport des solutés au sein de celle-ci (régime diffusif ou convectif) qui sont fonction de l'environnement géologique et hydrogéologique du site et alentour, ainsi que (iii) sur les caractéristiques du ou des exutoires. D'autre part, les performances en termes de rétention des radionucléides interagissant (actinites,

lanthanides, métaux…) nécessitent *a minima* d'être équivalentes à celles des Argiles tégulines du site de la CCVS.

Pour atténuer davantage les transferts des radionucléides mobiles des déchets de graphite (principalement ^{14}C sous forme organique et ^{36}Cl), des déchets bitumés et des déchets technologiques (^{79}Se et ^{129}I) par rapport aux Argiles tégulines du site de la CCVS, la combinaison de plusieurs paramètres et caractéristiques est à rechercher. L'analyse suivante peut être menée :

- la formation hôte doit posséder des propriétés intrinsèques de confinement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, c'est-à-dire présenter à la fois des capacités de rétention de ces éléments et des propriétés restreintes de transport des solutés. Les roches sédimentaires composées principalement de minéraux argileux permettent de répondre à ces prérequis. Néanmoins, afin de disposer d'une performance accrue vis-à-vis de la conductivité hydraulique et des coefficients de diffusion (environ un ordre de grandeur plus faibles que ceux des Argiles tégulines, toutes choses égales par ailleurs), les roches argileuses recherchées devront présenter une texture fine et compacte. De telles textures se présentent dans des roches argileuses indurées caractérisées soit par un fort niveau de compaction (lié à leur enfouissement au cours de leur histoire géologique), soit par une diagenèse chimique (avec colmatage de la porosité par un ciment minéral par exemple de la calcite). Les roches recherchées sont de fait des argiles marno-silteuses ou des marnes silteuses. La caractérisation précise et la quantification de ces propriétés ne sont accessibles que par réalisation de prélèvements et d'analyses, mais la nature de la roche constitue un premier indicateur des propriétés hydro-dispersives qu'elle possède ;
- le gradient de charge hydraulique au travers de la couche hôte, qui est fonction de l'environnement hydrogéologique du site et alentour doit être faible car il contribue au moteur hydraulique des phénomènes de transfert par convection des solutés. Une bonne maîtrise de ces conditions au cours du temps conduira à rechercher des contextes hydrogéologique et hydrologique dont le fonctionnent est simple et peu sensible à des évolutions dans le temps. Un contexte hydrogéologique favorisant des gradients hydrauliques descendants est recherché dans un objectif de bonne maîtrise des exutoires et pour s'affranchir des contraintes liées à l'artésianisme ;
- les conditions de transport des solutés : si elles sont de type « diffusion dominante », cela permet une meilleure atténuation du transfert de solutés (qui sera fonction du carré de l'épaisseur de garde entre le stockage et l'exutoire), mais nécessite une meilleure maîtrise des conditions de surface et son évolution dans le temps, notamment au regard des phénomènes d'érosion et d'altération car les paramètres de transport de la garde supérieure peuvent influer. Si elles sont de type « convection dominante », l'atténuation du transfert de solutés sera moins forte (fonction de l'épaisseur de garde entre le stockage et l'exutoire, qui devra être grande pour retarder le transfert des solutés jusqu'à l'exutoire), mais le besoin de maîtriser les conditions de surface est moins important, avec toutefois une attention sur l'évolution dans le temps du contexte hydrogéologique et hydrologique. Dans tous les cas, pour les radionucléides mobiles précités, une formation d'une centaine de mètres d'épaisseur est à cibler ;
- l'exutoire doit être aisément définissable et présenter un débit suffisant pour permettre une bonne dispersion des solutés en son sein.

En outre, l'épaisseur de la couche hôte devra être suffisante pour permettre d'implanter le stockage à une profondeur d'au moins 30 m au toit des alvéoles de stockage et disposer d'une garde inférieure *a minima* équivalente, bien qu'il pourrait être recherché des épaisseurs de garde inférieure plus importantes selon le régime de transport des solutés.

Ainsi la nature de la formation, son épaisseur, ses propriétés hydro-dispersives et l'environnement hydrologique/hydrogéologique constituent un ensemble de caractéristiques clés à examiner. Une partie des caractéristiques mentionnées implique de réaliser des investigations de terrain et de disposer d'échantillons de roches pour accéder à des paramètres quantitatifs afin de définir les conditions de transport des solutés, qui constituent un des éléments majeurs des évaluations de sureté en après-fermeture du stockage.

À ce stade, l'Andra a identifié les qualités et caractéristiques que devrait présenter un site adapté au stockage à faible profondeur de déchets de graphite, bitumés et technologiques. De plus, l'Andra considère que les formations argileuses à l'affleurement ou accessibles en pied de côte sont à privilégier pour la recherche de site, car elles faciliteraient en outre la réalisation technique d'un stockage à faible profondeur.

Par ailleurs, l'Andra a une bonne confiance dans l'existence de secteurs géographiques sur le territoire national métropolitain correspondant *a priori* aux conditions énoncées ci-avant, fondée sur les données disponibles notamment sur la nature des formations, leur épaisseur et leur caractère homogène. Ces éléments de connaissance permettront d'initier une démarche de recherche de site. Ensuite, ils devront être étayés par la réalisation de campagnes d'investigations géologiques pour préciser en particulier les paramètres hydro-dispersifs du site et ainsi confirmer le potentiel d'accueil d'un stockage de déchets de graphite, bitumés et/ou technologiques. Dans ce cadre, un processus de recherche d'un site adapté au stockage de ces déchets devrait ainsi rapidement être défini ; celui-ci intégrera les critères présentés dans l'action territoire.2 du PNGMDR 2022-2026 (3) tels qu'environnementaux et de sûreté, d'intérêt des territoires pour le projet.

Afin d'élargir le champ des possibles et ne pas omettre d'autres solutions techniques plus en rupture qui pourraient présenter un intérêt, tels des concepts sous-marins accessibles depuis les terres qui sont à l'étude à l'étranger (par exemple au Royaume Uni), l'Andra mènera une démarche de veille technique sur les solutions à l'étude ou en cours de développement à l'étranger. Cela concernera notamment des concepts « côtiers » avec une implantation du stockage dans des formations sédimentaires en mer mais localisée à proximité des côtes. Les résultats de cette veille pourront opportunément alimenter la recherche de site.

En tout état de cause, l'Andra considère que les résultats obtenus dans les études menées dans le cadre du rapport art.33 ne remettent pas en cause le rôle du site de la CCVS pour gérer une grande partie des déchets radifères et qu'il constitue en cela une solution de gestion appropriée et proportionnée aux enjeux de ces déchets. Ainsi, le site recherché constituera une solution complémentaire à celle développée sur le site de la CCVS. À cet égard, le principe d'un concept complémentaire à faible profondeur est présenté dans le rapport options de gestion FA-VL (9).

9.7 Synthèse des enseignements appliquée à la poursuite du projet

L'intégration de l'ensemble des résultats obtenus et des enseignements tirés permet de montrer, sur le plan technique, la faisabilité d'un stockage à faible profondeur sur la zone d'étude du site de la CCVS pour une partie des déchets étudiés dont l'inventaire sera établi en lien avec les producteurs de déchets, et d'envisager la poursuite du projet. En outre, à l'issue des évaluations de sûreté menées dans le cadre du DOS, des capacités d'accueil seront établies, notamment pour les radionucléides mobiles, et l'inventaire des déchets associé pourra être défini.

Néanmoins, à la lumière des résultats des évaluations de sûreté après-fermeture présentées dans ce rapport, un premier contour de cet inventaire peut être esquissé, pour interroger dès à présent la viabilité technico-économique du projet.

En se fondant sur les enseignements acquis sur les déchets étudiés, présentés au chapitre 9.5 du présent rapport, il apparait que la majorité des déchets radifères peut être intégrée à l'inventaire d'étude pour le futur DOS, ainsi qu'une quantité très limitée de déchets contenant des radionucléides mobiles (déchets de graphite, déchets bitumés, déchets technologiques). Pour ces derniers, la sélection des déchets et des quantités associées à retenir pour cet inventaire ne peut être définie à ce stade et se fera en lien avec les producteurs de déchets. Bien que cet inventaire complémentaire aux déchets radifères ne puisse à ce stade être défini avec précision, les enseignements acquis et présentés dans le présent rapport fournissent des éléments sur les caractéristiques que les déchets sélectionnés devront respecter, en particulier (i) sur la limitation de l'inventaire en carbone 14 des déchets de graphite et sur les taux de relâchement de ce radionucléide, (ii) sur la limitation des inventaires en sélénium 79 et en iode 129 pour les déchets bitumés et les déchets technologiques, ainsi qu'en chlore 36, et (iii) sur la limitation des quantités de sels chimiques présents dans les déchets bitumés et technologiques. Ces critères ne sont pas exhaustifs et seront complétés dans le cadre du DOS.

Pour les déchets radifères, il peut être évalué un volume de déchets qui pourraient être stockés sur la zone d'étude du site de la CCVS, après notamment exclusion de certains déchets ou familles de déchets, jugés non compatibles avec le stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS, de l'inventaire d'étude du futur DOS, de l'ordre de 70 000 m³. Les producteurs seraient principalement Solvay, détenteur du plus grand volume de déchets potentiellement stockés (environ 30 000 m³), puis le CEA et Framatome (chacun environ 17 000 m³), volumes estimés selon les hypothèses de conditionnement de ces déchets prises pour la présente étude. Les déchets issus de petits producteurs non électronucléaires représenteraient environ 6 000 m³ et les déchets sous responsabilité de l'Andra environ 2 000 m³. Ces éléments sont à considérer ici uniquement comme des hypothèses qu'il conviendra de consolider en lien avec les producteurs.

Pour les déchets de graphite, bitumés et technologiques, leur volume sera limité à quelques milliers de m³ du fait de la présence de radionucléides mobiles à vie longue principaux contributeurs à l'impact ; leur sélection devra également répondre à d'autres critères tels que les besoins industriels des producteurs. Le volume retenu sera fonction de la nature des radionucléides mobiles et des impacts radiologiques cumulés qu'ils occasionnent, afin de respecter la contrainte de dose de 0,25 mSv/an sur la période 0 - 50 000 ans et l'objectif de dose de l'ordre de quelques mSv/an au-delà de 50 000 ans.

Sur la base de ces hypothèses, l'Andra estime que développer un stockage pour un tel volume présente un intérêt pour la gestion des déchets FA-VL. De plus, la synergie due à la présence des centres de stockage du CSA et du Cires à proximité géographique de la zone d'étude conforte l'intérêt industriel de ce projet.

À cet égard, il convient de rappeler que le site de la CCVS est aussi identifié pour le développement d'un stockage de déchets TFA. Aussi, la possibilité de développer un centre de stockage multi-filières sur le site de la CCVS sera à instruire tant du point de vue technique qu'économique.

À l'issue des évaluations de sûreté menées dans le cadre du DOS, des capacités radiologiques devront être établies, notamment pour les radionucléides mobiles, et l'inventaire des déchets associé pourra être défini.

10

Perspectives

10.1 Besoin de connaissances complémentaires sur la zone d'étude 202
10.2 Caractérisation des aléas naturels 203
10.3 Perturbations mécaniques dues à la réalisation des ouvrages de stockage 203
10.4 Évolution dans le temps de la couverture du stockage 203
10.5 Comportement hydraulique du système de stockage et de son environnement 203
10.6 Comportement géochimique du système de stockage 204
10.7 Relâchement du carbone 14 des déchets de graphite 204
10.8 Études particulières à mener pour les architectures 204
10.9 Comportement au cours du temps des déchets bitumés en conditions de stockage 205
10.10 Études prospectives sur le conditionnement de certains déchets 205

Les étapes suivant les études présentées dans ce rapport vont consister, dans un premier temps, (i) à établir l'inventaire des déchets qui seront pris en compte pour le dossier d'options de sûreté, (ii) à faire des choix sur la ou les architectures de stockage qui seront étudiées afin d'établir les options de conception et de sûreté des installations de stockage et (iii) à consolider les hypothèses de conditionnement. Pour cela, l'Andra s'appuiera notamment sur les résultats présentés dans ce rapport et les enseignements tirés, ainsi que sur le positionnement et les recommandations de l'ASN et de son appui technique.

Par la suite, des études visant à établir les options de sûreté de la future installation de stockage sur le site de la CCVS devront être menées, en particulier pour l'étude des dispositions de maîtrise des risques lors de la phase d'exploitation et l'évaluation de scénarios d'évolution altérée du stockage en phase d'après-fermeture.

À ce stade, les études et acquisitions de connaissances complémentaires présentées ci-après ne constituent pas une liste exhaustive d'études à mener, mais sont celles qui sont identifiées comme *a minima* nécessaires pour améliorer les connaissances notamment sur la zone d'étude, réduire des incertitudes et préciser des hypothèses prises à ce stade. Ces études s'inscrivent dans le développement itératif du projet et en particulier dans l'objectif d'élaborer le DOS ; elles seront engagées en fonction du positionnement de l'ASN sur la poursuite des études. Les choix qui seront faits, en matière notamment d'architecture de stockage et d'inventaire de déchets, conduiront à orienter la liste des études à réaliser pour le dossier d'options de sûreté.

Par ailleurs, des études seront à mener en lien avec les producteurs sur le comportement en stockage sur le long terme de certains déchets ou colis de déchets. Enfin, la poursuite d'étude en cours par les producteurs sur les conditionnements des déchets complètera les éléments nécessaires à l'élaboration du DOS.

10.1 Besoin de connaissances complémentaires sur la zone d'étude

Les deux campagnes de reconnaissances géologiques réalisées en 2013-2015 et 2017 ont permis d'acquérir des connaissances sur la partie de la zone d'étude située au sud de la route départementale D400, tel que rappelé dans le chapitre 4.2 du présent rapport. Compte tenu de l'augmentation de la profondeur d'implantation du stockage depuis le rapport d'étape de 2015 (1), les connaissances disponibles nécessitent d'être complétées en menant des caractérisations géologiques de la couche des Argiles tégulines située au nord de la route départementale D400, où le mur de la couche des Argiles tégulines est plus profond qu'au sud de celle-ci.

En outre, des données complémentaires sont nécessaires sur les caractéristiques géomécaniques et les propriétés géotechniques de la couche des Argiles tégulines, pour laquelle les données disponibles portent principalement sur les 20 premiers mètres d'épaisseur.

Des compléments d'acquisition seront nécessaires pour préciser les paramètres de rétention de certains radionucléides et substances toxiques chimiques (notamment l'uranium) pour mieux prendre en compte les effets d'interfaces avec l'atmosphère et des contextes de couverture. Le comportement du carbone 14 (notamment le carbone 14 organique) dans les Argiles tégulines (et plus généralement dans les roches argileuses) constitue également une perspective d'étude afin de réduire le niveau de conservatisme pour ce radionucléide. Les propriétés hydro-dispersives seraient également à consolider notamment pour la première dizaine de mètres depuis la surface.

L'évolution future du site constitue un point important de la sureté après-fermeture du stockage. Les études réalisées ont permis d'identifier des méthodes pertinentes d'évaluation quantitative de l'érosion et mis en exergue certaines limites notamment pour l'évolution de site au-delà de 50 000 ans. D'autres phénomènes, telle que la dynamique fluviatile, constituent des éléments à mieux quantifier. En outre, il y a besoin de développer des méthodologies communes à l'échelle européenne pour une meilleure évaluation de l'évolution climatique long terme et les effets induits notamment en termes d'évolution géomorphologique. Une partie de ces études pourrait se développer dans le cadre du projet européen EURAD-II.

10.2 Caractérisation des aléas naturels

Pour élaborer les options de conception du stockage pour le dossier d'options de sûreté, les aléas naturels devront être établis : aléas climatiques (neige, pluies, vent) et l'aléa sismique devront être précisés, en se fondant sur la définition des aléas naturels de la démonstration de sûreté du CSA.

10.3 Perturbations mécaniques dues à la réalisation des ouvrages de stockage

La définition des perturbations mécaniques, selon les solutions techniques retenues pour réaliser les alvéoles de stockage, devra être précisée : extension des perturbations, influence des perturbations sur les propriétés hydro-dispersives des argiles, efficience du phénomène d'auto-colmatage.

En particulier, pour un stockage à ciel ouvert, les perturbations engendrées par les phénomènes de décompression du fond de fouille ainsi que par la présence des fiches d'ancrage devront être étudiées, afin de mieux les caractériser et de vérifier si la mise en charge du stockage par mise en place des colis de déchets puis de la couverture remaniée permet de recomprimer les argiles et de préserver leurs propriétés initiales.

Pour les architectures en galeries souterraines, les extensions des perturbations mécaniques devront être confirmées par des études plus détaillées afin de conforter les hypothèses prises en compte et de caractériser les effets de ces perturbations sur les propriétés hydro dispersives des Argiles tégulines.

10.4 Évolution dans le temps de la couverture du stockage

Que la couverture du stockage soit remaniée ou constituée d'argiles en place, les évolutions dans le temps de son comportement hydromécanique et de ses performances devront être caractérisés. En particulier, les sujets suivants seront étudiés :

- les effets des affaissements des vides laissés dans le stockage ;
- les effets des tassements au cours du temps (cas de la couverture remaniée) ;
- les effets dus au gonflement des enrobés bitumés par reprise d'eau si des déchets bitumés figurent dans l'inventaire (cf. Chapitre 10.9 du présent rapport).

Ces études devront permettre de préciser si ces phénomènes sont de nature à modifier les performances de la couverture, en favorisant les déformations et fissurations ou en générant une plastification des argiles. Elles permettront de définir certaines exigences de conception, telles que les déformations admissibles et les taux de vides maximums admissibles au sein du stockage.

En outre, l'évaluation du transitoire hydraulique-gaz (THG) au sein de la couverture sera à mener afin de mieux définir les conditions de transfert des radionucléides (notamment le radon) depuis le stockage et les risques d'endommagement de la couverture. Ces évaluations devront intégrer les phénomènes de resaturation et tenir compte des gaz potentiellement émis par les déchets ou par les phénomènes de corrosion des aciers contenus dans le stockage.

Les conditions géochimiques prévalant dans la couverture au cours du temps seront à préciser notamment vis-à-vis de potentiels phénomènes d'oxydation/altération qui peuvent influer sur le transfert des radionucléides.

10.5 Comportement hydraulique du système de stockage et de son environnement

Un modèle hydrogéologique devra être conçu et développé, de façon à améliorer la compréhension des gradients de charge hydraulique, l'incidence des ouvrages de stockage sur les gradients et leur évolution sur le long terme. Il permettra de conforter les connaissances actuelles sur les écoulements et les transferts des solutés dans le milieu géologique. Dans ce cadre, des compléments d'acquisition piézométriques sont à envisager.

Par ailleurs, la charge hydraulique dans les Sables verts et dans les argiles devra également être caractérisée pour dimensionner le soutènement des ouvrages de stockage et pour prévoir des dispositions adaptées pour gérer les eaux d'infiltration ; cela permettra en outre d'évaluer les risques d'instabilité du fond de fouille pour les architectures à ciel ouvert.

Des études complémentaires seraient également à conduire pour mieux quantifier les écoulements d'eau superficielle, en particulier au niveau de l'ancien lit de la Brévonne qui draine ces eaux de surface.

A l'instar des autres centres et projets de stockages, il est également attendu de disposer d'évaluation relative au comportement hydraulique-gaz du stockage permettant de quantifier les conditions de resaturation du stockage et l'effet de potentiel termes sources gaz.

10.6 Comportement géochimique du système de stockage

Certains déchets contiennent des substances chimiques qui peuvent modifier les performances des composantes du stockage et de la couche en champ proche. Les évaluations de sureté en après-fermeture ont considéré l'impact des perturbations géochimiques attendues (perturbation alcaline, perturbation liée aux complexants, aux sels dissous…). Les connaissances supports utilisées pour ces évaluations sont celles issus du projet global Cigéo qui permet de borner les phénomènes. Néanmoins, il est attendu de disposer de connaissances plus spécifiques des conditions géochimiques attendues et pour la roche hôte. Des compléments d'acquisition de données sur le comportement des radionucléides pour ces conditions géochimiques seront nécessaires afin de préciser leurs paramètres de transport. Les évaluations des perturbations géochimiques sont également à consolider en mobilisant des modèles géochimiques qui permettront de mieux apprécier les différents niveaux de conservatismes pris en compte dans le cadre de ce dossier.

10.7 Relâchement du carbone 14 des déchets de graphite

Pour les évaluations des scénarios des transferts par l'eau des déchets de graphite, la prise en compte des dernières valeurs obtenues expérimentalement à l'été 2023 de taux de relâchement actualisées du carbone 14 pour certaines familles d'empilements (Saint-Laurent A1 et A2, Chinon A2) (incluant leurs incertitudes), conduisent à un taux de relâchement « moyen » légèrement plus faible (-27 %) que celui indiqué au chapitre 8.2.1.2 du présent rapport dans la section « cinétique de relâchement des radionucléides », réduisant ainsi de façon limitée les débits molaires de carbone 14 organique en sortie d'argile hôte au mur de la couche, de l'ordre de la quinzaine à la vingtaine de pourcents seulement.

Toutes choses égales par ailleurs (dont les propriétés hydro-dispersives du site de la CCVS), cet exemple illustre clairement que la réduction de plusieurs ordres de grandeur des débits molaires de carbone 14 organique au mur de la couche et des doses associées à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » ne pourrait être obtenue qu'avec une réduction très importante (au moins un ordre de grandeur) des taux de relâchement de chacune des familles d'empilements, ce qui ne semble pas, ou très difficilement, atteignable compte tenu de l'état des connaissances.

La pertinence de la poursuite des essais de lixiviation pour préciser encore les taux de relâchement valorisables du carbone 14 pourra être évaluée en lien avec EDF et le CEA.

10.8 Études particulières à mener pour les architectures

<u>Pour les architectures à ciel ouvert</u>

Des calculs supplémentaires de dimensionnement des ouvrages seront à effectuer, après acquisitions complémentaires géotechniques et hydrogéologiques. Ces évaluations devront permettre notamment de préciser les pentes admissibles de l'excavation en phase de construction, d'exploitation et de fermeture, en lien avec la réalisation d'une structure de mise sous abri mise en place pour protéger la zone excavée des intempéries. Les calculs de dimensionnement porteront également sur les caractéristiques des soutènements verticaux (épaisseurs, hauteur, fiches, type de matériau).

Un prédimensionnement de la structure de mise sous abri sera également à étudier, en se fondant sur les exigences liées à la sûreté en exploitation qui seront établies au préalable. À partir de ces éléments, la faisabilité technique de la structure devra être confortée et étudiée.

En outre, des études sur la réalisation de la couverture remaniée devront être menées. Pour sa conception, les études pourront porter sur les leviers techniques permettant de limiter les déformations de la couverture, que ce soit sous l'effet des vides résiduels dans le stockage ou du gonflement de certains colis, ou pour limiter l'effet des gaz émis par le stockage. De plus, des études sur l'interface entre les argiles en place et la couverture remaniée devront être menée, de façon à caractériser cette zone singulière et son évolution dans le temps.

La formation d'un éventuel effet baignoire, pouvant survenir si la couverture remaniée du stockage est significativement plus perméable que les Argiles tégulines entourant le stockage, laissant infiltrer plus d'eau dans la couverture que dans les argiles et conduisant à une accumulation d'eau dans le stockage et l'entraînement de radionucléides ou substances toxiques chimiques vers la biosphère, devra également être étudiée.

Pour les architectures souterraines

Des études dédiées devront permettre de définir les performances requises pour les ouvrages de fermeture et d'en préciser la conception.

La sensibilité de la couverture en place aux vides résiduels, à la production de gaz par le stockage (issu de la corrosion des aciers notamment) ou au gonflement de certains colis devra être étudiée qui constitue un enjeu particulier pour ces architectures.

10.9 Comportement au cours du temps des déchets bitumés en conditions de stockage

Le phénomène de gonflement des déchets bitumés par reprise d'eau au cours du temps fait l'objet d'études complémentaires par l'Andra et les producteurs de déchets bitumés pour leur stockage dans le projet de centre de stockage Cigéo.

Dans l'attente de ces résultats, ce phénomène de gonflement n'a pas fait l'objet d'étude spécifique au stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS. Cependant, si *in fine* une partie de ces déchets figure à l'inventaire des déchets étudiés dans le cadre du dossier d'options de sûreté, le phénomène de gonflement des enrobés bitumés devra être étudié.

10.10 Études prospectives sur le conditionnement de certains déchets

À ce jour, Framatome n'a pas défini le conditionnement de stockage pour ses déchets ; c'est pourquoi des hypothèses ont été prises en compte pour les études du présent rapport, mais ces éléments sont appelés à évoluer. Des optimisations relatives au conditionnement des déchets radifères produits par l'usine de Framatome à Jarrie sont actuellement à l'étude *via* un procédé de vitrification. Ces études ont pour objet de démontrer si ce procédé de blocage pourrait apporter des améliorations du conditionnement de ces déchets en vue de leur stockage sur le site de la CCVS.

Cependant, ce type de colis pourrait conduire à étudier, pour les évaluations de sûreté après-fermeture, d'autres types de situations d'intrusion humaine que le forage géotechnique et le chantier routier pour vérifier sa compatibilité avec le stockage. De plus, le comportement des déchets vitrifiés dans le temps et en situation de stockage, et sous l'effet de la production de radon en son sein, reste à être étudié.

Ainsi, des études complémentaires devront être menées pour évaluer les performances et les apports pour la sûreté long terme d'un tel colis de déchets.

11

Conclusion générale

Le présent rapport constitue le dossier d'options techniques et de sûreté établi en réponse à l'article 33 de l'arrêté du 9 décembre 2022 établissant les prescriptions du PNGMDR (4). Il présente les études qui ont été menées par l'Andra, d'une part sur la faisabilité technique de réaliser et d'implanter un stockage à faible profondeur sur le site de la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines, d'autre part sur la sûreté après-fermeture du stockage au travers d'évaluations de scénarios de sûreté sur la période allant de la fermeture du stockage à au-delà de 50 000 ans. Il présente également les éléments de connaissance acquis par l'Andra sur les propriétés du milieu géologique de la zone d'étude (située au nord de la CCVS) et de son évolution future. L'analyse de la sûreté en phase d'exploitation n'a pas été menée pour le présent rapport.

Celui-ci s'inscrit dans la poursuite des études exploratoires menées par l'Andra en 2013-2015 et présentées dans le rapport d'étape de 2015 (1). Les enseignements issus de ces premières études, les conclusions de l'Autorité de sûreté nucléaire sur ce rapport d'étape et l'épaisseur maximale de 70 m de la couche des Argiles tégulines présente sur la zone d'étude, ont notamment conduit, pour les études présentées dans le présent rapport, à définir une profondeur d'implantation de 30 m au toit des alvéoles de stockage.

Le périmètre des déchets pris en compte dans les études, établi en lien avec les producteurs, comporte les déchets catégorisés FA-VL qui ont fait l'objet des études présentées dans le rapport d'étape de 2015, des déchets catégorisés FA-VL dans l'Inventaire national 2023 ainsi que des déchets aujourd'hui catégorisés MA-VL et qui pourraient prétendre à un stockage à faible profondeur compte tenu de leurs caractéristiques radiologiques. Les déchets ainsi « candidats » à un stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS ont des origines, des natures et des caractéristiques radiologiques et physico-chimiques très variées. Ils représentent un volume d'environ 277 000 m^3 de déchets conditionnés. Pour les études présentées dans le présent rapport, ils ont été regroupés en quatre grandes typologies – les déchets radifères, les déchets de graphite, les déchets bitumés et les déchets technologiques –, considérées indépendamment les unes des autres à ce stade des études dans le but d'évaluer le caractère compatible de chacune avec un stockage à faible profondeur sur ce site.

S'agissant de l'implantation du stockage, les études montrent que les enjeux environnementaux sont importants sur la zone d'étude de la CCVS, mais qu'ils ne sont pas nature à identifier d'éléments rédhibitoires à l'implantation d'une installation de stockage. Ainsi l'Andra considère que les conclusions de ces études sur la zone d'étude de la CCVS permettent de poursuivre la démarche d'implantation d'un stockage à faible profondeur, réalisée dans le cadre d'une séquence « éviter – réduire – compenser ». Les secteurs retenus pour poursuivre les études de conception sont ceux où le mur de la couche des Argiles tégulines est situé à au moins 60 m de profondeur (situés dans la partie nord de la zone d'étude).

S'agissant des techniques constructives pouvant être mises en œuvre pour réaliser un stockage dont le toit est situé à 30 m de profondeur, la revue des meilleures techniques disponibles réalisée par l'Andra n'a pas mis en évidence de technique rédhibitoire à ce stade. En outre, les résultats obtenus des évaluations de sûreté ne permettent pas de mettre en évidence un type d'architecture qui serait plus favorable qu'une autre (c'est-à-dire conduisant à des impacts les plus faibles), parmi celles étudiées. En effet, selon la période considérée (0 – 50 000 ans ou post 50 000 ans) et la nature du scénario de sûreté après-fermeture évalué, les tendances varient, c'est-à-dire qu'une architecture de stockage peu favorable pour un des scénarii évalués peut s'avérer la plus favorable pour les autres scénarios. Ainsi, les choix à venir d'architectures de stockage et de techniques constructives associées, qui pourront intégrer un mixte d'architectures de stockage, seront notamment fonction de l'inventaire des déchets retenu pour poursuivre les études. En outre, leurs incidences environnementales liées aux déblais produits, aux matériaux consommés et aux émissions de gaz à effet de serre devront être prises en compte, de même que des analyses technico-économiques.

S'agissant des évaluations de sûreté après-fermeture, l'Andra présente dans ce rapport sa démarche de sûreté pour un stockage de déchets dont le niveau d'activité est faible mais qui comportent des radionucléides à vie longue (certaines périodes radioactives allant au-delà de plusieurs dizaines de milliers d'années). Pour ces échelles de temps, l'évolution géomorphologique d'un site de stockage à faible profondeur joue un rôle majeur pour établir la démonstration de sûreté après fermeture ; les grands changements climatiques susceptibles de s'opérer vont déterminer les processus d'altération, d'érosion et de dépôt qui façonneront l'évolution future du site. Pour couvrir le domaine des évolutions

possibles au niveau de la zone d'étude, l'Andra a considéré deux périodes dans la démonstration de sûreté après fermeture : la première allant jusqu'à 50 000 ans et au cours de laquelle l'état des connaissances permet de justifier le maintien des principales fonctions de sûreté du système de stockage, la seconde allant au-delà de 50 000 ans, période au cours de laquelle les incertitudes sur l'évolution géomorphologique ne permettent pas de garantir le maintien de ces fonctions.

Pour la première période, l'Andra a évalué, pour trois types d'architecture de stockage envisageables, deux grandes catégories de scénarios de sûreté : un scénario d'évolution normale du stockage, afin notamment d'évaluer la capacité d'accueil du stockage en activité totale de chacune des quatre typologies de déchets, et des scénarios d'intrusion humaine involontaire, afin d'établir la compatibilité intrinsèque des déchets « candidats » au stockage sur le site de la CCVS.

Pour la seconde période, l'Andra propose une démarche de sûreté fondée sur la définition de « situations conventionnelles », représentations fonctionnelles « extrêmes » de l'état géométrique et physico-chimique du stockage compte tenu des incertitudes existant sur l'évolution géomorphologique du système de stockage. L'objectif est d'évaluer, selon une approche raisonnablement majorante, les impacts radiologiques potentiels du stockage sur le très long terme, et de consolider les capacités d'accueil radiologiques du stockage. Pour ces situations, l'Andra considère que des niveaux d'impacts, de l'ordre de grandeur de la valeur de référence (0,25 mSv/an) et pouvant aller jusqu'à des niveaux restant inférieurs au niveau d'exposition moyen aux rayonnements ionisants dus à la radioactivité naturelle en France (estimée autour de 5 mSv/an), restent acceptables compte tenu notamment du niveau des conservatismes pris en compte pour ces situations et leur caractère conventionnel.

Ces évaluations de sûreté ont mis en exergue que la totalité des déchets étudiés ne pourra pas être stockée dans l'installation à l'étude sur le site de la CCVS ; néanmoins, elles identifient un inventaire de déchets d'une volumétrie suffisante (environ 70 000 m^3) qui pourrait constituer un stockage sur le plan industriel, composé de la majorité des déchets radifères étudiés dans le présent rapport. Cependant, une réduction significative des quantités de sels chimiques présents dans certains de ces déchets est nécessaire pour limiter le marquage de la nappe et réduire significativement les impacts radiologiques dus aux déchets radifères. Concernant les autres typologies de déchets étudiées, à savoir les déchets de graphite, les déchets bitumés et les déchets technologiques, les évaluations de sûreté montrent que seule une quantité très limitée de ceux-ci pourrait être étudiée pour le dossier d'options de sûreté de la future installation de stockage, en raison des radionucléides mobiles qu'ils contiennent et qui dominent les impacts radiologiques évalués sur la période 0 – 50 000 ans. Par ailleurs, l'acceptabilité des niveaux d'impact dus aux toxiques chimiques reste un sujet à conforter.

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

Les études ont en outre permis d'esquisser les caractéristiques d'un site qui présenterait des performances adaptées au stockage à faible profondeur des déchets non éligibles au stockage sur le site de la CCVS (déchets de graphite, les déchets bitumés et les déchets technologiques). Compte tenu des connaissances dont elle dispose sur le contexte géologique français, l'Andra a une bonne confiance dans l'existence d'un site possédant ces caractéristiques sur le territoire national métropolitain. Dans ce cadre, un processus de recherche d'un site adapté au stockage de ces déchets devrait ainsi rapidement être défini.

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

À l'issue de l'instruction du présent rapport par l'ASN et en fonction de son positionnement sur les études menées, et en particulier sur la démarche de sûreté après-fermeture présentée par l'Andra, les études des options de sûreté du stockage seront engagées.

Dans un premier temps, elles consisteront (i) à établir l'inventaire des déchets qui seront pris en compte pour le dossier d'options de sûreté, (ii) à faire des choix sur la ou les architectures de stockage qui seront étudiées afin d'établir les options de conception et de sûreté des installations de stockage et (iii) à consolider les hypothèses de conditionnement.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 2-1	Classification française des déchets radioactifs	16
Figure 2-2	Zone restreinte telle que définie en 2013 pour réaliser de premières études pour la conception d'une installation de stockage de déchets FA-VL	23
Figure 3-1	Déchets radifères entreposés sur le site de Solvay de La Rochelle – Résidus radifères RRA (à gauche) et Résidus solides banalisés RSB (à droite)	31
Figure 3-2	Déposante du site du CEA d'Itteville (source illustration - Inventaire national Andra)	32
Figure 3-3	Colis de déchets dits « sulfate de plomb radifères » entreposés sur le site du CEA de Cadarache (source illustrations - Inventaire national Andra)	32
Figure 3-4	Brique de l'empilement du réacteur EDF de Bugey 1 (gauche), rondins de la protection biologique du réacteur de Bugey 1 (milieu) et chemise des réacteurs EDF de Saint Laurent (droite) (source illustrations EDF)	35
Figure 3-5	Fût de déchet bitumés du site du CEA de Marcoule (en bleu à droite) et le sur-fût EIP (à gauche) (source Inventaire national Andra)	36
Figure 4-1	Localisation des forages réalisés lors de la première phase de la campagne 2013-2015 sur le secteur d'étude de la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines	43
Figure 4-2	Carte géographique de la zone restreinte (10 km²) avec localisation des forages (points rouges) et tranchées (carrés bleus) réalisés. Les lignes de versants sont représentées en pointillés violets et les lignes points hauts en pointillés orange	45
Figure 4-3	Zones potentiellement artésiennes à proximité de la zone d'étude	45
Figure 4-4	Carte géographique de la zone d'étude retenue (contour rouge) et des critères de sélection associés	46
Figure 4-5	Log géologique synthétique des formations crétacées présentes sur la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines (à gauche) et carte géologique de 2015 du secteur au 1/25 000e (à droite)	47
Figure 4-6	Évolution de l'extension des incursions marines, du Valanginien (a) à l'Albien (b) (schéma modifié d'après Collete et al., 1995)	48
Figure 4-7	Carte de l'épaisseur (m) des Argiles tégulines (formations superficielles incluses) sur le secteur établi à partir des forages (de moins épais en « jaune clair » au plus épais en « rouge foncé »)	49
Figure 4-8	Coupe géologique nord-sud au nord du secteur d'étude	49
Figure 4-9	Carte de l'épaisseur (m) des Argiles tégulines (formations superficielles incluses) sur la zone d'étude	50
Figure 4-10	Schéma structural régional (réalisé en 2015)	51
Figure 4-11	Schéma structural du secteur d'étude (réalisé en 2015)	52
Figure 4-12	Répartition en pourcentage des principaux groupes de minéraux argileux composant les Argiles tégulines	53
Figure 4-13	Photographies au microscope optique illustrant les Argiles tégulines (à gauche : Unité Argilo-Quartzeuse et à droite : Unité Argileuse)	54
Figure 4-14	Évolution de la teneur en minéraux argileux et en tectosilicates dans les Argiles tégulines (distance à partir du mur de la couche)	54
Figure 4-15	Évolution de la teneur en carbonates dans les Argiles tégulines (distance à partir du mur de la couche)	55
Figure 4-16	Évolution de la porosité totale des Argiles tégulines en fonction de la profondeur	56

Figure 4-17 Représentation conceptuelle des arrangements minéraux dans les Argiles tégulines 57
Figure 4-18 Évolution de la chimie des eaux des Argiles tégulines en fonction de la profondeur pour différents forages (Alk : alcalinité) 58
Figure 4-19 Profils verticaux de conductivité hydraulique et des coefficients de diffusion effectifs (eau tritiée et chlore) mesurés dans les Argiles tégulines 59
Figure 4-20 Carte du réseau hydrographique sur le secteur d'étude 61
Figure 4-21 Schéma des écoulements de surface sur la zone d'étude 62
Figure 4-22 Schéma conceptuel selon une coupe nord-sud des écoulements de l'aquifère des Sables verts et du Barrémien sur le secteur d'étude 63
Figure 4-23 Carte de distribution spatiale du gradient de charge hydraulique vertical à travers les Argiles tégulines sur la zone d'étude et alentour 64
Figure 4-24 Scénarios d'évolution du climat sur le prochain million d'années 65
Figure 4-25 Illustration d'une simulation d'érosion à 50 000 ans à partir du modèle RUSLE sur la zone d'étude (climat B4 – couvert végétal de type forêt) 67
Figure 5-1 Zonage du Plan local d'urbanisme intercommunale de la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines dans le secteur de la zone d'étude et de ses abords 74
Figure 6-1 Zone d'étude (contour rouge) et zone d'étude élargie de 1 km (contour bleu) 77
Figure 6-2 Zones artésiennes (à gauche), gradients hydrauliques (à droite) 78
Figure 6-3 Occupation des sols au niveau de la zone d'étude (source : Corine Land Cover (35)) 79
Figure 6-4 Propriétés agronomiques des sols au niveau de la zone d'étude 80
Figure 6-5 Carte de l'état-major où figurent les boisements anciens 80
Figure 6-6 Réseau hydrographique sur la zone d'étude (source : Géoportail) 82
Figure 6-7 Zones sensibles aux remontées de nappe (source : Géorisques) 84
Figure 6-8 Site Ramsar des étangs de la Champagne humide 86
Figure 6-9 Zonages d'inventaires et de protection pour le milieu naturel 87
Figure 6-10 Zones humides (Biotope, 2018) 87
Figure 6-11 Hiérarchisation des enjeux écologiques 89
Figure 6-12 Enjeux paysagers globaux (Ingérop, 2023) 92
Figure 6-13 Hiérarchisation des sensibilités paysagères sur la zone d'étude (Ingérop, 2023) 93
Figure 7-1 Illustration d'un ouvrage de stockage réalisé en terrassement pleine fouille jusqu'au toit du stockage (exemple avec 10 m de hauteur de stockage) 100
Figure 7-2 Illustration d'un ouvrage de stockage réalisé en soutènement linéaire vertical depuis la surface (exemple avec 10 m de hauteur de stockage) 101
Figure 7-3 Illustration d'un ouvrage de stockage réalisé en soutènement linéaire vertical type puits depuis la surface (exemple avec 20 m de hauteur de stockage) 102
Figure 7-4 Illustration d'un ouvrage de stockage à ciel ouvert mixte : terrassement et soutènement linéaire vertical (exemple avec 10 m de hauteur de stockage) 103
Figure 7-5 Illustration d'un module de stockage de deux alvéoles, réalisé par creusement conventionnel (diamètre excavé de l'ordre de 10 m) avec un accès par puits sous abri 104
Figure 7-6 Illustration d'un module de stockage composé d'un alvéole de stockage de l'ordre de 5 m de diamètre utile réalisé par tunnelier avec accès par puits sous abri 105
Figure 7-7 Illustration d'un module de stockage composé d'une dizaine d'alvéoles de l'ordre de 3 m de diamètre utile réalisés par microtunnelier avec accès par tranchées sous abri 106
Figure 7-8 Illustration des architectures de stockage en souterrain étudiées pour les évaluations de sûreté après-fermeture 113
Figure 7-9 Illustration de l'architecture de stockage à ciel ouvert étudiée pour les évaluations de sûreté après-fermeture 114
Figure 8-1 Illustration des voies de transfert potentielles et des exutoires retenus 127

Figure 8-2 Représentation des voies de transfert associées à l'exutoire « puits » dans le cadre d'un groupe de référence hypothétique « villageois » 129
Figure 8-3 Représentation des voies de transfert associées à l'exutoire « rivière » dans le cadre d'un groupe de référence hypothétique « multi-activités » 130
Figure 8-4 Représentation des voies de transfert associées à l'exutoire « sol contaminé » dans le cadre d'un groupe de référence hypothétique « multi-activités » 131
Figure 8-5 SEN - situation enveloppe, déchets radifères (cas sans élimination des sels), tous actinides : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 133
Figure 8-6 SEN - situation enveloppe, déchets radifères (cas sans élimination des sels), potassium 40 et carbone 14 : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour le concept de stockage à ciel ouvert, pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 134
Figure 8-7 SEN - situation enveloppe, déchets de graphite, tous radionucléides (hors chaînes de filiation) : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 139
Figure 8-8 SEN - situation enveloppe, déchets bitumés, tous radionucléides (hors chaînes de filiation) : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 142
Figure 8-9 SEN - situation enveloppe, déchets technologiques, tous radionucléides (hors chaînes de filiation) : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 145
Figure 8-10 Illustration des scénarios d'intrusion humaine involontaire étudiés 149
Figure 8-11 Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » - situation enveloppe, déchets radifères (cas sans élimination des sels), tous actinides : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 162
Figure 8-12 Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » - situation enveloppe, déchets de graphite, tous actinides : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 165
Figure 8-13 Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » - situation enveloppe, déchets bitumés, tous actinides : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m, souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an) 168
Figure 8-14 Situation conventionnelle d'altération de la fonction « limiter le transfert des radionucléides » - situation enveloppe, déchets technologiques, tous actinides : historiques de doses à l'exutoire « puits de pompage dans les Sables verts » pour les trois concepts de stockage (souterrain alvéole 6 m,

	souterrain alvéole 3 m, ciel ouvert), pour les biosphères tempérée et chaude et les classes d'âge adulte et enfant (10 ans, 1 an)	171
Figure 9-1	Illustration des voies et modes de transfert des solutés depuis les ouvrages de stockage	179
Figure 9-2	Carte représentant les profondeurs du mur de la couche des Argiles tégulines	183

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 PNGMDR 2013-2015 - Projet de stockage de déchets radioactifs de faible activité massique à vie longue (FA-VL) : rapport d'étape 2015. Andra (2015). Document N°F.RP.ADPG.15.0010.

2 Orientations générales de sûreté en vue d'une recherche de site pour le stockage des déchets de faible activité massique à vie longue. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2008), N°ASN/DRD/0307/2008.

3 Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2022-2026. Ministère de la Transition énergétique (2022). 114 p. Disponible à l'adresse : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/PNGMDR_2022.pdf.

4 Arrêté du 9 décembre 2022 pris en application du décret n° 2022-1547 du 9 décembre 2022 prévu par l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Ministère de la Transition énergétique (2022). Journal officiel de la République française, N°286.

5 Feuille de route - Élaboration d'un dossier sur la conception d'un stockage à faible profondeur de déchets FA-VL dans la formation argileuse du site de la CCVS. Andra (2022). Document N°FNTASFP220012.

6 Avis relatif à l'élaboration d'un guide pour le stockage de déchets de faible activité à vie longue. Groupe permanent d'experts pour les déchets (ASN) (2021).

7 Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2007-2009 : de l'Inventaire national des déchets radioactifs et des matières valorisables à un bilan et une vision prospective des filières de gestion à long terme des déchets radioactifs en France. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2006). 147 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/PNGMDR-2007-2009-Complet?

8 Loi n°2006-739 du 28 Juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. Assemblée nationale; Sénat (2006). Journal officiel de la République française, N°ECOX0600036L, pp.8-17.

9 PNGMDR 2022-26 - Schéma industriel de gestion des déchets FA-VL : définition des options de gestion (article 29 de l'arrêté du PNGMDR 2022-2026). Andra (2024). Document N°SFIRPASFP230020.

10 Étude PNGMDR - Rapport d'étape du projet FA-VL relatif à la gestion des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2016). N°CODEP-DRC-2016-013550. 6 p.

11 Avis n° 2016-AV-264 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 29 mars 2016 sur les études relatives à la gestion des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, en vue de l'élaboration du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2016).

12 Élaboration d'un guide pour le stockage des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) - Synthèse des travaux du groupe de travail sur la mise à jour de la note d'orientations de 2008 de l'ASN. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2020). N°2020-00962. 66 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/expertise/demarches-de-surete/2020-00962%20-%20Rapport%20GT%20guide%20FAVL.pdf.

13 Inventaire national des matières et déchets radioactifs. Andra (2024). Consulté le 03/01/2024. Disponible à l'adresse : https://inventaire.andra.fr.

14 Courrier - PNGMDR 2022-2026 -Remise du livrable relatif à l'article 27 de l'arrêté "PNGMDR" du 9 décembre 2022. Commissariat à l'énergie atomique (2023). N°DSSN DIR 2023-0182. 11 p.

15 Courrier - Article 27 de l'arrêté PNGMDR 2022-2026 - Critères de discrimination de déchets MA-VL et FA-VL - Quantités dedéchets relevant des filières MA-VL et FA-VL. Orano (2023). N°DPS2D CE 2023-189. 2 p.

16 Guillocheau, F., Robin, C., Allemand, P., Bourquin, S., Brault, N., Dromart, G., Friedenberg, R., Garcia, J., Gaulier, J.M., Gaumet, F., Grosdoy, B., Hanot, F., Le Strat, P., Mettraux, M., Nalpas, T., Prijac, C., Rigollet, C., Serrano, O., Grandjean, G. Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin: 3D stratigraphic constraints. Geodinamica Acta (2000). Vol. 13, N°4, pp.189-245.

17 Amédro, F., Matrion, B. L'étage Albien dans sa région-type, l'Aube (France) : une synthèse dans un contexte sédimentaire global. Carnets de géologie (Notebooks on geology) (2014). Vol. 14, N°5, pp.69-128.

18 Lerouge, C., Robinet, J.-C., Debure, M., Tournassat, C., Bouchet, A., Fernández, A.M., Flehoc, C., Guerrot, C., Kars, M., Lagroix, F., Landrein, P., Madé, B., Negrel, P., Wille, G., Claret, F. A deep alteration and oxidation profile in a shallow clay aquitard : example of the Tégulines Clay, East Paris Basin, France. Geofluids (2018), pp.1-20.

19 Le Meur, M., Boussafir, M., Le Milbeau, C., Debure, M., Claret, F., Robinet, J.-C., Lerouge, C. Organic matter oxidation of the Tégulines Clay formation, (Paris Basin, France) : Spatial Heterogeneities. Applied Geochemistry (2021). Vol. 134, pp.105093.

20 Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks : 2022 Update. Nuclear Energy Agency (NEA); OCDE (2022). N°7249. 248 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_66401/clay-club-catalogue-of-characteristics-of-argillaceous-rocks-2022-update.

21 Gaucher, E., Tournassat, C., Pearson, F.J., Blanc, P., Crouzet, C., Lerouge, C., Altmann, S. A robust model for pore water chemistry of clayrock. Geochimica et Cosmochimica Acta (2009). Vol. 73, N°21, pp.6470-87.

22 Lerouge, C., Debure, M., Henry, B., Fernandez, A.-M., Blessing, M., Proust, E., Madé, B., Robinet, J.-C. Origin of dissolved gas (CO2, O2, N2, alkanes) in pore waters of a clay formation in the critical zone (Tégulines Clay, France). Applied Geochemistry (2020). Vol. 116, pp.104573.

23 Lerouge, C., Debure, M., Fernández, A.-M., Négrel, P., Madé, B., Maubec, N., Fléhoc, C., Guerrot, C., Blessing, M., Henry, B., Robinet, J.-C. Hydrogeochemical processes of critical zone developed in Tégulines Clay, Paris Basin : hydrogeochemical and multi-isotopic approach (δ13C, δD, δ18O, 87Sr/86Sr and 14C). Journal of Hydrology (2023). Vol. 617, pp.129077.

24 Missana, T., Colàs, E., Grandia, F., Olmeda, J., Mingarro, M., Garcia-Gutierrez, M., Munier, I., Robinet, J.-C., Grivé, M. Sorption of radium onto early cretaceous clays (Gault and Plicatules Fm). Implications for a repository of low-level, long-lived radioactive waste. Applied Geochemistry (2017). Vol. 86, pp.36-48.

25 Région de Soulaines (Aube, France) : géologie, hydrogéologie et géotechnique - Synthèse des connaissances. Andra (1990). Document N°ANDRA COM 123.

26 Borrelli, P., Robinson, D.A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J.E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., Ballabio, C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). Proceedings of the National Academy of Sciences (2020). Vol. 117, N°36, pp.21994-2001.

27 Dossier départemental des risques majeurs (DDRM). Préfet de l'Aube; Direction départementale des territoires de l'Aube (2018). 136 p.

28 Dossier départemental des risques majeurs (DDRM) : mise à jour 2020. Préfet de l'Aube; Direction départementale des territoires de l'Aube (2020). 48 p. Disponible à l'adresse : https://www.aube.gouv.fr/contenu/telechargement/32027/204175/file/DDRM_MAJ_2020.pdf.

29 SCoT des Territoires de l'Aube - Rapport de présentation du SCoT approuvé le 10 février 2020 : révision du SCoT de la région Troyenne valant élaboration du SCoT des territoires de l'Aube. Syndicat d'étude, de programmation et d'aménagement de la région Troyenne (2020). 312 p. Disponible à l'adresse : https://www.syndicatdepart.fr/images/pdf/scot/construction_du_scot/SCoT-Territoires-Aube_1_Rapport_syndicat-depart_10-02-2020.pdf.

30 Plan local d'urbanisme intercommunal - Communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines : rapport de présentation (version révisée en 2021). Communauté de communes Vendeuvre-Soulaines (2021). 367 p. Disponible à l'adresse : https://app.box.com/s/s3pjztfcxb04wte61k7nhdwu76ktur5j/file/884064403332.

31 Plan biodiversité. Ministère de la Transition énergétique; Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2021). Consulté le 17/05/2023. Disponible à l'adresse : https://www.ecologie.gouv.fr/plan-biodiversite.

32 Loi n° 2023-630 du 20 juillet 2023 visant à faciliter la mise en œuvre des objectifs de lutte contre l'artificialisation des sols et à renforcer l'accompagnement des élus locaux. Assemblée nationale; Sénat (2023). Journal officiel de la République française, N°TREX2306675L.

33 Loi n°2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. Assemblée nationale; Sénat (2021). Journal officiel de la République française. Vol. 1, N°0196.

34 Plan local d'urbanisme intercommunal - Communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines : rapport de présentation. Communauté de communes Vendeuvre-Soulaines (2020). 366 p.

35 Corine Land Cover. Ministère de la Transition écologique et solidaire; Ministère de la Cohésion des territoires (2018). Consulté le 01/04/2023. Disponible à l'adresse : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0.

36 Projet FAVL : étude pédologique pour le programme de reconnaissance 2017-2018. Andra (2018). Document N°FRPFGES180030.

37 Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (2000). Journal officiel des Communautés européennes, N°L327.

38 Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau (Ramsar telle qu'amendée par le protocole du 3.12.1982 et les amendements du 28.5.1987. UNESCO (1971).

39 Étangs de la Champagne humide. Service d'information sur les Sites Ramsar (2024). Consulté le 19/03/2024. Disponible à l'adresse : https://rsis.ramsar.org/fr/ris/514?language=fr.

40 Directive n°79/409/CEE du Conseil du 2 avril 1979 concernant la conservation des oiseaux sauvages (1979). Journal officiel des Communautés européennes, N°L103.

41 Directive 2009/147/CE du Parlement européen et du Conseil du 30 novembre 2009 concernant la conservation des oiseaux sauvages. Parlement européen; Conseil de l'Union européenne (2010). Journal officiel de l'Union européenne, N°L20, pp.7–25.

42 FR2100310 - Bois d'Humegnil-Epothemont. Natura 2000; Inventaire national du patrimoine naturel (INPN) (2024). Consulté le 19/03/2024. Disponible à l'adresse : https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR2100310.

43 Stockage des déchets FA-VL - Enjeux et exigences préliminaires de sûreté. Andra (2019). Document N°FNTASPF180004.

44 Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PGMDR) 2016-2018. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer; Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2017). 282 p.

45 Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires : démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) (2021). N°Ineris-200357-2563482-v1.0. 130 p. Disponible à l'adresse : https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Ineris_GuideERS-Juillet2021-A4-%2310Quatro_Web.pdf.

46 Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. Version consolidée. Ministère de la Santé et des Solidarités (2020). Journal officiel de la République française, N°SANP0720201A, pp.58-66.

47 Arrêté du 30 décembre 2022 modifiant l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif au programme de prélèvements et d'analyses du contrôle sanitaire pour les eaux utilisées dans une entreprise alimentaire ne provenant pas d'une distribution publique, pris en application des articles R. 1321-10, R. 1321-15 et R. 1321-16 du code de la santé publique. Ministère de la Santé et de la Prévention (2022). Journal officiel de la République française. Vol. 168, N°SPRP2222078A.

48 Debure, M., Tournassat, C., Lerouge, C., Madé, B., Robinet, J.-C., Fernandez, A.M., Grangeon, S. Retention of arsenic, chromium and boron on an outcropping clay-rich rock formation (the Tégulines Clay, eastern France). Science of the total environment (2018). Vol. 642, pp.216-29.

49 Inventaire et caractérisation des sols en marge du programme de reconnaissance FAVL. Andra (2015). Document N°FRPFSTR150011.

50 Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2017). 128 p. Disponible à l'adresse : https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2022-02/methodo_ssp_2017.pdf.

51 Exposition de la population française aux rayonnements ionisants - Bilan 2014-2019. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2021). N°IRSN/2021-00108. 88 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiques_et_dossiers_de_presse/Documents/IRSN_Rapport%20EXPOP_def.pdf.

ANDRA:398.C

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00

www.andra.fr