



Rapport sur les incidences environnementales (*Strategic Environmental Assessment – SEA*) pour l’avant-projet d’arrêté royal établissant le processus d’adoption de la politique nationale relative à la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et définissant la solution de gestion à long terme de ces déchets

Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies

NIROND-TR 2020-07 F Avril 2020

Approbation version 1.0

Rédaction :
Groupe de travail ONDRAF,
sous la direction de Peter de Preter

Signature

Peter De
Preter
(Signature)

Digitally signed by
Peter De Preter
(Signature)
Date: 2020.04.08
09:12:23 +02'00'

Vérification :
Philippe Lalieux (ONDRAF)



Philippe Lalieux
(Signature)
2020.04.08
09:47:47 +02'00'

Approbation :
Marc Demarche (ONDRAF)



Le présent document est la propriété de l'ONDRAF et est protégé par le copyright conformément à la loi belge du 30 juin 1994. Il ne peut être reproduit ou transmis, en tout ou partie, sous quelque forme ou par quelque moyen électronique ou mécanique que ce soit, que pour un usage non commercial et assorti d'une mention adéquate de la source. Toute reproduction et/ou transmission à d'autres fins nécessite l'autorisation écrite préalable de l'ONDRAF. L'ONDRAF ne pourra en aucun cas être tenu responsable des pertes, dommages ou dépenses encourus ou subis par un tiers qui résulteraient de l'utilisation de tout ou partie du présent document et/ou des données qu'il contient.

Informations relatives au document

Rapport sur les incidences environnementales (*Strategic Environmental Assessment – SEA*) pour l'avant-projet d'arrêté royal établissant le processus d'adoption de la politique nationale relative à la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et définissant la solution de gestion à long terme de ces déchets

Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies
Avenue des Arts 14
1210 Bruxelles
BELGIQUE

<i>Série</i>	Catégories B&C
<i>Type de document</i>	NIROND-TR
<i>Statut</i>	Public
<i>Date de publication</i>	Avril 2020
<i>Numéro de rapport ONDRAF</i>	NIROND-TR 2020-07 F
<i>Numéro de version</i>	Version 1.0
<i>Mots clés</i>	Déchets B&C, gestion à long terme, stockage géologique, politique nationale, projet de plan, plan, SEA, incidences environnementales

Versions

Numéro de version et date	Commentaires et modifications principales par rapport à la version précédente
1.0 Avril 2020	

Ce document est aussi disponible en néerlandais et en allemand, sous les références NIROND-TR 2020-07 N et NIROND-TR 2020-07 D.

Il est accompagné d'un résumé non technique portant la référence NIROND-TR 2020-08 F, également disponible en néerlandais et en allemand sous les références NIROND-TR 2020-08 N et NIROND-TR 2020-08 D.

Informations complémentaires : www.ondraf.be/sea2020

Editeur : Marc Demarche, Directeur général, Avenue des Arts 14, 1210 Bruxelles, Belgique

Table des matières

Résumé exécutif	1
1 Contexte et rétroactes du projet de Plan et du SEA	5
1.1 Cadre légal et réglementaire de la gestion des déchets radioactifs, et en particulier de leur gestion à long terme	5
1.2 L'ONDRAF et le système de gestion des déchets radioactifs	8
1.3 Proposition de politique nationale de juin 2018	10
1.4 Rétroactes de la proposition de juin 2018	11
1.5 Nécessité d'une nouvelle procédure SEA et établissement du SEA	12
1.6 Structure du SEA	12
2 Le projet de Plan	15
2.1 Un volet technique et un volet non technique	15
2.1.1 Une solution technique, dont les incidences environnementales doivent être évaluées : « un système de stockage géologique sur le territoire belge »	15
2.1.2 Un volet non technique sans incidences environnementales : l'adoption par étapes de la politique nationale et le processus décisionnel	17
2.2 Environnement dans lequel le Plan sera réalisé	18
2.3 Calendrier indicatif de mise en œuvre	18
2.4 Inventaire des déchets concernés	19
2.4.1 Classification des déchets radioactifs conditionnés pour leur gestion à long terme	20
2.4.2 Inventaire de référence	21
2.4.3 Inventaire complémentaire potentiel	22
3 Stockage géologique : introduction générale	23
3.1 Stockage géologique en galeries	24
3.2 Stockage géologique en forages profonds	29
3.2.1 Forages profonds	29
3.2.2 Avantages, inconvénients et défis	32
3.3 Brève comparaison du stockage géologique en galeries et du stockage géologique en forages profonds	33
3.4 Formations hôtes	34
3.4.1 A l'étranger, en général	34
3.4.1.1 Evaporites	35
3.4.1.2 Roches cristallines	35
3.4.1.3 Formations argileuses	35
3.4.2 En Belgique	36
3.4.2.1 Evaporites	36
3.4.2.2 Roches cristallines	36
3.4.2.3 Formations argileuses	36
3.5 Politiques nationales de pays étrangers pour la gestion à long terme de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie	37

4	Alternatives ne constituant pas des solutions de substitution raisonnables au stockage géologique	41
4.1	Alternatives d'entreposage	41
4.1.1	Entreposage de longue durée	42
4.1.2	Entreposage perpétuel	43
4.1.3	Entreposage transformable en stockage	45
4.2	Technologies avancées de séparation-transmutation	45
4.3	Alternatives qui contreviennent à la réglementation et/ou présentent des risques non maîtrisables	47
5	Liens du Plan avec d'autres plans et programmes pertinents ou des politiques pertinentes en vigueur	51
6	Contenu du SEA	53
6.1	Aperçu des procédures de screening et de scoping et résultat	53
6.1.1	Screening	53
6.1.2	Scoping	55
6.1.2.1	Résultats pour la période pré-fermeture	56
6.1.2.2	Résultats pour la période post-fermeture	56
6.2	Pas d'évaluations possibles des incidences transfrontières	57
7	Situation de référence et évolution attendue si le Plan n'est pas mis en œuvre	59
7.1	Entreposage temporaire en surface	59
7.1.1	Entreposage temporaire des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie	59
7.1.2	Entreposage temporaire du combustible usé	61
7.2	Evolution attendue si le Plan n'est pas mis en œuvre	62
8	Méthode utilisée	65
8.1	Approche méthodologique	65
8.1.1	Options de gestion et concepts types	65
8.1.2	Période pré-fermeture et période post-fermeture	65
8.1.3	Inventaires des déchets radioactifs	66
8.1.4	Incertitudes associées à la période post-fermeture et robustesse	66
8.2	Experts consultés	66
8.3	Difficultés et limites rencontrées	66
9	Evaluation des incidences environnementales du stockage géologique en galeries	67
9.1	Concepts types	67
9.1.1	Installations en surface	68
9.1.2	Constructions souterraines	70
9.1.3	Phasage et fermeture	74
9.2	Pour fixer les idées	75
9.2.1	Hypothèses et valeurs de paramètres dimensionnants	75
9.2.2	Activités considérées durant les différentes phases	77
9.3	Evaluation des incidences environnementales pour les périodes pré- et post-fermeture	79

9.3.1	Identification des activités de mise en œuvre qui ont a priori au moins une incidence environnementale significative	79
9.3.2	Evaluation des incidences des activités qui ont a priori au moins une incidence significative et évaluation de l'évolution naturelle du système	85
9.4	Evaluation des incidences environnementales d'une augmentation de l'inventaire de référence	89
9.5	Mesures de suivi ou monitoring	89
9.6	Evaluation des incidences environnementales d'un stockage géologique multinational en galeries	90
10	Evaluation des incidences environnementales du stockage géologique en forages profonds	93
11	Robustesse et flexibilité d'une solution de stockage géologique	95
11.1	Stockage géologique en galeries	95
11.1.1	Robustesse	95
11.1.2	Flexibilité	96
11.2	Stockage géologique en forages profonds	97
12	Considérations finales et recommandations	99
Annexe 1	Acronymes	105
Annexe 2	Références des documents qui fixent ou font état des politiques nationales de gestion à long terme de pays étrangers	107
Annexe 3	Avis du Comité d'avis et façon dont il a été traité	109
Références		113

Résumé exécutif

En exécution de ses missions légales, l'ONDRAF — l'organisme public doté de la personnalité juridique chargé de la gestion des déchets radioactifs en Belgique — a proposé en juin 2018 à sa tutelle de fixer la base de la future politique nationale de gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. Sa proposition, faite sous la forme d'un avant-projet d'arrêté royal, établit le processus d'adoption de ladite politique et définit la solution de gestion à long terme de ces déchets comme étant « *un système de stockage géologique sur le territoire belge* ». Cette solution constitue la *première partie* de la politique. La proposition prévoit que la politique comprendra d'autres parties, fixées par arrêtés royaux successifs, dont notamment le processus décisionnel et le choix du ou des sites de mise en œuvre du stockage.

Le stockage géologique constitue une solution pérenne à la problématique environnementale que constituent les déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. Ces déchets présentent en effet un risque durant une très longue période et doivent être isolés de l'homme et de l'environnement pendant quelques centaines de milliers d'années, voire pendant une période de l'ordre du million d'années. Ils sont actuellement entreposés de façon sûre dans des bâtiments dédiés, mais le maintien de la sûreté en entreposage repose de façon permanente sur des actions humaines. La sûreté des systèmes de stockage géologique, par contre, repose sur la capacité de leurs multiples barrières, ouvragées et naturelles, à confiner les déchets radioactifs et à les isoler suffisamment et suffisamment longtemps de la biosphère *sans que des actions humaines soient nécessaires*. Ceci constitue une exigence réglementaire. C'est ce type de solution qu'ont choisi tous les pays étrangers qui ont une politique nationale pour la gestion à long terme de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. Il n'existe du reste *pas de solution de substitution raisonnable au stockage géologique*. En Belgique, le stockage géologique fait l'objet de travaux de recherche, développement et démonstration depuis plus de 40 ans, qui ont été évalués à plusieurs reprises par des experts belges et étrangers. Selon ces évaluations, la Belgique peut poursuivre dans cette voie : il y a une confiance suffisante dans le fait que la sûreté du stockage géologique peut être démontrée et qu'il peut être mis en œuvre par des techniques industrielles sur le territoire belge.

Les politiques nationales sont considérées comme des plans ou programmes au sens de la *loi du 13 février 2006 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement et à la participation du public dans l'élaboration des plans et des programmes relatifs à l'environnement* et l'avant-projet d'arrêté royal proposé constitue donc un projet de plan, dont l'ONDRAF est l'auteur et dont les incidences environnementales doivent être évaluées.

La présente évaluation des incidences environnementales est partielle et essentiellement descriptive, en raison du caractère *conceptuel* et *générique* du Plan. Celui-ci ne précise en effet pas la solution de stockage géologique à développer et à mettre en œuvre : il ne donne *ni le où ?* (formation géologique hôte, profondeur de stockage et site de stockage), *ni le comment ?* (concept de stockage et technologies de mise en œuvre), *ni le quand ?* (début de l'exploitation dans plusieurs décennies au mieux). Cette première évaluation ne considère pas non plus certains types d'incidences environnementales, soit parce que leur évaluation est non pertinente ou impossible à ce stade — comme l'incidence sur l'air, l'incidence sur l'homme des nuisances sonores et des poussières, l'incidence sur les activités humaines ou encore l'altération du paysage —, soit parce que l'incidence elle-même est présumée non pertinente ou négligeable — comme l'incidence sur le climat. Cette évaluation devra donc être suivie d'autres évaluations, plus spécifiques et plus détaillées, à des stades ultérieurs de l'adoption de la politique nationale et de sa mise en œuvre. A terme, les incidences environnementales pertinentes du Plan tel qu'il sera proposé de le concrétiser par un ou plusieurs projets auront toutes été évaluées en détail.

Le stockage géologique peut se faire sous la forme de stockage géologique en galeries ou de stockage géologique en forages profonds.

- L'évaluation des incidences environnementales du *stockage géologique en galeries* s'est appuyée sur des concepts types de stockage couvrant les trois types de formations hôtes les plus fréquemment considérées dans le monde, à savoir les évaporites, les roches cristallines et les formations argileuses. Elle a supposé que les déchets étaient placés dans une installation unique, sur un seul site, et que toutes les activités de mise en œuvre se déroulaient de la manière prévue. Elle a été limitée aux incidences sur les eaux de surface et souterraines, sur le sol, le sous-sol, la santé humaine et la faune et la flore.

Les activités de mise en œuvre du stockage géologique en galeries qui paraissent les plus susceptibles d'avoir des incidences significatives parmi celles examinées sont la préparation du site de stockage, dont l'empreinte au sol serait de l'ordre du kilomètre carré, et la construction des installations en surface, ainsi que l'entreposage sur site des matériaux excavés lors de la construction de l'installation souterraine. Les principales incidences concerneraient les eaux de surface et le sol ainsi que la faune et la flore. Il n'est pas possible, à ce stade, de se prononcer sur l'effet sur les eaux de surface ou souterraines de l'utilisation d'eau pour l'exploitation d'une centrale à béton sur le site de stockage ni sur l'effet sur les eaux souterraines de l'infiltration d'eau dans l'installation souterraine et ses accès.

Les activités impliquant des colis de déchets radioactifs, avant fermeture complète de l'installation de stockage, n'ont aucune incidence environnementale significative parmi les incidences à examiner et leurs incidences sur la santé humaine, en particulier, sont jugées négligeables. Ceci devra être démontré dans les dossiers de sûreté, sur la base des procédures prévues pour les phases d'exploitation.

L'évolution naturelle du système de stockage en galeries après sa fermeture complète conduira, dans les premiers milliers d'années, à une augmentation temporaire de la température des eaux souterraines et du sous-sol en raison de la présence de déchets de haute activité, chauffants, et à plus long terme à une altération de la formation hôte suite au relâchement lent et progressif de radionucléides et de contaminants chimiques hors de l'installation de stockage. Tout système de stockage doit toutefois être conçu de manière à éviter, en toutes circonstances, grâce au fonctionnement des barrières ouvragées et naturelles et à la décroissance radioactive, toute incidence significative du relâchement de ces substances sur les autres parties du sous-sol, sur les eaux souterraines et, a fortiori, sur la biosphère. Le respect des règles et limites imposées par le cadre réglementaire de radioprotection et de protection de l'environnement assurera que les incidences seront très faibles et en tout cas négligeables par rapport aux niveaux d'exposition moyens, en particulier radiologique, de la population. Ceci devra être démontré de manière convaincante dans le dossier de sûreté qui accompagnera la demande d'autorisation nucléaire de construction du stockage.

- L'évaluation des incidences environnementales du *stockage géologique en forages profonds* s'est limitée à quelques considérations générales, étant donné que ce type de stockage n'a jamais été étudié en Belgique et que l'hétérogénéité et le manque de redondance des informations contenues dans la littérature ne permettent pas de construire une évaluation un tant soit peu fondée. Tout au plus peut-on dire que les incidences environnementales du stockage en forages profonds seraient de mêmes natures que celles du stockage en galeries, avec des différences d'ampleur selon les incidences.

Comme le Plan poursuit un objectif de protection de l'homme et de l'environnement, ses incidences environnementales doivent être vues comme un effet inévitable de sa mise en œuvre, qu'il conviendra de minimiser et d'atténuer autant que possible. Cette mise en œuvre sera subordonnée à la délivrance d'autorisations nucléaires et non nucléaires confirmant que les normes en vigueur sont satisfaites. La non mise en œuvre du Plan, par contre, aura tôt ou tard des conséquences négatives : la situation actuelle d'entreposage temporaire sûr en

surface finira par basculer vers une situation non sûre, du fait de l'impossibilité de maintenir à l'infini une gestion active sûre. Ceci aura des conséquences graves pour l'homme et l'environnement.

Les résultats de l'évaluation des incidences environnementales du Plan ne sont pas de nature à remettre en question la solution de gestion proposée, et donc l'adoption d'un *système de stockage géologique sur le territoire belge* comme base de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. L'ONDRAF considère en outre que

- le stockage géologique sur le territoire belge doit être adopté sans délai au niveau fédéral en tant que base de la politique nationale de gestion à long terme ;
- postposer cette décision ne permettra pas de prendre une meilleure décision ;
- le stockage géologique en forages profonds pourrait constituer une option de gestion complémentaire au stockage géologique en galeries pour des quantités limitées de déchets dont on voudrait rendre la récupération particulièrement difficile.

L'ONDRAF attire enfin l'attention sur le fait qu'une éventuelle décision politique en faveur d'une solution de stockage géologique partagé avec d'autres pays ne dispenserait pas la Belgique de poursuivre son programme national de stockage géologique et n'offrirait aucune garantie d'aboutissement plus rapide.

1 Contexte et rétroactes du projet de Plan et du SEA

La Belgique a produit et produit encore des déchets radioactifs de caractéristiques très diverses. Ces déchets proviennent non seulement de la production d'électricité d'origine nucléaire, qui a débuté en 1975 et se terminera en 2025 [Belgique 2003], mais aussi d'une gamme étendue d'applications nucléaires et/ou mettant en œuvre la radioactivité, notamment en médecine, dans l'industrie et en recherche. *Comme dans toutes les problématiques environnementales liées à la gestion de déchets, ceux-ci doivent être gérés de façon sûre et responsable.* Une petite fraction d'entre eux est constituée de déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie ¹. Ces déchets, qui incluent le combustible usé qui a été déclaré comme déchet, présentent un risque durant une très longue période et doivent être isolés de l'homme et de l'environnement pendant des centaines de milliers d'années, voire pendant une période de l'ordre du million d'années.

Ce chapitre donne le contexte de l'avant-projet d'arrêté royal (qui constitue un « projet de Plan » — voir section 1.3 pour une mise en perspective de quelques termes clés), soumis par l'ONDRAF à sa tutelle, qui définit la solution de gestion à long terme pour les déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, ainsi que du présent rapport d'évaluation stratégique de ses incidences environnementales (*Strategic Environmental Assessment* ou SEA). Ce rapport d'évaluation est établi en application de la loi du 13 février 2006 *relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement et à la participation du public dans l'élaboration des plans et des programmes relatifs à l'environnement* [Belgique 2006] (section 1.5).

Après avoir brièvement introduit l'ONDRAF et son cœur de métier — la gestion des déchets radioactifs (section 1.2) — ainsi que les grands principes et obligations du cadre légal et réglementaire (section 1.1), ce chapitre introduit le projet de Plan : celui-ci consiste essentiellement en une proposition de politique nationale de gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, faite sous la forme d'un avant-projet d'arrêté royal (section 1.3). Cette initiative réglementaire vise à poser la première pierre d'un processus qui doit permettre à la Belgique de satisfaire à ses obligations en matière de gestion à long terme de ces déchets. Elle fait suite à une série d'initiatives basées sur un premier plan, publié en 2011 (section 1.4).

1.1 Cadre légal et réglementaire de la gestion des déchets radioactifs, et en particulier de leur gestion à long terme

Le cadre légal et réglementaire de la gestion des déchets radioactifs est international, européen et national ² (cadre 1).

Le cadre *international et européen* met en avant la *responsabilité nationale* des Etats en matière de gestion de leurs déchets radioactifs et dispose que ceux-ci doivent, sauf dispositions particulières, être *stockés dans l'Etat membre où ils ont été produits*. Ils doivent

¹ Activité : nombre probable de transitions nucléaires spontanées d'une quantité d'un radionucléide à un état énergétique déterminé et à un moment donné dans un intervalle de temps, mesuré en becquerels (1 Bq = 1 transition par seconde).

Durée de vie : temps nécessaire pour que le nombre de noyaux d'un radionucléide donné, et donc son activité, soit réduit de moitié. Après dix durées de vie, l'activité est divisée par 1 000. La durée de vie est spécifique à chaque radionucléide. Les « longues durées de vie » sont les durées de vie supérieures à 30 ans.

² Le cadre légal et réglementaire contient des dispositions et principes similaires pour la gestion du combustible usé, mais ils ne sont pas repris dans ce document : la gestion du combustible usé non déclaré comme déchet ne fait pas partie du domaine d'application du Plan et le combustible usé déclaré comme déchet est, en Belgique, compris sous le vocable « déchets radioactifs » (voir aussi section 2.4.2).

donc, par définition, être mis à terme dans une installation appropriée, dite « de stockage », sans qu'il y ait *intention* de les récupérer, ce qui ne signifie pas pour autant qu'il est impossible de les récupérer. La directive européenne 2011/70/Euratom du 19 juillet 2011 impose en outre aux Etats membres d'instituer et de maintenir des *politiques nationales* pour la gestion de leurs déchets radioactifs. La sûreté de la gestion à long terme doit être assurée de façon *passive*, c'est-à-dire sans nécessiter d'interventions humaines.

Le cadre légal et réglementaire *belge* de la gestion des déchets radioactifs est principalement constitué de l'article 179 de la loi du 8 août 1980, tel que modifié notamment par la loi du 3 juin 2014 transposant la directive 2011/70/Euratom en droit belge, et de ses arrêtés royaux d'exécution. L'article 179 de la loi du 8 août 1980 dispose en particulier que c'est à l'ONDRAF qu'il revient de proposer les politiques nationales en matière de gestion des déchets radioactifs et que *les déchets radioactifs produits sur le territoire belge y sont stockés*, sauf si certaines conditions permettant d'utiliser une installation de stockage d'un autre pays sont satisfaites (art. 179, § 7, alinéa 2). L'arrêté royal du 20 juillet 2001 contient les dispositions générales qui règlent la protection de la population, des travailleurs et de l'environnement contre le danger des rayonnements ionisants.

Cadre 1 — Le cadre international et national de la gestion des déchets radioactifs

La gestion des déchets radioactifs est une responsabilité nationale, dans un cadre international. Le cadre international, principalement constitué de la Convention commune et de la directive 2011/70/Euratom, établit les dispositions et principes applicables à la gestion des déchets radioactifs au niveau national. Le cadre national est principalement constitué de l'article 179 de la loi du 8 août 1980 et de ses arrêtés royaux d'exécution ainsi que de l'arrêté royal du 20 juillet 2001. Les principaux éléments pertinents de ces textes pour la gestion à long terme des déchets radioactifs sont les suivants :

Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs [AIEA 1997], signée par la Belgique en 1997 et ratifiée par la loi du 2 août 2002 [Belgique 2002]

Préambule

Les Parties contractantes

- vi) [réaffirmation] que c'est à l'Etat qu'il incombe en dernier ressort d'assurer la sûreté de la gestion [...] des déchets radioactifs ;
- xi) [sont convaincues] que les déchets radioactifs devraient, dans la mesure où cela est compatible avec la sûreté de la gestion de ces matières, être stockés définitivement dans l'Etat où ils ont été produits, tout en reconnaissant que, dans certaines circonstances, une gestion sûre et efficace [...] des déchets radioactifs pourrait être favorisée par des accords entre Parties contractantes pour l'utilisation d'installations situées dans l'une d'entre elles au profit des autres Parties, en particulier lorsque les déchets résultent de projets communs ;

Article 1er — Objectifs

Les objectifs de la présente Convention sont les suivants :

- i) Atteindre et maintenir un haut niveau de sûreté dans le monde entier en matière de gestion [...] des déchets radioactifs, grâce au renforcement des mesures nationales et de la coopération internationale, y compris, s'il y a lieu, de la coopération technique en matière de sûreté ;
- ii) Faire en sorte qu'à tous les stades de la gestion [...] des déchets radioactifs il existe des défenses efficaces contre les risques potentiels afin que les individus, la société et l'environnement soient protégés, aujourd'hui et à l'avenir, contre les effets nocifs des rayonnements ionisants, de sorte qu'il soit satisfait aux besoins et aux aspirations de la génération actuelle sans compromettre la capacité des générations futures de satisfaire les leurs ;
- iii) Prévenir les accidents ayant des conséquences radiologiques et atténuer ces conséquences au cas où de tels accidents se produiraient à un stade quelconque de la gestion [...] des déchets radioactifs.

Article 2 — Définitions

- f) « Entreposage » s'entend de la détention [...] de déchets radioactifs dans une installation qui en assure le confinement, dans l'intention de les récupérer ;
- u) « Stockage définitif » s'entend de la mise en place [...] de déchets radioactifs dans une installation appropriée sans intention de les récupérer.

Article 11 — Prescriptions générales de sûreté

Chaque Partie contractante prend les mesures appropriées pour que, à tous les stades de la gestion des déchets radioactifs, les individus, la société et l'environnement soient protégés de manière adéquate contre les risques radiologiques et autres. Ce faisant, chaque Partie contractante prend les mesures appropriées pour :

- vi) s'efforcer d'éviter les actions dont les effets raisonnablement prévisibles sur les générations futures sont supérieurs à ceux qui sont admis pour la génération actuelle ;
- vii) chercher à éviter d'imposer des contraintes excessives aux générations futures.

Directive 2011/70/Euratom du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs [Conseil européen 2011]

Article premier — Objet

1. La présente directive établit un cadre communautaire visant à garantir la gestion responsable et sûre [...] des déchets radioactifs afin d'éviter d'imposer aux générations futures des contraintes excessives.
2. Elle veille à ce que les Etats membres prennent les dispositions nationales appropriées afin d'assurer un niveau élevé de sûreté dans la gestion [...] des déchets radioactifs pour protéger les travailleurs et la population contre les dangers résultant des rayonnements ionisants.
3. Elle garantit la nécessaire information du public et la participation de celui-ci en ce qui concerne la gestion [...] des déchets radioactifs, tout en tenant dûment compte des questions liées à la sécurité et à la confidentialité des informations.

Article 2 — Champ d'application

1. La présente directive s'applique à toutes les étapes [...] b) de la gestion des déchets radioactifs, de la production au stockage, lorsque ces déchets résultent d'activités civiles.

Article 3 — Définitions

Aux fins de la présente directive, on entend par :

3. « stockage », le dépôt [...] de déchets radioactifs dans une installation, sans intention de retrait ultérieur ;
14. « entreposage », le maintien [...] de déchets radioactifs dans une installation, avec intention de retrait ultérieur.

Article 4 — Principes généraux

1. Les Etats membres instituent et maintiennent des politiques nationales en matière de gestion [...] des déchets radioactifs. [...] chaque Etat membre est responsable, en dernier ressort, de la gestion [...] des déchets radioactifs qui ont été produits sur son territoire.
3. Les politiques nationales reposent sur tous les principes suivants : [...] c) [...] les déchets radioactifs sont gérés de manière sûre, y compris à long terme grâce à des dispositifs de sûreté passive ; [...].
4. Les déchets radioactifs sont stockés dans l'Etat membre où ils ont été produits, à moins qu'au moment de leur transfert, un accord prenant en compte les critères établis par la Commission [...] ne soit entré en vigueur entre l'Etat membre concerné et un autre Etat membre ou un pays tiers pour utiliser une installation de stockage dans l'un de ces Etats.

Article 179 de la loi du 8 août 1980 relative aux propositions budgétaires 1979-1980 [Belgique 1980], tel que modifié notamment par la loi du 3 juin 2014 transposant la directive 2011/70/Euratom en droit belge [Belgique 2014]

Article 179, § 5

Au sens du présent article, il faut entendre par :

- 3° stockage : le dépôt [...] de déchets radioactifs dans une installation, sans intention de retrait ultérieur mais sans préjudice de la possibilité de procéder, le cas échéant, à la récupération d'un déchet conformément aux modalités définies dans les Politiques nationales [...] ;
- 14° entreposage : le maintien [...] de déchets radioactifs dans une installation, avec intention de retrait ultérieur.

Article 179, § 6

Par arrêté délibéré en Conseil des ministres, sur proposition de [l'ONDRAF] et après avis de [l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire], le Roi institue et maintient des Politiques nationales en matière de gestion des déchets radioactifs [...] en fonction des caractéristiques physiques, chimiques et radiologiques des déchets [...], reposant au minimum sur les principes généraux suivants : [...] 3° [...] les déchets radioactifs sont gérés de manière sûre, la sûreté à long terme d'une installation de stockage reposant notamment sur des dispositifs de sûreté qui doivent pouvoir devenir passifs à long terme ;

Les Politiques nationales [...] sont considérées comme des plans ou programmes au sens de la loi du 13 février 2006 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement et à la participation du public dans l'élaboration des plans et des programmes relatifs à l'environnement.

Les Politiques nationales en matière de gestion des déchets radioactifs [...] contiennent des modalités de réversibilité, de récupérabilité et de monitoring pour une période à déterminer en tant qu'éléments de conception et d'exploitation de chaque installation de stockage. Ces modalités sont établies en tenant compte de la nécessité d'assurer la sûreté de l'installation de stockage.

Article 179, § 7

Les déchets radioactifs produits sur le territoire belge y sont stockés, à moins qu'au moment de leur transfert, un accord prenant en compte les critères établis par la Commission européenne [...] ne soit entré en vigueur entre l'Etat et un autre pays pour utiliser une installation de stockage dans ce pays.

Arrêté royal du 20 juillet 2001 portant règlement général de la protection de la population, des travailleurs et de l'environnement contre le danger des rayonnements ionisants [Belgique 2001]

L'arrêté royal contient notamment les dispositions suivantes :

- le régime d'autorisation des installations (classe I) de traitement, de conditionnement et d'entreposage des déchets radioactifs et les dispositions générales du régime d'autorisation pour les installations de stockage (chapitre II, section II, article 6) ;
- les normes de base concernant la protection contre l'exposition aux rayonnements ionisants (chapitre III, section I) ;
- différentes dispositions relatives aux déchets radioactifs (chapitre III, section IV).

Autres dispositions

De nombreuses autres dispositions s'appliquent aux divers aspects de la gestion des déchets radioactifs, sous la forme de traités internationaux, de directives européennes ou de dispositions légales et réglementaires nationales et régionales :

- dispositions relatives à la protection des individus et de l'environnement contre les risques liés aux rayonnements ionisants (radioprotection), y compris dans un contexte transfrontière ;
- dispositions relatives à la protection de l'environnement, y compris dans un contexte transfrontière, tant au niveau des plans et programmes qu'au niveau des projets ;
- dispositions relatives à l'accès du public à l'information environnementale et la possibilité pour le public de participer réellement au processus de prise de décision en matière de gestion des déchets radioactifs.

1.2 L'ONDRAF et le système de gestion des déchets radioactifs

L'ONDRAF est l'organisme public chargé de la gestion des déchets radioactifs en Belgique. Ses missions et modalités de fonctionnement sont fixées par l'article 179, § 2, de la loi du 8 août 1980 et par l'arrêté royal du 30 mars 1981 [Belgique 1980, 1981]. Il est placé sous la tutelle des ministres qui ont l'Energie et l'Economie dans leurs attributions.

Depuis le début des années quatre-vingt, l'ONDRAF a progressivement développé et mis en œuvre un système de gestion cohérent des déchets radioactifs destiné à protéger l'homme et l'environnement des risques qu'ils présentent tout en évitant le report de charges indues sur les générations futures. Ce système est constitué d'une succession d'étapes techniques allant de la production des déchets jusqu'à leur stockage et qui peuvent être regroupées en activités de gestion à court, moyen et long termes (figure 1). Les activités de gestion à court et moyen termes sont menées dans le cadre d'une politique nationale de gestion centralisée à Mol et à Dessel, sur les sites de l'ONDRAF exploités par sa filiale industrielle Belgoprocess.

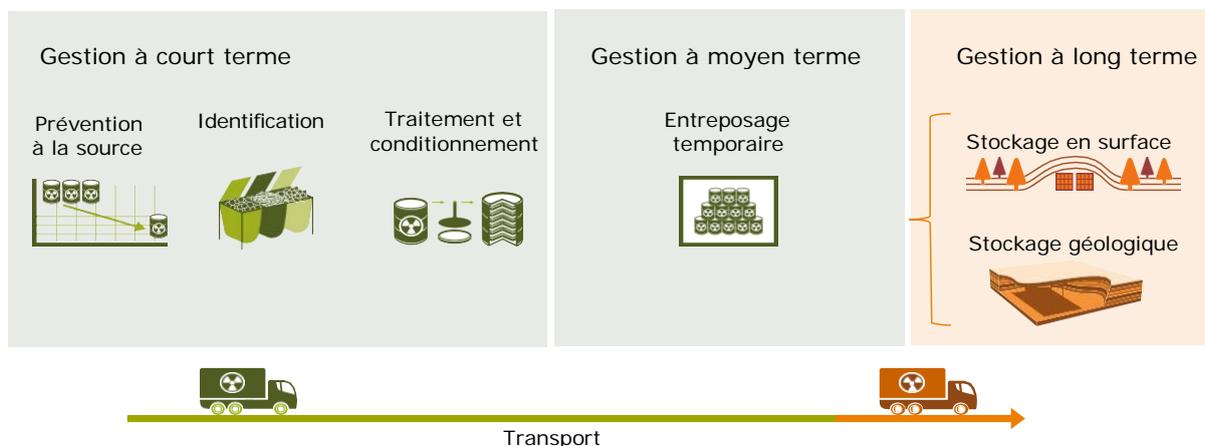


Figure 1 – Les grandes étapes du système de gestion des déchets radioactifs.

La *gestion à court terme* des déchets radioactifs non conditionnés comprend principalement la prévention à la source, l'enlèvement des déchets chez les producteurs, leur traitement et leur conditionnement. Le traitement vise à concentrer le plus possible la radioactivité afin de réduire le volume de matières à considérer comme déchets radioactifs et à mettre ces matières dans un état physique et chimique adéquat pour leur conditionnement. Le conditionnement des déchets traités se fait par immobilisation dans une matrice, par exemple de verre ou de ciment, afin d'obtenir un matériau solide et compact, chimiquement stable et non dispersable, dans la masse duquel sont confinées les substances radioactives. Les déchets conditionnés sont le plus souvent contenus dans un emballage métallique cylindrique.

La *gestion à moyen terme* comprend l'entreposage temporaire en surface des colis de déchets conditionnés, en attendant une solution de stockage opérationnelle sûre qui leur donne une destination finale, ainsi que leur suivi dans le temps en entreposage. L'entreposage en surface permet notamment aux déchets qui émettent une grande quantité de chaleur de refroidir avant leur stockage. Les bâtiments d'entreposage sont conçus en fonction des caractéristiques radiologiques des déchets qu'ils doivent abriter et leur durée de vie maximale est d'une centaine d'années. C'est la situation de gestion de référence (chapitre 7). L'entreposage temporaire est, conceptuellement et légalement, une solution de gestion provisoire (voir définitions du cadre 1 à la section 1.1).

Les activités relatives à la *gestion à long terme* des déchets conditionnés sont à des stades d'avancement différents. Ainsi, pour ce qui est des principales catégories de déchets (section 2.4.1), le gouvernement

- a décidé que les déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de courte durée de vie, aussi appelés déchets de catégorie A en Belgique, seront mis en stockage en surface sur le territoire de la commune de Dessel ; selon les estimations, l'autorisation nucléaire dite de « création et d'exploitation », demandée en 2013, pourrait être délivrée par arrêté royal (voir ci-dessous) en 2022 ;
- n'a pas encore fixé la base de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, aussi appelés déchets des catégories B et C en Belgique ; les activités sont donc des activités de recherche, développement et démonstration.

Les activités de gestion des déchets radioactifs sont, comme toutes les autres activités nucléaires, soumises aux dispositions du cadre légal et réglementaire de radioprotection, principalement constitué de l'arrêté royal du 20 juillet 2001, communément appelé *règlement général de protection contre les rayonnements ionisants* [Belgique 2001] (voir cadre 1 à la section 1.1). Elles sont soumises au système de contrôles et d'autorisations de cet arrêté

royal. En particulier, l'autorisation nucléaire dite « de création et d'exploitation » d'une installation de stockage doit être demandée à l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire (AFCN) — l'établissement public chargé de protéger la population, les travailleurs et l'environnement contre les dangers résultant des rayonnements ionisants — sur la base d'un dossier dit « de sûreté ». Elle est délivrée par arrêté royal sur proposition de l'AFCN à son autorité de tutelle, le ministre de l'Intérieur. La construction d'une installation de stockage doit également faire l'objet d'un permis unique régional.

1.3 Proposition de politique nationale de juin 2018

La Belgique n'ayant pas encore fixé de politique nationale de gestion à long terme de ses déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, comme acté dans le programme national de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs [SPF Economie 2016b] (chapitre 5), l'ONDRAF a, en exécution de la disposition prévue à l'article 179, § 6, 1^{er} alinéa, de la loi du 8 août 1980 (voir cadre 1 à la section 1.1), proposé en juin 2018 à sa tutelle la base de la politique nationale de gestion à long terme de ces déchets [ONDRAF 2018a].

La proposition de l'ONDRAF, faite sous la forme d'un avant-projet d'arrêté royal, définit la solution de gestion à long terme pour les déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie comme étant « *un système de stockage géologique sur le territoire belge* ».

Les politiques nationales visées par l'article susmentionné étant considérées comme des plans ou programmes au sens de la loi du 13 février 2006 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement, l'avant-projet d'arrêté royal soumis constitue donc un projet de Plan (voir chapitre 2 pour une présentation plus détaillée du projet de Plan), dont l'ONDRAF est l'auteur (figure 2). Le SEA suit la logique de la loi du 13 février 2006 : elle ne parle donc de « projet de plan » que pour désigner la proposition soumise à l'avis des instances officielles et à la consultation du public prévus par cette même loi.

Le projet de Plan soumis vise à fixer la *base* de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie à un niveau *conceptuel* et *générique*. En d'autres termes, il ne précise *aucunement* la solution de stockage géologique à développer et à mettre en œuvre :

- le *comment* ?, c'est-à-dire le concept de stockage et les technologies de mise en œuvre ;
- le *où* ?, c'est-à-dire la formation géologique hôte, la profondeur de stockage et le site de stockage³ ;
- et le *quand* ? ;

et il est applicable à toute solution de stockage à venir. Il établit par ailleurs le processus d'adoption *par étapes* de la politique nationale et précise les caractéristiques générales du processus décisionnel encore à établir (section 2.1.2).

³ Selon le projet de Plan, la solution de stockage géologique pourrait être mise en œuvre au moyen d'une ou plusieurs installations de stockage, sur plusieurs sites (section 2.1.2). Dans cette hypothèse, on ne peut exclure le choix de plusieurs formations hôtes et de plusieurs profondeurs, et donc le développement de plusieurs projets. Pour la clarté, le texte utilise toutefois ces notions au singulier.

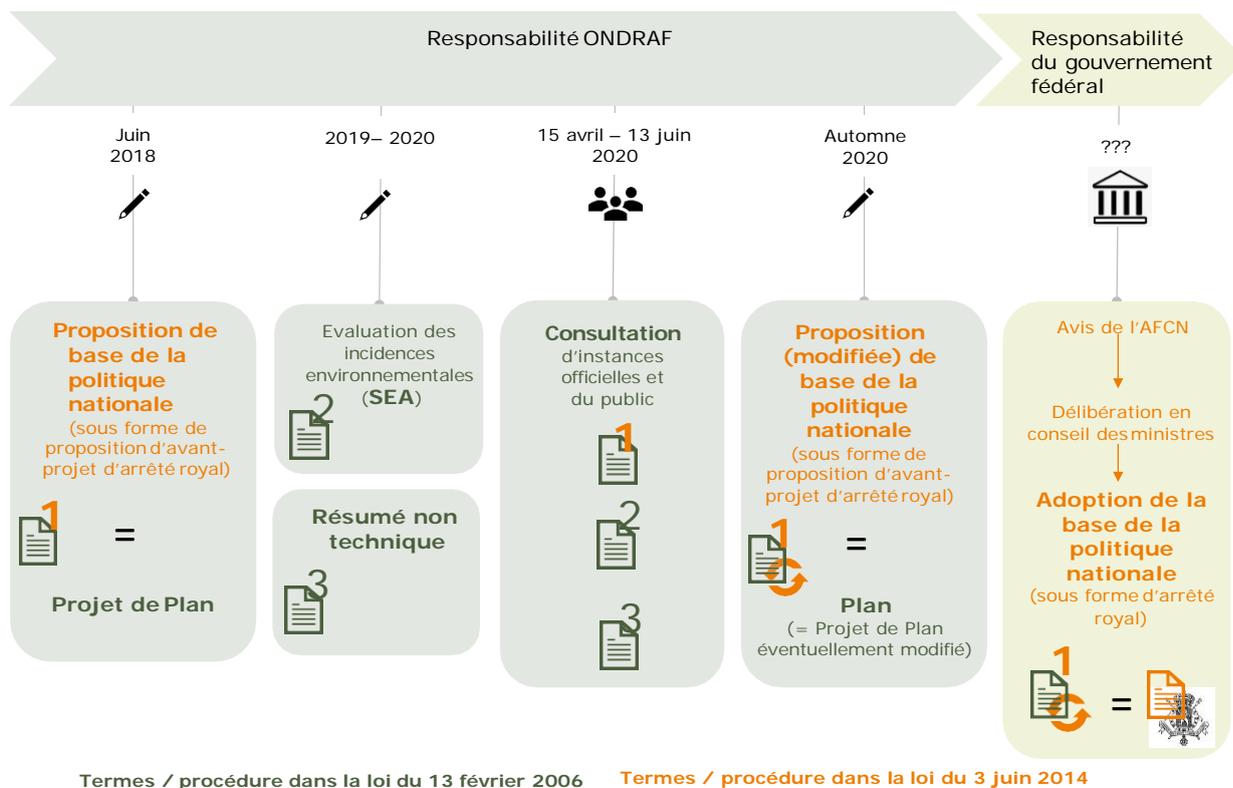


Figure 2 – Représentation simplifiée de l’articulation de la loi du 13 février 2006 avec celle du 3 juin 2014 et liens entre les notions clés utilisées dans ce SEA, compte tenu du fait que la proposition soumise est, non pas une proposition de politique nationale, mais une proposition de *base* ou de *première partie* d’une politique nationale. Comme la loi de 2006, le SEA utilise par défaut l’appellation « plan ». Il parle de « projet de plan » pour le document soumis à l’avis des instances officielles et à la consultation du public. Il n’utilise les notions de « proposition de base de la politique nationale » et d’« avant-projet d’arrêté royal » que quand le contexte l’impose.

1.4 Rétroactes de la proposition de juin 2018

La proposition de juin 2018 est l’aboutissement d’un long processus qui a impliqué différentes tutelles depuis la première proposition formelle de l’ONDRAF en matière de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. Cette première proposition — une proposition de décision de principe faite en 2011 au gouvernement — n’a pas été adoptée. Elle résultait des conclusions du Plan Déchets pour la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie de l’ONDRAF [ONDRAF 2011a] (ci-après « Plan 2011 ») et du rapport d’évaluation des incidences environnementales dont il avait fait l’objet [Resource Analysis 2010] (ci-après « SEA 2010 »), en application de la loi du 13 février 2006. Ces deux textes avaient été soumis entre juin et septembre 2010 à la consultation d’instances officielles et du public prévue par ladite loi et la procédure s’était conclue par l’adoption du Plan 2011 par le conseil d’administration de l’ONDRAF en septembre 2011 et la publication le 30 septembre 2011 au Moniteur belge de la déclaration prévue par la loi de 2006 et du résumé exécutif du Plan 2011 [ONDRAF 2011b, 2011c].

La proposition de septembre 2011 était plus précise que la proposition de juin 2018, en ce sens qu’elle fixait le type de formation hôte pour le stockage géologique : elle recommandait en effet une décision de principe en faveur du « *stockage géologique au sein d’une argile peu indurée dans une installation unique située sur le territoire belge* ». Elle résultait d’une comparaison extensive de solutions de gestion envisageables, non seulement sur la base de

leurs incidences environnementales, mais aussi sous les angles technique et scientifique, éthique et sociétal, et économique et financier. Elle s'appuyait sur les résultats de trente années de recherche, développement et démonstration en Belgique en matière de stockage géologique et s'inscrivait dans la ligne des politiques nationales de pays étrangers. Bien que confirmant qu'aucun argument ne remettait en question la capacité de l'Argile de Boom — une argile peu indurée — à confiner les substances radioactives, l'AFCN avait toutefois jugé prématuré le choix d'une formation hôte pour le stockage géologique [AFCN 2010]. La tutelle de l'ONDRAF s'était rangée à cet avis en 2016 [Peeters & Marghem 2016].

1.5 Nécessité d'une nouvelle procédure SEA et établissement du SEA

En tant qu'auteur de la proposition de politique nationale de juin 2018, et en application de la loi du 8 août 1980 et de la loi du 13 février 2006, l'ONDRAF soumet sa proposition à la procédure SEA, c'est-à-dire en particulier à une évaluation de ses incidences environnementales et à une consultation du public [Marghem & Peeters 2018]. Le SEA est établi à la date de référence du 31 décembre 2018.

Du fait notamment que la délimitation géographique et l'environnement géologique du Plan ne sont pas encore connus, l'évaluation de ses incidences environnementales est préliminaire et essentiellement descriptive (voir aussi section 2.1.1). Le présent SEA identifie et décrit les incidences dont l'évaluation est utile et pertinente au stade de l'adoption de la première partie de la politique nationale de gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. Des évaluations plus détaillées des incidences devront obligatoirement être effectuées à des stades ultérieurs de la définition de cette politique et de la préparation de sa mise en œuvre.

Le SEA s'appuie sur un choix de références bibliographiques très sélectif. Les ressources bibliographiques relatives à la gestion à long terme des déchets radioactifs en général et au stockage géologique en particulier sont en effet pléthoriques : elles résultent de cinq décennies de recherche, développement et démonstration, à l'étranger comme en Belgique. L'ONDRAF n'a par contre pas connaissance d'exemples étrangers d'évaluations des incidences environnementales de la solution du stockage géologique en tant que *concept*. Les exemples existants portent sur des plans plus détaillés et sur des projets.

1.6 Structure du SEA

Le SEA adopte la structure suivante :

- une présentation des volets technique et non technique du projet de Plan, des considérations relatives à l'environnement dans lequel il sera réalisé, un calendrier indicatif de mise en œuvre et l'inventaire des déchets concernés (chapitre 2) ;
- une présentation générale de la solution du stockage géologique, y compris une brève présentation des formations géologiques hôtes potentielles, et un aperçu des politiques nationales de pays étrangers (chapitre 3) ;
- les alternatives envisagées qui ne constituent pas des solutions de substitution raisonnables au stockage géologique (chapitre 4) ;
- les liens entre le Plan et d'autres plans et programmes pertinents ou des politiques pertinentes en vigueur (chapitre 5) ;
- un aperçu du contenu du SEA, tel qu'il résulte de l'application des procédures de screening et de scoping établies par le Service public fédéral (SPF) Santé (chapitre 6) ;
- une description de la situation de référence — l'entreposage temporaire en surface — et de son évolution attendue si le Plan n'est pas mis en œuvre (chapitre 7) ;

- une brève présentation de l'approche utilisée pour l'évaluation, préliminaire et descriptive, des incidences environnementales du Plan (chapitre 8) ;
- l'évaluation des incidences environnementales du stockage géologique en galeries (chapitre 9) ;
- quelques considérations préliminaires relatives à l'évaluation des incidences environnementales du stockage géologique en forages profonds (chapitre 10) ;
- des considérations générales relatives à la robustesse et à la flexibilité (chapitre 11) ;
- des considérations finales et des recommandations, qui s'appuient non seulement sur les résultats des évaluations des incidences environnementales, mais aussi sur des considérations d'autres natures, comme des considérations éthiques, sociétales et financières (chapitre 12).

Le SEA aborde ainsi tous les sujets qui figurent dans l'annexe II de la loi du 13 février 2006. Il est accompagné d'un résumé non technique.

Le SEA contient par ailleurs en annexe une liste d'acronymes, les références des documents qui fixent ou font état des politiques nationales de gestion à long terme de pays étrangers pour leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie ainsi que l'avis du Comité d'avis SEA sur le projet de répertoire et la façon dont il a été pris en compte.

2 Le projet de Plan

Le projet de Plan, qui comporte un volet technique et un volet non technique, est très concis. Après avoir décrit ces volets et précisé que le projet de Plan constitue la première partie de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie (section 2.1), ce chapitre fait le constat selon lequel l'environnement dans lequel le Plan sera réalisé est inconnu (section 2.2) et donne un calendrier indicatif de mise en œuvre (section 2.3). Il se termine avec l'inventaire des déchets concernés (section 2.4).

2.1 Un volet technique et un volet non technique

Pour l'essentiel, le projet de Plan fixe, d'une part, le type de solution technique à développer pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, qui constitue la base de la politique nationale de gestion à long terme de ces déchets (section 2.1.1), et, d'autre part, le processus d'adoption par étapes de la politique et les caractéristiques du processus décisionnel à établir (section 2.1.2). Il ne précise ni le concept de stockage et les technologies de mise en œuvre (le comment ?), ni la formation géologique hôte, la profondeur de stockage et le site de stockage (le où ?), ni le moment du début de l'exploitation (le quand ?).

Le projet de Plan porte sur les « *déchets radioactifs solides conditionnés de haute activité et [les] déchets radioactifs solides conditionnés de faible et moyenne activité et de longue durée de vie, en ce compris les combustibles usés déclarés comme déchets, les déchets issus du retraitement de combustibles usés, les matières fissiles excédentaires déclarées comme déchets ainsi que tous les autres déchets radioactifs dont les caractéristiques sont compatibles avec la mise en stockage géologique* » (voir section 2.4 pour les questions d'inventaire).

2.1.1 Une solution technique, dont les incidences environnementales doivent être évaluées : « un système de stockage géologique sur le territoire belge »

Le projet de Plan définit la solution de gestion à long terme pour les déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie comme étant « *un système de stockage géologique sur le territoire belge* » [ONDRAF 2018a]. Il fixe ainsi l'orientation à suivre pour gérer la problématique environnementale que constituent ces déchets à long terme. Le projet de Plan définit

- « *stockage géologique* » comme « *la mise en place de déchets radioactifs dans une installation de stockage telle que définie à l'article 179, § 5, de la loi du 8 août 1980, située à une profondeur appropriée dans une formation géologique dans le but de protéger la population et l'environnement des risques radiologiques que présentent ces déchets* » ;
- « *système de stockage géologique* » comme « *ensemble constitué par les déchets radioactifs, les barrières ouvragées — les deux constituant l'installation de stockage telle que définie à l'article 179, § 5, de la loi du 8 août 1980 — et les barrières naturelles y associées, à savoir la formation géologique hôte et son environnement géologique* ».

La notion de stockage géologique englobe deux options (voir chapitre 3 pour plus de détails) :

- le *stockage géologique en galeries*, à savoir l'acheminement de déchets et leur mise en place dans les galeries d'une installation spécialement conçue et construite à cet effet à une profondeur appropriée dans une formation hôte ;

- le *stockage géologique en forages profonds*, à savoir la mise en place de déchets, depuis la surface, dans des forages creusés dans la formation hôte, à une profondeur potentiellement beaucoup plus importante que pour un stockage géologique en galeries.

C'est la dangerosité des déchets, déterminée par leur activité et leur durée de vie, qui guide leur profondeur minimale de stockage. Un système de stockage doit en effet confiner les déchets et les isoler de la biosphère, *suffisamment et de façon suffisamment durable*. Ainsi, les déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de longue durée de vie doivent être stockés dans des formations géologiques stables à des profondeurs de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mètres et les déchets conditionnés de haute activité le sont habituellement à quelques centaines de mètres de profondeur ou plus [AIEA 2009]. Ces deux catégories de déchets (section 2.4.1) peuvent être gérées dans le cadre d'une solution de stockage commune, à quelques centaines de mètres de profondeur (tout en tenant compte de leurs caractéristiques spécifiques), ou être gérées dans des installations distinctes, à des profondeurs alors vraisemblablement différentes.

Le Plan étant *conceptuel* et *générique*, il ne contient aucune indication qui puisse suggérer une ou plusieurs zones de mise en œuvre possibles de la solution de stockage, comme une mention de types de formations géologiques hôtes potentiellement adéquates, ce que faisait la proposition de 2011. C'est un choix délibéré, conforme à une demande récente de la tutelle de l'ONDRAF [Peeters & Marghem 2016] et qui tient compte de la position de l'AFCN selon laquelle le choix d'une formation hôte pour le stockage géologique est prématuré [AFCN 2010, 2014, 2015].

Comme le Plan fait partie d'un ensemble hiérarchisé — d'autres documents proposeront le choix d'une formation géologique hôte, le choix d'un site de mise en œuvre, le choix d'un projet technique bien défini, etc. —, son volet technique fait l'objet d'une évaluation *stratégique*, très générale, de ses incidences environnementales. Le domaine d'évaluation est en effet particulièrement étendu ou peu précis, dans toutes ses dimensions : spatiale (environnement de surface *et* souterrain), temporelle et technique (en évolution constante). Cette approche est autorisée par l'article 11 de la loi du 13 février 2006, selon lequel « *Lorsque le plan ou programme fait partie d'un ensemble hiérarchisé, le rapport sur les incidences environnementales peut tenir compte, en vue d'éviter une répétition de l'évaluation du fait que l'évaluation des incidences sera effectuée à un autre niveau de l'ensemble hiérarchisé* ». Selon l'annexe II de la même loi, le rapport sur les incidences environnementales doit contenir « *les informations qui peuvent être raisonnablement exigées, compte tenu des connaissances et des méthodes d'évaluation existantes, du contenu et du degré de précision du plan ou du programme, du stade atteint dans le processus de décision et du fait qu'il peut être préférable d'évaluer certains aspects à d'autres stades de ce processus afin d'éviter une répétition de l'évaluation* ».

Des évaluations des incidences environnementales plus spécifiques et plus détaillées seront effectuées chaque fois que le cadre légal et réglementaire l'exige, en particulier pour le choix du site de mise en œuvre et pour les demandes d'autorisations du projet technique dont la réalisation sera proposée in fine. A terme, les incidences environnementales pertinentes du Plan tel qu'il sera proposé de le concrétiser par un projet auront toutes été évaluées en détail (figure 3).

Ceci dit, comme le Plan pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie existants et prévus poursuit précisément un objectif de protection de l'homme et de l'environnement et que sa mise en œuvre sur le terrain sera subordonnée à la délivrance d'autorisations nucléaires et non nucléaires confirmant que les normes en vigueur sont satisfaites, ses incidences environnementales en sont une conséquence inévitable. Elles doivent être mises en regard de l'évolution attendue si le Plan n'est pas mis en œuvre (section 7.2). Il conviendra bien entendu de les minimiser et de les atténuer autant que possible.

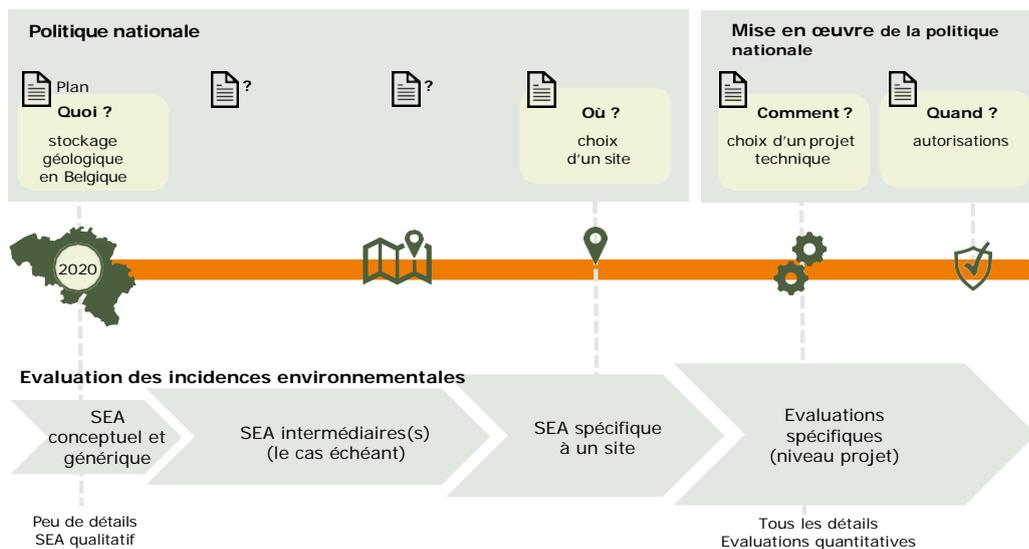


Figure 3 – L'approche par étapes de l'évaluation des incidences environnementales de la solution du stockage géologique (voir aussi section 2.1.2).

2.1.2 Un volet non technique sans incidences environnementales : l'adoption par étapes de la politique nationale et le processus décisionnel

Le projet de Plan contient un volet non technique, dépourvu d'incidences environnementales : ce volet fixe en effet les modalités d'adoption et de maintien de la politique nationale et contient des dispositions relatives au processus décisionnel à établir, dans lequel s'inscrira le développement de la solution de gestion à long terme.

Le volet non technique du projet de Plan prévoit que la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie *sera adoptée par étapes* (figure 3), *par des arrêtés royaux successifs*. Elle comprendra au moins deux autres parties : « la détermination du processus décisionnel qui accompagnera le développement de la solution de gestion à long terme, en ce compris les grandes étapes qui le jalonnent et les rôles et responsabilités y afférents » et, en temps opportun, « la détermination du ou des sites sur lequel ou lesquels est mise en œuvre la solution de gestion à long terme ». En application de la loi du 8 août 1980, la politique nationale devra aussi contenir des modalités relatives à la réversibilité du processus décisionnel, à la récupération des déchets et au monitoring du système de stockage pendant une période à déterminer.

Le processus décisionnel à fixer, qui constitue la prochaine étape dans l'adoption de la politique nationale, devra, selon le projet de Plan, présenter les caractéristiques suivantes :

- « a) progresser par étapes documentées, fondées sur des données probantes et sanctionnées formellement ;
- b) considérer de manière raisonnée les différents aspects de la gestion des déchets radioactifs [...], à savoir non seulement les aspects de sûreté, mais aussi les aspects scientifiques et techniques, les aspects sociétaux et éthiques, les aspects environnementaux, les aspects économiques et financiers ainsi que les aspects légaux et réglementaires, étant entendu que les considérations liées à la sûreté priment ; ensemble, ces aspects déterminent la faisabilité de la solution et conditionnent sa mise en œuvre et son optimisation progressive » ;

- c) être adaptable, de manière à pouvoir prendre en compte les développements internationaux et les avancées scientifiques et techniques, notamment en matière de stockage en forages profonds et de technologies nucléaires avancées, les résultats des évaluations de sûreté et d'incidences sur l'environnement, les impératifs de maîtrise des coûts ainsi que les évolutions sociétales, légales et réglementaires ;
- d) être participatif, équitable et transparent, de manière à créer et maintenir l'assise sociétale nécessaire au développement de la solution de gestion à long terme avec une ou plusieurs collectivités locales informées et consentantes et, à terme, à l'intégration d'un projet de stockage géologique aux différents niveaux, en particulier dans une collectivité locale ;
- e) considérer le système de stockage géologique dans sa totalité ;
- f) inclure [...] les modalités de suivi de la politique nationale, celles-ci portant notamment sur le statut, la composition, les missions et les compétences de l'organe multidisciplinaire visé à l'article 179, § 6, alinéa 5, de la loi du 8 août 1980. »

2.2 Environnement dans lequel le Plan sera réalisé

L'environnement — de surface et souterrain — dans lequel le Plan sera réalisé n'est pas connu, car le site de mise en œuvre du Plan n'est pas encore connu. L'environnement de surface est potentiellement constitué de l'ensemble du territoire national. En pratique, le stockage géologique en galeries ou en forages profonds nécessitera un environnement géologique présentant des caractéristiques adéquates (voir aussi section 3.4).

Compte tenu du caractère conceptuel et générique du Plan, l'exclusion de certaines zones du territoire belge est prématurée. Ceci dit, le futur choix de site tiendra compte d'un certain nombre de types de zones d'exclusion, telles les zones Natura 2000 et les zones fortement urbanisées, ainsi notamment que des impositions relatives à la préservation des sols et des eaux. La préservation adéquate des ressources en eaux constituera un point d'attention essentiel.

2.3 Calendrier indicatif de mise en œuvre

Le large consensus international en faveur du stockage géologique et les politiques nationales adoptées en ce sens par de nombreux pays (table 3 à la section 3.5) n'enlèvent rien au fait que le développement et la mise en œuvre d'un stockage géologique en galeries ou en forages profonds est un processus long et progressif, qui prend plusieurs décennies et comporte des étapes décisionnelles clés (choix du site de mise en œuvre, octroi des autorisations, etc.). Compte tenu des difficultés et délais à prendre en compte, le défi que représente le développement d'une solution de stockage géologique est considérable. Ce développement nécessite donc des efforts soutenus, guidés par un processus de prise de décisions transparent.

L'adoption du Plan, qui définit la base de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie comme étant le stockage géologique sur le territoire belge, *n'entraînera en aucun cas sa mise en œuvre immédiate sur le terrain*. Il s'écoulera en effet plusieurs dizaines d'années entre cette adoption et la mise en stockage des premiers déchets (figure 4). Cette période sera nécessaire pour, notamment,

- répondre, via les activités de recherche, développement et démonstration, aux questions scientifiques et techniques encore ouvertes, préparer les dossiers de sûreté nécessaires aux demandes d'autorisations et obtenir ces autorisations ;
- construire le processus et les méthodes de concertation sociétale et installer cette concertation dans la durée ;

- parvenir, dans le cadre du processus décisionnel à établir, aux décisions successives permettant d'aboutir, in fine, au choix d'un projet technique spécifique, à mettre en œuvre sur un site donné, et aux infrastructures, activités et projets associés devant permettre de créer et maintenir l'assise sociétale requise pour le projet technique (loi du 8 août 1980, article 179, § 2, 11°) ;
- préparer les phases de construction et d'exploitation, y compris le développement des technologies nécessaires ;
- permettre aux déchets conditionnés de haute activité de refroidir suffisamment, compte tenu des caractéristiques de la formation géologique hôte qui aura été choisie, pour pouvoir y être mis en stockage ;
- préparer les déchets conditionnés en vue de leur stockage géologique, une fois les caractéristiques du système de stockage connues. Ceci nécessite par exemple a priori la construction d'installations pour leur post-conditionnement dans un emballage supplémentaire — un conteneur de stockage — avant stockage.

Le délai de plusieurs dizaines d'années qui s'écoulera entre l'adoption du Plan et le stockage des premiers déchets permettra aussi de tirer avantage, le cas échéant, des développements scientifiques et techniques susceptibles d'améliorer la solution de stockage. La prise en compte de nouveaux développements restera de même possible, dans une certaine mesure, durant l'exploitation du stockage géologique.

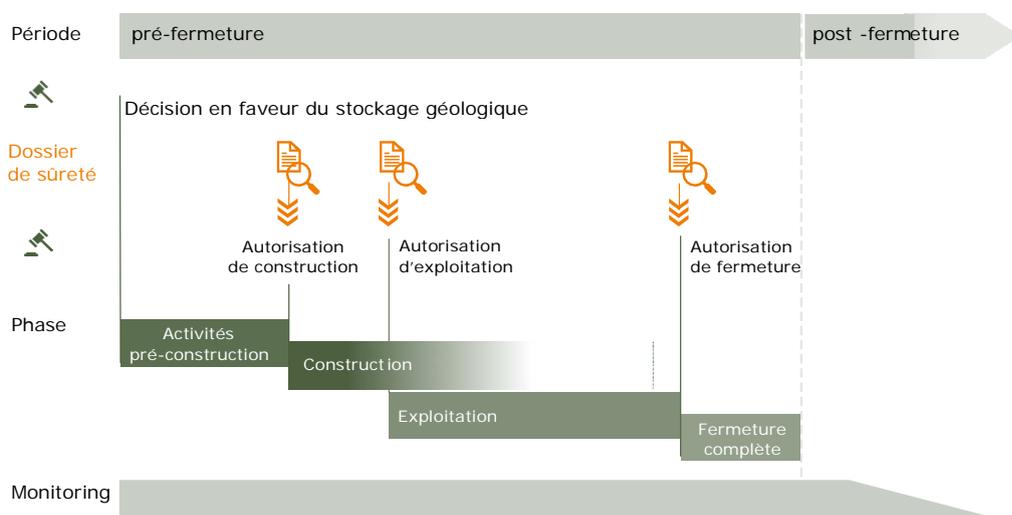


Figure 4 – Chronologie de mise en œuvre d'un stockage géologique en galeries, y compris les principales phases d'activités [d'après AIEA 2011a].

2.4 Inventaire des déchets concernés

Le Plan concerne *les déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie*, en ce compris le combustible usé non retraité déclaré comme déchet, les déchets issus du retraitement de combustible usé et les matières fissiles excédentaires déclarées comme déchets, ainsi que tous les autres déchets radioactifs dont les caractéristiques sont compatibles ou rendues compatibles avec le stockage géologique. Les déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie correspondent aux déchets de catégorie C et aux déchets de catégorie B de la classification de l'ONDRAF pour la gestion à long terme (section 2.4.1).

L'inventaire des déchets radioactifs destinés au stockage géologique comporte deux volets :

- un *inventaire de référence*, dont l'estimation, revue périodiquement, est jugée relativement fiable (section 2.4.2) ;
- un *inventaire complémentaire potentiel* (section 2.4.3).

2.4.1 Classification des déchets radioactifs conditionnés pour leur gestion à long terme

Pour la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés, l'ONDRAF a adopté une classification en trois catégories ⁴ (figure 5), définies de façon conforme à la classification proposée en 1994 par l'Agence internationale de l'Energie atomique (AIEA) [AIEA 1994], elle-même revue en 2009 [AIEA 2009].

- Les *déchets de catégorie A* sont les déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de courte durée de vie. Ils contiennent des quantités limitées de radionucléides de longue durée de vie. Ils présentent un risque pendant quelques centaines d'années pour l'homme et l'environnement. Ils entrent en considération pour un stockage en surface ou à faible profondeur. Ils correspondent aux déchets de faible activité de la classification de l'AIEA de 2009.

Les déchets de catégorie A contiennent, en Belgique, moins de 0,5 % de l'activité totale de tous les déchets. Près des trois quarts d'entre eux sont des déchets de déclassement.

- Les *déchets de catégorie B* sont les déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de longue durée de vie. Ils contiennent des radionucléides de longue durée de vie en quantités telles qu'ils présentent un risque durant une très longue période et doivent être isolés de l'homme et de l'environnement pendant quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années. Ils correspondent aux déchets de moyenne activité de la classification de l'AIEA de 2009.

Les déchets de catégorie B contiennent, en Belgique, environ 2 % de l'activité totale de tous les déchets et n'émettent pas ou peu de chaleur. Ils proviennent essentiellement des activités de recherche, de la fabrication de combustible, du retraitement de combustible usé (y compris dans l'ancienne usine-pilote de retraitement Eurochemic) et du déclassement des centrales nucléaires et des installations de recherche et de fabrication de combustible. Ils comprennent le combustible usé non retraité des réacteurs de recherche déclaré comme déchet qui n'appartient pas à la catégorie C en raison de sa faible puissance thermique. Ils comprennent notamment aussi les sources scellées retirées du service qui doivent être gérées en tant que déchets radioactifs.

- Les *déchets de catégorie C* sont les déchets conditionnés de haute activité. Ils contiennent de grandes quantités de radionucléides de longue durée de vie et, comme les déchets de catégorie B, présentent donc un risque durant une très longue période et doivent être isolés de l'homme et de l'environnement pendant quelques centaines de milliers d'années, voire pendant une période de l'ordre du million d'années. Ils correspondent aux déchets de haute activité de la classification de l'AIEA de 2009.

Les déchets de catégorie C contiennent, en Belgique, environ 97,5 % de l'activité totale de tous les déchets et émettent une quantité considérable de chaleur. Ce sont les déchets vitrifiés issus du retraitement de combustible usé commercial ou de recherche ainsi que le combustible usé non retraité déclaré comme déchet, à l'exception du combustible usé des réacteurs de recherche qui appartient à la catégorie B en raison de sa faible puissance thermique.

⁴ Ces catégories ne couvrent pas les déchets radifères qui se trouvent dans les installations d'entreposage d'Umicore à Olen (section 2.4.3).

	DE FAIBLE ACTIVITÉ	DE MOYENNE ACTIVITÉ	DE HAUTE ACTIVITÉ
DÉCHETS DE COURTE DURÉE DE VIE	A 	A 	C
DÉCHETS DE LONGUE DURÉE DE VIE	B 	B 	C

Figure 5 – Représentation simplifiée de la classification des déchets radioactifs conditionnés pour leur gestion à long terme. Les déchets de catégorie C émettent une quantité considérable de chaleur.

2.4.2 Inventaire de référence

L'inventaire de référence est l'inventaire estimé des déchets des catégories B et C *existants et dont la production est prévue* [ONDRAF 2019c]. Il est mis à jour périodiquement par l'ONDRAF sur la base de ses propres connaissances et des déclarations des producteurs de déchets :

- connaissance qu'a l'ONDRAF des déchets et du combustible utilisé existant et estimation des déchets qui seront issus du déclassement futur des installations nucléaires existantes ;
- déclarations des producteurs concernant leurs estimations des déchets d'exploitation (y compris le combustible utilisé qu'ils déclareraient comme déchet), de retraitement et de déclassement qu'ils transféreront encore à l'ONDRAF.

La presque totalité des déchets de l'inventaire de référence sont *inévitables*, en ce sens qu'ils existent déjà, sous forme conditionnée ou pas, ou qu'ils sont « en devenir », essentiellement sous la forme

- de combustible chargé dans les cœurs des réacteurs nucléaires ou entreposé sur les sites des centrales ;
- de parties de bâtiments et installations dans lesquels prennent place des activités qui mettent en jeu la radioactivité.

L'inventaire de référence des déchets des catégories B et C existants et prévus au 31 décembre 2018 est donné dans la table 1. Il comporte un volet se rapportant aux quantités et un volet radiologique. Il s'élève à 10 900 m³ de déchets de catégorie B ⁵, 250 m³ de déchets vitrifiés de catégorie C et 3 800 tHM (*tonne of Heavy Metal*) de combustible utilisé non retraité. Il considère, conformément aux dispositions de la loi du 31 janvier 2003 telle que modifiée, que les réacteurs nucléaires commerciaux de Doel 1 et 2 et de Tihange 1 seront exploités pendant 50 ans et que les quatre autres réacteurs commerciaux belges seront exploités pendant 40 ans. Il tient compte de l'hypothèse de Synatom au 31 décembre 2018 selon laquelle environ 1 000 tHM de combustible utilisé provenant des réacteurs nucléaires commerciaux seront encore retraités (dont 66 tHM de combustible utilisé MOX ou *mixed-oxide fuel*, soit l'ensemble du MOX présent en Belgique), en plus des 672 tHM UOX (*uranium-oxide*

⁵ Dont en particulier

- les quantités limitées de déchets radioactifs d'origine belge qui se trouvent actuellement à l'étranger et qui doivent être rapatriées ;
- les sources scellées retirées du service ;
- les (maximum) 30 m³ de déchets de catégorie B en provenance du Grand-Duché de Luxembourg que la Belgique s'est engagée à prendre en charge d'ici 2049 [Belgique 2019 ; Grand-Duché de Luxembourg 2018].

fuel) qui ont été retraitées dans le passé. L'inventaire de référence pourrait être affecté par un changement d'hypothèse quant à la fraction du combustible usé des réacteurs nucléaires commerciaux qui sera encore retraitée.

Table 1 – Inventaire de référence au 31 décembre 2018 (chiffres arrondis) [ONDRAF 2019c].

Catégorie de déchets	Nombre de colis ou d'assemblages	Quantité existante	Quantité encore prévue [volume ou tHM]	Inventaire total	Activité totale [Bq]	
					α	βγ
Catégorie B						
Déchets conditionnés	31 250 colis	6 300 m ³	4 600 m ³	10 900 m ³	7 10 ¹⁵	10 ¹⁸
Catégorie C						
Déchets vitrifiés	1 400 colis	70 m ³	180 m ³	250 m ³	9 10 ¹⁷	10 ¹⁹
Combustible usé des centrales nucléaires	8 500 assemblages	2 600 tHM	1 200 tHM	3 800 tHM	2 10 ¹⁸	5 10 ¹⁹

2.4.3 Inventaire complémentaire potentiel

A l'inventaire de référence peut s'ajouter un inventaire complémentaire de déchets, constitué de déchets semblables à ceux qui appartiennent actuellement aux catégories B et C et/ou de déchets d'autres types que les déchets de ces deux catégories et qui ne pourraient pas être gérés à long terme dans une installation de stockage en surface. Pourraient par exemple entrer dans l'inventaire complémentaire potentiel des déchets des types suivants :

- les déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de courte durée de vie dont les caractéristiques physicochimiques ne satisferaient pas aux critères de la future autorisation nucléaire de création et d'exploitation de l'installation de stockage en surface à Dessel mais sont compatibles ou auront été rendues compatibles avec le stockage géologique (chapitre 3) ;
- la fraction la plus radioactive des déchets radifères contenus dans les installations d'entreposage d'Umicore à Olen, qui pourrait avoisiner les 10 000 m³ avant conditionnement. Le mode de gestion à long terme de ces déchets, qui sont des déchets de longue durée de vie provenant de la production historique de radium et d'uranium par Umicore (anciennement Union Minière) à Olen entre 1922 et 1977, n'a pas encore été fixé ;
- la fraction des substances NORM (*naturally occurring radioactive materials*) dont l'AFCN décidera qu'elles doivent être gérées à long terme en tant que déchets radioactifs par l'ONDRAF, probablement de l'ordre de quelques centaines de mètres cubes avant conditionnement selon l'AFCN ⁶ ;
- certains déchets issus d'installations nucléaires futures, qu'elles soient prévues, comme l'installation MYRRHA (prototype de réacteur nucléaire piloté par un accélérateur de particules), ou non.

La capacité d'une solution de stockage géologique à absorber des modifications de l'inventaire des déchets est traitée au chapitre 11 et les effets de telles modifications sur les incidences environnementales sont commentés à la section 9.4.

⁶ Des matières naturellement radioactives, de longue durée de vie, sont utilisées dans certains procédés industriels pour des raisons qui n'ont rien à voir avec leurs propriétés radioactives. Ces procédés peuvent entraîner une concentration de la radioactivité naturelle dans certains résidus. Ces résidus sont actuellement entreposés sur les sites des producteurs et dans quelques décharges connues et contrôlées.

3 Stockage géologique : introduction générale

La stratégie communément acceptée et appliquée au niveau international pour la gestion des déchets radioactifs est la stratégie de *concentration* et de *confinement* des déchets, avec *isolation* vis-à-vis de la biosphère, par opposition à une stratégie de dilution et de dispersion des substances radioactives dans l'environnement.

Selon l'AIEA [AIEA 2011b], « les objectifs spécifiques du stockage définitif sont les suivants :

- a) *confiner les déchets ;*
- b) *isoler les déchets de la biosphère accessible et réduire sensiblement la probabilité et toutes les conséquences possibles d'une intrusion humaine par inadvertance dans les déchets ;*
- c) *empêcher, réduire et retarder la migration des radionucléides à tout moment des déchets vers la biosphère accessible ;*
- d) *faire en sorte que les quantités de radionucléides qui parviennent dans la biosphère accessible du fait d'une migration quelconque depuis l'installation de stockage définitif soient telles que les conséquences radiologiques possibles sont à un faible niveau acceptable à tout moment. »*

Dans tous les pays concernés, la conception et le développement de solutions de stockage de déchets radioactifs procèdent toujours d'une approche systémique, selon un concept multibarrière (figure 6) : les systèmes, et en particulier leurs barrières artificielles ou « ouvragées » (emballages des déchets et barrières de l'installation de stockage), sont conçus en fonction des caractéristiques de la formation hôte et des déchets à confiner et isoler, de manière que l'ensemble « *barrières naturelles + barrières ouvragées + déchets* » soit à même d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement de façon passive, en *confinant* les radionucléides et les contaminants chimiques, en *retardant* leur migration vers la biosphère et en *isolant* l'installation de stockage par rapport à la biosphère.

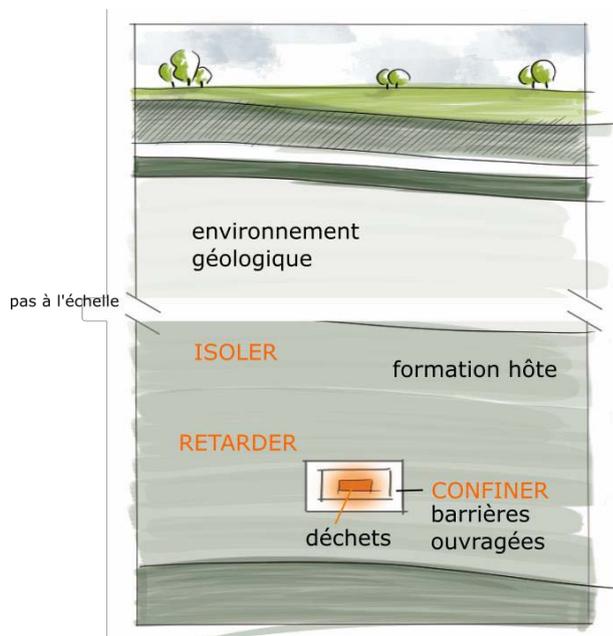


Figure 6 – Représentation du concept multibarrière dans le cas du stockage géologique. Un système de stockage géologique confine et isole les radionucléides et les contaminants chimiques de la biosphère et retarde leur migration vers celle-ci.

Le stockage géologique est,

- selon le cadre international de la gestion des déchets radioactifs (cadre 1 à la section 1.1) [AIEA 1997 ; Conseil européen 2011],
- selon le consensus international [par exemple, AEN 1995, 2008 ; AIEA 2003 ; Blue Ribbon Commission 2012 ; CoRWM 2018],
- et selon l'AFCN [AFCN 2015],

la seule solution possible pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité (déchets de catégorie C). C'est également la position de l'ONDRAF : seule une solution de stockage géologique peut être conçue et mise en œuvre de façon telle que la protection de l'homme et de l'environnement soit assurée aussi longtemps que nécessaire. Une fois l'installation complètement fermée, le système de stockage assure la sûreté de façon passive : il ne nécessite plus d'interventions humaines et n'impose donc pas de report de charges sur les générations futures. L'activité résiduelle relâchée dans l'environnement au bout de quelques centaines de milliers d'années suite à l'évolution naturelle d'un système de stockage bien conçu et bien mis en œuvre doit être négligeable. Les déchets conditionnés de longue durée de vie de catégorie B doivent aussi être mis en stockage géologique, mais à une profondeur potentiellement moindre que les déchets conditionnés de haute activité.

En application de la loi du 8 août 1980, la solution de stockage géologique devra être assortie ultérieurement de modalités relatives à la réversibilité du processus décisionnel, à la récupération des déchets et au monitoring du système de stockage pendant une période à déterminer.

Le stockage géologique peut se décliner en deux options : le stockage géologique en galeries (section 3.1) et le stockage géologique en forages profonds (section 3.2), qui sont comparés sous différents aspects (section 3.3). De nombreux pays ont déjà adopté le stockage géologique comme politique nationale de gestion à long terme de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie (section 3.5). Les formations géologiques hôtes généralement retenues sont des évaporites, des roches cristallines ou des formations argileuses (section 3.4).

3.1 Stockage géologique en galeries

Le stockage géologique en galeries consiste à placer les déchets radioactifs conditionnés dans une installation spécialement conçue, construite dans une formation géologique hôte adéquate à une profondeur appropriée. Selon l'AIEA, les déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de longue durée de vie doivent être stockés à des profondeurs de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mètres et les déchets conditionnés de haute activité le sont habituellement dans des formations géologiques stables à quelques centaines de mètres de profondeur ou plus [AIEA 2009]. En pratique, les profondeurs considérées pour le stockage géologique en galeries de déchets conditionnés de haute activité, le cas échéant avec des déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de longue durée de vie, sont le plus souvent de l'ordre de 400 à 500 mètres, mais peuvent être inférieures selon le contexte géologique et son évolution attendue. Elles ne dépassent jamais 1 000 mètres, quelle que soit la formation hôte choisie. En effet, l'augmentation de la profondeur, et avec elle l'augmentation des difficultés techniques, des risques opérationnels et des coûts, n'est pas compensée par une augmentation significative de la protection de l'homme et de l'environnement à long terme.

Le stockage géologique en galeries requiert, en plus de l'installation souterraine, des installations en surface ainsi que des puits d'accès et, le cas échéant, une ou plusieurs rampes d'accès (voir figure 13 à la section 9.1). Une phase industrielle pilote, permettant en particulier de tester la manutention de colis de stockage factices et les technologies de monitoring en conditions réelles, peut précéder la mise en stockage des déchets. Une fois tous les déchets mis dans l'installation, celle-ci peut être fermée complètement, immédiatement ou

après un certain temps, en une fois ou par étapes, sans toutefois qu'une fermeture différée puisse mettre en péril la sûreté et la sécurité ⁷ (voir section 9.1.3 pour un aperçu des principales phases de mise en œuvre et des activités y associées). L'installation ainsi fermée fait en principe au début l'objet d'un monitoring, qui ne peut affecter la sûreté globale du système. Les installations en surface peuvent être démolies, en tout ou en partie, de manière à rendre le site à un état non bâti ou moins bâti.

Tous les systèmes de stockage géologique en exploitation, en cours de construction ou à l'étude de par le monde sont basés sur les objectifs du stockage édictés par l'AIEA (voir introduction du chapitre). Le développement d'une installation de stockage géologique dans une formation hôte spécifique nécessite une approche systémique prenant en compte les caractéristiques des déchets à mettre en stockage, des barrières ouvragées et des barrières naturelles les entourant (formation hôte et environnement géologique) ; les barrières ouvragées sont développées en fonction des caractéristiques des déchets et des barrières naturelles. Chaque système de stockage géologique est ou sera donc unique, du fait des spécificités des déchets et des différentes formations hôtes (figure 7 et section 3.4.1) et de leurs environnements géologiques respectifs.

- Les *formations hôtes* présentent chacune un large éventail de caractéristiques. Selon les géologies présentes dans les sous-sols des pays, un ou plusieurs types de formations hôtes peuvent s'avérer posséder des caractéristiques adéquates pour un stockage géologique.
- Les *barrières ouvragées* peuvent être constituées de différents types de matériaux, tels des métaux, du béton et des matériaux naturels comme l'argile. Leur choix vise à garantir la sûreté à la fois opérationnelle et à long terme. Le souhait de pouvoir récupérer les déchets pendant un certain temps après fermeture complète de l'installation peut également jouer sur la sélection de certaines barrières ouvragées et/ou techniques de construction.
- Les *caractéristiques des déchets*, par exemple le fait qu'ils émettent ou non de la chaleur ou la nature de leur matrice de conditionnement, influencent la conception et la mise en œuvre de l'installation de stockage.

De nombreux pays ont déjà adopté une politique nationale en faveur du stockage géologique en galeries pour la gestion à long terme de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et quelques installations sont en exploitation dans des évaporites et des roches cristallines (section 3.5). La construction de laboratoires souterrains dans des formations argileuses (en Belgique, en France et en Suisse) ainsi que des tests grandeur nature (par exemple, l'excavation avec des techniques industrielles) ont démontré la faisabilité de la construction d'une installation de stockage en galeries dans ce type de formations. De manière générale, les laboratoires souterrains construits dans des formations hôtes potentielles sont des outils précieux pour les caractériser, réaliser des expériences à long terme et des expériences de démonstration in situ et à échelle représentative, ainsi que tester et développer des outils de monitoring. Les laboratoires souterrains sont également des outils de communication vers le public et de transfert des connaissances entre spécialistes.

Les études relatives au stockage géologique en galeries menées en Belgique depuis les années septante indiquent la présence en Belgique de formations argileuses peu indurées susceptibles d'accueillir une installation de stockage géologique (voir aussi section 3.4.2.3) [ONDRAF 1989, 2001a, 2001b, 2011a, 2013]. Les acquis scientifiques et techniques ont été évalués à plusieurs reprises par des experts belges et étrangers [AEN 2003 ; Olsthoorn 2011]

⁷ Sûreté : protection de l'homme et de l'environnement contre les risques des rayonnements ionisants et sûreté des installations et des activités qui sont à l'origine de risques d'irradiation.
Sécurité : prévention, détection et réponse au vol, au sabotage, à l'accès non-autorisé, au transfert illégal ou à d'autres actes malveillants impliquant des matières nucléaires ou d'autres substances radioactives ainsi que les installations associées.

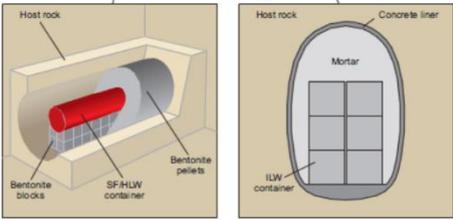
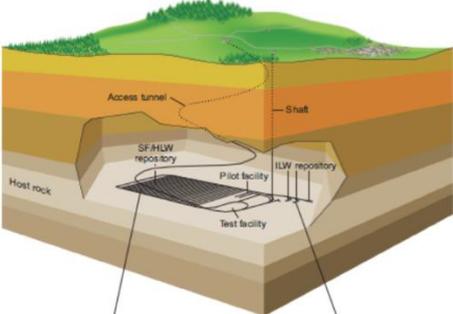
et aucun vice rédhibitoire n'a été relevé : les formations argileuses peu indurées ont une bonne capacité à retarder le relâchement des radionucléides et des contaminants chimiques vers la biosphère et à isoler les déchets et il apparaît faisable de construire une installation de stockage géologique par des méthodes industrielles dans ce type de formations. Les activités de recherche, développement et démonstration se poursuivent afin de compléter et d'affiner les connaissances. En particulier, le laboratoire souterrain de recherche de Mol, construit dans l'argile à environ 220 mètres de profondeur, abrite depuis 2014 l'expérience de chauffe PRACLAY, qui indique jusqu'à présent que les propriétés de l'argile, favorables au confinement des déchets conditionnés de haute activité, ne sont pas affectées de manière significative par la chaleur. Le laboratoire souterrain est, par ailleurs, reconnu par l'AIEA comme étant un centre d'excellence pour les technologies de stockage et la formation de scientifiques. D'autres types de formations que les argiles peu indurées pourraient également entrer en ligne de compte en Belgique en tant que formations hôtes pour un stockage géologique en galeries (section 3.4.2).

Les études de recherche, développement et démonstration (et le maintien des compétences et qualifications) bénéficient d'échanges et de collaborations avec l'étranger (organismes internationaux, agences de gestion des déchets radioactifs, centres de recherche, etc.). Ces échanges et collaborations permettent le partage des règles de bonne pratique, des connaissances et des ressources.

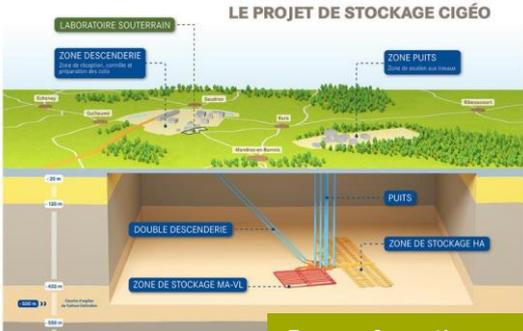
Bien que le Plan propose la solution du stockage géologique *sur le territoire belge*, conformément aux dispositions du cadre légal et réglementaire (section 1.1), ce cadre n'exclut pas que le stockage géologique en galeries puisse être envisagé — c'est une proposition parfois évoquée — dans un contexte multinational, où plusieurs pays partageraient la même installation. Une telle installation multinationale serait susceptible d'être réalisée *tant en Belgique qu'à l'étranger*. Ceci pourrait se faire dans le cadre d'un accord de gestion entre les pays concernés.

La variante « stockage géologique multinational en galeries » de l'option « stockage géologique en galeries en Belgique » est présentée au cadre 2 par souci d'exhaustivité. Elle aurait le même type d'incidences environnementales qu'une solution nationale de stockage mise en œuvre sur le territoire belge, mais avec plus d'inconnues encore, puisque le domaine géographique de mise en œuvre potentielle s'étendrait alors bien au-delà des frontières belges et que l'inventaire des déchets serait inconnu, car il inclurait des déchets étrangers de pays partenaires non identifiés.

Suisse, formation argileuse, cat. A, B et C



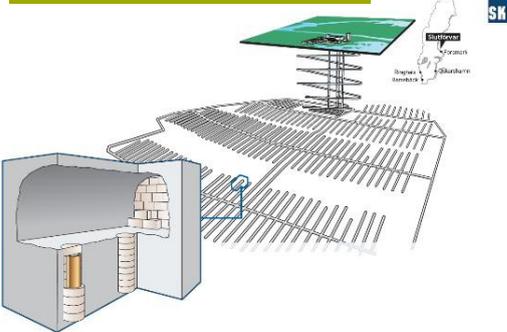
Source : Nagra



Source : Andra

France, formation argileuse, cat. B et C

Suède, roche cristalline, cat. C



Allemagne, calcaire sous argile, cat. A et B, en construction



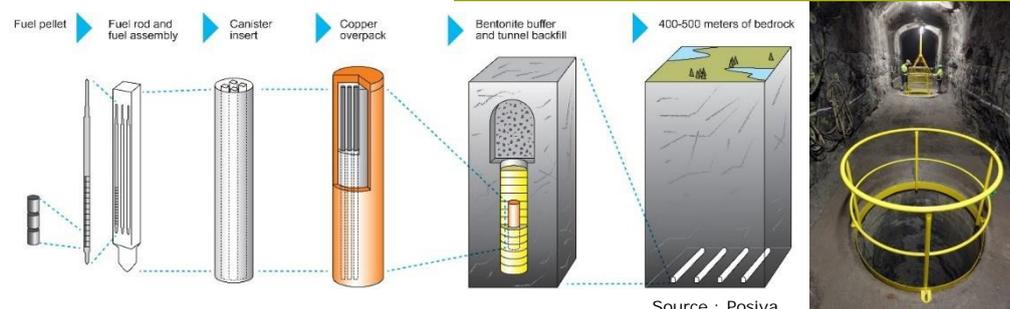
Source : BGE

Hongrie, roche cristalline, cat. A et B, en exploitation



Source : Duna-Dráva

Finlande, roche cristalline, cat. C, en construction



Source : Posiva

Figure 7 – Stockage géologique en galeries à l'étranger (voir aussi section 2.4.1 pour la classification des déchets radioactifs et table 3 à la section 3.5 pour un aperçu plus large de la situation à l'étranger).

Cadre 2 — Stockage géologique multinational en galeries

Le concept de stockage géologique multinational, ou partagé, en galeries fait l'objet de discussions et travaux entre experts depuis le milieu des années septante au niveau international et suscite un intérêt croissant. Cette évolution s'inscrit dans la ligne de la Convention commune et de la directive 2011/70/Euratom : tout en affirmant que les déchets radioactifs devraient être stockés dans le pays où ils ont été produits, les Parties contractantes à la Convention et les Etats membres de l'Union européenne admettent que le partage d'installations de stockage, sous certaines conditions destinées notamment à garantir un niveau de sûreté élevé, pourrait être une option valable pour certains pays. Le stockage, et en particulier le stockage géologique en galeries, requiert en effet des ressources financières considérables, une expertise inhabituelle et un environnement naturel favorable, toutes exigences qui peuvent être difficiles à satisfaire, surtout pour les pays de faible superficie et/ou ayant un inventaire réduit de déchets radioactifs : l'effort, singulièrement en matière de recherche et développement et de sélection d'un site d'implantation, est en effet largement indépendant de l'inventaire des déchets à gérer. L'évolution des travaux relatifs au concept de stockage géologique partagé depuis les années septante a été synthétisée par l'ONDRAF [ONDRAF 2019d].

En pratique, les initiatives en matière de stockage géologique partagé en galeries ne progressent que très lentement : même si les économies d'échelle rendues possibles par de telles installations peuvent être attrayantes, le défi consistant à les développer et à les mettre en œuvre dépasse celui qui consiste à développer et à mettre en œuvre des installations de stockage nationales : en particulier, obtenir l'acceptation politique et sociétale du stockage de déchets radioactifs d'origine étrangère constitue un défi encore plus grand que celui consistant à obtenir l'acceptation du stockage de déchets produits sur le territoire national. Malgré des efforts soutenus, il n'y a pas de perspectives concrètes de stockages géologiques partagés en galeries en vue.

- La plupart des initiatives de type commercial, dans lesquelles un pays hôte propose de compléter son inventaire de déchets destinés au stockage par des déchets importés, ont été abandonnées tôt, essentiellement en raison de l'opposition politique et sociétale. La seule initiative de ce type en application est une initiative russe de reprise de combustible usé d'origine soviétique/russe non accessible à la Belgique.
- Les initiatives passées et en cours visant des scénarios de collaboration, dans lesquels des pays partenaires développent un programme de stockage partagé en vue de sa mise en œuvre dans l'un d'eux, sont des études conceptuelles. Ce travail se poursuit principalement dans le cadre de l'Agence internationale de l'Energie atomique et via un groupe de travail, le *European Repository Development Organisation Working Group* (ERDO-WG), créé en 2009 et composé au 31 décembre 2018 de l'Autriche, du Danemark, de l'Italie, de la Norvège, de la Pologne, des Pays-Bas et de la Slovénie. Il est assisté par l'*Association for Regional and International Underground Storage* (Arius), créée en 2002 pour promouvoir des concepts de solutions internationales et régionales socialement acceptables pour l'entreposage et le stockage sûrs, respectueux de l'environnement et économiques des déchets radioactifs de longue durée de vie. Les progrès concrets sont lents : la création d'une ERDO — une organisation pour le développement d'un stockage européen — prévue pour la mi-2013, n'est pas encore effective et une redéfinition des priorités du ERDO-WG suggère qu'une ERDO ne sera pas créée dans les prochaines années.

En Belgique, l'hypothèse de travail en matière de stockage géologique des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie a toujours été celle d'une solution nationale sur le territoire national, par opposition à une solution partagée pour les déchets belges et des quantités significatives de déchets étrangers, susceptible d'être mise en œuvre sur le territoire belge ou à l'étranger. Ce n'est qu'au début des années 2000 que la Belgique a fait preuve d'intérêt pour une solution de stockage partagé, en participant très brièvement, via l'ONDRAF, aux travaux de l'association Arius et au projet pilote international SAPIERR (*Support Action: Pilot Initiative for European Regional Repositories*), proposé par Arius dans le but de réunir des Etats membres de l'Union européenne ayant un intérêt pour l'évaluation des possibilités d'entreposage et de stockage partagé des déchets conditionnés de moyenne et haute activité. Depuis 2005, l'ONDRAF et la Belgique ne sont plus impliqués, que ce soit activement ou en tant qu'observateurs, dans aucune des initiatives qui supportent le développement d'un concept de stockage partagé.

Les différentes propositions soumises par l'ONDRAF à sa tutelle durant la période 2011-2018 en vue de fixer la base de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie reposaient toutes sur la solution du stockage géologique sur le territoire national et comportaient soit un engagement, soit une suggestion que l'ONDRAF suive les développements internationaux relatifs aux possibilités de partage d'installations de stockage géologique par plusieurs pays, afin d'identifier l'impact possible de telles initiatives sur le programme belge de stockage géologique.

La décision éventuelle d'engager la Belgique dans une approche dite *dual track*, c'est-à-dire une approche selon laquelle un pays qui travaille à une solution de stockage partagé développe, en parallèle, un programme de stockage susceptible de conduire à une solution pour ses propres déchets sur son territoire, est une décision politique. La seule initiative actuellement susceptible d'offrir un intérêt pratique pour la Belgique est le ERDO-WG. Y participer ne dispenserait toutefois pas la Belgique de continuer à s'investir dans son programme de stockage national jusqu'au moment où le stockage partagé entrerait en exploitation, à l'étranger ou en Belgique. Selon le consensus international en effet, les pays parties à une initiative destinée au développement d'une solution de stockage partagé doivent développer une expertise propre et travailler sur une solution de repli nationale. Il n'y a par ailleurs pas d'indications qu'un stockage partagé pourrait être réalisé plus rapidement qu'un stockage national. La viabilité d'une telle solution au niveau européen est du reste restreinte par le fait qu'environ la moitié des pays européens interdit l'importation de déchets radioactifs sur leur territoire en vue de leur stockage [Commission européenne 2019].

Un stockage partagé et un stockage national étant conceptuellement équivalents, leurs incidences environnementales sont de mêmes natures. L'évaluation descriptive des incidences d'un stockage partagé comporte toutefois davantage d'inconnues, car non seulement sa localisation, mais aussi l'inventaire des déchets, sont inconnus. L'évaluation descriptive des incidences d'un tel stockage par rapport au cas où les pays partenaires mettraient leur propre stockage en œuvre est esquissée à la section 9.6.

3.2 Stockage géologique en forages profonds

Au niveau international, les travaux sur le stockage géologique en forages *profonds*⁸ des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie — essentiellement des études conceptuelles — dont les premiers remontent à plusieurs dizaines d'années, ont toujours été et restent marginaux par rapport aux travaux sur leur stockage géologique en galeries. Ces dernières années, ces travaux sont menés principalement par l'Allemagne, la Corée du Sud et les Etats-Unis. Bien que le sujet évolue beaucoup, les concepts de stockage géologique en forages profonds restent nettement moins matures que les concepts de stockage géologique en galeries, tant sous l'angle des technologies à mettre en œuvre que de celui de la capacité scientifique à démontrer que de tels systèmes de stockage sont aptes à protéger aussi longtemps que nécessaire l'homme et l'environnement des risques que présentent les déchets.

L'ONDRAF n'a pas développé de connaissances propres, ni a fortiori d'expérience de recherche, développement et démonstration, en matière de stockage géologique en forages profonds. Il a toutefois fait réaliser une étude bibliographique sur le sujet [ONDRAF 2019b] qui, en association avec quelques autres publications récentes [par exemple, Bracke 2017 ; Chapman 2019 ; CoRWM 2019 ; Muller *et al.* 2019], permet de dégager la synthèse générale qui suit. Elle consiste en une brève description du concept de forages profonds (section 3.2.1), ainsi que de leurs avantages et inconvénients et des défis qui y sont associés (section 3.2.2).

3.2.1 Forages profonds

Jusqu'il y a peu, la notion de stockage géologique en forages profonds désignait uniquement le stockage en forages profonds *verticaux*. Depuis 2016, une compagnie américaine privée, *Deep Isolation*, développe une technologie courante dans le monde pétrolier — la technologie des forages profonds dits « *déviés* », c'est-à-dire dont la partie inférieure est (sub-)horizontale — pour l'adapter au stockage géologique.

Le stockage géologique en forages profonds verticaux consiste conceptuellement en « l'empilement » de colis de déchets radioactifs conditionnés dans des forages étroits de profondeur supérieure à 1 000 mètres (figure 8). La plupart des études envisagent le stockage des déchets dans des forages qui peuvent atteindre 5 à 6 kilomètres de profondeur. La zone de stockage, située dans la partie inférieure des forages, peut atteindre 2 kilomètres et avoir un diamètre compris entre 40 et 90 cm environ. L'espace annulaire entre le revêtement du forage et le milieu environnant et celui entre les colis de déchets et le revêtement du forage peuvent être remplis avec des matériaux choisis pour assurer les meilleures performances possibles au système de stockage. Des « bouchons » horizontaux sont placés à intervalles réguliers dans la zone de stockage afin de réduire tant la pression verticale sur les colis de déchets que le risque de remontée de radionucléides et de contaminants chimiques le long des parois du forage. Le segment de forage situé au-dessus de la zone de stockage est fermé de manière adéquate. Après fermeture complète du forage, le système confine et isole les déchets radioactifs de façon passive de manière sûre pour aussi longtemps que nécessaire, du moins en théorie : il n'est en effet pas encore possible de réaliser des démonstrations convaincantes de la sûreté des forages profonds. Un monitoring limité est possible, mais il est nécessairement très indirect en raison de la profondeur du forage. Le concept de stockage géologique en forages profonds se prête à une exploitation modulaire, en forages successifs. Après fermeture du dernier forage, les installations en surface peuvent être démolies, en tout ou en partie, de manière à rendre le site à un état non bâti ou moins bâti.

⁸ A ne pas confondre avec le stockage géologique simplement dit « en forages », qui concerne le stockage en forages à des profondeurs de quelques dizaines à quelques centaines de mètres et est envisagé typiquement pour les sources scellées de moyenne activité.

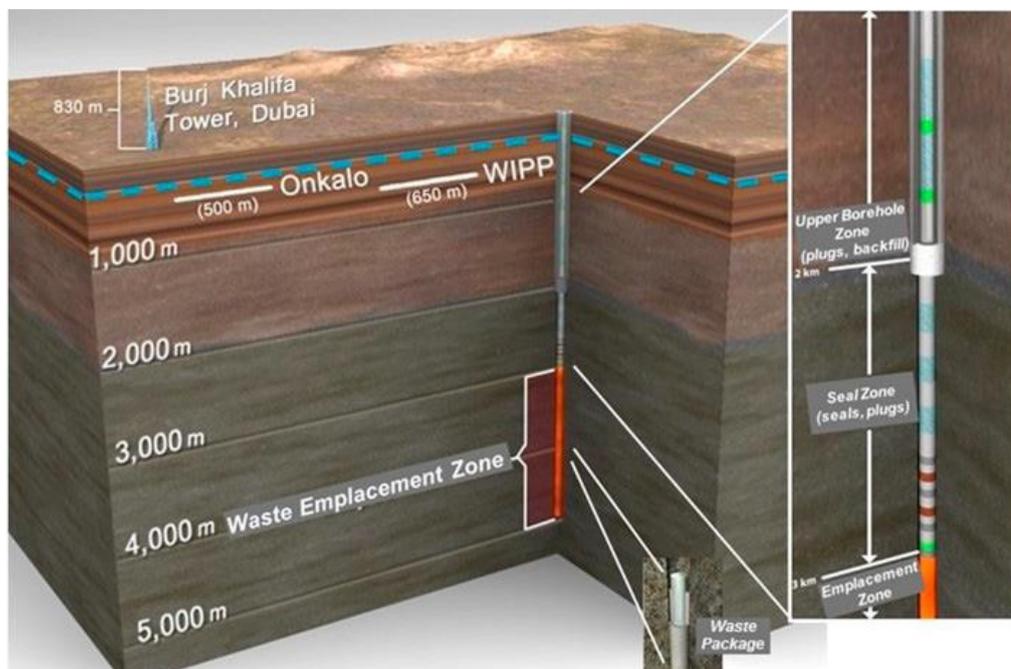


Figure 8 – Représentation type du stockage géologique en forages profonds verticaux [Freeze *et al.* 2019].

Le stockage géologique de déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie en forages profonds verticaux n'a jamais été mis en œuvre. Il semble possible, quoique difficile, de creuser des forages profonds verticaux de 0,7 mètre de diamètre et cinq kilomètres de profondeur (figure 9). Ce diamètre serait le diamètre approximatif minimum pour le stockage des colis de déchets vitrifiés et de combustible usé de l'inventaire de référence (section 2.4.2), sur la base de l'hypothèse que tant les colis de déchets vitrifiés que les assemblages de combustible seraient placés dans des conteneurs de stockage. Près de 90 % des colis existants et prévus de déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de longue durée de vie nécessiteraient des forages — difficiles à réaliser — de diamètre supérieur à 0,7 mètre.

Les connaissances relatives à la présence en Belgique de formations géologiques appropriées pour le stockage géologique en forages profonds verticaux sont peu développées. Les concepts envisagés à l'étranger considèrent généralement le stockage dans un socle cristallin profond surmonté par des couches argileuses plus ou moins imperméables.

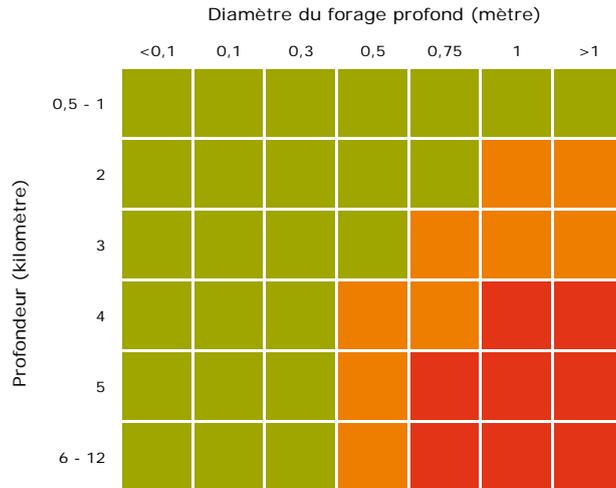


Figure 9 – Faisabilité, telle qu'estimée en 2015, des forages profonds, en fonction du diamètre interne et de la profondeur. Les dimensions indiquées en vert sont faisables avec les technologies existantes, celles indiquées en jaune le seraient moyennant développement des technologies actuelles et celles indiquées en rouge nécessiteraient des développements significatifs [d'après Sowder *et al.* 2016].

Le *Deep Isolation Project* [Muller *et al.* 2019], quant à lui, vise le stockage géologique en forages dits « déviés » (figure 10). Dans ce concept, la partie inférieure du forage, utilisée pour le stockage, est déviée jusqu'à être horizontale ou presque, à une profondeur située entre celles envisagées pour le stockage géologique en galeries et celles généralement rencontrées dans les concepts de stockage en forages profonds verticaux. La zone de stockage peut atteindre une longueur de 3 kilomètres. La formation hôte peut, a priori, être de même nature que les formations hôtes susceptibles d'entrer en ligne de compte pour le stockage géologique en galeries.

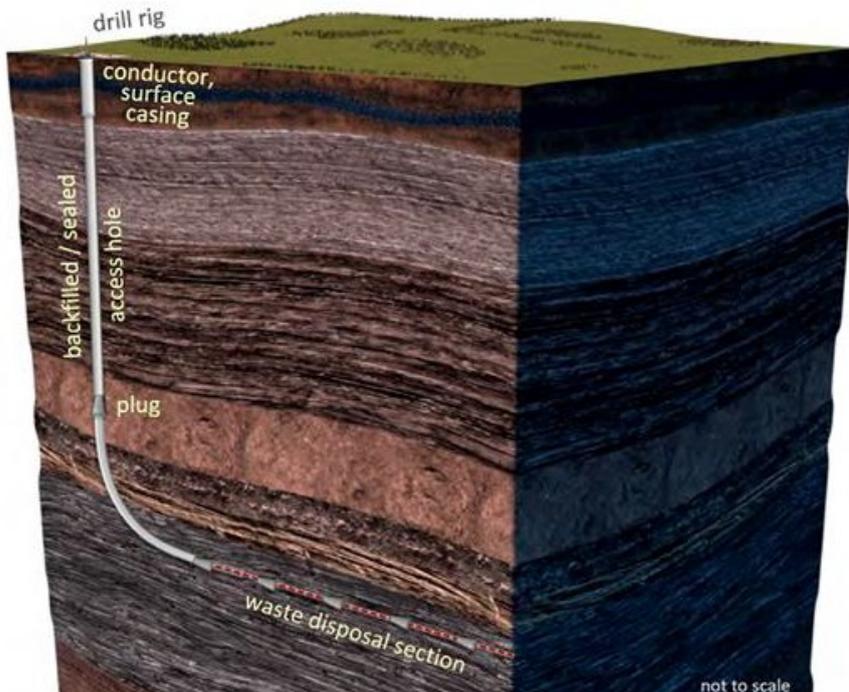


Figure 10 – Représentation type du stockage géologique en forages déviés [Muller *et al.* 2019].

Bien que le Plan propose la solution du stockage géologique *sur le territoire belge*, conformément aux dispositions du cadre légal et réglementaire (section 1.1), ce cadre n'exclut pas que le stockage géologique en forages profonds puisse être envisagé dans un contexte multinational, où plusieurs pays partageraient les mêmes forages. Alors que certains pays envisagent le partage de forages de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de profondeur, le partage de forages de plusieurs kilomètres de profondeur ne semble envisagé nulle part. Le SEA ne considère donc pas de variante « stockage géologique multinational en forages profonds » de l'option « stockage géologique en forages profonds en Belgique ».

3.2.2 Avantages, inconvénients et défis

Alors que des stockages géologiques en galeries sont en phase opérationnelle dans certains pays, les connaissances et le savoir-faire relatifs au stockage géologique en forages profonds sont comparativement limités et les publications dédiées d'instances internationales semblent inexistantes. Une brève synthèse de leurs avantages et inconvénients ainsi que des défis qu'ils présentent est donc utile.

Les principaux avantages et inconvénients des forages profonds, moyennant choix adéquat de la formation hôte et de l'emplacement des forages et indépendamment des défis qui se posent en matière de démonstration de la sûreté et de faisabilité technique, sont les suivants :

- avantages :
 - ▶ l'absence ou la quasi-absence de mouvements d'eaux souterraines aux profondeurs auxquelles les déchets sont stockés et la faible probabilité d'échanges avec le système d'eaux souterraines plus proche de la surface, lui-même relié à la biosphère ;
 - ▶ la grande épaisseur de l'ensemble des couches géologiques qui isolent les déchets de la biosphère ;
 - ▶ l'impossibilité, ou en tout cas la très grande difficulté de récupérer les déchets après fermeture complète des forages (pour des types de déchets qu'il serait souhaitable de ne jamais pouvoir récupérer, par exemple pour des raisons de non-prolifération) ;
- inconvénients :
 - ▶ selon certains points de vue, le fait que le système de stockage est essentiellement un système mono-barrière, où les seules réelles barrières sont géologiques (la formation hôte et certaines des couches géologiques supérieures) ;
 - ▶ le diamètre relativement limité des colis qui peuvent être mis en stockage ;
 - ▶ l'impossibilité, ou en tout cas la très grande difficulté de récupérer les déchets après fermeture complète des forages (si la récupérabilité des déchets est imposée).

Le stockage en forages profonds pose par ailleurs une série de défis scientifiques et technologiques, dont en particulier les suivants :

- défis scientifiques :
 - ▶ la caractérisation suffisante de la formation hôte, nécessaire à la compréhension des phénomènes qui se dérouleront dans le système de stockage, qui ne peut se faire qu'au moyen de forages exploratoires, par opposition à une caractérisation via laboratoire souterrain ;
 - ▶ l'étude des effets des conditions qui règnent à grande profondeur, en particulier l'effet de la température, de la pression et des conditions chimiques, sur les colis de déchets ;

- ▶ la mise au point de techniques de fermeture des forages qui suppriment les voies de transport préférentiel des radionucléides et des contaminants chimiques vers la surface et isolent donc parfaitement la zone où sont stockés les déchets de la biosphère ;
- ▶ la modélisation et l'évaluation convaincantes du comportement du système de stockage à long terme afin d'en évaluer la sûreté ;
- défis technologiques :
 - ▶ le creusement de forages ayant un diamètre de 0,7 mètre ou plus dans la zone de stockage, située a priori à plus de deux kilomètres de profondeur ;
 - ▶ la mise en place de colis très lourds à grandes profondeurs, tout en se prémunissant du risque de chute ou de coincement des colis, en particulier au-dessus de la zone de stockage, où les conditions de confinement et d'isolation suffisantes des radionucléides et contaminants chimiques ne sont pas réunies ;
 - ▶ la récupération des colis de déchets qui se coinceraient lors de leur mise en place.

3.3 Brève comparaison du stockage géologique en galeries et du stockage géologique en forages profonds

Une brève comparaison du stockage géologique en galeries et du stockage géologique en forages profonds en termes de sûreté et de faisabilité indique que le stockage géologique en galeries est davantage susceptible de constituer une solution pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie — du moins pour la totalité de l'inventaire des déchets — que le stockage géologique en forages profonds (table 2).

Table 2 – Brève comparaison du stockage géologique en galeries et du stockage géologique en forages profonds en termes de sûreté et de faisabilité.

	Stockage géologique en galeries	Stockage géologique en forages profonds
Caractère passif à terme ?	oui	oui
Caractérisation de la formation hôte via un laboratoire souterrain ?	faisable	non envisagé, en raison des difficultés techniques et du coût élevé liés à la profondeur
Démonstration de la sûreté ?	<ul style="list-style-type: none"> ■ en exploitation : faisable ■ à long terme : faisable 	<ul style="list-style-type: none"> ■ en exploitation : incertaine ■ à long terme : incertaine
Faisabilité : existence		
■ de sites adéquats ?	■ oui	■ probablement
■ de techniques adéquates de construction ?	■ oui	■ <i>oui</i> , pour des forages de faibles diamètres ; <i>pas encore</i> , pour des forages ayant les diamètres et profondeurs requis
■ de techniques adéquates d'exploitation ?	■ oui	■ pas encore, du moins pour des colis lourds
Choisi par d'autres pays ?	oui	étudié à un niveau conceptuel et envisagé pour de faibles volumes de déchets

3.4 Formations hôtes

Une formation hôte ⁹ et son environnement géologique doivent présenter un certain nombre de caractéristiques pour pouvoir abriter une installation de stockage géologique. Selon l'AIEA, et pour le stockage géologique en galeries [AIEA 2011a] :

- la profondeur et les dimensions de la formation hôte doivent être suffisantes ; des formations hôtes homogènes facilement caractérisables dans des environnements géologiques dont l'évolution peut être raisonnablement évaluée sont habituellement préférées ;
- des formations hôtes ne présentant a priori pas de caractéristiques structurelles propices au transport préférentiel des radionucléides sont préférées ;
- les propriétés mécaniques de la formation hôte doivent permettre la construction, l'exploitation et la fermeture sûres de l'installation de stockage et garantir sa stabilité à long terme ; de même, ses propriétés thermiques et thermomécaniques doivent être telles que l'installation puisse accueillir des déchets chauffants sans subir de trop sévères sollicitations ;
- les caractéristiques de la formation hôte et de son environnement géologique doivent contribuer à limiter les mouvements d'eau dans l'installation de stockage, de manière à ne pas compromettre le confinement et l'isolation des déchets ;
- les caractéristiques physicochimiques et géochimiques de la formation hôte et de son environnement géologique et hydrogéologique doivent contribuer à limiter le relâchement des radionucléides et des contaminants chimiques par le système de stockage, ou du moins contribuer à freiner leur migration vers la biosphère ;
- la formation hôte devrait être peu affectée par des phénomènes futurs, tels que sismicité, volcanisme ou changement climatique, de sorte que la capacité de confinement et d'isolation du système de stockage soit préservée sur le long terme.

Toutefois, il ne s'agit ici que de caractéristiques très générales permettant habituellement une présélection des formations hôtes potentielles et de leur environnement. C'est la protection offerte par le système de stockage *dans son ensemble*, c'est-à-dire par la combinaison des déchets, des barrières ouvragées, de la formation géologique hôte et de son environnement géologique, qui est déterminante.

La description qui suit vise à donner une idée générale des formations géologiques hôtes les plus fréquemment considérées dans les programmes étrangers relatifs au stockage en galeries des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie (section 3.4.1) et à introduire brièvement les formations géologiques rencontrées en Belgique théoriquement envisageables pour ce type de stockage (section 3.4.2). Elle est volontairement très simplifiée, car le choix d'une formation géologique hôte n'est pas à l'ordre du jour pour la fixation de la base de la politique nationale de gestion à long terme de ces déchets.

3.4.1 A l'étranger, en général

Il existe une base de connaissances internationales étendue au sujet des différentes formations hôtes potentielles pour le stockage géologique. Les formations hôtes les plus fréquemment étudiées dans les programmes de recherche et développement étrangers pour le stockage de déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie sont de trois types : les évaporites, les roches cristallines et les formations argileuses. Elles sont elles-mêmes diverses et présentent des caractéristiques variables selon leur localisation. Plusieurs

⁹ Par défaut, le SEA utilise l'appellation « formation hôte », sans faire de distinction entre « formation hôte » et « roche hôte ». Lorsque nécessaire, il fait néanmoins une distinction entre « roche » et « formation ».

pays ont déjà sélectionné la formation hôte pour le stockage en galeries de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie (table 3 à la section 3.5).

3.4.1.1 Evaporites

Les évaporites, souvent appelées abusivement « formations salines » ou « formations salifères », résultent de l'évaporation d'anciennes masses d'eau. La présence de sel indique l'absence d'écoulements d'eaux souterraines susceptibles de contribuer au mouvement des radionucléides et des contaminants chimiques vers la biosphère : l'eau, en effet, dissoudrait le sel. Le sel présente également d'autres caractéristiques favorables : il conduit bien la chaleur et permet donc facilement l'évacuation de la charge thermique des déchets chauffants, il est extrêmement plastique et possède donc des propriétés d'auto-réparation (*self-healing*) des fissures et des fractures qui y seraient éventuellement générées par les activités de construction et il présente de bonnes propriétés mécaniques, favorables à l'excavation (et la stabilité) de stockages en galeries.

Les évaporites ont été choisies par les Etats-Unis pour le stockage géologique de déchets conditionnés de moyenne activité et de longue durée de vie.

3.4.1.2 Roches cristallines

Les roches cristallines sont des roches magmatiques, formées par le refroidissement très lent de magma en profondeur, ou métamorphiques, c'est-à-dire modifiées au cours de leur histoire suite à leur exposition à des températures et/ou pressions élevées. Elles comprennent notamment les granites et les gneiss et ont fait l'objet de recherches approfondies comme formations hôtes potentielles pour le stockage géologique en galeries des combustibles usés, notamment en Finlande et en Suède.

Les roches cristallines étant relativement dures et très stables, elles offrent une bonne protection aux barrières ouvragées. Elles ont par ailleurs différentes autres caractéristiques favorables au stockage de déchets, comme une faible porosité, une très faible perméabilité et une bonne conductivité thermique, importante pour le stockage de déchets chauffants. Les roches cristallines ont cependant le désavantage de fréquemment présenter des réseaux de fractures, que la construction d'un système de stockage doit éviter au maximum.

3.4.1.3 Formations argileuses

Les formations argileuses sont formées par le dépôt de sédiments dans une mer ou un lac. Elles comprennent un éventail de formations, allant des argiles peu consolidées, dites « peu indurées », au schiste ardoisier en passant par des argiles plus ou moins fortement consolidées, ou « indurées ». Le degré d'induration des formations dépend des processus de diagenèse à l'œuvre au cours de l'histoire ainsi que d'un éventuel métamorphisme de faible intensité (par exemple, schiste ardoisier).

Les argiles possèdent de nombreuses propriétés favorables au développement d'une installation de stockage : elles sont très peu perméables à l'eau et ont une bonne capacité de rétention de nombreux radionucléides et contaminants chimiques en raison de leurs caractéristiques minéralogiques et chimiques. De plus, elles possèdent une grande capacité d'auto-scellement (*self-sealing*). Les fractures et fissures qui y sont générées, en particulier par les activités de construction, s'y referment.

Les formations argileuses ont notamment été choisies par la Suisse et la France pour le stockage géologique de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie.

3.4.2 En Belgique

Les formations théoriquement envisageables en Belgique pour le stockage géologique sont les mêmes qu'au niveau international. Elles sont introduites succinctement ci-après [Commission européenne 1979 ; Wouters & Vandenberghe 1994 ; Vandenberghe & Laga 1996 ; Geologica Belgica 2001].

3.4.2.1 Evaporites

Les évaporites présentes en Belgique se trouvent dans le sous-sol profond (de 600 m à 3,5 km) du Bassin de Mons et du Bassin de la Campine. Il s'agit essentiellement d'anhydrite.

Les évaporites présentes en Belgique sont hautement dégradées ou moins épaisses que celles utilisées ou considérées à l'étranger.

- Les évaporites du Bassin de Mons se trouvent dans un environnement structurellement complexe et sont principalement constituées de couches hautement dégradées sujettes à des phénomènes de dissolution.
 - Les évaporites du Bassin de la Campine forment des couches nodulaires et minces.
- A ce jour, les évaporites n'ont pas fait l'objet de recherche expérimentale par l'ONDRAF.

3.4.2.2 Roches cristallines

De multiples occurrences de roches cristallines ont été observées en Belgique. Elles sont de diverses natures : intercalations volcaniques, intrusions cristallines ou encore socle granitique.

- Les intercalations volcaniques ont moins de dix mètres d'épaisseur et sont par conséquent trop fines pour entrer en ligne de compte en tant que formations hôtes.
- Les intrusions de roches cristallines situées dans le sud du Massif du Brabant affleurent à différents endroits et ont presque toutes déjà été exploitées ou sont en cours d'exploitation. D'autres occurrences ont également été observées mais sont de trop petite taille. Enfin, certaines intrusions ont récemment été découvertes et devraient faire l'objet de plus amples investigations.
- Le socle cristallin, de type granitique, se trouve à plus de deux kilomètres de profondeur, dans le Massif du Brabant. Ses caractéristiques sont largement inconnues car il n'a jamais été pénétré directement par un forage.

A ce jour, les roches cristallines n'ont pas fait l'objet de recherche expérimentale par l'ONDRAF.

3.4.2.3 Formations argileuses

En Belgique, les formations argileuses comprennent également un éventail de formations allant des argiles peu indurées au schiste ardoisier en passant par les argilites.

Argiles peu indurées

Les argiles peu indurées que l'on trouve en Belgique sont principalement l'Argile de Boom, présente dans le sous-sol du Bassin de la Campine, et les Argiles yprésiennes, présentes surtout dans le sous-sol de Flandre Occidentale et de Flandre Orientale.

L'ONDRAF et le Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (SCK CEN) mènent, depuis plus de quarante ans, des recherches sur le stockage géologique en galeries dans l'Argile de Boom et, dans une moindre mesure, dans les Argiles yprésiennes, des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. Selon les résultats obtenus, ces argiles peu indurées ne présentent pas de vices rédhibitoires pour le stockage en galeries [ONDRAF 1989, 2001a, 2001b, 2011a, 2013 ; AEN 2003]. Ce point de vue est partagé par l'AFCN dans son avis sur le

projet de Plan 2010 [AFCN 2010], qui attire néanmoins l'attention sur la présence de couches aquifères dans l'environnement de l'Argile de Boom :

« Les résultats des études menées durant les dernières décennies à Mol, et plus spécifiquement dans l'argile de Boom, montrent qu'aucun argument ne remet en question les caractéristiques intrinsèques de cette formation d'argile (donc sans tenir compte de l'environnement du dépôt) en tant que formation hôte d'un dépôt de déchets radioactifs. »

« la présence de couches aquifères dans l'environnement de l'argile de Boom est à peine mentionnée [...] et n'est pas prise en considération ni dans l'évaluation des avantages et des inconvénients de cette formation hôte, ni dans la perspective de comparaison avec d'autres formations possibles [...]. »

L'ONDRAF tient compte de la présence de couches aquifères dans ses études relatives au stockage géologique en galeries dans les argiles peu indurées. Tout système de stockage géologique doit en effet être conçu de manière telle qu'il soit possible de démontrer de manière convaincante que son impact sur les aquifères et sur les individus qui en consommeraient l'eau serait très faible, et en tout cas inférieur aux normes applicables.

Argilites

Les argilites présentes en Belgique sont tantôt d'âge paléozoïque (- 541 à - 252 millions d'années), tantôt d'âge mésozoïque (- 252 à - 66 millions d'années).

- Les argilites paléozoïques se trouvent dans les parties périphériques du Massif du Brabant, dans le Bassin de la Campine ainsi que dans les régions de Namur et Dinant. Certaines formations pourraient présenter des caractéristiques a priori favorables à l'établissement d'un stockage. A ce jour, elles n'ont pas fait l'objet de recherche expérimentale par l'ONDRAF.
- Les argilites mésozoïques sont présentes dans le Bassin de Mons, sur le Plateau de Herve et en Gaume. Elles sont très similaires aux argilites étudiées en France et en Suisse comme formations hôtes pour le stockage géologique en galeries. A ce jour, elles n'ont pas fait l'objet de recherche expérimentale par l'ONDRAF.

Schistes ardoisiers

Les schistes ardoisiers pourraient présenter des caractéristiques favorables à l'établissement d'un stockage géologique. Ils sont présents dans le Massif du Brabant, le synclinal de Neufchâteau, le faciès de La Roche ainsi que les Massifs de Rocroi et Stavelot.

A l'exception de certains schistes français, les schistes ardoisiers n'ont que peu d'analogues à l'étranger et ne sont que très peu étudiés de par le monde en tant que formations hôtes potentielles. Ils n'ont pas fait l'objet de recherche expérimentale par l'ONDRAF.

3.5 Politiques nationales de pays étrangers pour la gestion à long terme de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie

De nombreux pays étrangers ont une politique nationale de stockage géologique pour la gestion à long terme de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. Ainsi, parmi les pays de l'OCDE et de l'Union européenne qui possèdent au moins un réacteur nucléaire commercial en exploitation ou à l'arrêt définitif, soit 21 pays au total, 18 ont une politique de gestion à long terme desdits déchets : tous ont opté pour le stockage géologique (table 3). Seuls la Belgique, l'Italie et le Mexique n'ont pas encore de politique nationale de gestion à long terme de ces déchets.

Parmi les 18 pays qui ont opté pour le stockage géologique de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie ¹⁰,

- la Corée du Sud, les Etats-Unis, la Finlande, la Hongrie et la Suède ont au moins une installation de stockage géologique en galeries en exploitation :
 - ▶ La Corée du Sud exploite depuis 2015 un stockage géologique pour déchets de faible et moyenne activité. Les déchets sont stockés dans une roche cristalline, à une profondeur de 80 à 130 mètres.
 - ▶ Les Etats-Unis exploitent depuis 1999 un stockage géologique construit dans une évaporite à 650 mètres de profondeur, pour des déchets militaires de moyenne activité et de longue durée de vie.
 - ▶ La Finlande exploite deux stockages géologiques pour déchets de faible et moyenne activité, depuis 1992 et 1998, creusés dans une roche cristalline à des profondeurs respectivement de 60 à 100 mètres et de 120 mètres.
 - ▶ La Hongrie exploite depuis 2012 un stockage géologique pour déchets de faible et moyenne activité, construit dans une roche cristalline, à une profondeur de 200 à 250 mètres.
 - ▶ La Suède exploite depuis 1988 un stockage géologique pour déchets de faible et moyenne activité, creusé dans une roche cristalline à une profondeur de 50 à 100 mètres sous la mer et situé à un kilomètre de la côte. Une demande d'extension de ce stockage, pour en tripler la capacité, est en cours d'instruction par les autorités suédoises.
- l'Allemagne construit une installation de stockage géologique en galeries pour ses déchets non chauffants de longue durée de vie et la Finlande fait de même pour son combustible usé ;
- le Canada et la Suède ont introduit une demande d'autorisation de construction d'une installation de stockage géologique en galeries qui est actuellement à l'instruction auprès des autorités compétentes ;
- la France compte soumettre sa demande d'autorisation de construction en 2020.

Les pays de l'Union européenne qui ne possèdent pas de réacteurs nucléaires commerciaux soit ont opté pour le stockage géologique de leurs éventuels déchets conditionnés de haute activité et de leurs déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de longue durée de vie, le cas échéant dans le cadre d'une solution partagée en dehors de leurs frontières, soit n'ont pas de politique nationale pour la gestion à long terme de ces déchets.

Le retour d'expérience en matière de stockages géologiques se limite à l'expérience en exploitation. Il n'existe en effet pas encore, dans le monde, de stockages géologiques pour déchets de faible et moyenne activité fermés. Il n'existe pas encore non plus de stockages géologiques pour déchets de haute activité : le premier est en construction, en Finlande.

- A l'exception du stockage américain, tous les stockages géologiques en exploitation fonctionnent sans interruption depuis leur mise en service. Les deux incidents — l'un de type radiologique et l'autre de type classique — intervenus dans le stockage américain, qui ont conduit à sa fermeture temporaire, ont mis en exergue l'importance du respect des procédures et de l'instauration d'une culture de sûreté parmi les travailleurs.
- Dans le passé, l'Allemagne a utilisé deux mines de sel (évaporites) désaffectées pour y stocker des déchets de faible et moyenne activité, respectivement de 1967 à 1978 (Asse) et de 1971 à 1998 (Morsleben). Ce procédé, qui consistait à utiliser des cavités

¹⁰ Certains pays ont opté pour le stockage géologique de leurs déchets conditionnés de moyenne activité et de longue durée de vie avec celui de leurs déchets conditionnés de faible activité et de longue durée de vie. La comparaison avec le cas belge reste pertinente, car le Plan n'exclut pas l'éventualité que les déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de longue durée de vie et les déchets conditionnés de haute activité soient répartis dans des installations de stockage distinctes, sur plusieurs sites (section 2.1).

souterraines existantes sans appliquer l'approche systémique maintenant internationale-ment recommandée a conduit à l'arrêt définitif des exploitations. A Asse en particulier, la mine, qui avait le statut de « stockage pilote », a présenté des problèmes de stabilité et d'infiltrations d'eau. Les déchets vont en être retirés.

Table 3 – Politiques nationales des pays de l'OCDE et de l'Union européenne qui possèdent au moins un réacteur nucléaire commercial en exploitation ou à l'arrêt définitif pour la gestion à long terme de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, aussi appelés déchets des catégories B et C dans la classification belge (section 2.4.1), et stade de mise en œuvre. Ces politiques nationales sont le plus souvent fixées par des lois (voir annexe 2 pour les références des documents qui fixent ces politiques ou en font état).

Pays	Catégories de déchets	Politique nationale et année d'adoption	Formation hôte	Profondeur [m]	Mise en exploitation
Allemagne	A-B	stock. géo. 1959	calcaire sous argile	800 – 1300	prévue en 2028
	C	stock. géo. 1973	n.c.	n.c.	prévue en 2050
Belgique	B-C	<i>non décidée</i>			
Bulgarie	B-C	stock. géo.			
Canada	A-B	stock. géo. ¹	calcaire sous argile	680	prévue en 2027
	C	stock. géo. 2007	n.c.	n.c.	prévue en 2040-2045
Corée du Sud	A-B	stock. géo. 2005	roche cristalline	80 – 130	en 2015
	C	stock. géo. 2016	n.c.	n.c.	prévue en 2053
Espagne	B-C	stock. géo.			
Etats-Unis	B (militaires)	stock. géo. 1979	évaporite	650	en 1999
	C	stock. géo. 1982	roche volcanique	300	projet suspendu (pas de budget)
Finlande	A-B	stock. géo. 1983	roche cristalline	60 – 100	en 1992
	A-B	stock. géo. 1983	roche cristalline	120	en 1998
	C	stock. géo. 1987	roche cristalline	400 – 450	prévue en 2023
France	B-C	stock. géo. 2006	formation argileuse	500	prévue en 2025 (phase pilote)
Hongrie	A-B	stock. géo. 1996	roche cristalline	200 – 250	en 2012
	C	stock. géo. 1996	formation argileuse	n.c.	prévue en 2064
Italie	B-C	<i>non décidée</i>			
Japon	B	stock. géo. 2007	n.c.	n.c.	
	C	stock. géo. 2000	n.c.	n.c.	prévue en 2035
Mexique	B-C	<i>non décidée</i>			
Pays-Bas	A-B-C	stock. géo. 1984	évaporite ou formation argileuse	n.c.	prévue pour après 2100
Roumanie	B-C	stock. géo.			prévue en 2055
Royaume-Uni	B-C	stock. géo. 2006	n.c.	n.c.	
Slovaquie	C	stock. géo. 2015	n.c.	n.c.	prévue vers 2065
Slovénie	C	stock. géo. 2016	n.c.	n.c.	
Suède	A-B	stock. géo. 1977	roche cristalline	50 – 100	en 1988
	C	stock. géo. 1977	roche cristalline	500	prévue en 2030
Suisse	A-B	stock. géo. 2005	formation argileuse	n.c.	prévue vers 2050
	C	stock. géo. 2005	formation argileuse	n.c.	prévue vers 2060
Tchéquie	C	stock. géo. 2002	roche cristalline	n.c.	prévue en 2065

n.c. : non choisie

¹ L'installation de stockage géologique fait l'objet d'un processus d'évaluation environnementale depuis 2005 et a fait l'objet d'une demande d'autorisation de construction en 2011, mais l'adoption du stockage géologique comme politique nationale de gestion à long terme des déchets des catégories A et B ne semble pas avoir été formalisée dans une loi.

4 Alternatives ne constituant pas des solutions de substitution raisonnables au stockage géologique

Il existe un large consensus quant au fait que les alternatives qui ont été ou sont encore parfois avancées pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie ne constituent pas des solutions de substitution raisonnables au stockage géologique sur le territoire belge (table 4). Ces propositions sont décrites par souci d'exhaustivité, avec les principaux arguments (réglementaires, de sûreté, de sécurité, environnementaux, sociétaux, financiers, etc.) qui conduisent à les rejeter, conformément au consensus international en la matière. Elles ne sont donc pas soumises à une évaluation de leurs incidences environnementales.

Table 4 – Alternatives ne constituant pas des solutions de substitution raisonnables au stockage géologique, avec leurs principaux motifs de rejet.

Options	Principaux motifs de rejet
Entreposage (section 4.1)	
<ul style="list-style-type: none"> ■ de longue durée 	<ul style="list-style-type: none"> ■ a une durée (jusqu'à environ 300 ans) non compatible avec celle durant laquelle il faut assurer la protection de l'homme et de l'environnement, soit jusqu'à des centaines de milliers d'années, voire de l'ordre du million d'années (section 2.4.1)
<ul style="list-style-type: none"> ■ perpétuel 	<ul style="list-style-type: none"> ■ n'assure pas la sûreté de façon passive à long terme et impose donc un report intégral des charges de génération en génération, pendant des centaines de milliers d'années, voire pendant une période de l'ordre du million d'années
<ul style="list-style-type: none"> ■ transformable en stockage 	<ul style="list-style-type: none"> ■ constitue une antinomie sur les plans réglementaire, des principes, de la conception et de la mise en œuvre
Technologies avancées de séparation-transmutation (section 4.2)	
	sont des technologies de recyclage du combustible usé et non des technologies de gestion à long terme
Solutions « exotiques » et stockage en (sub-)surface (section 4.3)	
	contreviennent à la réglementation et/ou présentent des risques non maîtrisables

4.1 Alternatives d'entreposage

Les alternatives d'entreposage envisagées qui vont au-delà de la centaine d'années, soit la durée maximale considérée pour l'entreposage temporaire (situation de référence — chapitre 7), sont l'entreposage de longue durée, l'entreposage dit « perpétuel » et l'« entreposage transformable en stockage ». Toutes trois peuvent s'envisager en surface, voire en sub-surface. La distinction entre surface et sub-surface n'est toutefois pas discriminante pour l'évaluation des alternatives d'entreposage : les constats valables pour un entreposage en surface le sont également pour un entreposage en sub-surface. L'entreposage en surface et en sub-surface peuvent toutefois présenter certaines différences, notamment en termes de conception et d'exploitation, d'exposition aux perturbations extérieures, de sécurité et de risque d'oubli.

Les sections qui suivent ne font pas la distinction entre entreposage en surface et entreposage en sub-surface.

4.1.1 Entreposage de longue durée

L'entreposage de longue durée consiste à entreposer les déchets dans des installations dédiées pour une durée allant a priori de 100 à 300 ans, ce qui imposera aux générations futures de décider au terme de cet entreposage de la façon de poursuivre la gestion des déchets en question. L'entreposage de longue durée impose de concevoir et de construire des installations d'entreposage (en surface, voire jusqu'à une profondeur de quelques dizaines de mètres) capables d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement durant cette période, moyennant contrôles et entretiens périodiques et moyennant vérifications périodiques de l'intégrité des colis de déchets qu'elles contiennent, avec si nécessaire réemballage ou reconditionnement des déchets. Le site d'entreposage doit par ailleurs également être contrôlé, entretenu et surveillé. Durant toute cette période, la protection de l'homme et de l'environnement repose donc sur des actions humaines. L'entreposage de longue durée est équivalent, en termes de gestion et d'installations nécessaires, à la première étape de l'entreposage perpétuel (section 4.1.2).

Toute mise en regard des principaux avantages et inconvénients de l'entreposage de longue durée (table 5) ne doit pas occulter le fait qu'il ne peut, par essence, constituer la base d'une politique de gestion à long terme, puisqu'il ne couvre qu'une période de quelques centaines d'années. Il a du reste été jugé non recevable par l'AFCN en 2010 dans son avis sur le projet de Plan et le SEA de l'époque [AFCN 2010].

« Un entreposage en surface de déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie (déchets de catégorie B&C), que ce soit en attendant la mise au point de nouvelles techniques ou pour une durée de plusieurs siècles, ne peut pas se justifier pour les raisons suivantes :

- a) Cela représenterait une charge permanente et de longue durée pour les générations futures ;*
- b) Cette solution nécessiterait le maintien des connaissances en la matière et l'organisation continue des formations ;*
- c) Le risque potentiel de pratiques malveillantes est plus élevé qu'avec d'autres options (géologiques) puisque les matériaux sont facilement accessibles en surface ;*
- d) Le volume de déchets radioactifs ne ferait qu'augmenter en raison du reconditionnement et il nécessiterait donc, au fil du temps, une capacité d'entreposage toujours plus grande ;*
- e) Comme, de toute façon, il convient de chercher une solution définitive de stockage des déchets radioactifs ultimes, le fait de rien décider aujourd'hui pour ce type de déchets reviendrait à reporter la responsabilité sur les générations futures.*

En outre, l'entreposage de longue durée (plusieurs siècles) n'est pas considéré au niveau international comme une solution de référence pour la gestion à long terme de ce type de déchets. »

De la même manière, le considérant 21 de la directive 2011/70/Euratom dispose que l'entreposage n'est pas une alternative au stockage : *« L'entreposage de déchets radioactifs, y compris à long terme, n'est qu'une solution provisoire qui ne saurait constituer une alternative au stockage. »*

Opter pour l'entreposage de longue durée dans l'intention de se donner du temps pour pouvoir bénéficier de l'apport éventuel des technologies avancées de séparation-transmutation n'est pas non plus une solution, ne serait-ce que parce que ces technologies, à supposer qu'elles puissent un jour être mises en œuvre à l'échelle industrielle dans le cadre du développement de réacteurs nucléaires avancés, ne feront pas disparaître le besoin d'une solution de stockage géologique, à la fois pour les déchets déjà produits et pour les déchets ultimes de longue durée de vie qui seront produits par ces réacteurs avancés et par les autres installations des cycles nucléaires avancés (section 4.2).

Table 5 – Synthèse des principaux avantages et inconvénients de l'entreposage de longue durée, lequel ne constitue pas une alternative au stockage selon la directive 2011/70/Euratom et est jugé non recevable par l'AFCN.

Avantages	Inconvénients
Sûreté et environnement	
<ul style="list-style-type: none"> ■ peut être contrôlé 	<ul style="list-style-type: none"> ■ nécessite <ul style="list-style-type: none"> ▶ des contrôles et entretiens permanents ▶ le réemballage ou le reconditionnement des déchets et donc <ul style="list-style-type: none"> ▶ entraîne une augmentation progressive du volume des déchets ▶ comporte un risque répété en matière de sûreté opérationnelle ■ est vulnérable <ul style="list-style-type: none"> ▶ aux évolutions de l'environnement des bâtiments ▶ aux incertitudes contextuelles : risques de dégradation du suivi réglementaire, de disparition de l'exploitant, d'érosion des connaissances, d'assèchement du financement, de guerre, etc.
Sécurité	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ nécessite une surveillance permanente ■ est vulnérable aux actes malveillants
Science et technique	
<ul style="list-style-type: none"> ■ permet la prise en compte des évolutions scientifiques et techniques 	<ul style="list-style-type: none"> ■ offre une solution pour une période limitée par les possibilités de la technique (a priori 300 ans maximum)
Ethique et société	
<ul style="list-style-type: none"> ■ laisse une liberté de choix de gestion aux générations futures 	<ul style="list-style-type: none"> ■ reporte intégralement les charges sur les générations futures : <ul style="list-style-type: none"> ▶ contrôles, entretiens et surveillance ▶ transfert des connaissances et du savoir-faire ▶ développement, mise en œuvre et financement d'une solution de gestion à long terme
Economie et finances	
<ul style="list-style-type: none"> ■ est aisément finançable selon le principe du pollueur-payeur 	<ul style="list-style-type: none"> ■ nécessite ensuite le financement d'une solution de gestion à long terme non connue
Récupération des déchets	
<ul style="list-style-type: none"> ■ est toujours possible 	

4.12 Entreposage perpétuel

L'entreposage perpétuel est vu comme étant la répétition, sur des centaines de milliers d'années, voire pendant une période de l'ordre du million d'années, d'étapes d'entreposage de longue durée et de réemballage ou de reconditionnement des déchets (figure 11). Il impose de concevoir et de construire des installations d'entreposage (en surface, voire jusqu'à une profondeur de quelques dizaines de mètres) capables d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement durant des périodes pouvant a priori aller de 100 à 300 ans moyennant contrôles et entretiens périodiques et moyennant vérifications périodiques de l'intégrité des colis de déchets qu'elles contiennent. Même des installations d'entreposage construites selon les meilleures techniques du génie civil ne peuvent en effet pas rester intactes sur des durées beaucoup plus longues. Pour maintenir la protection de l'homme et de l'environnement dans la durée, de nouvelles installations d'entreposage doivent donc être construites périodiquement, à la fin de la durée de vie des anciennes installations, et les déchets doivent être transférés vers ces nouvelles installations, le cas échéant après réemballage ou reconditionnement, ce qui augmente progressivement la quantité totale de déchets à entreposer. La matrice de conditionnement des déchets et le conteneur qui l'enferme constituent en effet les premières barrières de confinement des radionucléides et des contaminants chimiques et doivent dès lors être renouvelés quand ils ne sont plus conformes aux exigences de sûreté. Le site d'entreposage doit par ailleurs également être contrôlé, entretenu et surveillé.

La protection de l'homme et de l'environnement en cas d'entreposage perpétuel repose donc de façon permanente sur des actions humaines : en d'autres termes, une solution d'entreposage perpétuel n'assure pas la sûreté de façon passive et ne satisfait donc pas au troisième principe de la directive 2011/70/Euratom auquel doivent satisfaire les politiques nationales (cadre 1 à la section 1.1). L'entreposage perpétuel n'est par ailleurs pas recevable pour l'AFCN, puisque l'entreposage de longue durée n'est pas recevable [AFCN 2010]. Ses principaux avantages et inconvénients sont néanmoins synthétisés à la table 6.

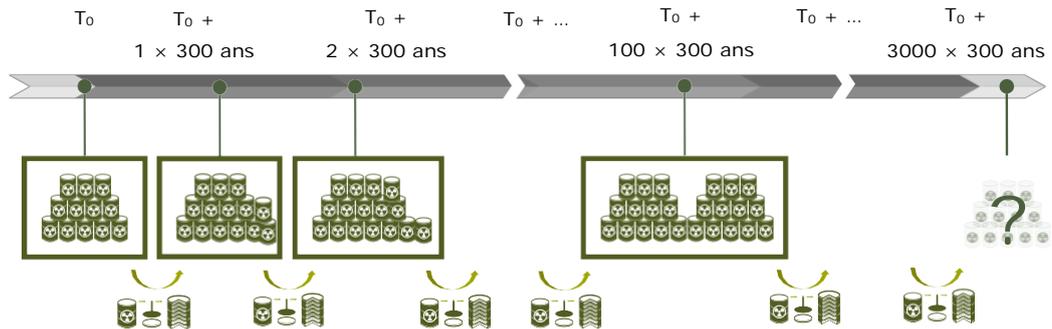


Figure 11 – Schéma temporel simplifié de la mise en œuvre de l'entreposage perpétuel. La séquence construction-exploitation-déclassement, combinée aux opérations de réemballage/reconditionnement des déchets, est supposée se répéter sur des centaines de milliers d'années, voire pendant une période de l'ordre du million d'années.

Table 6 – Synthèse des principaux avantages et inconvénients de l'entreposage perpétuel, lequel ne satisfait pas à la directive 2011/70/Euratom et est jugé non recevable par l'AFCN.

Avantages	Inconvénients
Sûreté et environnement <ul style="list-style-type: none"> ■ comme entreposage de longue durée 	<ul style="list-style-type: none"> ■ comme entreposage de longue durée + ■ nécessite le remplacement périodique des bâtiments
Sécurité	
Science et technique <ul style="list-style-type: none"> ■ comme entreposage de longue durée 	<ul style="list-style-type: none"> ■ comme entreposage de longue durée
Ethique et société	<ul style="list-style-type: none"> ■ reporte intégralement les charges sur les générations futures, durant des centaines de milliers d'années, voire pendant une période de l'ordre du million d'années : <ul style="list-style-type: none"> ▶ contrôles, entretiens et surveillance ▶ transfert des connaissances et du savoir-faire ▶ construction périodique de nouveaux bâtiments ▶ investissements sans fin
Economie et finances	<ul style="list-style-type: none"> ■ a un coût permanent et croissant, impossible à chiffrer et donc à couvrir selon le principe du pollueur-payeur
Récupération des déchets <ul style="list-style-type: none"> ■ comme entreposage de longue durée 	

4.1.3 Entreposage transformable en stockage

L'entreposage transformable en stockage consisterait à entreposer les déchets dans une installation conçue, construite et exploitée dans l'intention de récupérer les déchets et à la transformer à un moment donné en une installation capable, sans interventions humaines, d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement tant que les déchets présentent un risque (voir définitions et principes du cadre 1 à la section 1.1).

Une telle solution constitue une antinomie sur les plans réglementaire, des principes, de la conception et de la mise en œuvre. En effet, ce sont les exigences relatives à l'assurance de la sûreté à long terme qui seraient déterminantes pour le concept de l'installation : il n'est pas possible de transformer une installation construite en profondeur, prévue pour quelques dizaines ou centaines d'années et conçue pour que les déchets puissent en être extraits à tout moment en une installation faisant partie intégrante d'un système de stockage, capable de confiner et d'isoler aussi longtemps que nécessaire les radionucléides et les contaminants chimiques de la biosphère. Ce cas de figure n'est pas considéré à l'étranger. Il n'est pas non plus prévu réglementairement : il serait impossible d'établir le dossier de sûreté nécessaire à l'obtention de l'autorisation de stockage sur des fondements qui sont ceux d'une installation d'entreposage.

La seule façon de « transformer » un entreposage en stockage serait de concevoir d'emblée un système de stockage tel que les déchets puissent être récupérés pendant un certain temps, sans que les choix faits pour permettre cette récupération puissent nuire à la sûreté et à la sécurité. *Il n'y aurait donc pas transformation d'une installation d'entreposage, mais bien d'emblée construction d'une installation de stockage.*

4.2 Technologies avancées de séparation-transmutation

Les technologies avancées de séparation-transmutation sont en cours de recherche, essentiellement dans le cadre du développement de réacteurs nucléaires avancés (réacteurs de génération IV et systèmes pilotés par accélérateur). Elles visent avant tout une utilisation plus efficace des ressources naturelles (principalement le minerai d'uranium), en recyclant le combustible usé, et devraient ainsi permettre une diminution du volume et de la radiotoxicité des déchets de haute activité et une diminution de leur puissance thermique, qui permettraient de réduire l'empreinte de solutions de stockage géologique. Elles pourraient donc en théorie contribuer à optimiser de telles solutions.

Alors que dans les cycles nucléaires actuels (réacteurs de génération II et réacteurs de génération III (en construction)), le combustible usé peut être recyclé une fois (l'uranium et le plutonium récupérés lors du retraitement sont convertis en combustible MOX), avec les futurs cycles nucléaires avancés, qui incluent les technologies avancées de séparation-transmutation, le combustible usé serait « multi-recyclé » lors de plusieurs cycles de *séparation-transmutation*. Dans de tels cycles, des radionucléides choisis sont *séparés* du reste du combustible usé lors du retraitement, puis intégrés dans un combustible pour réacteur nucléaire avancé. L'irradiation de ce combustible avancé dans ce type de réacteur entraîne alors la *transmutation* d'une partie des radionucléides, c'est-à-dire leur transformation en éléments de plus courte durée de vie. Après irradiation, le combustible usé « avancé » est soumis à un nouveau cycle.

Les cycles nucléaires avancés nécessitent, outre les réacteurs de génération IV et/ou des installations spécifiques pour la transmutation (qui ne produisent pas d'énergie), des installations de retraitement poussé et des installations de fabrication de combustible. Il faudra encore plusieurs décennies avant que les premiers réacteurs de génération IV soient commercialisés [NNL 2013 ; SGGN 2013]. La France, par exemple, ne les envisage que pour remplacer ses réacteurs de génération III, dont le premier n'est pas encore opérationnel, soit dans au moins un demi-siècle [CNE 2019]. Tous les systèmes proposés de cycles avancés du

combustible sont basés sur l'hypothèse que les programmes d'énergie nucléaire se poursuivront pendant des décennies, voire des siècles [AEN 2012 ; SGDN 2013 ; IRSN 2019a].

Selon le consensus international, les technologies avancées de séparation-transmutation, à supposer qu'elles puissent être mises en œuvre à l'échelle industrielle, ne constituent pas une alternative au stockage géologique pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. En effet, ce sont des technologies de *recyclage* du combustible usé et non des technologies de gestion à long terme [AEN 2011, 2012 ; Blue Ribbon Commission 2012 ; SGDN 2013 ; ASN 2016 ; SPF Economie 2016a]. Elles ne s'appliquent ni aux déchets déjà conditionnés ni, pour des raisons tant techniques qu'économiques, aux produits de fission de longue durée de vie et aux produits d'activation contenus dans le combustible usé. Seule la transmutation des actinides présents dans le combustible usé, par exemple l'américium et le neptunium, peut être envisagée à l'échelle industrielle [ASN 2016 ; CNE 2019 ; IRSN 2019a, 2019b]. Par ailleurs, la transmutation de certains radionucléides de longue durée de vie n'apporterait une réduction tangible de l'empreinte d'un futur stockage que dans l'hypothèse d'une exploitation au moins séculaire d'un parc de réacteurs nucléaires avancés [CEA 2015 ; ASN 2016].

En outre, la mise en œuvre des technologies avancées de séparation-transmutation produira de nouveaux flux de déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie : des déchets ultimes issus de l'exploitation et du démantèlement des réacteurs avancés et/ou des installations de transmutation elles-mêmes, des installations de retraitement poussé et des installations de fabrication de combustible [AEN 2012 ; Blue Ribbon Commission 2012].

Enfin, selon l'AFCN [AFCN 2010], la mise au point de technologies nucléaires avancées ne peut justifier le choix de l'entreposage de longue durée pour la gestion des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie (section 4.1.1).

4.3 Alternatives qui contreviennent à la réglementation et/ou présentent des risques non maîtrisables

Différentes alternatives au stockage géologique parfois suggérées doivent être rejetées d'emblée. Outre que ces alternatives contreviennent en effet à des traités ou conventions internationaux dont la Belgique est signataire **(I)** et/ou au cadre légal et réglementaire belge **(B)**, toutes présentent des garanties insuffisantes en matière de sûreté et de protection de l'environnement **(S)**. La « simple » phase initiale de mise en œuvre de certaines — en particulier l'envoi dans l'espace — comporte à elle seule des risques considérables. D'autres peuvent à coup sûr connaître des évolutions défavorables non maîtrisables par la science et la technique, par exemple le retour éventuel en surface lors d'éruptions volcaniques de déchets stockés dans des zones de subduction océanique. Pour toutes enfin, il n'est pas possible de développer les connaissances et méthodes nécessaires (caractérisations approfondies, scénarios d'évolution, modèles mathématiques, etc.) pour parvenir à démontrer de façon convaincante qu'elles peuvent être mises en œuvre de façon telle qu'elles protégeront en toutes circonstances et aussi longtemps que nécessaire l'homme et l'environnement des risques que présentent les déchets.

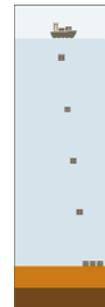
Parmi ces alternatives, qui ont fait l'objet d'investigations par différents pays, seul le stockage par injection directe de déchets radioactifs liquides a été mis en œuvre, de façon limitée, par le passé. Leur caractère inapproprié pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie fait l'objet d'un large consensus, tant au niveau national qu'au niveau international, parmi les gestionnaires de déchets radioactifs et les autorités de sûreté, ainsi qu'au sein des organisations internationales [par exemple, CoRWM 2018 ; IRSN 2019a].

Les alternatives qui doivent être rejetées d'emblée en raison du fait qu'elles contreviennent à la réglementation et/ou présentent des risques non maîtrisables sont brièvement décrites ci-après, accompagnées chaque fois de la mention du ou des principaux textes juridiques qui conduisent à leur élimination.

I/S Le *stockage en mer* consiste à jeter les colis de déchets radioactifs en mer, où ils coulent librement jusqu'au fond de l'eau.

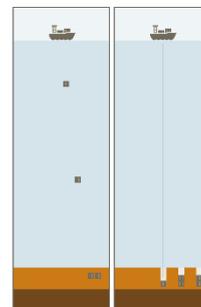
La Convention de Londres de 1972 ou *Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets*, ratifiée par la Belgique en 1985, vise à protéger le milieu marin et interdisait notamment l'immersion en mer de déchets radioactifs de haute activité [Convention de Londres 1972]. Depuis 1993, elle interdit l'immersion en mer de tous les déchets radioactifs.

La Convention OSPAR de 1992, ou *Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est*, signée par la Belgique en 1992 et approuvée en 1995, vise à protéger le milieu marin dans le nord-est de l'océan Atlantique et interdit l'immersion de déchets radioactifs en mer [Convention OSPAR 1992].



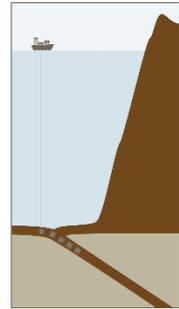
I/S Le *stockage dans les fonds marins* consiste à enfouir les colis de déchets radioactifs dans les sédiments recouvrant le fond marin. Soit les colis ont une forme telle qu'ils s'enfoncent d'eux-mêmes par gravité de quelques mètres dans les sédiments, soit ils sont déposés dans des forages de faible profondeur.

Le stockage dans les fonds marins est interdit au même titre que le stockage en mer.



I/S Le *stockage dans une zone de subduction océanique* consiste à placer les colis de déchets radioactifs sur la plaque tectonique descendante d'une zone de subduction océanique afin qu'ils soient entraînés dans les profondeurs de la croûte terrestre. C'est une variante de l'immersion en mer et du stockage dans les fonds marins.

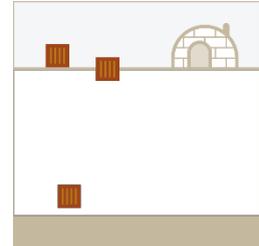
Le stockage dans une zone de subduction océanique est interdit au même titre que le stockage en mer.



I/S Le *stockage dans une calotte glaciaire*, qui n'est envisageable que pour les déchets radioactifs qui dégagent de la chaleur, consiste en l'enfouissement progressif des colis de déchets dans une calotte glaciaire suite à la fonte progressive de la glace causée par la chaleur qu'ils dégagent, suivie de la formation progressive de nouvelle glace par le haut.

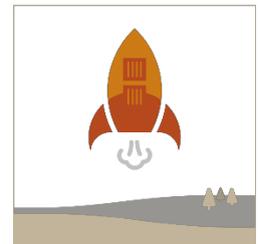
Le *Traité sur l'Antarctique* de 1959, signé par la Belgique en 1959 et ratifié en 1960, interdit le stockage de déchets

radioactifs dans l'Antarctique [Traité sur l'Antarctique 1959]. De plus, selon l'article 27.2 de la *Convention Commune* [AIEA 1997], signée par la Belgique en 1997 et ratifiée en 2002, une partie contractante ne peut autoriser l'envoi de son combustible usé ou de ses déchets radioactifs, en vue de leur entreposage ou de leur stockage, vers une destination située au sud de 60 degrés de latitude sud.



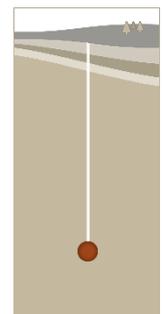
I/S Le *stockage dans l'espace* consiste à envoyer les déchets radioactifs conditionnés dans l'espace, au moyen par exemple d'une fusée, de manière qu'ils soient mis sur orbite autour de la terre ou même qu'ils quittent le champ gravitationnel terrestre.

Bien qu'il n'interdise pas le stockage dans l'espace de façon absolue, le *Traité sur l'Espace* de 1967, ou *Traité sur les principes régissant les activités des Etats en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes* [Traité sur l'Espace 1967], le rend pratiquement impossible du fait qu'il fait porter sur l'Etat qui lance des objets dans l'espace la responsabilité des dommages, potentiellement colossaux, qui pourraient en résulter pour des Etats parties au Traité. Adopté pour répondre à des préoccupations liées à la course aux armements, ce traité a été signé par la Belgique en 1967 et ratifié en 1973.



B/S Le *stockage par fusion de la formation géologique hôte*, qui n'est envisageable que pour les déchets radioactifs qui dégagent beaucoup de chaleur, consiste soit à injecter les déchets dans une formation hôte sous forme liquide ou de boue, soit à insérer les déchets conditionnés sous forme solide dans des forages. Dans les deux cas, la formation qui entoure les déchets se liquéfie sous l'action de la chaleur, ce qui permet aux déchets de s'y enfoncer encore plus profondément sous l'effet de la pesanteur. Une fois les déchets refroidis, la formation qui les entoure se resolidifie, formant ainsi un enrobage naturel pour les déchets.

L'article 34.1 du *règlement général de protection contre les rayonnements ionisants* [Belgique 2001] interdit le rejet de déchets radioactifs liquides dans le sous-sol, et donc la première variante du stockage par fusion de la formation hôte. La variante du stockage par fusion de la formation hôte qui consiste à insérer les déchets conditionnés dans des forages ne semble pas explicitement interdite par le cadre juridique mais, à supposer qu'elle soit un jour techniquement réalisable, présenterait des risques non maîtrisables.

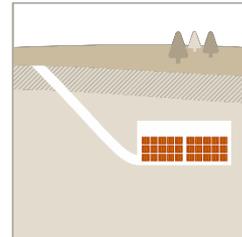


B/S Le *stockage par injection directe*, qui n'est envisageable que pour des déchets radioactifs sous forme liquide, consiste à les injecter dans une formation géologique hôte profonde.

L'article 34.1 du *règlement général de protection contre les rayonnements ionisants* interdit le rejet de déchets radioactifs liquides dans le sous-sol, et donc le stockage par injection directe.



I/S Le *stockage en surface ou en sub-surface* consiste à placer les colis de déchets radioactifs dans une installation spécialement conçue à cet effet, construite en surface, voire jusqu'à une profondeur d'une trentaine de mètres [AIEA 2009]. Une telle installation est typiquement constituée de modules en béton destinés à accueillir les colis de déchets radioactifs. Ces modules sont isolés des eaux de pluie et de ruissellement et/ou, selon la configuration, des eaux souterraines, par un système de protection peu perméable à l'eau.



Selon le consensus international, le stockage en surface ou en sub-surface des déchets conditionnés de haute activité, ou déchets de catégorie C, et des déchets conditionnés de longue durée de vie de catégorie B n'est pas à même d'assurer la sûreté à long terme [par exemple, AIEA 2009].

5 Liens du Plan avec d'autres plans et programmes pertinents ou des politiques pertinentes en vigueur

Les plans, programmes ou politiques en vigueur au niveau fédéral et liés au Plan *considérés à ce stade* sont ceux qui portent directement sur ou sont directement associés à la gestion à long terme des déchets radioactifs ou à leur production. Ils sont identifiés comme suit :

- *le programme national de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs* [SPF Economie 2016b], établi en application de la loi du 3 juin 2014. Il constitue le programme de mise en œuvre des politiques nationales de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs. Les politiques manquantes, dont celle relative à la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, y sont identifiées.
- *le programme de stockage en surface des déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de courte durée de vie, ou déchets de catégorie A, de l'ONDRAF* [ONDRAF 2010, 2019a]. Par décisions du gouvernement fédéral du 16 janvier 1998 et du 23 juin 2006 [Conseil des ministres 1998, 2006], ces déchets sont destinés à être mis dans une installation de stockage en surface sur le territoire de la commune de Dessel. Le programme de stockage des déchets de catégorie A est lié au Plan en ce sens que la future autorisation nucléaire de création et d'exploitation de l'installation de stockage, actuellement en cours d'instruction par l'AFCN, n'autorisera probablement pas, pour des raisons qui relèvent de la physicochimie, le stockage en surface de certains déchets que l'ONDRAF destinait à cette installation. Ces déchets seront intégrés à l'inventaire de référence du Plan après avoir, s'ils ne l'étaient pas encore, été rendus compatibles avec leur mise en stockage géologique.
- *la loi du 31 janvier 2003 sur la sortie progressive de l'énergie nucléaire à des fins de production industrielle d'électricité* [Belgique 2003], telle que modifiée en particulier par les lois du 18 décembre 2013 et du 28 juin 2015. La loi de 2003 telle que modifiée interdit la construction de nouvelles centrales et exclut désormais la possibilité de prolonger, le cas échéant, l'exploitation des centrales nucléaires existantes. Les déchets d'exploitation existants et futurs (dont le combustible usé déclaré comme déchet et/ou les déchets de retraitement) et les futurs déchets de déclassement des catégories B et C sont inclus dans l'inventaire de référence. Quand bien même la durée d'exploitation de certaines centrales serait encore prolongée, les déchets radioactifs additionnels produits et l'allongement du calendrier de production ne remettraient pas en question la solution du stockage géologique et l'approche générale suivie pour l'évaluation des incidences environnementales.

Des liens (et éventuellement des conflits) avec d'autres plans, programmes ou politiques aux niveaux international, européen, fédéral ou régional pourraient apparaître lors des étapes ultérieures de l'évaluation des incidences environnementales du stockage géologique (choix du site de mise en œuvre, choix d'un projet technique bien défini, etc.). L'analyse des liens, par exemple avec les plans qui réglementent l'utilisation de l'espace dans les régions, tels les Plans régionaux en Région wallonne et les Plans d'exécution territoriaux en Région flamande, ainsi qu'avec les plans ou programmes qui concernent la gestion des eaux et l'utilisation du sous-sol, est prématurée. Aucun de ces plans, programmes ou politiques n'est toutefois susceptible d'avoir un impact sur la décision d'adopter, ou pas, le stockage géologique comme base de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie.

Enfin, l'absence de certitudes quant au devenir du combustible usé des réacteurs nucléaires commerciaux (levée du moratoire de fait de 1993 sur le retraitement ou mise en stockage directe) a un impact sur l'inventaire des déchets conditionnés à gérer (section 2.4), mais pas sur la solution de gestion qui fait l'objet du Plan.

6 Contenu du SEA

Ce chapitre identifie les types d'incidences environnementales dont l'évaluation a été jugée pertinente au terme de la procédure de scoping, compte tenu du caractère conceptuel et générique du Plan (section 6.1.2). Comme le Plan fait partie d'un ensemble hiérarchisé de plans, cette première évaluation — préliminaire et essentiellement descriptive — sera suivie d'autres évaluations des incidences environnementales, plus spécifiques et plus détaillées, à d'autres niveaux de l'ensemble hiérarchisé. Pour la clarté, ce chapitre liste également les incidences qui seront évaluées ou réexaminées à des stades ultérieurs de l'évaluation par étapes des incidences environnementales (section 6.1.1). Il justifie enfin l'impossibilité actuelle de procéder à des évaluations des incidences transfrontières (section 6.2).

6.1 Aperçu des procédures de screening et de scoping et résultat

Le *scoping* constitue la première phase de l'établissement d'une évaluation stratégique des incidences environnementales pour un plan. Il vise à délimiter l'ampleur et la précision de cette évaluation.

Etant donné le caractère conceptuel et générique du Plan, l'ONDRAF a identifié les incidences environnementales à évaluer dans le SEA en appliquant — de façon simplifiée — la procédure de scoping établie par le SPF Santé [SPF Santé 2007c, 2007d] (section 6.1.2). Le scoping a lui-même été alimenté par les résultats de la procédure de *screening*, également établie par le SPF Santé [SPF Santé 2007a, 2007b] (section 6.1.1).

En application de la loi du 13 février 2006, l'ONDRAF a soumis le rapport de scoping, ou *projet de répertoire*, du Plan pour avis au Comité d'avis SEA. Dans son avis (annexe 3), le Comité recommande d'apporter quelques adaptations au projet de répertoire. Les adaptations relatives aux procédures de screening et de scoping sont prises en compte dans la présente section.

6.1.1 Screening

Le screening a permis d'identifier les incidences environnementales possibles du fait des activités du Plan et d'évaluer la pertinence de leur examen dans le cadre du SEA. Outre les incidences pertinentes et les incidences dont la pertinence est inconnue, l'ONDRAF a séparé les incidences dont il sait déjà, ou dont il est pratiquement certain, qu'elles ne devront jamais être évaluées des incidences qui devront être évaluées à un stade ultérieur de l'évaluation par étapes des incidences environnementales. Quatre incidences ont par ailleurs été ajoutées : l'« Altération du sous-sol » et, pour tenir compte du caractère chauffant des déchets conditionnés de haute activité, la « Modification de la température des eaux souterraines », la « Modification de la température du sol » et la « Modification de la température du sous-sol ».

Compte tenu du caractère conceptuel et générique du Plan,

- pour lequel le domaine d'évaluation est constitué de l'ensemble du territoire belge
- et pour lequel l'ONDRAF ne connaît
 - ▶ ni l'inventaire précis des déchets concernés *in fine*,
 - ▶ ni le projet technique à mettre en œuvre,
 - ▶ ni, a fortiori, ses modalités d'exécution,

l'ONDRAF a considéré comme non pertinente à ce stade l'évaluation des incidences environnementales suivantes :

- *les incidences environnementales identifiées dans la procédure comme dépendant du site de mise en œuvre, à savoir*
 - ▶ l'altération du paysage / de la vue sur la mer ;
 - ▶ l'altération physique de monuments, de vues de villes et de villages, d'épaves de navires, ... ;
 - ▶ l'altération visuelle de monuments, de vues de villes et de villages, ... (y compris la perte de contexte) ;
 - ▶ l'impact sur la biodiversité (perte d'espèces (intra et inter espèces), perte de surface, morcellement) ;
- *plus généralement, des incidences environnementales attendues d'un projet de stockage géologique mais qui ne lui sont pas spécifiques ; ces incidences sont comparables aux incidences d'un projet industriel de type « traitement et conditionnement de déchets radioactifs », dont la mise en œuvre dépendra en partie des technologies employées, à savoir*
 - ▶ l'altération du patrimoine archéologique ;
 - ▶ l'impact sur l'air ;
 - ▶ l'impact sur l'homme du fait des nuisances sonores, visuelles et olfactives, des poussières, etc. ;
 - ▶ l'impact sur les activités humaines ;
 - ▶ l'impact sur la biodiversité du fait d'incidences aux niveaux génétique, des espèces et des écosystèmes ;
- *trois incidences sur le sol, à savoir*
 - ▶ la modification de la sensibilité à l'érosion du sol ;
 - ▶ la modification de la sensibilité au dessèchement du sol ;
 - ▶ la modification du régime des eaux du sol.

Par ailleurs, les incidences dont l'ONDRAF sait, ou dont il est pratiquement certain, qu'elles ne devront jamais être évaluées ont été identifiées comme suit :

- pour l'impact sur les eaux de surface (eaux douces et milieu marin) :
 - ▶ la modification des propriétés hydrauliques de cours d'eau (déclivité, rugosité, section) ;
 - ▶ la modification de la vitesse et du sens d'écoulement des eaux de surface (eaux douces et milieu marin) ;
 - ▶ la modification du débit des eaux de surface ;
 - ▶ la modification du régime des marées (symétrie, longueur, vitesse) ;
 - ▶ la modification du régime salin (teneur, fluctuation) des eaux de surface (eaux douces et milieu marin) ;
 - ▶ la modification du régime de sédimentation et d'érosion des eaux de surface (eaux douces et milieu marin) ;
 - ▶ la modification du régime des crues (eaux douces et milieu marin) ;
 - ▶ la modification du pouvoir auto-épurant des eaux de surface (eaux douces et milieu marin) ;
 - ▶ l'altération du fond de l'eau (y compris le fond de la mer) ;
 - ▶ la modification de la texture du fond de l'eau (y compris le fond de la mer) ;
- pour l'impact sur les eaux souterraines :
 - ▶ l'épuisement des réserves d'eaux souterraines ;
 - ▶ la salinisation des eaux souterraines ;
- pour l'impact sur le climat :
 - ▶ l'altération du climat ;
- pour l'impact sur le sol :
 - ▶ la salinisation du sol.

Les incidences dont l'évaluation est considérée non pertinente à ce stade seront évaluées à des stades ultérieurs de la fixation de la politique nationale de gestion à long terme des

déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et lors des demandes d'autorisations. Le caractère (presque) certainement non pertinent de certaines incidences, quel que soit le stade d'évaluation, sera également vérifié ultérieurement.

En corollaire, ont donc été considérées comme pertinentes au terme de la procédure de screening :

- des incidences sur les eaux de surface ;
- des incidences sur les eaux souterraines ;
- des incidences sur le sol ;
- des incidences sur le sous-sol ;
- l'incidence sur la santé humaine ;
- l'incidence générale sur la biodiversité, interprétée à ce stade comme étant l'incidence générale sur la faune et la flore.

6.12 Scoping

Le Plan étant caractérisé par un horizon temporel exceptionnellement long, puisque les déchets doivent être isolés de l'homme et de l'environnement pendant quelques centaines de milliers d'années, voire pendant une période de l'ordre du million d'années, s'est posée la question de la fenêtre de temps sur laquelle doit porter l'évaluation des incidences environnementales.

Etant donné que la nature et l'importance des incidences environnementales du stockage géologique en galeries et du stockage géologique en forages profonds évolueront avec le temps, l'ONDRAF a choisi de distinguer les incidences « pré-fermeture » des incidences « post-fermeture » et de les évaluer séparément. Les notions de « période pré-fermeture » et « période post-fermeture » sont décrites comme suit.

- La *période pré-fermeture* désigne la période qui s'étend de l'obtention de l'autorisation nucléaire de création et d'exploitation du stockage géologique, au sens du règlement général de protection contre les rayonnements ionisants [Belgique 2001], jusqu'à la fermeture complète de l'installation souterraine et à la démolition partielle ou totale des installations en surface. C'est au cours de cette période que se déroulent les activités humaines qui peuvent être à l'origine d'incidences environnementales, comme la préparation du site de stockage, la construction, l'exploitation, la fermeture des zones de stockage, la fermeture des accès et la démolition des installations en surface. La durée de la période pré-fermeture est de l'ordre d'une centaine d'années, selon notamment que les générations futures choisiront, ou pas, de fermer *complètement* l'installation souterraine dès la fin de son exploitation. La fermeture complète peut en effet être différée, par exemple pour permettre un monitoring rapproché du comportement du système, sans toutefois que cette fermeture différée puisse mettre en péril la sûreté et la sécurité.
- La *période post-fermeture* commence dès fermeture complète de l'installation souterraine et la démolition partielle ou totale des installations en surface. Elle correspond à la période durant laquelle la sûreté du système de stockage est assurée de façon passive, par le système lui-même (barrières ouvragées et naturelles). Les seules incidences attendues sont donc celles qui résultent de son évolution naturelle.

Compte tenu de ce que l'ONDRAF ne connaît ni la formation hôte, ni le site de mise en œuvre du Plan et le projet technique à réaliser, ni a fortiori ses modalités d'exécution, le scoping des incidences environnementales issues du screening a été fortement simplifié par rapport à ce que prévoit la procédure de scoping. Les incidences environnementales n'ont été examinées que sous les quatre aspects suivants :

- le risque que l'incidence se produise effectivement ;
- l'ampleur des changements qui se produiront ;
- le caractère transfrontalier de l'incidence sur l'environnement ;

- la taille de la zone d'extension de l'incidence.
- L'examen des autres aspects a en effet été jugé trop spéculatif et de toute façon peu susceptible de modifier la vue d'ensemble fournie par l'examen des quatre éléments retenus.

Par ailleurs, le scoping n'a pas été mené jusqu'au stade final du scoping in/out, destiné à identifier précisément les incidences à évaluer dans le SEA. En effet, il n'est pas encore possible de discriminer de manière fondée certaines des incidences sur les eaux de surface et souterraines et sur le sol et le sous-sol. Dès lors, plutôt que livrer des listes d'incidences à évaluer dans le SEA, le scoping pour la période pré-fermeture et le scoping pour la période post-fermeture ont essentiellement livré des *familles d'incidences à évaluer*.

Les familles d'incidences environnementales identifiées au terme du scoping correspondent aux thèmes diversité biologique, santé humaine, faune, flore, sols et eaux de la loi du 13 février 2006, Annexe II, 6°. Des évaluations des incidences environnementales plus spécifiques et plus détaillées seront effectuées ultérieurement, chaque fois que le cadre légal et réglementaire l'exige, en particulier pour le choix du site de mise en œuvre et pour les demandes d'autorisations du projet technique dont la réalisation sera proposée in fine. Elles couvriront aussi les thèmes population, air, biens matériels, patrimoine culturel, y compris patrimoine architectural et archéologique et paysages, et vérifieront le caractère non pertinent d'une évaluation des incidences sur le climat. A terme, les incidences environnementales pertinentes du Plan tel qu'il sera proposé de le concrétiser par un projet auront donc toutes été évaluées en détail.

6.1.2.1 Résultats pour la période pré-fermeture

Les incidences environnementales identifiées au terme du scoping comme étant à évaluer dans le SEA pour la période pré-fermeture sont

- la famille des incidences sur les eaux de surface,
 - la famille des incidences sur les eaux souterraines,
 - la famille des incidences sur le sol,
 - l'altération du sous-sol,
 - la modification de la température du sous-sol,
 - l'incidence sur la santé humaine,
 - l'incidence générale sur la biodiversité, autrement dit sur la faune et la flore,
- où les familles d'incidences sur les eaux et sur le sol se subdivisent en de multiples incidences très spécifiques, dont il est difficile de distinguer à ce stade celles qui seront finalement pertinentes de celles qui ne le seront pas.

Les incidences environnementales des activités de restitution du site à un état moins ou non bâti en surface seront évaluées, dans la mesure du possible, à des stades ultérieurs de la fixation de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. En effet,

- les décisions relatives à la restitution du site à un état moins ou non bâti en surface sont entièrement du ressort des générations futures ;
- les incidences environnementales des activités nécessaires à la restitution du site à un état moins ou non bâti en surface seraient compensées par le bénéfice environnemental de cette restitution.

6.1.2.2 Résultats pour la période post-fermeture

Les incidences environnementales identifiées au terme du scoping comme étant à évaluer dans le SEA pour la période post-fermeture sont

- la famille des incidences sur les eaux souterraines,
- la famille des incidences sur le sol,
- la famille des incidences sur le sous-sol,
- l'incidence sur la santé humaine,

où le scoping a plus précisément suggéré d'évaluer les sept incidences suivantes :

- *l'altération des eaux souterraines* par des substances ou des agents pathogènes eutrophisants, consommateurs d'oxygène, radioactifs, toxiques pour l'homme ou l'environnement ;
- *la modification de la température des eaux souterraines* ;
- *l'altération du sol* du fait de la modification de la teneur en substances nutritives pour les plantes, toxiques pour l'homme ou l'environnement dans le sol ou de la modification du taux d'acidité ;
- *la modification de la température du sol* ;
- *l'altération du sous-sol* ;
- *la modification de la température du sous-sol* ;
- *l'impact sur la santé humaine*, par exemple du fait d'une exposition chronique à des substances toxiques (exposition directe, inhalation, consommation via l'eau ou l'alimentation...).

6.2 Pas d'évaluations possibles des incidences transfrontières

Comme les évaluations des incidences environnementales du stockage géologique sont préliminaires, essentiellement descriptives et non spécifiques à un site, il est impossible à ce stade d'évaluer les incidences transfrontières du Plan. Par ailleurs, *du fait de la nature et de l'objectif même d'un système de stockage géologique*, à savoir confiner et isoler les substances radioactives tant que nécessaire, *ses incidences environnementales attendues après fermeture complète sont essentiellement locales et faibles*. Les incidences environnementales transfrontières pré- et post-fermeture seront évaluées à des stades ultérieurs. Les incidences radiologiques d'un système de stockage pour la période post-fermeture, en particulier, seront évaluées dans le cadre du dossier de sûreté de l'installation de stockage à réaliser sur le site choisi.

Le Comité d'avis SEA a confirmé la position de l'ONDRAF dans son avis sur le projet de répertoire [Comité SEA 2019] (annexe 3).

Néanmoins, en complément des prescrits légaux, l'ONDRAF

- a, après réception de l'avis du Comité d'avis SEA sur le projet de répertoire, et comme proposé dans le projet de répertoire, informé les représentants officiels SEA des Etats membres de l'Union européenne au sujet de la nature du Plan et du SEA ;
- assure une publicité au Plan et au SEA sur son site web, en français, néerlandais et allemand.

7 Situation de référence et évolution attendue si le Plan n'est pas mis en œuvre

A défaut de pouvoir décrire « les aspects pertinents de la situation environnementale » (loi du 13 février 2006, annexe II, 2°) qui existe dans la zone — encore inconnue — qui sera couverte par le Plan, le SEA considère comme situation de référence ¹¹ la situation actuelle d'entreposage temporaire en surface (section 7.1). Il donne les grandes lignes de l'évolution de cette situation, y compris les grandes lignes de son impact possible sur l'environnement, si le Plan n'est pas mis en œuvre et donc si la problématique environnementale que constituent les déchets à long terme ne trouve pas de solution définitive sous la forme d'une mise en stockage (section 7.2).

7.1 Entreposage temporaire en surface

La situation de référence est celle de l'entreposage temporaire actuel en surface à Dessel des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, dans l'attente de leur stockage géologique (section 7.1.1). Étroitement liée à la situation de référence est la situation d'entreposage temporaire du combustible usé des centrales nucléaires de Doel et de Tihange sur les sites des centrales (section 7.1.2). En effet, ce combustible n'est pas déclaré comme déchet radioactif à l'ONDRAF par son propriétaire, Synatom, mais il est intégré dans l'inventaire de référence de façon conforme à l'hypothèse de Synatom en matière de retraitement au 31 décembre 2018. Et si le Plan n'est pas mis en œuvre, l'entreposage du combustible usé sur le site des centrales posera le même type de problèmes que l'entreposage des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie à Dessel. L'entreposage temporaire du combustible usé est donc inclus dans les constats relatifs à la situation de référence.

L'entreposage temporaire est une étape nécessaire de tous les systèmes de gestion des déchets radioactifs de par le monde. Il est fiable et sûr s'il fait l'objet d'une gestion active adéquate. Cette gestion comprend des actions de surveillance, de maintenance et de rénovation des bâtiments et de leurs équipements, destinées à leur permettre d'atteindre leur durée de vie définie à la conception, voire de la prolonger. De même, l'intégrité des emballages des déchets radioactifs et du combustible usé doit être contrôlée périodiquement de manière à permettre, le cas échéant, de prendre des mesures correctives.

7.1.1 Entreposage temporaire des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie

Les six bâtiments d'entreposage temporaire de l'ONDRAF sont situés à Dessel, sur un site exploité par sa filiale industrielle Belgoprocess. Ils ont été conçus en fonction des caractéristiques radiologiques des déchets qu'ils doivent abriter et sont exploités conformément aux conditions de leurs autorisations nucléaires et environnementales. Ils sont sous la surveillance de l'AFCN. Ils ont une durée de vie d'environ 75 ans, qui pourrait être prolongée jusqu'à une centaine d'années pour certains, moyennant accord de l'AFCN (table 7). Ils arrivent progressivement à saturation et des extensions de capacité sont donc prévues. Les équipements (manutention, contrôle-commande, ventilation, etc.) ont une durée de vie plus

¹¹ La situation de référence renvoie en principe aux aspects pertinents de la situation environnementale qui existe dans la zone — encore inconnue — couverte par le Plan et dans laquelle il est susceptible d'avoir des incidences environnementales notables ; son évolution attendue si le Plan n'est pas mis en œuvre renvoie à l'évolution de ces aspects pertinents.

courte, allant de 15 à 30 ans environ selon le type d'équipement, et sont rénovés ou remplacés selon les besoins.

Table 7 – Principales caractéristiques des bâtiments d'entreposage des déchets conditionnés à Belgoprocess en termes de durée d'exploitation escomptée, de capacité et des déchets qu'ils contenaient au 31 décembre 2018 (sources scellées retirées du service incluses).

Bâtiments	Mise en exploitation	Fin d'exploitation escomptée	Catégories de déchets	Capacité [m ³]	Taux remplissage [%]	Volume [m ³]	Activité [Bq]	
							α	β-γ
127	1976	2040	A + surtout B	4 700	83	3 900	3,4 10 ¹⁴	4,6 10 ¹⁶
129	1985	2090	B	250	86	215	1,7 10 ¹⁵	3,7 10 ¹⁷
136-Zone X	2000	2130	C	106	66	70 (vitrifiés)	8,1 10 ¹⁶	5,9 10 ¹⁸
136-Zone D	2009	2130	B	600	26	154	2,1 10 ¹⁴	4,6 10 ¹⁶
150	1986	2045	A + B	1 900	100	1 900	1,9 10 ¹²	2,2 10 ¹⁴
151	1988	2050	A + B	14 700	97	14 253	5,4 10 ¹³	1,1 10 ¹⁵
155	2006	2090	B	4 221	91	3 822	1,9 10 ¹⁵	1,7 10 ¹⁶

Sont brièvement décrits ci-après, à titre d'illustration, le bâtiment le plus ancien et le bâtiment le plus récent (figure 12) :

- Le bâtiment 127, mis en service en 1976, qui abrite principalement des déchets conditionnés de moyenne activité, est composé de quatre bunkers ventilés dont les murs en béton armé ont une épaisseur de 80 cm et le toit une épaisseur de 75 cm.
- Le bâtiment 136, mis en service en 2000, est lui destiné à l'entreposage des déchets vitrifiés de haute activité issus du retraitement de combustible usé des centrales nucléaires de Doel et de Tihange et à l'entreposage de déchets conditionnés de moyenne activité issus du retraitement de ce même combustible et de combustible de recherche. Il est ventilé. Il est conçu pour résister à différents types d'événements (chute d'un avion militaire, tremblement de terre, vents violents, explosion, incendie, inondation, etc.).
 - ▶ Les déchets vitrifiés de haute activité sont entreposés dans des puits verticaux dans des modules d'entreposage. Les parois en béton ont une épaisseur totale de 180 cm, dont 140 cm sont en béton fortement armé. La dalle de plafond a une épaisseur de 170 cm.
 - ▶ Les autres types de déchets sont entreposés dans un module d'entreposage dont les murs en béton armé atteignent 170 cm d'épaisseur.

L'impact environnemental des activités de gestion active est négligeable. L'impact de la présence même des déchets entreposés reste dans les limites autorisées [AFCN 2019] : les épaisseurs des murs des bâtiments sont calculées pour que les débits de dose à l'extérieur des modules respectent les limites de dose pour les travailleurs imposées par le règlement général de protection contre les rayonnements ionisants. Il n'y a par ailleurs ni rejets liquides, ni rejets gazeux.

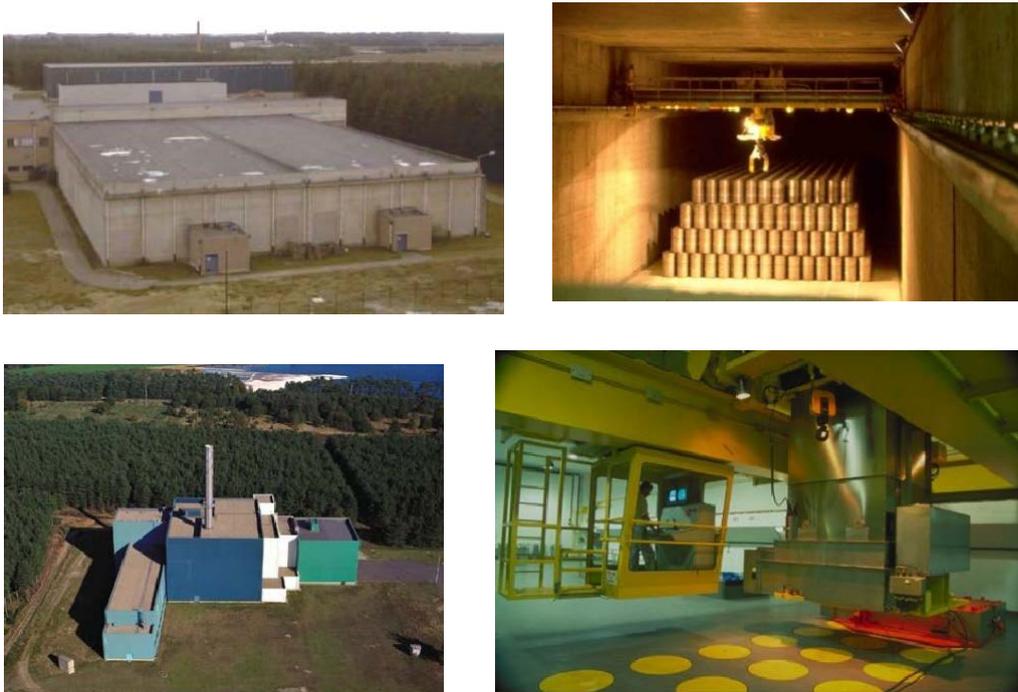


Figure 12 – Entreposage à Dessel. En haut : bâtiment 127 d'entreposage de déchets conditionnés de moyenne activité ; en bas : bâtiment 136, zone-X, d'entreposage des déchets conditionnés de haute activité.

7.1.2 Entreposage temporaire du combustible usé

Le combustible usé des centrales nucléaires de Doel et de Tihange est entreposé temporairement par Electrabel, sous sa responsabilité, et conformément aux conditions des autorisations nucléaires et environnementales, sur les sites des centrales. Au 31 décembre 2017, 2 590 tHM de combustible usé, soit 60 % de l'ensemble du combustible définitivement déchargé des réacteurs depuis leur mise en service ¹², étaient ainsi entreposées [Belgique 2018] :

- à sec, dans des conteneurs métalliques, à Doel ;
- sous eau à Tihange.

L'impact environnemental de cet entreposage temporaire, qui est sous la surveillance de l'AFCN, reste dans les limites autorisées [AFCN 2019].

Les capacités d'entreposage temporaire du combustible usé à Doel et à Tihange, qui étaient utilisées à environ 61 % et 78 % respectivement à la fin 2017, seront saturées avant la sortie complète du nucléaire en 2025. Deux nouvelles installations d'entreposage à sec en conteneurs — une sur chaque site — devraient être mises en exploitation d'ici là.

Les installations d'entreposage actuelles peuvent être décrites comme suit :

- Le bâtiment d'entreposage temporaire à sec à Doel a été mis en service en 1995. Il protège les conteneurs de combustible usé et les équipements du bâtiment contre les intempéries et assure un blindage radiologique complémentaire au blindage assuré par les conteneurs. Ceux-ci sont des conteneurs spéciaux de transport et d'entreposage, qui contiennent chacun de l'ordre d'une trentaine d'assemblages de combustible usé et ont notamment une fonction de contrôle de la criticité, c'est-à-dire de contrôle du risque de

¹² Le solde du combustible usé définitivement déchargé a été retiré ou est encore entreposé dans les piscines de refroidissement des réacteurs.

réaction en chaîne de fission nucléaire incontrôlée. Ils dégagent de la chaleur, qui est évacuée par ventilation naturelle. Ils sont conçus pour résister à l'impact d'un avion militaire et à l'incendie de kérosène et à l'effondrement du bâtiment qui pourraient s'ensuivre. Ils ont une durée de vie nominale de 50 ans, qui peut être prolongée.

- Le bâtiment d'entreposage temporaire sous eau à Tihange a été mis en service en 1997. Il est bunkérisé afin de résister aux événements externes (impact d'avion militaire, séisme, explosion). Il comporte huit piscines équipées de dispositifs permettant de contrôler la criticité. L'entreposage sous eau impose un strict contrôle du niveau minimum d'eau (pour limiter l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants) et de la chimie de l'eau (notamment pour prévenir la corrosion des assemblages de combustible et contribuer au maintien de la sous-criticité), ainsi que le maintien des systèmes de refroidissement (pour garantir l'évacuation adéquate de la chaleur résiduelle).

7.2 Evolution attendue si le Plan n'est pas mis en œuvre

La gestion active des déchets radioactifs sur de très longues durées comporte une difficulté intrinsèque, en ce sens que la protection de l'homme et de l'environnement est tributaire du maintien de mesures actives de gestion : il est impossible d'estimer si et jusqu'à quand ces mesures et ce contexte perdureront. S'ils s'affaiblissent, les conséquences à terme seront graves, car les déchets finiront par ne plus être isolés de l'homme et de l'environnement.

Si le Plan n'est pas mis en œuvre (voir chapitre 12 pour les principales raisons — autres qu'environnementales — d'adopter la politique nationale sans délai) et que les déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie doivent donc rester en entreposage temporaire, l'ONDRAF devra les *gérer* « à vue », autrement dit apporter des solutions de court terme, au cas par cas, aux problèmes qui se présenteront inévitablement. Electrabel devra faire face à des problèmes similaires pour l'entreposage du combustible utilisé jusqu'au moment où sa gestion est transférée à l'ONDRAF.

Plusieurs types d'incidences environnementales se manifesteront progressivement :

- les bâtiments d'entreposage temporaire existants devront être rénovés ou remplacés quand ils arrivent en fin de vie et les bâtiments devenus vétustes devront être déclassés ; ces deux types d'opérations auront des incidences environnementales, dont une probable augmentation de la quantité totale de déchets radioactifs à gérer ;
- les colis de déchets conditionnés n'étant pas prévus pour rester entreposés durant un siècle ou plus, ils sont susceptibles de devoir faire l'objet d'opérations de reconditionnement si le confinement des substances radioactives n'est plus totalement assuré ; ces opérations augmenteront inévitablement la quantité totale de déchets radioactifs à gérer ; il en va de même pour le combustible utilisé en entreposage, dont l'enveloppe peut se dégrader avec le temps et qui peut donc nécessiter des mesures destinées à maintenir la sûreté en entreposage ;
- les manipulations des colis de déchets entreposés ou des (conteneurs de) combustible utilisé, que ce soit lors de la rénovation des bâtiments ou des transferts vers de nouveaux bâtiments d'entreposage, s'accompagnent de risques en matière de sûreté opérationnelle.

La *gestion réactive* qui s'installera si le Plan n'est pas mis en œuvre continuera à se faire selon les dispositions du cadre légal et réglementaire de sûreté et de protection de l'environnement, mais il est impossible de prédire pendant combien de temps elle restera sûre, étant donné que les incertitudes contextuelles iront croissant (risques de dégradation du suivi réglementaire, de disparition de l'exploitant, d'érosion des connaissances, d'assèchement du financement, de guerre, etc.) : la situation d'entreposage temporaire sûr en surface finira par basculer vers

une situation non sûre, du fait d'un contexte de gestion dégradé, et la démonstration du maintien de la sûreté sans limite dans le temps est donc impossible.

En cas de perte de la gestion active à terme, des problèmes environnementaux graves commenceront à se poser. Si les bâtiments d'entreposage sont abandonnés, ils commenceront à se dégrader, de même que leur contenu. Les substances radioactives qui seront alors progressivement relâchées par les déchets et le combustible usé finiront par contaminer gravement l'environnement.

8 Méthode utilisée

Compte tenu du caractère à la fois inédit, conceptuel et générique du Plan, l'ONDRAF a choisi d'établir le SEA lui-même (section 8.2). Pour ce faire, il s'est appuyé sur des choix méthodologiques de base (section 8.1) destinés à contourner autant que possible les difficultés inhérentes à l'évaluation des incidences environnementales d'une proposition largement abstraite (section 8.3).

8.1 Approche méthodologique

Pour permettre une évaluation préliminaire des incidences environnementales du Plan bien que le domaine d'évaluation soit particulièrement étendu ou peu précis, l'ONDRAF a travaillé avec

- des concepts techniques types (section 8.1.1) ;
- deux domaines temporels différents (section 8.1.2) ;
- un inventaire de référence des déchets radioactifs, tout en considérant certaines conséquences d'une éventuelle modification de cet inventaire (section 8.1.3).

Le SEA traite également de la robustesse du stockage géologique en galeries et de celle du stockage géologique en forages profonds, autrement dit de la mesure dans laquelle ces options peuvent assurer la protection de l'homme et de l'environnement en dépit des évolutions temporelles auxquelles elles seront soumises (section 8.1.4).

8.1.1 Options de gestion et concepts types

Malgré la masse de connaissances et l'expertise acquises par l'ONDRAF en 40 ans de recherche, développement et démonstration sur le stockage géologique et malgré les acquis considérables au niveau international, le stockage géologique en galeries et le stockage géologique en forages profonds ne peuvent être représentés que par des concepts types dans le SEA. L'ONDRAF ne connaît en effet ni le site (y compris l'environnement géologique) de mise en œuvre du Plan et le projet technique à réaliser, ni a fortiori ses modalités d'exécution. Ces concepts types comprennent un aperçu des principales phases d'activités (préparation du site, construction, exploitation, fermeture complète, restitution du site à un état moins ou non bâti) avec un calendrier général indicatif et une description générale des principales activités attendues ainsi qu'un inventaire des principales installations requises et une description sommaire des installations de stockage et de leurs accès.

8.1.2 Période pré-fermeture et période post-fermeture

Etant donné que la nature et l'importance des incidences environnementales du stockage géologique en galeries et du stockage géologique en forages profonds évolueront avec le temps et qu'elles diffèrent essentiellement selon qu'il y a ou qu'il n'y a plus d'activités humaines, le SEA distingue les incidences de la période pré-fermeture des incidences de la période post-fermeture et les évalue séparément (section 6.1.2) :

- *pour la période pré-fermeture*, l'évaluation des incidences se fait sur la base des concepts types jusqu'à la fermeture complète de l'installation souterraine ; l'ONDRAF identifie et décrit les principales incidences possibles des principaux types d'activités ;
- *pour la période post-fermeture*, l'évaluation des incidences est basée sur les connaissances relatives à l'évolution naturelle des systèmes de stockage à long terme, après fermeture complète.

8.1.3 Inventaires des déchets radioactifs

Les évaluations des incidences environnementales du Plan sont basées sur l'inventaire de référence (section 2.4.2). L'impact de l'inventaire complémentaire potentiel (section 2.4.3) sur les incidences environnementales fait l'objet de considérations qualitatives générales (section 9.4). Ces considérations sont associées à une évaluation de la capacité des deux options de stockage géologique à absorber une modification de l'inventaire de référence, autrement dit, à une évaluation de leur *flexibilité* (chapitre 11).

8.1.4 Incertitudes associées à la période post-fermeture et robustesse

L'horizon temporel extrêmement long de la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie conduit à s'interroger sur la fiabilité de l'évaluation des incidences environnementales pour la période post-fermeture. Le stockage géologique en galeries et le stockage géologique en forages profonds seront en effet soumis à des évolutions, notamment des évolutions externes, impossibles à prévoir avec le degré de précision voulu.

Outre les incidences environnementales pour les périodes pré- et post-fermeture, le SEA examine donc aussi, par le biais de la notion de robustesse, la confiance que l'on peut avoir dans le résultat des évaluations des incidences pour la période post-fermeture. La robustesse des options de gestion reflète en effet la mesure dans laquelle leur capacité à assurer la protection — et en particulier la protection radiologique et chimiotoxique — de l'homme et de l'environnement est insensible aux évolutions temporelles.

La robustesse est une caractéristique intrinsèque de chaque option de gestion. Elle est évaluée sous quatre angles :

- robustesse à l'égard des évolutions naturelles, notamment climatiques ;
- robustesse à l'égard des évolutions du système qui diffèrent de son évolution attendue ;
- robustesse à l'égard des événements externes non naturels ;
- robustesse à l'égard des évolutions sociétales.

8.2 Experts consultés

Compte tenu du caractère conceptuel et générique du Plan et de ce qu'il porte sur un type d'activité sans précédent en Belgique, pour lequel les acteurs qui peuvent habituellement apporter une plus-value dans l'évaluation des incidences environnementales de plans ou programmes manquent d'expérience, l'ONDRAF a choisi d'établir lui-même le SEA (loi du 13 février 2006, article 9).

8.3 Difficultés et limites rencontrées

Les difficultés rencontrées lors de l'établissement du SEA résultent de ce que le Plan est à ce point conceptuel et générique qu'aucun de ses éléments concrets n'est connu : la solution du stockage géologique est susceptible d'être mise en œuvre à une multitude d'endroits, d'une multitude de façons. Cet exercice doit néanmoins accompagner toute proposition de politique nationale, fut-elle extrêmement générale.

L'ONDRAF s'est donc efforcé de réaliser les évaluations descriptives pertinentes pour le Plan en suivant au mieux l'esprit de la loi. Ce SEA constitue la base des évaluations des incidences environnementales qui seront réalisées à des stades ultérieurs de l'adoption de la politique nationale puis de sa mise en œuvre.

9 Evaluation des incidences environnementales du stockage géologique en galeries

Compte tenu du caractère abstrait du Plan, l'évaluation de ses incidences environnementales (section 9.3) se fait, pour le stockage géologique en galeries, à partir de concepts types (section 9.1) sur la base desquels sont fixées certaines hypothèses, quelques valeurs de paramètres et les principales activités à considérer durant les différentes phases de mise en œuvre (section 9.2). Cette évaluation est complétée par des considérations relatives aux incidences environnementales d'une augmentation de l'inventaire de référence (section 9.4), aux mesures de suivi (aussi appelées « monitoring » — section 9.5) et aux incidences environnementales d'un stockage géologique multinational partagé en galeries (section 9.6).

L'évaluation des incidences environnementales du stockage géologique en galeries considère le stockage des déchets des catégories B et C dans une installation unique, par opposition à leur stockage dans des installations séparées. Les incidences du stockage dans des installations séparées seraient supérieures à celles du stockage dans une installation unique, en raison du dédoublement des installations de surface et des accès aux zones de stockage de l'installation souterraine.

9.1 Concepts types

Le stockage géologique en galeries est représenté par quatre concepts types. Compte tenu de ce que les systèmes de stockage géologique sont toujours développés suivant une approche systémique, en fonction des caractéristiques de la formation hôte et de celles des déchets à confiner et à isoler (voir introduction du chapitre 3), il n'est en effet pas possible d'établir un concept type unique, valable pour le stockage géologique dans tous les types de formations hôtes potentielles. Ces concepts types n'ont pas vocation à être comparés en termes de « meilleur » ou « moins bon » à tel ou tel égard, puisqu'ils résultent d'approches systémiques.

Les quatre concepts types sur lesquels l'ONDRAF base l'évaluation des incidences environnementales du stockage géologique en galeries sont trois concepts types d'une étude générique britannique récente et un concept type belge. Ces concepts ont en commun d'avoir été développés avec une visée stratégique et de concerner le stockage de déchets de catégorie B et de déchets de catégorie C.

- Les concepts types britanniques, génériques, ont été développés récemment par le *Radioactive Waste Management (RWM)*, l'agence britannique chargée du stockage géologique des déchets des catégories B et C, en préparation au processus de sélection d'un site de stockage dans une formation hôte encore à choisir [RWM 2016a, 2016b]. Ces trois concepts — un pour chacun des trois principaux types de formations hôtes (évaaporite, roche cristalline ou formation argileuse) — reposent sur des hypothèses admises dans des concepts développés de par le monde pour le stockage de déchets des catégories B et/ou C dans ces formations et pour lesquels la base scientifique et technique est abondante. Ainsi, le concept type générique pour les formations argileuses repose sur les concepts développés par la Suisse et, dans une moindre mesure, la France et la Belgique pour le stockage géologique en galeries en formation argileuse. Les concepts types britanniques sont dimensionnés pour l'inventaire de référence britannique.
- Le concept type belge est le concept sur lequel se base le scénario de référence financier en vigueur à la date de référence du SEA, soit au 31 décembre 2018 [ONDRAF 2018b]. Il a vocation à permettre de chiffrer sur une base réaliste le coût d'une solution de stockage géologique en galeries en Belgique. Il est spécifique à une formation argileuse peu indurée et à l'inventaire de référence belge des déchets des catégories B et C

(section 2.4.2). Il est basé sur les connaissances acquises en Belgique en plus de 40 ans de recherche, développement et démonstration relative à ce type de formation.

L'examen des concepts types britanniques révèle de grandes différences, à inventaire de déchets constant, dues aux différences de caractéristiques entre formations hôtes. Rapportées à la taille de l'inventaire de référence belge, les valeurs de leurs paramètres dimensionnants permettent de mettre en perspective les valeurs correspondantes pour le concept type belge (section 9.2.1).

Les concepts types de stockage géologique en galeries (figure 13) comprennent un inventaire des principales installations en surface (section 9.1.1), une description sommaire de l'installation souterraine et de ses accès (section 9.1.2) et quelques considérations relatives au phasage des activités et à la fermeture de l'installation et de ses accès (section 9.1.3).

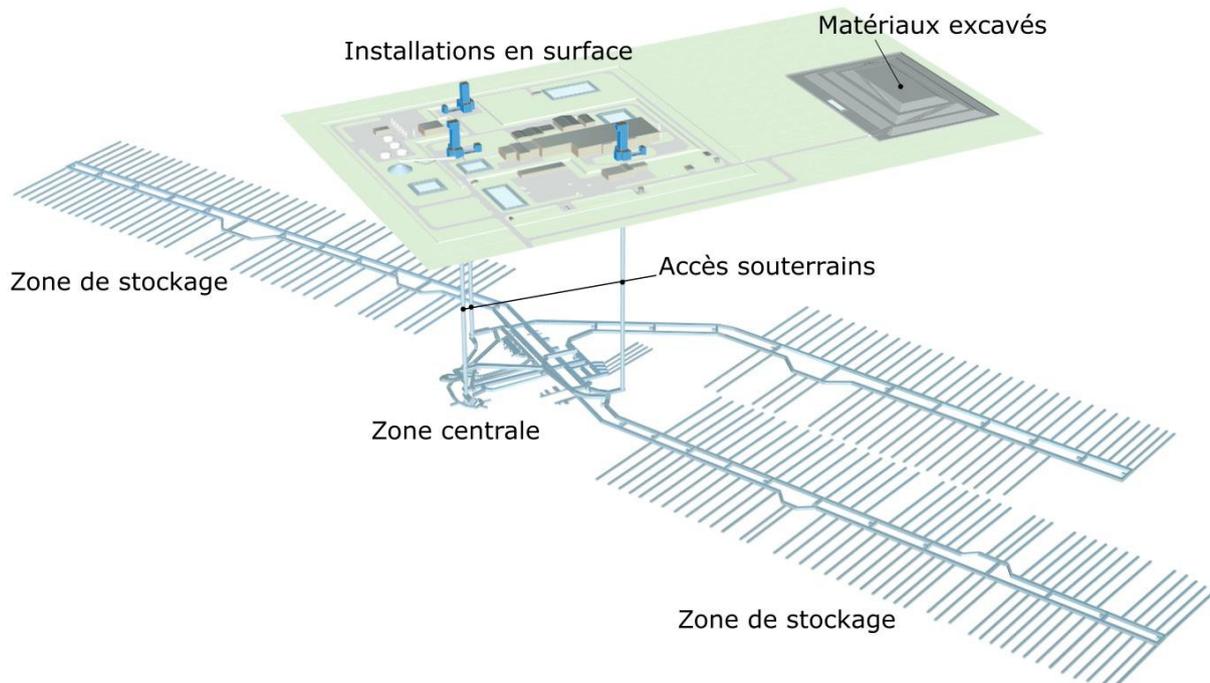


Figure 13 – Représentation d'un plan conceptuel de stockage géologique en galeries développée par la SGDN [SGDN 2019].

9.1.1 Installations en surface

Les installations en surface d'un stockage géologique en galeries n'ont pas vocation à être pérennes : elles seront démolies — en partie ou totalement — à la fin de la période pré-fermeture. Elles sont pour partie similaires aux installations que l'on peut trouver sur un site industriel classique et, pour quelques-unes, elles sont assez semblables aux installations de gestion courante des déchets radioactifs telles que celles rencontrées sur les sites de l'ONDRAF exploités par Belgoprocess à Mol et à Dessel. La seule installation en surface innovante est l'installation de post-conditionnement (présente dans le concept type belge), mais son fonctionnement repose sur des techniques et procédés utilisés régulièrement dans des installations de type conditionnement et entreposage telles que celles présentes à Mol et à Dessel.

Les installations en surface peuvent être réparties en trois zones : publique, non nucléaire et nucléaire (figure 14).

Zone publique La zone publique abrite par exemple un centre d'accueil pour les visiteurs, des parkings et un centre de communication, qui pourrait notamment comprendre un lieu d'exposition permanente proposant des simulations informatiques qui illustrent les principes de fonctionnement d'un système de stockage.

Zone non nucléaire La zone non nucléaire, clôturée, conçue comme une zone industrielle conventionnelle avec contrôle d'accès, comprend les installations non nucléaires nécessaires au projet de stockage jusqu'à la fermeture complète de l'installation souterraine et de ses accès. Elle comprend

- des installations *spécifiques* au projet de stockage, par exemple :
 - ▶ une ou plusieurs *zones d'entreposage des matériaux excavés*. A inventaire de déchets à stocker constant, le volume de ces matériaux dépend notamment du type de formation hôte et du concept de stockage.

Suivant la formation hôte et le concept, les matériaux excavés peuvent être utilisés au moins en partie comme matériau de remblayage de l'installation souterraine ou peuvent, voire doivent être transportés hors site. Ainsi, les matériaux excavés cristallins et argileux peuvent être laissés sur site sous forme de talus permanents, être utilisés pour le remblayage de (parties de) l'installation souterraine ou être transportés hors site afin d'être valorisés. En revanche, les matériaux excavés évaporitiques doivent être utilisés pour le remblayage de (parties de) l'installation souterraine ou être valorisés hors site, car ils sont solubles.
 - ▶ une *installation de traitement des lixiviats* des matériaux excavés entreposés ;
 - ▶ une *installation de traitement des eaux*, en particulier des eaux qui s'infiltrent le cas échéant dans l'installation souterraine et doivent être pompées vers la surface ;

et, s'il est décidé de les fabriquer sur place,
 - ▶ une *usine de fabrication des matériaux de construction* des installations en surface ainsi que de l'installation souterraine et de ses accès, qui nécessitent de grandes quantités de béton dans tous les concepts types ;
 - ▶ une ou plusieurs *usines de fabrication de certains composants nécessaires au post-conditionnement* des déchets ;
 - ▶ une *usine de fabrication des matériaux de remblayage* de l'installation souterraine et de ses accès. Ces matériaux et les quantités nécessaires dépendent du système de stockage, différents matériaux pouvant être utilisés dans un même système.
- des installations *non spécifiques* au projet de stockage telles que bâtiment administratif, zones de réception des matériaux livrés (matières premières, matériaux de construction, pièces préfabriquées, etc.), installations et bâtiments dédiés aux travaux de chantier et à la maintenance (ateliers, équipements électriques, poste d'incendie, etc.), lavoir ou encore laboratoire.

Zone nucléaire La zone nucléaire, soumise à des exigences particulières en matière de contrôle d'accès, comprend les installations par lesquelles transitent les déchets radioactifs depuis leur arrivée sur le site de stockage jusqu'au moment où ils entament leur descente vers l'installation souterraine. Ce sont des installations nucléaires de classe I au sens du règlement général de protection contre les rayonnements ionisants [Belgique 2001], au même titre que les installations de stockage des déchets radioactifs.

La zone nucléaire peut comprendre :

- un bâtiment avec une zone de réception des déchets qui arrivent de leur site d'entreposage, éventuellement une installation de post-conditionnement de ces déchets dans des conteneurs spécialement conçus pour le stockage et des zones tampons d'entreposage des colis de stockage avant leur transfert vers l'installation souterraine ;

- des bâtiments donnant accès à l'installation souterraine via les puits d'accès et, le cas échéant, via une rampe d'accès ;
- des installations de ventilation.



Figure 14 – Schéma d'implantation possible des installations en surface du concept suédois de stockage géologique du combustible usé en galeries [SKB 2011].

9.12 Constructions souterraines

Les constructions souterraines comprennent l'installation de stockage proprement dite et ses accès. L'ensemble constitue une installation nucléaire de classe I.

La table 8 présente certaines caractéristiques des concepts types utilisés pour l'évaluation des incidences environnementales et fait apparaître leurs différences, principalement dues aux différences entre les types de formations hôtes et les inventaires belge et britannique. L'inventaire belge comprend en effet environ cinquante fois moins de déchets de catégorie B et cinq fois moins de déchets de catégorie C que l'inventaire britannique ¹³.

Accès souterrains Les accès souterrains relient les installations en surface à l'installation souterraine et doivent permettre les transferts d'équipements et de matériaux (y compris la remontée en surface des matériaux excavés), les transferts de personnel, la descente des colis de stockage (voire, le cas échéant, leur remontée en surface) et la ventilation de l'installation souterraine. Ils sont de deux types : puits verticaux et rampe inclinée. Leur longueur est fonction de la profondeur de l'installation et, pour les rampes, de leur pente. Ils

¹³ Le Royaume-Uni possède 42 réacteurs nucléaires commerciaux en exploitation ou à l'arrêt définitif, soit six fois plus que la Belgique, et doit gérer une quantité très importante de déchets historiques, provenant du développement d'activités nucléaires pionnières dès les années quarante (63 % des déchets de catégorie B), ainsi que ceux résultant de ses activités militaires et de ses installations de retraitement et d'enrichissement de l'uranium.

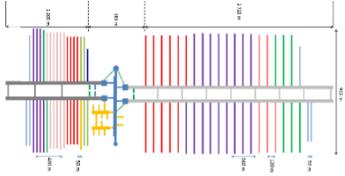
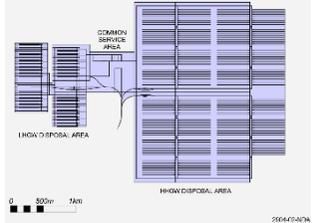
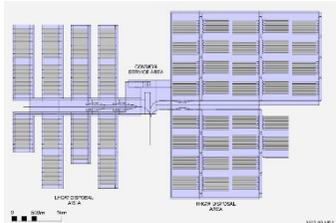
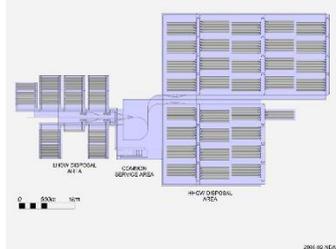
sont creusés à l'aide de techniques classiques d'excavation et stabilisés à l'aide de techniques qui diffèrent selon le type d'accès, son diamètre et les formations géologiques traversées.

Installation souterraine L'installation souterraine est l'endroit où sont stockés les déchets radioactifs. C'est un ouvrage industriel spécifique et innovant, à vocation pérenne, dont la construction constitue un défi technique soumis à de nombreuses contraintes. Ainsi, pour les formations argileuses, les techniques d'excavation des galeries de stockage doivent minimiser les perturbations de la formation hôte afin que le bon fonctionnement du système de stockage ne soit pas entravé et, pour une roche cristalline, il est indispensable d'avoir une connaissance préliminaire aussi détaillée que possible de la fracturation de la roche pour optimiser l'emplacement des galeries de stockage.

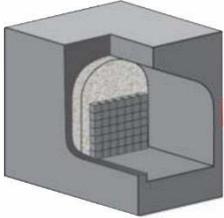
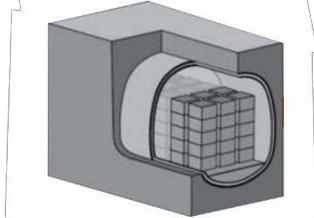
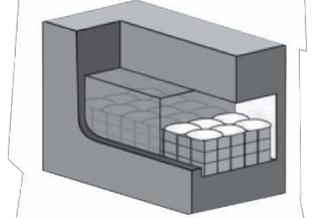
L'installation souterraine présente en particulier les caractéristiques suivantes :

- Elle est construite dans un plan horizontal, sur un seul niveau.
- Les parois des volumes excavés sont stabilisées par des techniques et dans une mesure qui dépendent de la formation hôte : dans certaines argiles, les parois doivent être revêtues de blocs de béton pour limiter la convergence spontanée. Dans d'autres formations hôtes, la stabilisation n'est pas nécessaire partout et là où elle est nécessaire, elle est assurée par boulons d'ancrage et treillis soudé, avec ou sans béton projeté. Le revêtement choisi pour les parois et l'obturation d'éventuelles fissures permettent également de limiter les infiltrations d'eau dans l'installation, qui peuvent être importantes dans les roches cristallines.
- Les déchets sont regroupés par zones en fonction de leurs grandes caractéristiques (radiologiques, thermiques, etc.). L'installation comprend donc deux zones de stockage distinctes, l'une pour les déchets de catégorie B (zone B) et l'autre pour les déchets de catégorie C (zone C), constituées chacune de galeries de stockage parallèles les unes aux autres. Les deux zones sont distantes de plusieurs centaines de mètres, pour éviter toute interaction potentiellement délétère (thermique, hydraulique, mécanique, chimique ou gazeuse) pouvant affecter le système après sa fermeture.
- Une zone centrale sépare les deux zones de stockage. Cette zone comprend des galeries d'accès et les installations techniques nécessaires en sous-sol, comme éventuellement une cellule permettant d'extraire les colis de stockage de leur conteneur de transport blindé avant leur transfert commandé à distance vers leur galerie de stockage. Cette zone centrale peut également comprendre une zone pilote destinée à des tests, par exemple des tests de confirmation des caractéristiques de la formation hôte choisie ou de démonstration de la mise en place et de la récupération de colis de stockage factices et/ou réels. Elle peut aussi servir à optimiser le design de l'installation et les opérations, par exemple en testant des techniques innovantes de manutention des colis de stockage, des techniques de fermeture de galeries et des techniques de monitoring.
- Les colis de stockage peuvent être acheminés en sous-sol via un puits ou une rampe, suivant le système de stockage.
- Les colis de stockage des déchets de catégorie B peuvent être empilés les uns sur et derrière les autres dans des galeries de grande section (quand le type de formation hôte le permet) ou être placés les uns derrière les autres dans des galeries cylindriques de section plus réduite.
- La zone de stockage des déchets de catégorie C, chauffants, est conçue de manière à dissiper la chaleur qu'ils dégagent, pour limiter l'augmentation de la température des barrières ouvragées et naturelles à des valeurs qui n'affecteront pas la capacité de confinement et d'isolation du système de stockage et limiter l'augmentation de température dans les aquifères aux valeurs réglementaires. Cette contrainte peut être satisfaite notamment en adaptant la durée de l'entreposage temporaire, et donc la durée de refroidissement en surface, l'espacement entre colis de stockage dans une même galerie de stockage et l'espacement entre galeries de stockage.

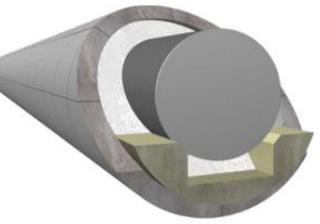
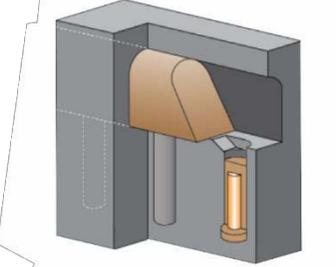
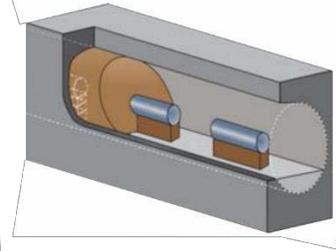
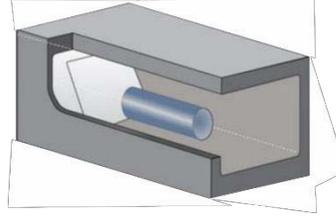
Table 8 – Caractéristiques principales des quatre concepts types de stockage géologique en galeries à la base de l'évaluation des incidences environnementales, pour les inventaires de déchets respectifs. Le concept type belge, établi dans un but d'estimation des coûts du stockage géologique, et l'inventaire des déchets des catégories B et C correspondant sont ceux à la date de référence du SEA, soit le 31 décembre 2018. Les données ne préjugent pas des caractéristiques d'un futur système de stockage géologique en galeries pour ces déchets.

	Concept type belge <i>argile peu indurée</i>	Concepts types génériques britanniques		
		<i>formation « plus résistante »</i> concept basé sur les concepts britannique et suédois (roches cristallines)	<i>formation « moins résistante »</i> concept basé sur les concepts suisse, français et belge (formations argileuses)	<i>évanorite</i> concept basé sur les concepts américain et allemand
Inventaire de référence				
Déchets de catégorie B	10 900 m ³	524 100 m ³	524 100 m ³	524 100 m ³
Déchets de catégorie C	≈ 2 600 m ³ (250 + 2 350)	12 163 m ³	12 163 m ³	12 163 m ³
Empreinte au sol				
Surface du site	≈ 1 km ²	≈ 1 km ²	≈ 1 km ²	≈ 1 km ²
Surface occupée par les matériaux excavés	≈ 0,3 km ²	non disponible	non disponible	non disponible
Accès souterrains				
Nombre et type	2 puits	1 rampe et 3 puits	1 rampe et 3 puits	4 puits
Transfert des colis de stockage	via puits	via rampe	via rampe	via puits
Installation souterraine				
Construite dans un plan horizontal, sur un seul niveau				
Profondeur et configuration	400 m	650 m	500 m	650 m
A gauche : zone B Au milieu : zone centrale A droite : zone C				
<i>Schémas à échelles différentes, zones centrales non à l'échelle</i>				
Empreinte souterraine totale	≈ 3,9 km ²	≈ 7,6 km ²	≈ 15,3 km ²	≈ 10,3 km ²
Zone B	≈ 1 km ²	≈ 0,5 km ²	≈ 2,5 km ²	≈ 0,8 km ²
Zone C	≈ 2,5 km ²	≈ 3,4 km ²	≈ 4,2 km ²	≈ 3,4 km ²
Zone centrale	≈ 0,4 km ²	≈ 3,7 km ²	≈ 8,6 km ²	≈ 6,1 km ²
Distance entre zones B et C	385 m	500 m	500 m	500 m
Revêtement	blocs de béton et béton projeté (épaisseur d'environ 3 m pour les galeries d'accès et d'environ 1 m pour les galeries de stockage)	boulons d'ancrage (de 2,5 m de long, placés tous les 2,5 m) et treillis soudé avec béton projeté (épaisseur : 20 cm dans les galeries de stockage et 5 cm ailleurs)	boulons d'ancrage (de 1,5 à 3 m de long, placés tous les 1,5 à 2 m) et treillis soudé avec béton projeté (épaisseur : 30 cm) (<i>utilisation possible de blocs de béton pour des tronçons de galerie</i>)	boulons d'ancrage (de 3 m de long placés tous les 1,5 m) et treillis soudé

Galeries de stockage des déchets de catégorie B (galeries B) : caractéristiques et configurations de stockage

Section	circulaire	en forme de fer à cheval	ovale	rectangulaire
				
Placement des colis	les uns derrière les autres	les uns sur/derrière les autres	les uns sur/derrière les autres	les uns sur/derrière les autres
Dimensions	3,5 m de diamètre utile	≈ 16 m × 16 m	≈ 10 m × 11 m	≈ 10 m × 5 m
Longueur	différentes longueurs, max. 400 m	≈ 300 m	≈ 300 m	≈ 300 m
Nombre	37	38	114	93
Matériau de remblayage	matériau cimentaire	matériau cimentaire	matériau cimentaire	(pas de remblayage)

Galeries de stockage des déchets de catégorie C (galeries C) : caractéristiques et configurations de stockage

Section	circulaire	en forme de fer à cheval	circulaire	carrée
				
Placement des colis	les uns derrière les autres	dans des puits verticaux individuels creusés à la base des galeries	les uns derrière les autres	les uns derrière les autres
Dimensions	3 m de diamètre utile	5,5 m × 5,5 m	2,5 m de diamètre	3 m × 3 m
Longueur	différentes longueurs, max. 400 m	500 m	500 m	500 m
Nombre	42	310	341	327
Matériau de remblayage	matériau cimentaire	bentonite ¹	bentonite	matériau excavé concassé ²

Matériaux pour la fermeture complète

Scelllements	béton et bentonite	béton et bentonite	béton et bentonite	béton et autres matériaux
Remblayage de la zone centrale	matériau cimentaire	matériau excavé concassé	bentonite et sable ou matériau excavé concassé	matériau excavé concassé
Remblayage des accès	matériau cimentaire et graviers	matériau excavé concassé	matériau excavé concassé	matériau excavé concassé

¹ Sorte d'argile.

² Le matériau excavé concassé provient du creusement de l'installation souterraine dans la formation hôte et non du creusement des accès.

9.1.3 Phasage et fermeture

Un projet de stockage géologique est mis en œuvre en plusieurs phases s'échelonnant sur de nombreuses décennies. On distingue classiquement, à partir de l'octroi de l'autorisation nucléaire de création et d'exploitation, une brève phase de préparation du site, les phases de construction, d'exploitation et de fermeture complète, ainsi qu'une phase de restitution du site à un état moins ou non bâti. Ces phases appartiennent à la période pré-fermeture, qui fait l'objet d'un monitoring continu (section 9.5). La période post-fermeture est celle de l'évolution naturelle du système de stockage, qui fait en principe elle aussi l'objet d'un monitoring à son début (voir aussi figure 4 à la section 2.3).

Phase de préparation du site La phase de préparation du site couvre des activités préalables au commencement des activités de construction principales, comme des terrassements et l'aménagement de l'infrastructure de base.

Phase de construction La phase de construction couvre la construction des installations en surface et de l'installation souterraine avec ses accès.

Phase d'exploitation La phase d'exploitation couvre l'exploitation des installations en surface et la mise en place des colis de stockage dans l'installation souterraine ainsi que la fermeture des zones de stockage. Cette fermeture consiste à remblayer les galeries de stockage et d'accès et à placer des scellements intermédiaires étanches à l'eau pour empêcher à terme le transport préférentiel des radionucléides et des contaminants chimiques dans l'installation.

Phase de fermeture complète Une fois tous les déchets mis dans l'installation souterraine, l'installation et ses accès peuvent être fermés complètement, c'est-à-dire remblayés complètement et scellés, immédiatement ou après une période de monitoring, en une fois ou par étapes, sans toutefois qu'une fermeture différée puisse mettre en péril la sûreté et la sécurité. La fermeture complète vise à :

- empêcher les intrusions humaines ;
- amener le système de stockage dans son état final et lui permettre ainsi de remplir son objectif, à savoir assurer la protection de l'homme et de l'environnement de façon passive.

Phase de restitution du site à un état moins ou non bâti La période pré-fermeture s'achève par une phase de démolition, partielle ou totale, des installations en surface, de manière à rendre le site à un état moins ou non bâti.

Période post-fermeture La période post-fermeture ne nécessite plus aucune activité humaine pour que la sûreté reste assurée. L'installation complètement fermée fait néanmoins en principe au début l'objet d'un monitoring, qui ne peut affecter la sûreté globale du système. Le site fait l'objet d'efforts de transfert de la mémoire de l'existence de l'installation souterraine.

Le concept type belge découple dans le temps les activités associées aux déchets de catégorie B de celles associées aux déchets de catégorie C et prévoit en outre que les phases de construction et d'exploitation se succèdent strictement, chacune ayant une durée de vingt ans (figure 15). Les concepts types britanniques, par contre, prévoient un chevauchement presque total des phases de construction et d'exploitation, avec une durée d'exploitation de 150 ans, qui s'explique par un inventaire de déchets beaucoup plus grand.

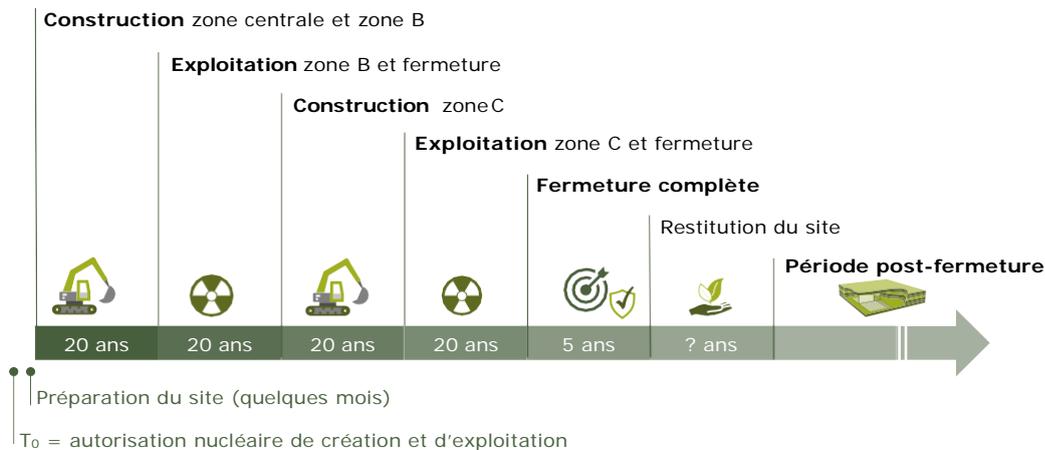


Figure 15 – Principales phases d'activités du concept type belge de stockage géologique en galeries.

9.2 Pour fixer les idées

Compte tenu des différences substantielles entre les quatre concepts types, l'évaluation descriptive des incidences environnementales du stockage géologique en galeries impose de fixer les idées quant à l'objet de l'évaluation : des hypothèses et des valeurs de paramètres sont nécessaires (section 9.2.1), de même qu'un inventaire des principales activités de mise en œuvre considérées (section 9.2.2), car jugées susceptibles d'avoir des incidences environnementales du type de celles identifiées au terme de la procédure de scoping (section 6.1.2).

9.2.1 Hypothèses et valeurs de paramètres dimensionnants

Les hypothèses prises pour l'évaluation des incidences environnementales, dont certaines sont délibérément pénalisantes, ainsi que les valeurs de quelques paramètres dimensionnants significatifs relèvent du jugement d'expert et dépendent en outre des données disponibles. Les valeurs des concepts types britanniques sont rapportées à titre indicatif à l'inventaire de référence belge. Ces hypothèses et valeurs sont uniquement destinées à préciser les idées quant à ce que pourrait impliquer le stockage géologique en galeries en Belgique de l'inventaire de référence. Elles ne préjugent pas des caractéristiques exactes d'un futur projet de stockage géologique.

Phasage

Le calendrier est le calendrier indicatif du concept type belge (figure 15 à la section 9.1.3) [ONDRAF 2018b]. Les différentes phases d'activités se succèdent strictement, sans chevauchement, et la fermeture complète de l'installation de stockage intervient dès la fin de l'exploitation.

Activités localisées sur le site de stockage plutôt qu'en dehors de celui-ci

- *Post-conditionnement des déchets* : les déchets sont post-conditionnés, c'est-à-dire mis dans leur conteneur de stockage, sur le site de stockage et non sur leur(s) site(s) d'entreposage temporaire ; ils satisfont aux critères de l'autorisation nucléaire d'exploitation de l'installation de post-conditionnement à leur arrivée sur le site de stockage et ne doivent donc pas y faire l'objet d'éventuelles opérations de mise en conformité (réemballage, reconditionnement, etc.).

- *Fabrication du béton et des matériaux cimentaires* : le béton nécessaire à la construction des installations en surface, de l'installation souterraine et de ses accès, les matériaux cimentaires nécessaires à la fabrication des conteneurs de stockage et les matériaux (supposés être tous des matériaux cimentaires) nécessaires au remblayage des volumes excavés sont fabriqués sur le site de stockage à partir de matières premières qui y sont acheminées.

Techniques de construction

- Les accès souterrains traversent des aquifères et leur creusement nécessite donc de congeler temporairement les aquifères traversés jusqu'à la pose du revêtement prévu.
- En l'absence de connaissances relatives aux caractéristiques hydrogéologiques du site de stockage, et donc sans possibilité d'évaluer la nécessité de recourir à des techniques telles que parois moulées et rabattements de nappe pour la construction des installations en surface, ces techniques ne sont pas considérées.

Matériaux excavés

Les matériaux excavés sont laissés sur le site de stockage. Ils ne sont pas réutilisés comme matériau de remblayage de l'installation souterraine ou évacués du site pour être valorisés ailleurs.

Empreintes et profondeur

- Empreinte du site en surface : 1 km², dont 0,4 km² sont supposés imperméabilisés, soit :
 - ▶ environ 0,1 km² pour les routes, parkings et installations en surface ;
 - ▶ environ 0,3 km² pour ou par l'entreposage des matériaux excavés.
- Empreinte souterraine :
 - ▶ concept type belge : 3,9 km² ;
 - ▶ concepts types britanniques : de 1,9 à 2,6 km².
- Profondeur :
 - ▶ concept type belge : 400 mètres ;
 - ▶ concepts types britanniques : de 500 à 650 mètres.

Volumes de matériaux

- Le nivellement du site ne génère pas de terres en excès et ne requiert pas d'apports de terres extérieures.
- Les volumes de matériaux considérés sont (table 9)
 - ▶ les volumes de matériaux excavés (par hypothèse entreposés dans leur totalité sur le site de stockage) ;
 - ▶ les volumes de béton nécessaires à la construction de l'installation souterraine et de ses accès et les volumes de matériaux cimentaires nécessaires à la fabrication des conteneurs de stockage ainsi qu'au remblayage de l'installation et de ses accès, où les matériaux de remblayage sont supposés être des matériaux cimentaires.

D'autres volumes de matériaux, en particulier ceux nécessaires à la construction des installations en surface, ne sont pas considérés à ce stade.

Consommations d'eau

Les proportions d'eau requises pour la fabrication du béton et des matériaux cimentaires sont estimées comme suit :

- 0,15 volume d'eau par volume de béton ou de matériaux cimentaires nécessaires à la construction de l'installation souterraine, de ses accès et des conteneurs de stockage ;
- 0,35 volume d'eau par volume de matériaux cimentaires de remblayage.

Table 9 – Evaluation préliminaire sommaire des volumes de matériaux considérés dans la mise en œuvre d'une solution de stockage géologique en galeries pour le concept type belge et selon les concepts types britanniques rapportés à l'inventaire de référence belge.

	Selon concept type belge [m ³]	Selon concepts types génériques britanniques [m ³]
Matériaux à entreposer sur le site de stockage		
Matériaux excavés	1 300 000	960 000 – 1 590 000
Matériaux à fabriquer sur le site de stockage		
Béton	680 000	118 000 – 248 000
Matériaux cimentaires		
Conteneurs de stockage B	41 000	0 ¹
Conteneurs de stockage C	42 000	0 ¹
Remblayage zone B	140 000	0 ² – 132 000
Remblayage zone C	280 000	540 000 – 1 890 000
Fermeture complète	94 000	données non disponibles

¹ Dans les concepts types britanniques, les déchets arrivent sur le site de stockage sous forme post-conditionnée.

² Les galeries de stockage pour déchets de catégorie B ne sont pas remblayées dans le concept type britannique en évaporite.

Transports

- Les transports considérés sont uniquement les *transports de déchets radioactifs* et les *transports des matières premières* nécessaires à la fabrication
 - ▶ du béton pour la construction de l'installation souterraine et de ses accès ;
 - ▶ des matériaux cimentaires pour la fabrication des conteneurs de stockage ;
 - ▶ des matériaux nécessaires (supposés être des matériaux cimentaires) pour le remblayage des zones B et C ;
 - ▶ des matériaux nécessaires au remblayage de la zone centrale et des accès.

Les transports nécessaires à l'acheminement des matériaux pour les installations en surface (volumes non évalués) et ceux nécessaires à d'autres types de matériaux, comme l'acier, ne sont pas considérés à ce stade.

- Les transports sont effectués par route, dans des camions de 10 m³, les jours ouvrés.
- Les transports sont répartis uniformément sur toute la durée de chacune des phases d'activités auxquelles ils se rapportent.

922 Activités considérées durant les différentes phases

La mise en œuvre d'une solution de stockage géologique en galeries à partir de l'obtention de l'autorisation nucléaire de création et d'exploitation peut être subdivisée en plusieurs grandes phases d'activités (figure 16). Les activités sélectionnées résultent d'un jugement d'expert : ce sont celles qui apparaissent les plus susceptibles d'avoir une ou plusieurs incidences significatives parmi les incidences environnementales identifiées au terme de la procédure de scoping comme étant à évaluer dans le SEA (section 6.1.2). Les incidences de ces activités et d'autres activités de mise en œuvre non prises en compte à ce stade devront être évaluées de manière plus détaillée à des stades ultérieurs de l'évaluation par étapes des incidences environnementales.

Les incidences environnementales des activités de restitution du site à un état moins ou non bâti en surface après fermeture complète de l'installation de stockage et de ses accès, dont il appartiendra aux générations futures de décider, seront elles aussi évaluées ultérieurement dans la mesure de ce qui est raisonnablement possible.



Figure 16 – Aperçu des principales activités considérées durant les différentes phases de la mise en œuvre d'une installation de stockage géologique en galeries jusqu'à sa fermeture complète ainsi que de sa période post-fermeture, durant laquelle aucune activité n'est indispensable pour assurer la sûreté. La restitution du site à un état moins ou non bâti en surface n'est pas considérée dans le SEA (section 6.1.2.1). Les transports, qui constituent une activité transversale à toutes les phases d'activités, ne sont pas représentés.

9.3 Evaluation des incidences environnementales pour les périodes pré- et post-fermeture

L'évaluation des incidences environnementales pour les périodes pré- et post-fermeture est essentiellement descriptive. Elle est effectuée en deux étapes :

- la première vise à identifier les activités de mise en œuvre qui ont a priori au moins une incidence environnementale significative (section 9.3.1) ;
- la seconde examine un peu plus en détail les incidences des activités retenues au terme de la première étape de même que celles de l'évolution naturelle post-fermeture du système de stockage (section 9.3.2).

Conformément aux choix faits lors de la procédure de screening et aux résultats de celle-ci, une série (de familles) d'incidences ne sont pas considérées (section 6.1.1),

- soit parce que *leur évaluation est non pertinente à ce stade ou qu'elle est impossible à ce stade* car elle dépend de choix futurs, comme le choix du type de formation hôte et celui du site de stockage, et des technologies qui seront disponibles au moment de la mise en œuvre du projet de stockage ;
- soit parce que *l'incidence elle-même est présumée non pertinente ou négligeable*.

Dans un cas comme dans l'autre, ces incidences seront reconsidérées à des stades ultérieurs de l'évaluation par étapes des incidences environnementales. C'est ainsi que des incidences dont l'évaluation est non pertinente ou impossible à ce stade qui viennent spontanément à l'esprit — comme l'incidence sur l'air, l'incidence sur l'homme des nuisances sonores et des poussières, l'incidence sur les activités humaines ou encore l'altération du paysage — feront l'objet d'évaluations ultérieures et que le caractère présumé non pertinent ou négligeable d'autres incidences sera vérifié.

L'évaluation des incidences environnementales considère que l'ensemble des activités nécessaires à la mise en œuvre d'une solution de stockage géologique en galeries jusques et y compris la fermeture complète de l'installation souterraine et de ses accès se déroule dans les conditions normales prévues. En d'autres termes, elle ne considère pas les situations d'incident ou d'accident, et en particulier les éventuelles pollutions accidentelles. Ces situations seront examinées à des stades ultérieurs de l'évaluation par étapes des incidences environnementales, en particulier dans le dossier de sûreté. En outre, pour la période pré-fermeture, l'évaluation considère que les éléments contextuels nécessaires à la mise en œuvre d'une solution de stockage dans de bonnes conditions (par exemple, le transfert des connaissances, la disponibilité du financement ou encore un état de paix) se maintiennent dans le temps.

Le développement d'un futur projet de stockage géologique se fera dans le respect des dispositions du cadre légal et réglementaire, en particulier des dispositions environnementales et de radioprotection, qui évoluent au fil des décennies. C'est une condition *sine qua non* à l'obtention des autorisations nécessaires à sa mise en œuvre, dans le respect des bonnes pratiques et selon des techniques éprouvées en matière de sûreté, de sécurité et de protection de l'environnement.

9.3.1 Identification des activités de mise en œuvre qui ont a priori au moins une incidence environnementale significative

L'identification des activités de mise en œuvre d'un stockage géologique en galeries qui ont a priori au moins une incidence environnementale significative se fait en examinant systématiquement les principales activités au regard des différentes incidences identifiées au terme de la procédure de scoping comme étant à examiner dans le SEA pour la période pré-fermeture (section 6.1.2.1).

L'exercice permet de dégager trois groupes d'activités de mise en œuvre (table 10) :

- les activités qui ont *a priori au moins une incidence environnementale significative* (négative) :
 - ▶ la préparation classique du site de stockage ;
 - ▶ la préparation de la zone d'entreposage des matériaux excavés sur le site de stockage ;
 - ▶ la construction des installations en surface ;
 - ▶ l'entreposage des matériaux excavés sur le site de stockage ;
 - ▶ la mise en place des déchets de catégorie C dans l'installation de stockage.Elles sont examinées plus en détail à la section 9.3.2.
- les activités qui n'ont *a priori aucune incidence environnementale significative, mais qui* sont quand même examinées plus en détail à la section 9.3.2 du fait qu'elles *impliquent des déchets radioactifs* :
 - ▶ le post-conditionnement des déchets de catégorie B ;
 - ▶ la mise en place des déchets de catégorie B dans l'installation de stockage ;
 - ▶ le post-conditionnement des déchets de catégorie C.
- les autres activités, qui sont commentées ci-dessous.

Table 10 – Identification des activités de mise en œuvre d'un stockage géologique en galeries qui ont a priori au moins une incidence environnementale significative et examen préliminaire de l'évolution naturelle post-fermeture du système de stockage.

- x : l'incidence (négative) est significative ;
- ? : il n'est pas possible d'évaluer s'il y a, ou non, une incidence (négative) significative ;
- (x) : l'incidence se manifeste de manière transitoire ;
- ¹ aucune incidence sur la santé humaine n'est attendue, mais ce point est quand même brièvement commenté à la section 9.3.2 du point de vue de la radioprotection.

Les activités qui n'auraient aucune incidence significative sont identifiées par une case coloriée en vert.

	Familles d'incidences			Incidences individuelles			
	Incidences sur les eaux de surface	Incidences sur les eaux souterraines	Incidences sur le sol	Altération du sous-sol	Modification de la température du sous-sol	Incidence sur la santé humaine	Incidence sur la faune et la flore
PERIODE PRE-FERMETURE							
<i>1. Préparation site</i>							
Préparation classique	x		x				x
Préparation zone d'entreposage matériaux excavés	x		x				x
<i>2. Construction zone centrale et zone B</i>							
Exploitation centrale à béton - utilisation d'eau	?	?					
Construction installations en surface	x		x				x
Congélation sol et sous-sol (à travers aquifères)							
Excavation accès		?					
Revêtement parois accès							
Excavation zone centrale et zone B		?					
Revêtement parois zone centrale et zone B							
Entreposage matériaux excavés sur site	x		x				x
Traitement eaux infiltrées et lixiviats							
<i>3. Exploitation zone B et fermeture</i>							
Exploitation centrale à béton - utilisation d'eau	?	?					
Post-conditionnement déchets B						¹	
Mise en place déchets B						¹	
Remblayage et scellement							
Traitement eaux infiltrées et lixiviats							
<i>4. Construction zone C</i>							
Exploitation centrale à béton - utilisation d'eau	?	?					
Excavation zone C		?					
Revêtement parois zone C							
Entreposage matériaux excavés sur site	x		x				x
Traitement eaux infiltrées et lixiviats							
<i>5. Exploitation zone C et fermeture</i>							
Exploitation centrale à béton - utilisation d'eau	?	?					
Post-conditionnement déchets C						¹	
Mise en place déchets C		(x)			(x)	¹	
Remblayage et scellement							
Traitement eaux infiltrées et lixiviats							
<i>6. Fermeture complète</i>							
Exploitation centrale à béton - utilisation d'eau	?	?					
Remblayage et scellement galeries d'accès et accès							
PERIODE POST-FERMETURE							
<i>7. Evolution post-fermeture</i>							
Evolution naturelle système de stockage		(x)		x	(x)	¹	

Les activités de mise en œuvre d'un stockage géologique en galeries dont les incidences environnementales sont jugées négligeables à ce stade et qui n'impliquent pas de déchets radioactifs et les activités dont certains types d'incidences ne peuvent être évalués sont brièvement décrites ci-dessous, avec une courte justification. L'activité *transport* est également brièvement considérée.

Utilisation d'eau pour l'exploitation de la centrale à béton Les incidences environnementales de l'utilisation d'eau pour l'exploitation de la centrale à béton ne peuvent être évaluées, parce que leur provenance (circuit de distribution d'eau de ville ou eau prélevée sur ou près du site de stockage, en surface ou en profondeur) est inconnue, de même que le rapport entre les quantités d'eau nécessaires et les quantités d'eau disponibles en surface ou en profondeur, compte tenu de la recharge naturelle du fait des précipitations. Dans le cas d'un prélèvement sur ou près du site, les incidences dépendent pour une large part des caractéristiques hydrogéologiques du site et de son environnement de surface et souterrain. Tout au plus est-il possible de faire une première évaluation des volumes d'eau moyens consommés par jour ouvré au cours des différentes phases d'activités, dans la limite des hypothèses émises (table 11).

L'utilisation d'eau pour la centrale à béton pourrait, si le prélèvement se fait sur ou près du site de stockage, et selon qu'il se fait en surface ou en profondeur, modifier le niveau des eaux de surface, voire les caractéristiques structurelles de cours d'eau, ou modifier l'écoulement des eaux souterraines et/ou leur niveau ou leur montée.

Table 11 – Volumes d'eau moyens consommés par jour ouvré au cours des différentes phases d'activités (voir section 9.2.1 pour les hypothèses). Les valeurs relatives aux trois concepts types de l'étude britannique ont été rapportées à l'inventaire belge de référence.

	Construction zones B et C [40 ans]		Exploitation zone B [20 ans]		Exploitation zone C [20 ans]		Fermeture complète [5 ans]	
	A fabriquer [m ³]	Eau/jour ouvré [m ³]	A fabriquer [m ³]	Eau/jour ouvré [m ³]	A fabriquer [m ³]	Eau/jour ouvré [m ³]	A fabriquer [m ³]	Eau/jour ouvré [m ³]
Béton								
BE	680 000	10						
UK	118 000– 248 000	2–4						
Matériaux cimentaires pour les conteneurs de stockage								
BE			41 000	1	42 000	1		
UK								
Matériaux cimentaires de remblayage								
BE			140 000	10	280 000	20	94 000	26
UK			0–132 000	0–9	540 000– 1 890 000	38–132	non disponible	
Total par jour ouvré								
BE		10		11		21		26
UK		2–4		0–9		38–132		

Congélation temporaire du sol et du sous-sol en vue de l'excavation des accès de l'installation souterraine Selon la teneur en eau des formations géologiques traversées, l'excavation des accès de l'installation souterraine peut nécessiter la congélation du sol et/ou du sous-sol pour assurer l'étanchéité à l'eau et la stabilité des parois pendant l'excavation. Cette congélation est temporaire et les tubes de congélation étanches peuvent être isolés de façon à limiter la congélation à l'extérieur de la zone, de quelques dizaines de mètres de diamètre, délimitée par les tubes de congélation.

Compte tenu de ces considérations et de l'extension latérale très limitée des zones temporairement congelées, la congélation du sol et du sous-sol est considérée n'avoir aucune incidence environnementale significative parmi celles à examiner.

Excavation des accès et pose concomitante d'un revêtement La stabilité mécanique des accès d'une installation souterraine devant être assurée jusqu'à leur fermeture complète, les parois sont pourvues d'un revêtement qui assure leur stabilité et, là où c'est nécessaire, leur étanchéité à l'eau. Sa nature diffère selon le type d'accès, son diamètre et les caractéristiques des formations géologiques traversées. Les interactions chimiques entre ce revêtement et les formations traversées ont une extension spatiale très réduite. Enfin, la mise en œuvre d'un projet de stockage géologique doit, par essence, éviter la dégradation des aquitards par formation d'un contact hydraulique entre aquifères.

Compte tenu de ces considérations et de ce que le diamètre des accès d'une installation souterraine est très faible par rapport à l'extension des formations traversées, ces accès sont considérés n'avoir aucune incidence environnementale significative parmi celles à examiner.

Sans connaître les caractéristiques des formations géologiques traversées, il n'est toutefois pas possible de se prononcer sur l'effet éventuel des infiltrations d'eau à travers les parois des accès sur l'écoulement des eaux souterraines et sur un éventuel abaissement de leur niveau.

Excavation de l'installation souterraine et pose concomitante d'un revêtement L'installation souterraine est construite dans une formation hôte située à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Les caractéristiques de cette dernière ainsi que celles de son environnement géologique doivent contribuer à limiter les mouvements d'eau dans l'installation de stockage. L'excavation se fait à l'aide de techniques industrielles, le cas échéant adaptées.

Comme les accès, les parois des volumes excavés doivent être stables durant la construction et l'exploitation. Elles sont donc généralement pourvues d'un revêtement en béton, sous forme de blocs et/ou de béton projeté (table 8 à la section 9.1.2), destiné à les stabiliser. Les interactions chimiques entre ce revêtement et la formation hôte ont une extension spatiale très réduite. L'infiltration d'eau dans l'installation souterraine pendant les phases de construction et d'exploitation ne pouvant par ailleurs être exclue dans les formations argileuses et les roches cristallines, le revêtement dans ces formations et le colmatage des fissures contribuent également à limiter ces infiltrations.

Compte tenu de ces considérations et de ce que le bon fonctionnement du système de stockage nécessite de préserver au mieux les caractéristiques initiales de la formation hôte lors de l'excavation, l'excavation proprement dite et la pose du revêtement sur les parois excavées sont considérées n'avoir aucune incidence significative sur la formation hôte et son environnement géologique et, plus généralement, elles sont considérées n'avoir aucune incidence environnementale significative parmi celles à examiner. Sans connaître les caractéristiques de la formation hôte et de son environnement géologique toutefois, il n'est pas possible de se prononcer sur l'effet éventuel des infiltrations sur l'écoulement des eaux souterraines et sur un éventuel abaissement de leur niveau.

Remblayage et scellement de l'installation souterraine et de ses accès Le remblayage et le scellement de l'installation souterraine et de ses accès visent notamment à limiter les déformations mécaniques de la formation hôte et des formations géologiques traversées par les accès et à empêcher à terme le transport préférentiel des radionucléides et des contaminants chimiques dans l'installation et ses accès. Les matériaux utilisés sont des matériaux courants, tels que du béton, des matériaux cimentaires, du gravier et de la bentonite ainsi que, dans les concepts types britanniques, les matériaux extraits de la formation hôte lors de la construction, qui sont concassés avant d'être « remis en place ».

Compte tenu de ces considérations et de ce que les matériaux utilisés ne sont pas de nature à perturber significativement les propriétés de l'environnement géologique dans lequel ils sont utilisés, le remblayage et le scellement de l'installation souterraine et de ses accès sont considérés n'avoir aucune incidence environnementale significative parmi celles à examiner.

Traitement des eaux infiltrées dans l'installation souterraine et des lixiviats des matériaux excavés Les eaux infiltrées dans l'installation souterraine et les lixiviats des matériaux excavés sont traités dans des installations adéquates en surface, avant recyclage ou rejet contrôlé des eaux traitées.

La qualité des eaux traitées devant répondre aux normes en vigueur, les activités de traitement sont considérées n'avoir aucune incidence environnementale significative parmi celles à examiner.

Transports Les incidences environnementales des transports vers le site de stockage, qui constituent une activité transversale à toutes les phases d'activités, ne peuvent être évaluées, notamment parce qu'elles dépendent pour une large part des distances à parcourir et du ou des moyens de transport utilisés. Il est probable qu'ils n'ont pas d'incidences environnementales significatives du type de celles à examiner à ce stade. Une première évaluation des nombres indicatifs moyens de transports par camion de déchets radioactifs et de matériaux de construction et de remblayage requis au cours des différentes phases d'activités est toutefois possible, dans la limite des hypothèses émises (table 12).

Table 12 – Nombre indicatif moyen de transports par camion (déchets radioactifs, matières premières nécessaires à la fabrication du béton et des matériaux cimentaires) vers le site de stockage requis au cours des différentes phases d'activités (voir section 9.2.1 pour les hypothèses). Les valeurs relatives aux trois concepts types de l'étude britannique ont été rapportées à l'inventaire belge de référence.

	Construction zones B et C [40 ans]		Exploitation zone B [20 ans]		Exploitation zone C [20 ans]		Fermeture complète [5 ans]	
	Volume total	Transports/jour ouvré	Transports ou vol. total	Transports/jour ouvré	Transports ou vol. total	Transports/jour ouvré	Volume total	Transports/jour ouvré
Déchets								
BE			4 811	1	521	< 1		
Béton								
BE	680 000 m ³	7						
UK	118 000–248 000 m ³	1–3						
Matériaux cimentaires pour les conteneurs de stockage								
BE			41 000 m ³	1	42 000 m ³	1		
UK								
Matériaux cimentaires de remblayage								
BE			140 000 m ³	3	280 000 m ³	6	94 000 m ³	8
UK			0–132 000 m ³	0–3	540 000–1 890 000 m ³	11–38	non disponible	
Total par jour ouvré								
BE		7		5		7		8
UK		1–3		0–3		11–38		

9.32 Evaluation des incidences des activités qui ont a priori au moins une incidence significative et évaluation de l'évolution naturelle du système

L'évaluation des incidences environnementales des activités qui ont a priori au moins une incidence significative et de l'évolution naturelle post-fermeture du système de stockage (table 13) se fait

- en examinant systématiquement chacune de ces activités au regard des différentes incidences à examiner dans le SEA pour la période pré-fermeture (section 6.1.2.1), tout en distinguant autant que possible les différentes incidences sur les eaux de surface, les eaux souterraines et le sol, et
- en examinant l'évolution naturelle post-fermeture du système de stockage sous l'angle des incidences à examiner dans le SEA pour cette période (section 6.1.2.2).

Table 13 – Evaluation des incidences des activités qui ont a priori au moins une incidence environnementale significative et de l'évolution naturelle post-fermeture du système de stockage.

x : l'incidence (négative) est significative ;

(x) : l'incidence se manifeste de manière transitoire ;

¹ bien qu'aucune incidence sur la santé humaine ne soit attendue, ce point est quand même brièvement commenté du point de vue de la radioprotection.

	Familles d'incidences									Incidences individuelles														
	Incidences sur les eaux de surface			Incidences sur les eaux souterraines			Incidences sur le sol																	
	Modification niveau surface	Modification emmagasinement + retenue eaux pluviales	Modification emmagasinement + retenue eaux de surface	Altération colonne eaux de surface	Modification caractéristiques structurales cours d'eau	Modification température eaux de surface	Modification alimentation en eaux souterraines	Dégradation aquitards	Modification écoulement eaux souterraines	Modification niveau ou montée eaux souterraines	Altération eaux souterraines	Modification température eaux souterraines	Modification évaporation	Altération sol	Modification température du sol	Modification capacité d'infiltration du sol	Modification propriétés hydrauliques du sol	Perturbation profil du sol	Modification structure du sol (tassement)	Altération du sous-sol	Modification température du sous-sol	Incidence sur santé humaine	Incidence générale sur faune et flore	
PERIODE PRE-FERMETURE																								
<i>1. Préparation site</i>																								
Préparation classique	x	x																						
Préparation zone d'entreposage matériaux excavés	x	x																						x
<i>2. Construction zone centrale et zone B</i>																								
Construction installations en surface	x	x																						x
Entreposage matériaux excavés sur site	x	x																						x
<i>3. Exploitation zone B et fermeture</i>																								
Post-conditionnement déchets B																								¹
Mise en place déchets B																								¹
<i>4. Construction zone C</i>																								
Entreposage matériaux excavés sur site	x	x																						x
<i>5. Exploitation zone C et fermeture</i>																								
Post-conditionnement déchets C																								¹
Mise en place déchets C												(x)										(x)		¹
<i>6. Fermeture complète</i>																								
PERIODE POST-FERMETURE																								
<i>7. Evolution post-fermeture</i>																								
Evolution naturelle système de stockage																								(x)

Les activités qui ont a priori au moins une incidence environnementale significative sont brièvement décrites ci-dessous, avec une courte évaluation des incidences en question (voir section 9.2.1 pour les hypothèses et valeurs de paramètres dimensionnants utilisées) et des exemples de mesures d'atténuation envisageables, c'est-à-dire de mesures destinées à éviter, réduire et compenser les incidences négatives. Les incidences significatives attendues ne sont pas quantifiables en raison du caractère conceptuel et générique du Plan.

Préparation du site de stockage, y compris la zone d'entreposage des matériaux excavés, construction des installations en surface et entreposage sur site des matériaux excavés

Les activités de préparation classique du site de stockage, de préparation de la zone dédiée à l'entreposage sur site des matériaux excavés, de construction des installations en surface et d'entreposage des matériaux excavés sur site génèrent les mêmes types d'incidences significatives : des incidences sur les eaux de surface, sur le sol, et sur la faune et la flore. Elles sont comparables en nature aux incidences de la préparation d'un terrain industriel classique et d'activités de construction sur ce terrain. Elles sont considérées n'avoir aucune incidence environnementale significative sur les eaux souterraines, sur le sous-sol et sur la santé humaine.

- La délimitation d'un site de stockage d'une superficie d'environ un kilomètre carré par la pose d'une clôture d'enceinte modifie les liaisons écologiques (fragmentation et effet de barrière). Elle a donc une incidence sur la faune.
- L'enlèvement de la végétation sur la superficie, estimée à 0,4 km², nécessaire aux installations en surface, aux routes et aux parkings, et à l'entreposage des matériaux excavés ainsi que les modifications associées d'occupation du sol entraînent la perte d'écotopes (plus petite unité homogène du paysage) et, suivant le type de zone dans laquelle se trouve le site (zone industrielle, zone naturelle, etc.), la perte de niches écologiques. L'enlèvement de la végétation et les modifications d'occupation du sol ont donc une incidence sur la faune et la flore.
- La préparation du site, en particulier en vue de la construction des voiries (routes et parkings) et des installations en surface et en vue de l'entreposage des matériaux excavés, nécessite des travaux de nivellement. Ces travaux peuvent avoir des incidences sur le sol, en particulier sur sa capacité d'infiltration et son profil, et avoir une incidence sur la faune et la flore.
- La construction des voiries et des installations en surface résulte de facto en une imperméabilisation des surfaces correspondantes et à des tassements plus ou moins importants du sol. L'imperméabilisation de la zone d'entreposage des matériaux excavés et l'entreposage de ces matériaux ont les mêmes effets.
 - ▶ L'imperméabilisation d'une partie du site peut réduire l'emmagasinement et la retenue des eaux pluviales et causer leur évacuation accélérée vers les eaux de surface, et donc modifier le niveau de surface. L'imperméabilisation réduit par ailleurs la capacité d'infiltration du sol et modifie ses propriétés hydrauliques.
 - ▶ Les tassements du sol perturbent son profil et modifient sa structure.

Mesures d'atténuation

L'ampleur des incidences environnementales dépend des caractéristiques de la zone où se trouve le site de stockage : elle est a priori moindre dans une zone industrielle que dans une zone naturelle au sol peu dégradé par l'activité humaine. Quel que soit le site cependant, des mesures d'atténuation peuvent être prévues pour limiter cette ampleur. Ainsi,

- l'utilisation pour les parkings d'un revêtement perméable, favorisant l'infiltration des eaux pluviales, et le contrôle du débit de rejet des eaux de ruissellement hors site peuvent limiter les incidences négatives de l'imperméabilisation ;

- les matériaux excavés entreposés sur le site peuvent jouer un rôle d'écran visuel, cachant les installations en surface ; les talus de matériaux auxquels les générations futures donneraient une vocation définitive peuvent être intégrés dans une stratégie paysagère conçue en fonction du lieu et favorable à un redéveloppement de la faune et de la flore ;
- suivant la formation hôte et le concept de stockage et selon les choix d'aménagement du site, les matériaux excavés (supposés pour le SEA être entreposés en totalité sur le site) peuvent en réalité être utilisés au moins en partie comme matériau de remblayage de l'installation souterraine ou peuvent, voire doivent être transportés hors site. Les matériaux excavés cristallins et argileux peuvent en effet être laissés sur site sous forme de talus permanents, être utilisés pour le remblayage de (parties de) l'installation souterraine ou être transportés hors site afin d'être valorisés. En revanche, les matériaux excavés évaporitiques doivent être utilisés pour le remblayage de (parties de) l'installation souterraine ou être transportés hors site, car ils sont solubles.

Post-conditionnement des déchets des catégories B et C et mise en place des déchets de catégorie B dans l'installation de stockage

Le post-conditionnement des déchets des catégories B et C, effectué par hypothèse sur le site de stockage (comme dans le concept type belge), consiste à emballer les déchets conditionnés dans des conteneurs spéciaux, de sorte que les colis de stockage ainsi obtenus possèdent les caractéristiques et propriétés fixées au cours du développement du système de stockage. Le post-conditionnement des déchets de catégorie C, par exemple, permet de contrôler l'environnement chimique de ces déchets.

Les opérations de post-conditionnement et les opérations de mise en place des déchets post-conditionnés dans l'installation de stockage n'ont aucune incidence environnementale significative parmi les incidences à examiner. L'incidence sur la santé humaine, en particulier, est jugée négligeable. En effet

- les opérations de post-conditionnement sont effectuées à distance, de manière à assurer la protection radiologique des travailleurs ; elles ne peuvent entraîner ni rejets radioactifs liquides, ni rejets radioactifs gazeux ;
- les opérations de manutention des colis de stockage n'exposent pas les travailleurs aux rayonnements ionisants, soit parce que ces colis ont une fonction de blindage (concept type belge), soit parce qu'elles sont effectuées à distance.

Ces affirmations devront être démontrées dans le dossier de sûreté de l'installation de post-conditionnement et dans celui de l'installation de stockage, sur la base des procédures prévues pour les phases d'exploitation.

Mise en place des déchets de catégorie C dans l'installation de stockage

La mise en place des déchets de catégorie C dans l'installation de stockage implique des opérations du même type que la mise en place des déchets de catégorie B et n'a pas non plus d'incidences significatives parmi celles à évaluer, mis à part des incidences dues au caractère chauffant des déchets de catégorie C.

La chaleur émise par les déchets de catégorie C entraîne une augmentation progressive et temporaire de la température de l'installation souterraine, de la formation hôte et de son environnement, et ce dès la phase d'exploitation. Cette augmentation de température, évaluée dans le dossier de sûreté, doit être limitée pour que la température des eaux souterraines ne dépasse pas la limite légale autorisée et que la capacité de confinement et d'isolation du système ne soit pas affectée.

Les températures maximales dans les différentes barrières — qui diffèrent suivant les matériaux utilisés pour les barrières ouvragées et le type de formation hôte — peuvent être

limitées notamment en augmentant la durée d'entreposage temporaire des déchets, et donc leur durée de refroidissement, et/ou en augmentant la distance entre colis de stockage en galerie de stockage et/ou en augmentant la distance entre galeries de stockage.

Evolution naturelle post-fermeture du système de stockage

Une fois fermé, le système de stockage peut remplir son objectif, à savoir assurer la protection de l'homme et de l'environnement de façon passive. Aucune action humaine n'est plus requise et aucune incidence significative n'est attendue en surface. Une augmentation temporaire de la température du sous-sol et des eaux souterraines, ainsi qu'une altération d'une partie du sous-sol sont toutefois inévitables.

Deux phases peuvent être distinguées dans la période post-fermeture : les quelques milliers d'années durant lesquelles les déchets de catégorie C émettent de la chaleur et la période qui suit.

- La chaleur émise par les déchets de catégorie C entraîne une augmentation progressive et temporaire de la température de l'installation souterraine, de la formation hôte et de son environnement. Elle peut aussi entraîner une dilatation du sous-sol et l'élévation lente et temporaire, après quelques milliers d'années, de la surface du sol de quelques centimètres ainsi qu'une augmentation faible et temporaire de la température du sol et des eaux de surface. Ces différents effets, qui seront évalués à un stade ultérieur de l'évaluation par étapes des incidences environnementales, peuvent le cas échéant être limités par une conception adéquate du stockage (voir ci-dessus, sous *Mise en place des déchets de catégorie C dans l'installation de stockage*).
- L'évolution naturelle attendue du système de stockage après sa fermeture complète se fait selon les mêmes grandes lignes quels que soient le concept et la formation hôte. Les radionucléides — dont la radioactivité décroît avec le temps — et les contaminants chimiques sont confinés, retardés et isolés pendant une très longue période d'abord par un ensemble de barrières ouvragées spécialement conçues puis, après la lente dégradation de ces barrières, par la formation hôte. A plus long terme encore, de faibles concentrations de radionucléides et de contaminants chimiques peuvent migrer hors de la formation hôte, vers les autres couches géologiques et la biosphère.

L'évolution naturelle attendue du système de stockage est décrite dans le scénario dit « de référence », développé dans le cadre du dossier de sûreté. Il doit démontrer de façon convaincante que le système de stockage fermé respecte les normes de sûreté et protégera ainsi en toutes circonstances et aussi longtemps que nécessaire l'homme et l'environnement des risques que présentent les déchets. Ce scénario constitue une représentation *enveloppe* de plusieurs évolutions possibles du système, dont son évolution la plus attendue, en fonction du temps et de l'espace. Les incertitudes liées au scénario de référence sont évaluées, ce qui peut conduire à l'élaboration d'autres scénarios (voir aussi section 11.1.1 relative à la robustesse).

L'évolution naturelle du système de stockage à long terme a comme principale incidence environnementale une altération de la formation hôte, autrement dit une altération d'une partie du sous-sol profond. Cette altération résulte du relâchement de radionucléides et de contaminants chimiques dans la formation hôte, après que les barrières ouvragées ont cessé d'assurer leur fonction de confinement. Ce relâchement fait lui-même partie de l'évolution naturelle du système de stockage et doit être évalué dans le dossier de sûreté. Les incidences du relâchement de radionucléides et de contaminants chimiques sur les autres parties du sous-sol et sur les eaux souterraines doivent par contre — et c'est une contrainte de conception des systèmes de stockage — être négligeables. Le dossier de sûreté doit démontrer de façon convaincante que la quantité de radionucléides qui finit par être relâchée dans les autres parties du sous-sol est du même ordre que celle qui y est naturellement déjà présente et que la concentration en contaminants chimiques relâchés est en-deçà des normes autorisées. A fortiori, les

incidences du relâchement, à très long terme, des radionucléides et des contaminants chimiques dans la biosphère doivent être négligeables.

Compte tenu de ces considérations, la présence d'un stockage géologique n'a pas d'incidence sur la santé humaine. Le respect des règles et limites imposées par le cadre réglementaire de radioprotection et de protection de l'environnement assurera que les incidences seront très faibles et en tout cas négligeables par rapport aux niveaux d'exposition moyens, en particulier radiologique, de la population.

9.4 Evaluation des incidences environnementales d'une augmentation de l'inventaire de référence

Les incidences environnementales attendues d'une augmentation de l'inventaire de référence sont essentiellement *de mêmes natures* que celles attendues pour l'inventaire de référence, indépendamment du fait que les caractéristiques des déchets complémentaires soient comparables ou pas à celles des déchets inclus dans cet inventaire (voir aussi chapitre 11 pour des considérations relatives à la capacité d'une solution de stockage géologique à absorber une modification de l'inventaire de référence). Les nouveaux types de déchets qui seraient inclus dans cet inventaire pourraient toutefois nécessiter des mesures de sûreté opérationnelle spécifiques ainsi que la création de zones de stockage additionnelles dans l'installation souterraine, avec des barrières ouvragées spécifiques, le tout moyennant prise en compte adéquate dans le dossier de sûreté.

Une augmentation de l'inventaire de référence entraînerait une *augmentation de l'ampleur* de certaines incidences directement liées à l'augmentation de la capacité de stockage nécessaire et, en particulier,

- une augmentation de l'empreinte souterraine totale de l'installation de stockage ;
- une augmentation des volumes de matériaux excavés à entreposer en surface, ce qui pourrait augmenter l'empreinte du site de stockage en surface.

Enfin, selon que les activités de construction et d'exploitation seraient intensifiées et/ou réparties sur une plus longue durée et selon les types de déchets, certaines incidences augmenteraient en ampleur et/ou se manifesteraient plus longtemps, en particulier

- les incidences liées à l'augmentation des volumes des matériaux de construction et de remblayage nécessaires, et notamment aux transports nécessaires à l'acheminement des matières premières ;
- les incidences liées à la fabrication du béton et des matériaux cimentaires, et notamment à l'augmentation des quantités d'eau nécessaires ;
- les incidences liées à la charge thermique, en cas d'augmentation de l'inventaire des déchets chauffants.

Le système de stockage serait toutefois encore toujours conçu de manière à assurer la protection de l'homme et de l'environnement aussi longtemps que nécessaire, ce qui devra être argumenté et démontré dans le dossier de sûreté.

9.5 Mesures de suivi ou monitoring

En application de la loi du 3 juin 2014 transposant la directive 2011/70/Euratom en droit belge [Belgique 2014], la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie devra être complétée ultérieurement par des modalités de monitoring, pour une période à déterminer, et ce monitoring ne pourra affecter la sûreté du système de stockage. Cette disposition rejoint celle de l'article 17 de la loi du 13 février 2006 [Belgique 2006], selon lequel l'ONDRAF devra assurer le suivi des incidences

notables sur l'environnement de la mise en œuvre du Plan afin notamment d'identifier, à un stade précoce, ses incidences négatives imprévues et d'être en mesure d'engager des actions correctrices.

Le programme de monitoring des incidences environnementales de la mise en œuvre du Plan sera développé une fois le site de stockage choisi, conformément aux dispositions du cadre réglementaire en vigueur à ce moment-là et aux bonnes pratiques internationales. Il figurera dans le dossier de demande d'autorisation nucléaire de création et d'exploitation de l'installation de stockage.

Il est toutefois possible d'annoncer certaines grandes lignes du futur programme de monitoring : il comprendra des mesures non radiologiques et radiologiques, sur le site de stockage et en dehors de celui-ci, depuis la sélection du site jusqu'après fermeture complète de l'installation de stockage et de ses accès, tant que les générations futures voudront les poursuivre.

- **De la sélection du site au début de la construction** Le monitoring mis en place à partir de la sélection du site servira à constituer une base de données complète des *conditions initiales* sur le site et dans ses alentours, afin de pouvoir ensuite suivre l'évolution des valeurs de paramètres significatifs des incidences, notamment des incidences sur les eaux de surface et souterraines, le sol et le sous-sol, la diversité biologique, l'air et le niveau sonore. Ce monitoring comprendra des mesures effectuées en surface et dans des forages exploratoires creusés lors du processus de sélection de site et réaménagés pour le monitoring du sous-sol et des eaux souterraines.
- **Période pré-fermeture** Le programme de monitoring sera renforcé et étendu au cours de la période pré-fermeture, de manière à couvrir les installations de surface, l'installation souterraine et ses accès. Le site devra faire l'objet d'une surveillance radiologique spécifique pour vérifier, par exemple, la non contamination de l'air dans les installations nucléaires ainsi que la non contamination des rejets gazeux et liquides.

Le site de stockage sera par ailleurs intégré au programme de surveillance radiologique du territoire de l'AFCN [AFCN 2019]. Ce programme comprend une surveillance globale du territoire, en dehors des zones où s'exerce une activité nucléaire significative, et une surveillance rapprochée autour des sites nucléaires où s'exerce une activité susceptible d'avoir une incidence radiologique sur l'environnement. Il prévoit une série de mesures de niveaux de la radioactivité artificielle et naturelle, comme des mesures de la radioactivité de l'air, des pluies, des eaux de surface et de boisson, des sols, des sédiments de rivières et des produits de la chaîne alimentaire (lait, viandes, poissons, légumes).

- **Période post-fermeture** Bien que non indispensable, le monitoring sera en principe maintenu durant l'évolution naturelle du système de stockage, pendant une période à déterminer par les générations futures. Il sera en principe accompagné d'efforts de transfert de la mémoire de l'emplacement du site de stockage.

9.6 Evaluation des incidences environnementales d'un stockage géologique multinational en galeries

L'incidence environnementale globale d'une solution de stockage géologique multinational — ou partagé — en galeries est, a priori, inférieure à la somme des incidences environnementales des différents stockages géologiques nationaux dont le partenariat multinational permet de se passer. En pratique, la différence entre cette incidence globale et la somme des incidences individuelles dépendra toutefois fortement des données de base du partenariat : nombre de pays partenaires, inventaires respectifs de déchets radioactifs, distances entre le site de stockage partagé dans le pays hôte et les sites d'entreposage temporaire dans les pays exportateurs, etc. (figure 17).

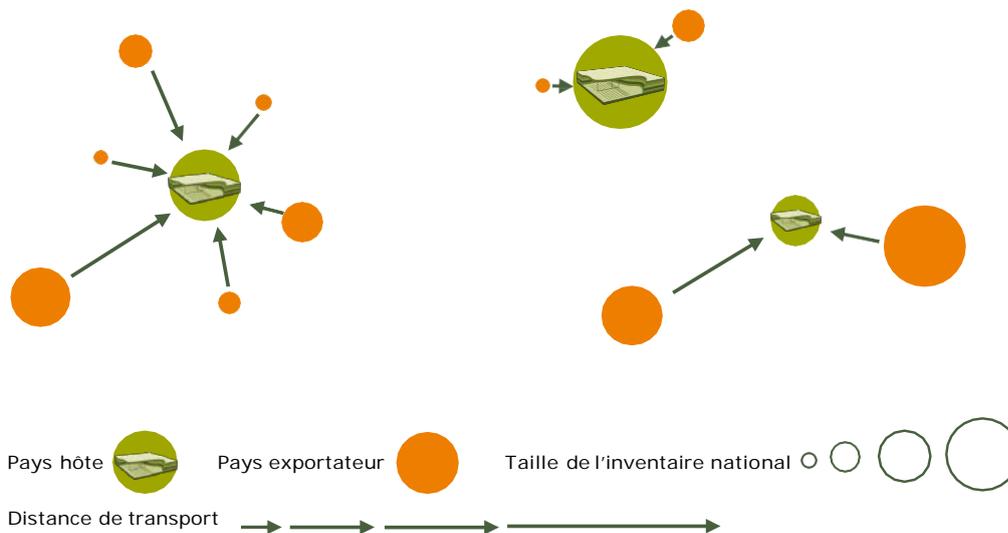


Figure 17 – Représentation schématique de différentes configurations de partenariat possibles dans le cadre de la mise en œuvre d'un stockage partagé.

Bien qu'en l'absence de toute donnée concrète, il soit impossible d'établir le bilan global, au niveau environnemental, d'une solution de stockage partagé par rapport à la somme des bilans individuels des stockages nationaux auxquels elle se substitue, il est possible de raisonner selon le rôle des pays directement concernés par le partenariat : le pays hôte, le ou les pays qui exportent leurs déchets vers le pays hôte, et le ou les éventuels pays de transit des déchets.

Etant donné qu'un stockage géologique partagé en galeries est conceptuellement équivalent à un stockage géologique national en galeries, leurs incidences environnementales sont essentiellement de mêmes natures. L'évaluation descriptive des incidences environnementales du partage d'un stockage par plusieurs pays porte dès lors sur les différences, positives ou négatives, par rapport à la situation où chacun des pays partenaires mettrait sa propre solution de stockage en œuvre. Ces différences se marquent essentiellement au niveau des incidences environnementales classiques. Un stockage géologique partagé devant en effet répondre aux mêmes exigences et normes internationales de sûreté radiologique, et en particulier aux mêmes normes européennes de radioprotection [Conseil européen 2013], que les stockages géologiques nationaux, les installations nucléaires en surface et l'installation souterraine seront conçues et exploitées en fonction de l'inventaire des déchets à gérer, de manière telle que leurs incidences radiologiques restent inférieures aux limites autorisées.

Incidences environnementales pour le pays hôte

Négatives :

- incidences classiques de la construction des infrastructures routières ou ferroviaires nouvelles éventuellement nécessaires ;
- augmentation, en intensité et/ou en durée, des incidences classiques
 - ▶ des transports de déchets ;
 - ▶ de la mise en œuvre de l'ensemble des installations nécessaires au stockage géologique partagé ;
- augmentation possible des risques pour les opérateurs lors de la manutention des déchets, du fait de l'augmentation des volumes.

Positives :

- assainissement d'éventuels sites (radiologiquement) contaminés ou autres actions positives pour l'environnement si une partie des recettes provenant des pays exportateurs y est affectée.

Incidences environnementales pour le ou les pays exportateurs

Positives :

- absence des incidences classiques de la mise en œuvre de l'ensemble des installations nécessaires à un stockage géologique national ;
- réduction des risques environnementaux, en particulier pour les pays de faible superficie, ayant le cas échéant un choix trop restreint de sites et de formations hôtes appropriées, et/ou aux ressources techniques, scientifiques et financières trop limitées et qui seraient dès lors amenés à prolonger l'entreposage de leurs déchets.

Incidences environnementales pour le ou les pays éventuellement traversés

Négatives :

- incidences classiques du transit des déchets.

En conclusion, si la Belgique devenait partie à un accord de partenariat en vue du développement d'une solution de stockage géologique partagé et que cette solution était réalisée, elle connaîtrait une augmentation, ou au contraire une diminution, des incidences environnementales par rapport à une solution nationale de stockage pour ses propres déchets selon qu'elle deviendrait ou non pays hôte pour le stockage partagé.

10 Evaluation des incidences environnementales du stockage géologique en forages profonds

Les travaux relatifs au stockage géologique en forages profonds étant beaucoup moins avancés, au niveau international, que ceux relatifs au stockage géologique en galeries, l'évaluation des incidences environnementales de l'option du stockage géologique en forages profonds est nécessairement plus sommaire que celle du stockage géologique en galeries. Cette évaluation part du postulat — purement théorique, puisque la base de connaissances est peu développée — que le stockage géologique en forages profonds est techniquement faisable et que sa sûreté opérationnelle et à long terme peuvent être démontrées de façon convaincante.

Comme un système de stockage géologique en forages profonds repose sur le même type de principes de conception qu'un système de stockage géologique en galeries, les incidences environnementales significatives attendues du stockage en forages profonds seraient de mêmes natures que celles du stockage en galeries (table 13), mais avec des ampleurs différentes selon les incidences.

Comme pour le stockage géologique en galeries, les incidences de la période pré-fermeture du stockage en forages profonds (période qui s'étend jusqu'à la fermeture du dernier forage et à la restitution du site à un état moins ou non bâti) seraient essentiellement celles liées à la préparation du site de stockage, y compris la préparation de la zone d'entreposage des matériaux excavés, à la construction des installations en surface, et à l'entreposage des matériaux excavés sur le site de stockage. Bien qu'il n'est pas possible de décrire davantage ces incidences pour les forages profonds que pour le stockage en galeries, il est possible de fournir, à titre préliminaire et purement indicatif, une estimation de l'empreinte au sol du site de stockage et du volume total des matériaux excavés. Cette estimation repose sur un concept type de stockage en forages profonds ultra-simplifié. Toute autre approche serait purement spéculative. En effet, la Belgique n'a pas d'expérience propre en matière de développement du stockage géologique en forages profonds et les informations de la littérature sont hétérogènes et encore peu validées au niveau international.

Le concept type ultra-simplifié de stockage géologique en forages profonds — qui fait l'hypothèse actuellement non fondée que cette option de gestion est à la fois faisable et sûre — peut être décrit comme suit (voir figure 8 à la section 3.2.1) :

- les forages sont regroupés sur un seul site de stockage ;
- les forages sont des forages verticaux de 5 kilomètres de profondeur ;
- la hauteur de stockage dans chaque forage est de 2 kilomètres, soit une hauteur utile de 1,9 kilomètre pour tenir compte de la hauteur cumulée des scellements intermédiaires dans la zone de stockage ;
- les forages ont un diamètre compris entre 0,7 m et 1,5 m ;
- la hauteur totale de forage nécessaire au stockage de l'ensemble des déchets de l'inventaire de référence est calculée à partir des longueurs des différents types de colis de déchets existants et prévus, sans tenir compte des questions de diamètre ;
- les colis de déchets sont placés dans des emballages de stockage non spécifiés et dont il n'est pas tenu compte pour le calcul de la hauteur de forage nécessaire au stockage des déchets ;
- une fois la zone de stockage d'un forage remplie, celui-ci est remblayé et scellé par des matériaux du type de ceux utilisés pour le remblayage et le scellement des accès des installations de stockage en galeries ;
- les forages sont distants les uns des autres de 0,2 km.

Sur ces bases, l'empreinte du site de stockage serait d'environ 1,5 km². Le stockage des déchets de catégorie B nécessiterait le creusement de 17 forages profonds et celui des déchets de catégorie C nécessiterait le creusement de 20 forages profonds. Le volume total à excaver serait compris entre 70 000 m³ et 330 000 m³ et le volume du remblayage serait compris entre 42 000 m³ et 200 000 m³.

11 Robustesse et flexibilité d'une solution de stockage géologique

La robustesse et la flexibilité des solutions de stockage géologique pour les déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie sont deux de leurs caractéristiques essentielles. Elles sont démontrables pour le stockage géologique en galeries (section 11.1), alors qu'elles ne sont (encore) que d'ordre théorique pour le stockage géologique en forages profonds (section 11.2).

11.1 Stockage géologique en galeries

Selon le consensus international, le stockage géologique en galeries est robuste (section 11.1.1), autrement dit on peut démontrer que sa capacité à assurer la protection de l'homme et de l'environnement tant que nécessaire n'est pas affectée de façon inacceptable par différents types d'évolutions, grâce notamment à la redondance des différentes barrières ouvragées et naturelles, et peut être flexible (section 11.1.2), c'est-à-dire capable d'absorber des modifications de l'inventaire de référence des déchets.

11.1.1 Robustesse

Un système de stockage géologique en galeries bien conçu — en ce compris le choix de la formation hôte et de la localisation du stockage dans cette formation — et bien mis en œuvre est robuste par rapport aux évolutions qui se produiront durant la période post-fermeture. C'est un des aspects que doit démontrer le dossier de sûreté qui doit accompagner toute demande d'autorisation nucléaire de création et d'exploitation d'une installation de stockage. Les méthodes et connaissances pour effectuer ce type de démonstrations existent tant en Belgique qu'au niveau international et font l'objet de collaborations et d'évaluations permanentes. Les évolutions considérées sont des types suivants :

- *évolutions naturelles* : le choix d'une formation hôte adéquate et d'une localisation appropriée est important pour pouvoir placer les déchets dans un environnement stable (par exemple faiblement sismique) et hors d'atteinte des évolutions naturelles en surface (par exemple réchauffement climatique, glaciation ou inondation) ;
- *évolutions du système différentes de son évolution attendue* : le choix de la formation hôte et des barrières ouvragées constitue un système multibarrière. Les différentes barrières fonctionnent de manière complémentaire et indépendante, de sorte que le fonctionnement du système n'est pas affecté de manière inacceptable par des évolutions telles que l'affaiblissement ou la défaillance prématurée d'une barrière ouvragée ;
- *événements externes non naturels* : le choix d'une localisation appropriée (profondeur suffisante, faible risque de situation de conflit pour l'utilisation du sous-sol) joue un rôle important pour ce qui est de placer les déchets hors d'atteinte des perturbations externes non naturelles en surface (par exemple explosion ou chute d'un avion) ; si la mémoire, à maintenir, de l'emplacement du stockage est néanmoins perdue, une perturbation externe non naturelle en profondeur de type forage à travers l'installation de stockage ne peut toutefois être exclue, mais est extrêmement peu probable.

Enfin, comme un stockage géologique ne nécessite pas d'interventions humaines après sa fermeture complète pour être sûr, il n'est *pas sensible aux évolutions sociétales* et donc à des risques tels que la dégradation du suivi réglementaire, la disparition de l'exploitant, l'érosion des connaissances, l'assèchement du financement ou même une guerre.

11.1.2 Flexibilité

Une solution de stockage géologique en galeries est flexible, que ce soit par rapport aux caractéristiques radiologiques des déchets à gérer, aux volumes des déchets ou à la taille des colis de stockage (voir aussi table 14 pour une analyse plus détaillée) :

- *caractéristiques radiologiques* : les déchets qui pourraient s'ajouter à l'inventaire de référence (section 2.4) sont de types relativement similaires à des déchets qui appartiennent à cet inventaire ou seraient rendus compatibles avec la solution de stockage développée pour l'inventaire de référence ; un stockage géologique peut par ailleurs si nécessaire être conçu et exploité de manière telle que des déchets de caractéristiques différentes soient placés dans des zones de stockage distinctes, éventuellement de façon séquentielle ;
- *volumes* : moyennant choix adéquat de la formation hôte et de la localisation de l'installation de stockage dans cette formation, la continuité latérale de la formation serait suffisante pour augmenter la capacité du stockage selon les besoins ;
- *taille des colis de stockage* : les accès aux zones de stockage d'un stockage géologique ont plusieurs mètres de diamètre, suffisant pour la manutention des colis de déchets post-conditionnés ; inversement, les dimensions des colis de stockage de nouveaux types de déchets peuvent dans une certaine mesure être fixées en fonction des caractéristiques dimensionnelles de l'installation et de ses équipements.

Table 14 – Analyse de la flexibilité d'une solution de stockage géologique en galeries.

Flexibilité par rapport		
aux caractéristiques radiologiques des déchets ?	aux volumes de déchets ?	à la taille des colis de stockage ?
Déchets de catégorie A qui ne pourraient être mis en stockage en surface		
OK Ces déchets seraient relativement comparables à certains déchets de catégorie B.	OK Pour fixer les idées, le transfert de 5 %, soit 2 500 m ³ , du volume estimé des déchets de catégorie A vers la catégorie B correspondrait à une augmentation de 25 % du volume estimé des déchets de catégorie B (environ 11 000 m ³ conditionnés).	OK
Déchets radifères d'Umicore (longue durée de vie)		
OK Ces déchets ont des caractéristiques radiologiques comparables à celles de certains déchets de catégorie B (notamment des déchets radifères). ! L'augmentation substantielle du risque de contamination au gaz radon imposerait des mesures spécifiques au niveau opérationnel.	OK Le volume éventuel (jusqu'à environ 10 000 m ³ , à traiter et conditionner) représenterait une augmentation substantielle du volume estimé des déchets de catégorie B.	OK
Substances naturellement radioactives (longue durée de vie)		
<i>comme pour les déchets radifères d'Umicore</i>	OK Le volume éventuel (quelques centaines de m ³ , à traiter et conditionner) ne représenterait qu'une faible augmentation du volume estimé des déchets de catégorie B.	OK
Déchets issus d'installations nucléaires futures		
! Ces déchets, actuellement inconnus, devraient le cas échéant être rendus compatibles, par un traitement et un conditionnement adéquats, avec le stockage géologique.	OK	OK
Déchets des catégories B et C issus d'une éventuelle nouvelle prolongation de centrales nucléaires		
OK Ces déchets auraient des caractéristiques radiologiques similaires à celles des déchets existants.	OK	OK

11.2 Stockage géologique en forages profonds

Compte tenu de ce que les concepts de stockage géologique en forages profonds restent nettement moins matures que les concepts de stockage géologique en galeries, tant sous l'angle des technologies à mettre en œuvre que de la capacité à en démontrer la sûreté opérationnelle et à long terme, la robustesse et la flexibilité de cette option de gestion ne sont encore que théoriques.

En théorie donc, un système de stockage géologique en forages profonds est robuste, car il repose sur le même type de principes de conception qu'un système de stockage géologique en galeries, mais la possibilité de démontrer cette robustesse n'est pas acquise.

En théorie aussi, une solution de stockage géologique en forages profonds est flexible, mais moins qu'une solution de stockage géologique en galeries :

- *par rapport aux caractéristiques radiologiques des déchets* : la flexibilité est identique, pour les mêmes raisons (table 14) ;
- *par rapport aux volumes de déchets* : la flexibilité est théoriquement totale, puisqu'il suffit d'augmenter le nombre de forages en fonction des volumes, mais contrairement au cas du stockage en galeries, l'empreinte en surface s'en trouve augmentée ; dans les faits toutefois, aucun pays n'a décidé de stocker en forages profonds un inventaire de plusieurs milliers de mètres cubes de déchets ;
- *par rapport à la taille des colis de stockage* : la flexibilité est limitée par le diamètre atteignable pour les forages aux profondeurs souhaitées ainsi que par la capacité à mettre des colis très lourds en place à de grandes profondeurs, tout en se prémunissant du risque de chute ou de coincement de ces colis.

12 Considérations finales et recommandations

La solution proposée par l'ONDRAF pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, à savoir un système de stockage géologique sur le territoire belge, vise à assurer en toutes circonstances la protection de l'homme et de l'environnement contre les risques que ces déchets présentent, en assurant leur confinement et en les isolant de la biosphère aussi longtemps que nécessaire, sans requérir d'interventions humaines. En raison du caractère conceptuel et générique de cette solution — qui constitue un plan — l'évaluation des incidences environnementales dont elle doit faire l'objet est essentiellement descriptive. Elle a été limitée aux incidences qui paraissent les plus pertinentes à ce stade. Elle sera suivie d'autres évaluations, plus spécifiques et plus détaillées, des incidences environnementales du stockage géologique tel qu'il sera proposé de le concrétiser par un ou plusieurs projets. A terme, les incidences environnementales du ou des projets de stockage proposés auront toutes été évaluées en détail.

Comme l'ONDRAF ne connaît ni l'environnement — de surface et souterrain — dans lequel le Plan sera réalisé, ni l'inventaire précis des déchets concernés *in fine*, ni le projet technique à mettre en œuvre ni, a fortiori, ses modalités d'exécution, il a identifié les activités de mise en œuvre du Plan qui paraissent les plus susceptibles d'avoir des incidences significatives parmi celles à examiner, mais n'est pas en mesure à ce stade de commenter les incidences potentielles identifiées autrement que de façon descriptive et qualitative ni d'émettre d'appréciations quant à leur ampleur et leur extension.

L'évaluation des incidences environnementales du stockage géologique en galeries s'est appuyée sur des concepts types de stockage couvrant les trois types de formations hôtes les plus fréquemment considérées dans le monde, à savoir les évaporites, les roches cristallines et les formations argileuses. Elle a supposé que les déchets étaient placés dans une installation unique, sur un seul site, que toutes les activités de mise en œuvre se déroulaient de la manière prévue et que les conditions contextuelles, par exemple de suivi réglementaire et de financement, nécessaires pour mener à bien un tel projet sur une durée de l'ordre du siècle se maintenaient dans le temps. Tout autre scénario serait purement spéculatif. L'évaluation a par ailleurs été limitée aux incidences sur les eaux de surface et souterraines, sur le sol et le sous-sol, ainsi que sur la santé humaine et la faune et la flore.

Les activités de mise en œuvre du stockage géologique en galeries qui paraissent les plus susceptibles d'avoir des incidences significatives parmi celles examinées sont la préparation du site de stockage, dont l'empreinte au sol serait de l'ordre du kilomètre carré, et la construction des installations en surface, ainsi que l'entreposage sur site des matériaux excavés lors de la construction de l'installation souterraine et de ses accès. Les principales incidences concerneraient les eaux de surface et le sol ainsi que la faune et la flore. Il n'est pas possible, à ce stade, de se prononcer sur l'effet sur les eaux de surface ou souterraines de l'utilisation d'eau pour l'exploitation d'une centrale à béton sur le site de stockage ni sur l'effet sur les eaux souterraines de l'infiltration d'eau dans l'installation souterraine.

Les activités impliquant des colis de déchets radioactifs, avant fermeture complète de l'installation de stockage, n'ont aucune incidence environnementale significative parmi les incidences à examiner et leurs incidences sur la santé humaine, en particulier, sont jugées négligeables. Ceci devra être démontré dans les dossiers de sûreté, sur la base des procédures prévues pour les phases d'exploitation.

Enfin, les incidences des transports dépendront pour une large part des distances à parcourir et des moyens de transport utilisés.

L'évolution naturelle post-fermeture du système de stockage conduira, dans les premiers milliers d'années, à une augmentation temporaire de la température des eaux souterraines et du sous-sol, et à plus long terme à une altération de la formation hôte suite au relâchement

lent et progressif de radionucléides et de contaminants chimiques hors de l'installation de stockage. Tout système de stockage doit toutefois être conçu de manière à éviter, en toutes circonstances, grâce au fonctionnement des barrières ouvragées et naturelles et à la décroissance radioactive, toute incidence significative du relâchement de ces substances sur les autres parties du sous-sol, sur les eaux souterraines et, a fortiori, sur la biosphère : l'incidence attendue d'un stockage géologique sur la santé humaine doit être nulle ou négligeable. Le respect des règles et limites imposées par le cadre réglementaire de radioprotection et de protection de l'environnement assurera que les incidences seront très faibles et en tout cas négligeables par rapport aux niveaux d'exposition moyens, en particulier radiologique, de la population. Ceci devra être démontré de manière convaincante dans le dossier de sûreté.

L'évaluation des incidences environnementales s'est limitée à quelques considérations générales pour ce qui est du stockage géologique en forages profonds, étant donné que ce type de stockage n'a jamais été étudié en Belgique et que l'hétérogénéité et le manque de redondance des informations contenues dans la littérature ne permettent pas de construire une évaluation suffisamment fondée. Tout au plus peut-on dire que les incidences environnementales du stockage en forages profonds seraient de mêmes natures que celles du stockage en galeries, avec des différences d'ampleur selon les incidences.

Comme le Plan poursuit un objectif de protection de l'homme et de l'environnement, ses incidences environnementales doivent être vues comme un effet collatéral inévitable de sa mise en œuvre, qu'il conviendra de minimiser et d'atténuer autant que possible. Cette mise en œuvre sera subordonnée à la délivrance d'autorisations nucléaires et non nucléaires confirmant que les normes en vigueur sont satisfaites. La non mise en œuvre du Plan, par contre, aura tôt ou tard des conséquences négatives : la situation actuelle d'entreposage temporaire sûr en surface finira par basculer vers une situation non sûre, du fait de l'impossibilité de maintenir à l'infini une gestion active sûre. Ceci aura des conséquences graves pour l'homme et l'environnement.

Dès lors que, selon l'ONDRAF, les résultats de l'évaluation des incidences environnementales du Plan ne sont pas de nature à influencer sur sa teneur, et donc sur l'adoption d'un système de stockage géologique sur le territoire belge comme base de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie, l'ONDRAF synthétise ci-après quelques messages clés contenus dans le SEA, qui dépassent les considérations purement environnementales mais qui sous-tendent sa proposition, et les complètent.

Il n'existe pas de solution de substitution raisonnable au stockage géologique

Selon le consensus international parmi les gestionnaires de déchets radioactifs et les autorités de sûreté, ainsi qu'au sein des organisations internationales, il n'existe pas de solution de substitution raisonnable au stockage géologique pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. C'est la solution qui a été choisie par tous les pays qui ont une politique nationale pour la gestion à long terme de ces déchets. Elle est étayée par 50 ans de recherche, développement et démonstration aux niveaux international et national. Selon l'ONDRAF, les recherches menées en Belgique jusqu'à présent indiquent qu'il serait possible de réaliser sur le territoire belge une solution de stockage géologique susceptible d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement contre les risques présentés par les déchets.

L'entreposage de longue durée et l'entreposage perpétuel contreviennent, en tant que solutions de gestion à long terme, aux dispositions de la directive 2011/70/Euratom et sont jugés non recevables par l'AFCN et un entreposage transformable en stockage imposerait de concevoir d'emblée un système de stockage tel que les déchets puissent être récupérés pendant un certain temps, sans que les choix faits pour permettre cette récupération puissent nuire à la sûreté et à la sécurité.

Par ailleurs, les technologies avancées de séparation-transmutation ne sont pas des technologies de gestion à long terme des déchets radioactifs et n'élimineraient pas le besoin d'une solution de stockage géologique, ne serait-ce que parce qu'elles ne sont pas applicables aux déchets qui existent déjà. A supposer qu'elles puissent être mises en œuvre à l'échelle industrielle, dans plusieurs décennies au mieux, elles requièrent le recours à une filière nucléaire énergétique avancée avec retraitement, en Belgique ou à l'étranger. Cette filière produira elle-même des déchets de longue durée de vie pendant au moins un siècle.

Une solution de stockage géologique sur le territoire belge, par contre, constituerait la meilleure façon d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement contre les risques que présentent les déchets, et ce de manière robuste et intrinsèquement passive.

- *sur le plan légal et réglementaire* Le stockage géologique répond, au niveau des principes, aux exigences générales du cadre légal et réglementaire de la gestion de déchets radioactifs et il peut être conçu et mis en œuvre de manière à satisfaire aux exigences du cadre légal et réglementaire de radioprotection et de protection de l'environnement.
- *sur le plan scientifique et technique* Il y a une confiance suffisante dans le fait que la sûreté du stockage géologique peut être démontrée et qu'il peut être mis en œuvre par des techniques industrielles.
- *sur le plan éthique et sociétal* Le stockage géologique minimise les charges reportées sur les générations futures, en leur évitant en particulier la responsabilité de devoir prendre les décisions fondamentales en matière de gestion à long terme des déchets et d'assurer le financement correspondant.
- *sur le plan économique et financier* Le stockage géologique peut être financé suivant le principe dit du « pollueur payeur », selon lequel les coûts de la gestion des déchets radioactifs doivent être supportés par ceux qui les ont produits.
- *sur le plan de la flexibilité* Le stockage géologique peut s'appliquer aux déchets de l'inventaire complémentaire potentiel, en plus d'être applicable à l'ensemble des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie de l'inventaire de référence. Ces derniers sont, pour leur plus grande part, inévitables : ils existent déjà, et sont entreposés sur le site de l'ONDRAF à Dessel exploité par sa filiale industrielle Belgoprocess, ou sont « en devenir », essentiellement sous la forme de combustible présent sur les sites des centrales nucléaires ou de parties de bâtiments et installations dans lesquels prennent place des activités qui mettent en jeu la radioactivité.

Une solution de stockage géologique n'est vulnérable aux incertitudes contextuelles que durant la période pré-fermeture. Sa mise en œuvre suppose donc que soient prises toutes les mesures nécessaires pour limiter cette vulnérabilité (maintien des équipes de projet, transfert de l'expertise et des connaissances entre générations successives d'équipes, suffisance et disponibilité du financement, etc.).

Le stockage géologique sur le territoire belge doit être adopté sans délai au niveau fédéral en tant que base de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie

L'ONDRAF recommande que la Belgique *adopte sans délai le stockage géologique sur le territoire belge comme base de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie* [ONDRAF 2017, 2018a, 2019e]. Tant que cette décision n'est pas prise :

- *sur le plan légal et réglementaire* La Belgique reste en infraction par rapport à certaines obligations, en particulier la disposition de la directive européenne 2011/70/Euratom qui oblige les Etats membres à avoir une politique nationale pour la gestion à long terme de leurs déchets radioactifs. Sans une telle politique, l'ONDRAF n'est pas en mesure de prendre les initiatives nécessaires pour progressivement concrétiser une solution de

stockage et pouvoir ainsi remplir l'intégralité de sa mission de service public de gestion des déchets radioactifs.

- *sur le plan scientifique et technique* Les travaux de recherche, développement et démonstration de l'ONDRAF en matière de gestion à long terme ne peuvent être organisés pour servir une politique de gestion clairement identifiée : ils doivent donc continuer à reposer entièrement sur des hypothèses de travail. Les moyens, financiers notamment, pourraient dès lors se réduire du fait de l'absence de perspectives. Dans ce cas, l'expertise et le savoir-faire accumulés au niveau national, en particulier en matière de connaissance des déchets et d'évaluation des performances d'un système de stockage, pourraient connaître des ruptures de continuité et dès lors se dégrader progressivement. Les acteurs concernés devraient donc à terme consentir des efforts considérables (financiers, humains, en temps, etc.) pour redévelopper les acquis nécessaires à la mise en œuvre d'un système de stockage géologique sûr. La gestion des déchets en amont de leur stockage géologique est par ailleurs rendue plus difficile tant que les principales caractéristiques du système de stockage ne sont pas connues. Ainsi, il est difficile d'opérer des choix optimaux en termes de réemballage/reconditionnement des déchets qui présentent des signes de dégradation en entreposage sans connaître leur destination finale.
- *sur le plan éthique et sociétal* La Belgique n'applique pas les principes éthiques d'équité intergénérationnelle en ne minimisant pas les charges, principalement décisionnelles, financières, de développement et de mise en œuvre, reportées sur les générations futures et en prolongeant la situation d'incertitude dans laquelle se trouvent les communes sur le territoire desquelles les déchets radioactifs et le combustible usé sont actuellement entreposés à titre temporaire.

Dans son deuxième rapport sur l'avancement de la mise en œuvre de la directive 2011/70/Euratom [Commission européenne 2019], la Commission écrit : « *Les Etats membres doivent intensifier leur engagement dans la mise au point de solutions à long terme concernant la gestion des déchets de moyenne et de haute activité et le combustible usé, y compris en entreprenant dès que possible des activités de recherche, de développement et de démonstration afin d'éviter de transmettre une charge indue aux générations futures. Il convient de prendre toutes les mesures nécessaires pour garantir, aux niveaux politique et technique, qu'aucun retard excessif ne se produise ultérieurement dans la mise en œuvre des projets. C'est pourquoi tous les Etats membres devraient optimiser la planification, engager des ressources adéquates, réaliser les travaux de recherche et les actions de formation nécessaires et faire participer le public et les autres parties prenantes afin d'accélérer la mise en œuvre.* »

- *sur le plan économique et financier*
 - ▶ L'ONDRAF reste dans l'impossibilité de faire reposer ses estimations du coût de la gestion à long terme des déchets sur une solution technique inscrite dans une politique nationale. Adopter le stockage géologique sur le territoire belge comme base de la politique nationale de gestion à long terme constituerait la première d'une série d'étapes décisionnelles nécessaires pour parvenir à une estimation progressivement plus précise de ce coût et une application progressivement plus exacte du principe du pollueur payeur.
 - ▶ La Belgique fait face à un risque croissant de création de nouveaux coûts. En effet, aux coûts de la gestion des déchets s'ajouteront les coûts résultant directement du fait que l'entreposage actuel, prévu comme temporaire (la situation de référence), se prolonge au-delà des échéances estimées (coût de la rénovation ou du remplacement de bâtiments d'entreposage, coût du réemballage/reconditionnement des déchets qui, avec le temps, présentent des signes de dégradation en entreposage, etc.).

Si le Plan n'est pas mis en œuvre, et donc si la problématique environnementale que constituent les déchets à long terme ne trouve pas de solution définitive sous la forme d'une

mise en stockage, la situation actuelle d'entreposage temporaire en surface, qui peut rester sûre tant qu'elle fait l'objet d'une gestion active adéquate, finira par basculer — à un moment impossible à prévoir — vers une situation où la protection de l'homme et de l'environnement n'est plus assurée, du fait d'un contexte de gestion dégradé.

Postposer l'adoption de la base de la politique nationale ne permettra pas de prendre une meilleure décision

Adopter la base de la politique nationale de gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie n'entraînera pas sa mise en œuvre immédiate sur le terrain. Les quelques dizaines d'années qui seront nécessaires pour mettre en œuvre les processus (de concertation sociétale, décisionnels, réglementaires, etc.) requis pour entamer la construction de l'installation de stockage géologique, compléter les connaissances scientifiques et techniques nécessaires en fonction des choix faits et préparer les phases de construction et d'exploitation permettront de facto de prendre en compte les avancées scientifiques et techniques pertinentes ainsi que des demandes sociétales. Postposer l'adoption de la base de la politique nationale *ne permettra donc pas de prendre une meilleure décision* : la décision à prendre à ce stade est purement stratégique et ne constitue que le premier — mais indispensable — jalon d'un processus décisionnel participatif par étapes encore très long, qui reste à établir. Il devra conduire à préciser où, comment et quand la solution de stockage sera mise en œuvre. Sans cette première décision, l'ONDRAF n'est pas en mesure de préparer la mise en œuvre de cette solution dont le principe fait consensus au niveau international.

Le stockage géologique en forages profonds pourrait constituer une solution de gestion avantageuse pour des quantités limitées de déchets dont on voudrait rendre la récupération particulièrement difficile

A ce stade, la décision demandée concernant la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie se limite à l'adoption de la solution du stockage géologique (sur le territoire belge), sans précisions quant au rôle potentiel de l'option du stockage géologique en forages profonds par rapport à celle du stockage géologique en galeries. Il est toutefois hautement probable que le stockage géologique en forages profonds ne constitue qu'un complément éventuel au stockage géologique en galeries et non une option de substitution à part entière.

En effet, même dans l'hypothèse où le sous-sol belge recèlerait une ou plusieurs formations hôtes potentiellement adéquates pour le stockage en forages profonds et où un programme de recherche, développement et démonstration entièrement nouveau, dédié à ce type de stockage, serait mis sur pied et livrerait des résultats favorables, il est très peu probable qu'il soit jamais possible de mettre en forages profonds une grande partie des colis existants et prévus de déchets conditionnés de faible et moyenne activité et de longue durée de vie (déchets de catégorie B), dont les dimensions excèdent les possibilités technologiques actuelles et leurs développements envisageables. Il n'est par ailleurs actuellement pas possible d'affirmer que les colis de stockage pourraient être récupérés en cas de chute ou de coincement au-dessus de la zone de stockage, ce qui pose un problème de sûreté. Il n'est a fortiori pas possible d'affirmer qu'ils pourraient être récupérés après fermeture complète des forages.

Le stockage géologique en forages profonds ne constitue donc pas, actuellement, une option de gestion à long terme applicable à l'ensemble de l'inventaire de référence et pourrait ne jamais l'être. Il pourrait par contre constituer une solution de gestion à long terme avantageuse pour des quantités limitées de déchets qu'on souhaiterait ne jamais pouvoir récupérer, par exemple pour des raisons de non-prolifération.

Les incertitudes relatives aux possibilités de mise en œuvre adéquate de la technologie du stockage géologique en forages profonds ne constituent pas un obstacle au choix du principe du stockage géologique en tant que base de la politique nationale.

Une décision politique en faveur de la voie du stockage géologique partagé ne dispenserait pas la Belgique de poursuivre son programme national de stockage géologique et n'offrirait aucune garantie d'aboutissement plus rapide

Bien que permise sous certaines conditions par le cadre légal et réglementaire international et européen, la solution du stockage géologique multinational, ou partagé, n'est pas la solution de référence que ce cadre préconise. La Convention commune de l'AIEA (1997) et la directive 2011/70/Euratom disposent en effet que les déchets radioactifs doivent en principe être stockés dans l'Etat où ils ont été produits. La loi du 8 août 1980, telle que modifiée, dispose que « *les déchets radioactifs produits sur le territoire belge y sont stockés* », sauf si certaines conditions sont remplies.

Conformément aux dispositions du cadre légal et réglementaire, l'ONDRAF propose une solution nationale, à mettre en œuvre sur le territoire national, pour la gestion à long terme des déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie. La décision éventuelle d'engager la Belgique dans une initiative visant le développement d'une solution de stockage qu'elle partagerait avec un ou plusieurs autres pays est une décision politique et n'est donc pas du ressort de l'ONDRAF. Participer à une telle initiative ne dispenserait toutefois pas la Belgique de continuer à s'investir dans son programme de stockage national jusqu'au moment où le stockage partagé entrerait en exploitation, à l'étranger ou en Belgique. Selon le consensus international en effet, les pays parties à une initiative destinée au développement d'une solution de stockage partagé doivent développer une expertise propre et travailler sur une solution de repli nationale pour leurs propres déchets, selon une approche dite *dual track*. La viabilité d'une éventuelle solution de stockage partagé entre pays européens est de fait restreinte par le fait qu'environ la moitié d'entre eux, dont ceux dont les programmes de stockage sont les plus avancés, interdit l'importation de déchets radioactifs étrangers sur leur territoire en vue de leur stockage.

Bien que l'incidence environnementale globale d'une solution de stockage géologique partagé en galeries soit a priori inférieure à la somme des incidences environnementales des stockages géologiques nationaux dont le partenariat multinational permettrait de se passer, il ressort des multiples travaux sur la question du développement de solutions de stockage géologique partagé que le facteur « incidences environnementales » en est pratiquement absent. Ces travaux traitent en effet essentiellement de questions plus décisives, comme les principaux avantages potentiels (économies d'échelle, partage des ressources scientifiques et techniques, etc.), les inconvénients objectifs (augmentation des distances de transport des déchets radioactifs, nécessité de prise en compte d'une plus grande variété de déchets, etc.) et les défis associés à la réalisation de ces stockages (obtention, dans un pays hôte potentiel, de l'acceptation politique et sociétale de l'importation de déchets radioactifs étrangers en vue de leur stockage, résolution de toutes les questions juridiques et institutionnelles, etc.). Il en ressort que la notion même de stockage partagé pose une série de défis additionnels par rapport aux stockages nationaux. Elle comporte de plus un risque de perte de contrôle du projet et/ou de son calendrier.

Annexe 1 Acronymes

AEN/NEA	Agence pour l'énergie nucléaire (de l'OCDE) / <i>OECD Nuclear Energy Agency</i>
AFCN/FANC	Agence fédérale de Contrôle nucléaire / <i>Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle</i>
AIEA/IAEA	Agence internationale de l'Energie atomique / <i>International Atomic Energy Agency</i>
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (France)
ASN	Autorité de sûreté nucléaire (France)
BGE	<i>Bundesgesellschaft für Endlagerung</i> (Société fédérale pour le stockage des déchets radioactifs) (Allemagne)
CE	Commission européenne
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (France)
CIPR/ICRP	Commission internationale de protection radiologique / <i>International Commission on Radiological Protection</i>
CoRWM	<i>Committee on Radioactive Waste Management</i> (Royaume-Uni)
CNE	Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (France)
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (France)
MOX	<i>mixed-oxide fuel</i>
Nagra	<i>Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle</i> (Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs) (Suisse)
NNL	<i>National Nuclear Laboratory</i> (Royaume-Uni)
OCDE/OECD	Organisation de coopération et de développement économiques / <i>Organisation for Economic Cooperation and Development</i>
ONDRAF/NIRAS	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies / <i>Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen</i>
Posiva	Société pour la gestion des déchets nucléaires (Finlande)
RWM	<i>Radioactive Waste Management</i> (Royaume-Uni)
SEA	<i>strategic environmental assessment</i>
SGDN	Société de gestion des déchets nucléaires (Canada)
SPF	Service public fédéral
tHM	<i>tonne of Heavy Metal</i>
UOX	<i>uranium-oxide fuel</i>

Annexe 2 Références des documents qui fixent ou font état des politiques nationales de gestion à long terme de pays étrangers

Les politiques nationales des pays de l'OCDE et de l'Union européenne qui possèdent au moins un réacteur nucléaire commercial en exploitation ou à l'arrêt définitif pour la gestion à long terme de leurs déchets conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie (section 3.5) sont fixées par ou mentionnées dans les documents suivants.

Allemagne

A-B : Act on the peaceful utilisation of nuclear energy and the protection against its hazards (Atomic Energy Act) of 23 December 1959, as amended and promulgated on 15 July 1985, last amendment of 26 July 2016, corrected on 15 December 2016

Bulgarie

B-C : The Republic of Bulgaria, Sixth National Report on Fulfilment of the Obligations under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Sofia, 2017

Canada

A-B : Loi sur les déchets de combustibles nucléaires, L.C. 2002, ch. 23

C : Loi sur les déchets de combustibles nucléaires, L.C. 2002, ch. 23, et choix de la solution du stockage géologique par le gouvernement canadien, cité dans : Canadian National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Sixth Report, October 2017

Corée du Sud

C : Basic Plan on Management of High level Radioactive Waste, cité dans : Korean Sixth National Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, October 2017

Espagne

B-C : Segundo Informe Nacional sobre la aplicación de la Directiva 2011/70/Euratom por la que se establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos, Julio 2018

Etats-Unis

C : Nuclear Waste Policy Act of 1982 as amended with appropriations acts appended, March 2004

Finlande

C : Nuclear Energy Act (990/1987)

France

B-C : Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs

Hongrie

A-B et C : Act CXVI of 1996 on Atomic Energy (adopted by the Parliament of Hungary on 10 December 1996), cité dans : Hungary National Report, Sixth Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, 2017

Italie

B-C : Programma Nazionale per la gestione del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi elaborato ai sensi del Decreto Legislativo n.45/2014 di recepimento della Direttiva 2011/70/EURATOM che istituisce un quadro comunitario per la gestione responsabile e sicura del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi — Testo consolidato a seguito del procedimento di Valutazione Ambientale Strategica concluso con il decreto di VAS n.340 del 10 dicembre 2018

Japon

B : Final Disposal Act of June 2000, as amended in June 2007, cité dans : National Report of Japan for the Sixth Review Meeting, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, October 2017

C : Final Disposal Act of June 2000, as amended in June 2007, cité dans : National Report of Japan for the Sixth Review Meeting, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, October 2017

Pays-Bas

A-B-C : Ministry of Housing, Physical Planning and Environment (VROM), Radioactive waste policy in The Netherlands; An outline of the Government's position, September 1984

Roumanie

B-C : Romania, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Romanian, The Sixth National Report, 2017

Royaume-Uni

B-C : Response to the Report and Recommendations from the Committee on Radioactive Waste Management (CoRWM) — By the UK Government and the devolved administrations, 2006

Slovaquie

C : Résolution du gouvernement de la République slovaque No. 387/2015 du 8 juillet 2015 sur la proposition de la politique nationale et du programme national de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs en République slovaque en tant que mise à jour du document stratégique « Stratégie pour la phase finale de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire en République slovaque » [traduction ONDRAF]

Slovénie

C : Resolution on the National Programme for Managing Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel 2016–2025, April 2016, cité dans : Sixth Slovenian Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, October 2017

Suède

A-B : Act on Nuclear Activities 1984:3

C : Act on Nuclear Activities 1984:3, et choix du site par SKB en 2009, cité dans : <https://www.skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/how-forsmark-was-selected>

Suisse

A-B et C : Loi sur l'énergie nucléaire du 21 mars 2003, en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2005 ; Ordonnance sur l'énergie nucléaire du 10 décembre 2004

Tchéquie

C : Policy for Radioactive Waste Management and Spent Fuel Management in the Czech Republic approved by the Czech government Resolution No. 487 of 15 May 2002 and its update, the draft of which was approved on 15 December 2014, cité dans : The Czech Republic National Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Praha 2017

Annexe 3 Avis du Comité d'avis et façon dont il a été traité

L'avis rendu par le Comité d'avis SEA [Comité SEA 2019], conformément à la loi du 13 février 2006, sur le projet de répertoire du présent SEA a été inséré en annexe du projet de répertoire, accompagné d'une réponse point par point aux recommandations du Comité. Le projet de répertoire n'a pas été autrement modifié. Le document ainsi obtenu constitue le *répertoire du rapport sur les incidences environnementales (Strategic Environmental Assessment – SEA) pour l'avant-projet d'arrêté royal établissant le processus d'adoption de la politique nationale relative à la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et définissant la solution de gestion à long terme de ces déchets*, qui a été communiqué au Comité d'avis.

Pour la transparence, l'avis du Comité d'avis est repris ci-dessous en italique [traduction ONDRAF], avec les réponses apportées par l'ONDRAF aux différents points soulevés.

Remarques introductives

[4] *Le Comité SEA soutient l'intention de l'ONDRAF de donner forme en plusieurs étapes à la politique de stockage sûr pour l'homme et l'environnement, avec comme objectif hypothétique de pouvoir commencer les travaux d'ici 2050. Le Comité SEA insiste sur le fait qu'il est très important que le processus décisionnel relatif à cette matière ne soit pas retardé inutilement.*

[5] *Le Comité SEA est d'accord avec le caractère conceptuel et stratégique de la première étape du plan de politique, à savoir la proposition de politique nationale, et accueille favorablement l'intention de lui soumettre les étapes ultérieures du processus de fixation de la politique.*

[6] *Le Comité est d'accord que, étant donné que la délimitation géographique et l'environnement géologique ne sont pas encore déterminés, il n'est pas nécessairement possible d'évaluer les effets transfrontières dans cette phase, mais que les documents soumis soient transmis aux experts SEA des Etats membres de l'Union européenne.*

[7] *Le Comité SEA est d'accord que le projet de répertoire soumis constitue un bon instrument sur lequel il conviendra de baser l'évaluation des incidences environnementales. Néanmoins, le Comité SEA souhaite faire les recommandations suivantes.*

Alternatives au Plan

[8] *L'alternative proposée est l'évolution attendue de la situation de référence si le Plan n'est pas mis en œuvre. Cette situation de référence est l'actuel entreposage temporaire en surface dans des bâtiments d'entreposage à Dessel. Ce scénario doit être développé en détail. Ceci donne aux responsables politiques et au public une image claire des risques liés au fait de ne pas prendre de décision (à temps).*

Le scénario d'évolution de la situation de référence si le Plan n'est pas mis en œuvre a été étoffé (section 7.2). Il n'est toutefois pas possible de le développer plus en détail, en raison des incertitudes qui lui sont attachées de façon intrinsèque : il est impossible d'anticiper en raison de quelles incertitudes contextuelles (risques de dégradation du suivi réglementaire, de disparition de l'exploitant, d'érosion des connaissances, d'assèchement du financement, de guerre, etc.) et quand (quelques centaines d'années ? quelques milliers d'années ?) la situation actuelle d'entreposage temporaire en surface, qui peut rester sûre moyennant une gestion active et des investissements continus, basculera vers une situation où la protection de l'homme et de l'environnement ne sera plus assurée.

[9] *Le Comité demande que soit développée la variante multinationale, selon laquelle plusieurs pays partageraient la même installation à l'étranger. L'ampleur des incidences*

environnementales est en effet différente dans ce cas. Il y a par exemple davantage de risques associés aux transports. En outre, les risques à long terme de la concentration des déchets radioactifs en Europe en un nombre limité d'endroits peuvent être différents.

L'ONDRAF a décrit la variante « stockage géologique multinational en galeries » (cadre 2 à la section 3.1) et ajouté des considérations relatives aux incidences environnementales d'un tel stockage (section 9.6).

Il rappelle par ailleurs que le fait pour la Belgique de s'engager, le cas échéant, dans une collaboration multinationale visant le développement d'une solution de stockage partagé par plusieurs pays expose la Belgique à l'éventualité que le futur stockage soit construit en Belgique. Une collaboration de ce type n'étant de plus pas certaine d'aboutir, la Belgique devrait de toute façon poursuivre son programme de stockage national jusqu'au moment où le stockage partagé entrerait en exploitation.

[10] Pour les alternatives rejetées qui ne sont pas discutées en détail, il convient de renvoyer tant vers les fondements juridiques que vers les considérations environnementales ou de faisabilité.

L'ONDRAF a justifié le rejet des alternatives qui ne sont pas discutées en détail sur différents types de bases, principalement des considérations juridiques, le constat que ces alternatives ne sont pas à même d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement à long terme ou qu'il n'est pas possible d'apporter une démonstration convaincante de cette protection ainsi que des considérations de faisabilité (chapitre 4).

Risques pour les aspects non nucléaires

[11] Dans la table 9, il convient de porter davantage attention à un certain nombre de risques liés aux aspects non nucléaires. La construction d'une installation de [stockage] souterraine suppose une certaine quantité de ciment, ce qui imposera de disposer d'une cimenterie sur place. L'impact d'une telle usine sur les eaux souterraines ne peut être sous-estimé. Il est donc préférable de considérer ce risque comme « inconnu » plutôt que comme « non pertinent ». Ceci est également valable pour la « modification des caractéristiques structurelles des cours d'eau ».

Il est en effet préférable de ne pas écarter à ce stade l'évaluation des incidences « Modification de l'écoulement des eaux souterraines », « Modification du niveau ou de la montée des eaux souterraines » et « Modification des caractéristiques structurelles des cours d'eau » pour la période pré-fermeture du stockage. Ces trois incidences ont donc été retirées de la liste des incidences dont l'ONDRAF sait ou est pratiquement certain qu'elles ne devront jamais être évaluées, mais dont il prévoit néanmoins de vérifier la non-pertinence à des stades ultérieurs de l'évaluation par étapes des incidences environnementales (section 6.1.1). L'ONDRAF a par ailleurs ajouté deux incidences supplémentaires à la liste des incidences à évaluer à ce stade pour les périodes pré- et post-fermeture : l'incidence « Altération du sous-sol » et l'incidence « Modification de la température du sous-sol ».

Remarques complémentaires

[12] Il convient de clarifier la manière dont la table 11 « Scoping des incidences environnementales du Plan pour le court terme » a été remplie.

La table « Scoping des incidences environnementales du Plan pour le court terme » a été remplie d'une manière que l'ONDRAF juge préférable, avec le recul, de modifier en partie. Les modifications apportées ne changent toutefois pas le résultat final du scoping pour le court terme. En effet, le scoping effectué dans le projet de répertoire pour le court terme n'a pas été mené jusqu'au stade final du scoping in/out : plutôt que d'établir une liste d'incidences à évaluer dans le SEA, l'ONDRAF a préféré retenir des familles d'incidences à évaluer (sur les eaux de surface et souterraines ainsi que sur le sol), auxquelles s'ajoutent quelques autres incidences.

Dans le projet de répertoire, l'ONDRAF a examiné les différentes incidences environnementales considérées dans le scoping pour le court terme selon les quatre éléments suivants :

- le risque que l'incidence se produise effectivement ;
- l'ampleur des changements qui se produiront ;
- le caractère transfrontalier de l'incidence sur l'environnement ;
- la taille de la zone d'extension de l'incidence.

Il a estimé que dans la majorité des cas, le « *risque que l'incidence se produise effectivement* » est faible et qu'il est moyen ou élevé dans les autres cas. Ces scores n'ont pas toujours été estimés adéquatement, dès lors que l'expression « *risque que l'incidence se produise effectivement* » a été comprise comme renvoyant au risque attaché à l'incidence plutôt que désignant la probabilité d'occurrence de l'incidence.

La majorité des incidences qui apparaissent dans la table 11 du projet de répertoire doit être considérée comme ayant une probabilité d'occurrence élevée à très élevée, les autres incidences ayant une probabilité faible ou moyenne. Ces risques d'occurrence sont nuancés par le fait que l'ampleur des changements qui se produiront est jugée faible (estimation inchangée par rapport au projet de répertoire) et que la zone d'extension de chaque incidence est jugée très locale (estimation inchangée par rapport au projet de répertoire). En conditions normales de construction et d'exploitation d'un site de stockage, aucune des incidences considérées ne paraît en effet susceptible de s'étendre au-delà du niveau local. Compte tenu du constat selon lequel il est impossible d'évaluer les incidences transfrontières du Plan (section 6.2), l'ONDRAF a aussi estimé que les incidences considérées ne sont pas transfrontières. Ce point fera l'objet d'évaluations à des stades ultérieurs de l'évaluation par étapes des incidences environnementales.

[13] Pour l'évaluation des incidences environnementales du Plan, l'ONDRAF considérera deux domaines temporels ; le « court terme » et le « long terme » peuvent être décrits de façon encore un peu plus spécifique.

L'ONDRAF a redéfini les deux domaines temporels de manière à les faire correspondre à, d'une part, la période pré-fermeture de l'installation de stockage et, d'autre part, sa période post-fermeture (section 6.1.2). Cette modification revient à transférer de la seconde période à la première les activités de fermeture *complète* du stockage géologique et de démolition partielle ou totale des installations en surface. Elle a donc l'avantage de faire correspondre la période pré-fermeture avec la période durant laquelle des activités humaines sont nécessaires et la période post-fermeture avec la période passive du système de stockage.

Cette redéfinition n'a qu'un impact marginal sur le résultat de la procédure de scoping : elle conduit à prendre en compte les incidences environnementales de la fermeture complète du stockage dans les évaluations relatives à la période pré-fermeture. La position selon laquelle les incidences environnementales de la restitution du site à un état moins ou non bâti après fermeture complète du stockage seront évaluées à des stades ultérieurs de la fixation de la politique nationale est, elle, maintenue.

Par contre, alors que la durée du « court terme » (période décrite dans le projet de répertoire comme se terminant avec la fermeture des zones de stockage) pouvait être estimée comme étant de l'ordre d'une centaine d'années, la durée de la période pré-fermeture est plus difficile à estimer, car elle dépendra de ce que décideront les générations futures pour la fermeture de l'installation de stockage.

[14] La formulation du dernier paragraphe de la section 5.2.4 de la version française doit être améliorée.

Ce paragraphe, relatif aux évaluations des incidences environnementales de combinaisons des options de stockage, n'apparaît plus.

[15] Il y a une incohérence entre les tables 9 et 11 au sujet des éléments « modification de l'écoulement des eaux souterraines » et « altération des eaux souterraines » (pertinent ou pas pour le SEA).

L'incohérence identifiée est présente en néerlandais et résulte d'une erreur de traduction de la version originale en français. Dans la table 11 de la version néerlandaise, l'incidence « *Aanrijking grondwater* » aurait dû apparaître à la place de l'incidence « *Wijziging grondwaterstromingen* ».

Références

- [AEN 1995] Nuclear Energy Agency, The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal — A Collective Opinion of the NEA Radioactive Waste Management Committee, OECD 1995
- [AEN 2003] Nuclear Energy Agency, SAFIR 2 — Belgian R&D Programme on the Deep Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste: An International Peer Review, OECD, 2003
- [AEN 2008] Nuclear Energy Agency, Moving Forward with Geological Disposal of Radioactive Waste — A Collective Statement by the NEA Radioactive Waste Management Committee (RWMC), NEA No. 6433, OECD 2008
- [AEN 2011] Nuclear Energy Agency, Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation, NEA No. 6894, OECD 2011
- [AEN 2012] Agence pour l'énergie nucléaire, Vers un cycle du combustible nucléaire durable — Evolution et tendances, AEN n° 6981, OCDE 2012
- [AFCN 2010] Agence fédérale de Contrôle nucléaire, Avis de l'AFCN sur les documents de l'ONDRAF : Projet de Plan Déchets (PPD) et Evaluation des Incidences sur l'Environnement (EIE), note 010-149-F, traduction du 2 février 2011
- [AFCN 2014] Agence fédérale de Contrôle nucléaire, Lettre de l'AFCN à l'ONDRAF, Note de positionnement de l'AFCN relative au stockage géologique et à la gestion à long terme des déchets B&C dans le cadre de l'établissement des politiques nationales et du programme national, réf. 2014-12-09-FB-5-1-2-FR, 9 décembre 2014, et son annexe
- [AFCN 2015] Agence fédérale de Contrôle nucléaire, Avis de l'AFCN sur le Programme National du 10 avril 2015, réf. 2015-04-29-AW-5-4-1-FR, 7 mai 2015
- [AFCN 2019] Agence fédérale de Contrôle nucléaire, Surveillance radiologique de la Belgique — Rapport de synthèse 2018, octobre 2019
- [AIEA 1994] International Atomic Energy Agency, Classification of Radioactive Waste — A Safety Guide, Safety Series No. 111-G-1.1, Vienna, May 1994
- [AIEA 1997] Agence internationale de l'Energie atomique, Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, INF/CIRC/546, Décembre 1997
- [AIEA 2003] International Atomic Energy Agency, The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability — A Position Paper of International Experts, IAEA, Vienna, June 2003
- [AIEA 2009] International Atomic Energy Agency, Classification of Radioactive Waste, General Safety Guide No. GSG-1, Vienna, November 2009
- [AIEA 2011a] International Atomic Energy Agency, Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-14, Vienna, September 2011
- [AIEA 2011b] Agence internationale de l'Energie atomique, Stockage définitif des déchets radioactifs, Prescriptions de sûreté particulières, Normes de sûreté de l'AIEA, No. SSR-5, Vienne, octobre 2011
- [ASN 2016] Autorité de sûreté nucléaire, Avis n° 2016-AV- 0259 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 25 février 2016 sur les études relatives à la gestion des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA et MA 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 déchets radioactifs 2016-2018
- [Belgique 1980] Loi du 8 août 1980 relative aux propositions budgétaires 1979-1080, Moniteur belge du 15 août 1980

- [Belgique 1981] Arrêté royal du 30 mars 1981 déterminant les missions et fixant les modalités de fonctionnement de l'organisme public de gestion des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, Moniteur belge du 5 mai 1981
- [Belgique 2001] Arrêté royal du 20 juillet 2001 portant règlement général de la protection de la population, des travailleurs et de l'environnement contre le danger des rayonnements ionisants, Moniteur belge du 30 août 2001
- [Belgique 2002] Loi du 2 août 2002 portant assentiment à la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, faite à Vienne le 5 septembre 1997, Moniteur belge du 25 décembre 2002
- [Belgique 2003] Loi du 31 janvier 2003 sur la sortie progressive de l'énergie nucléaire à des fins de production industrielle d'électricité, Moniteur belge du 28 février 2003
- [Belgique 2006] Loi du 13 février 2006 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement et à la participation du public dans l'élaboration des plans et des programmes relatifs à l'environnement, Moniteur belge du 10 mars 2006
- [Belgique 2014] Loi du 3 juin 2014 modifiant l'article 179 de la loi du 8 août 1980 relative aux propositions budgétaires 1979-1980 en vue de la transposition dans le droit interne de la Directive 2011/70/Euratom du Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs, Moniteur belge du 27 juin 2014
- [Belgique 2018] Royaume de Belgique, Rapport national relatif à la mise en œuvre de la directive 2011/70/Euratom du Conseil établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs, Deuxième édition, août 2018
- [Belgique 2019] Loi du 10 mars 2019 portant assentiment à l'Accord entre le Royaume de Belgique et le Grand-Duché de Luxembourg relatif à la gestion et au stockage définitif des déchets radioactifs du Grand-Duché de Luxembourg sur le territoire du Royaume de Belgique, fait à Luxembourg le 4 juillet 2016, Moniteur belge du 29 mars 2019
- [Blue Ribbon Commission 2012] Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, Report to the Secretary of Energy, January 2012
- [Bracke 2017] Bracke, G., Charlier, F., Liebscher, A., Schilling, F.R. and Röckel Th., About the Possibility of Disposal of HLRW in Deep Boreholes in Germany, *Geosciences* 2017, 7, 58, 18 July 2017
- [CEA 2015] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides, Décret n° 2013-1304 du 27 décembre 2013 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs, juin 2015
- [Chapman 2019] Chapman, N.A., Who Might Be Interested in a Deep Borehole Disposal Facility for Their Radioactive Waste?, *Energies* 2019, 12, 1542, 24 April 2019
- [CNE 2019] Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs instituée par la Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006, Rapport d'évaluation N°13, Juin 2019
- [Comité SEA 2019] Adviescomité SEA, Advies over het ontwerpregister strategische milieu-beoordeling van een voorontwerp van KB tot vaststelling van het goedkeuringsproces voor de nationale beleidsmaatregelen met betrekking tot het langetermijnbeheer van geconditioneerd hoogradioactief en/of langlevend afval en tot bepaling van de beheeroplossing op lange termijn voor dit afval, 21 november 2019
- [Commission européenne 1979] Commission européenne, Catalogue européen des formations géologiques présentant des caractéristiques favorables à l'évacuation des

déchets radioactifs solidifiés de haute activité et/ou de longue vie. 2 — Belgique, Etat au 01.01.1978, Tome réalisé par le SCK•CEN et le Service géologique de Belgique, septembre 1979

- [Commission européenne 2019] Commission européenne, Rapport au Conseil et au Parlement européen sur l'avancement de la mise en œuvre de la directive 2011/70/EURATOM du Conseil, un inventaire des déchets radioactifs et du combustible usé présents sur le territoire de la Communauté et les perspectives futures, Deuxième rapport, COM(2019) 632 final, Bruxelles, 17 décembre 2019
- [Conseil européen 2011] Directive 2011/70/Euratom du Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs, Journal officiel L 199/48, 2 août 2011
- [Conseil européen 2013] Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom, Journal officiel L 13/1, 17 janvier 2014
- [Conseil des ministres 1998] Conseil des ministres, Séance du 16 janvier 1998, Gestion à long terme des déchets radioactifs de faible activité. 98A40450.039
- [Conseil des ministres 2006] Ministerraad, Vergadering van 23 juni 2006, Berging van radioactief afval (categorie A). 2006A42450.020
- [Convention de Londres 1972] Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets, 29 décembre 1972
- [Convention OSPAR 1992] Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est, 22 septembre 1992
- [CoRWM 2018] Committee on Radioactive Waste Management, Position Paper: Why Geological Disposal?, CoRWM doc. 3521, 17 November 2018
- [CoRWM 2019] Committee on Radioactive Waste Management, Position Paper: Deep Borehole Disposal, CoRWM doc. 3574, 4 July 2019
- [Freeze *et al.* 2019] Freeze, G.A., Stein, E., Brady, P.V., Post-Closure Performance Assessment for Deep Borehole Disposal of Cs/Sr Capsules, *Energies* 2019, 12(10), 1980, 23 May 2019
- [Geologica Belgica 2001] Geologica Belgica, number 1-2 — Lithostratigraphic scale of Belgium, volume 4 (2001)
- [Grand-Duché de Luxembourg 2018] Loi du 6 juin 2018 portant approbation de l'Accord entre le Grand-Duché de Luxembourg et le Royaume de Belgique relatif à la gestion et au stockage définitif des déchets radioactifs du Grand-Duché de Luxembourg sur le territoire du Royaume de Belgique, fait à Gäichel, le 4 juillet 2016, Journal Officiel du Grand-Duché de Luxembourg, N° 478 du 12 juin 2018
- [IRSN 2019a] Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Panorama international des recherches sur les alternatives au stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue — Rapport établi en réponse à une saisine de la Commission nationale du débat public, rapport IRSN/2019-00318, mai 2019
- [IRSN 2019b] Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Débat Public — Projet Cigéo, Thème 1 — La place de Cigéo dans le dispositif de gestion des déchets, La séparation/transmutation des déchets à vie longue, FS 1-4
- [Marghem & Peeters 2018] Lettre de la tutelle de l'ONDRAF à l'ONDRAF, Politique nationale pour la gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de longue durée de vie, réf. MCM/KP-AJ/EP-MaP/SV 9621, 28 novembre 2018

- [Muller *et al.* 2019] Muller, R.A., Finsterle, S., Grimsich, J., Baltzer, R., Muller, E.A., Rector, J.W., Payer, J. and Apps, J., Disposal of High-Level Nuclear Waste in Deep Horizontal Drillholes, *Energies* 2019, 12(11), 2052, 29 May 2019
- [NNL 2013] National Nuclear Laboratory, Minor Actinide Transmutation — Position Paper
- [Olsthoorn 2011] Olsthoorn, T.N., Geologische Berging Van Radioactief Afval in België: Mogelijke Gevolgen voor Nederland, Rapport opgesteld in opdracht van Provincie Noord-Brabant, Technische Universiteit Delft, 20 september 2011
- [ONDRAF 1989] NIRAS, SAFIR — Safety Assessment and Feasibility Interim Report, 22 mei 1989
- [ONDRAF 2001a] ONDRAF/NIRAS, SAFIR 2 — Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, report NIROND 2001-06 E, December 2001
- [ONDRAF 2001b] ONDRAF, Aperçu technique du rapport SAFIR 2 — Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, rapport NIROND 2001-05 F, décembre 2001
- [ONDRAF 2010] ONDRAF, Le projet cAt à Dessel — Une solution à long terme pour les déchets de catégorie A belges, rapport NIROND 2010-02 F, mars 2010
- [ONDRAF 2011a] ONDRAF, Plan Déchets pour la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et aperçu de questions connexes, rapport NIROND 2011-02 F, septembre 2011
- [ONDRAF 2011b] ONDRAF, Déclaration relative au Plan Déchets en application de la loi du 13 février 2006 — Plan Déchets pour la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et aperçu de questions connexes, Moniteur belge du 30 septembre 2011
- [ONDRAF 2011c] ONDRAF, Résumé exécutif du Plan Déchets pour la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et aperçu de questions connexes, Moniteur belge du 30 septembre 2011
- [ONDRAF 2013] ONDRAF/NIRAS, ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the geological disposal of high-level and/or long-lived radioactive waste including irradiated fuel if considered as waste — State-of-the-art report as of December 2012, report NIROND-TR 2013-12 E, December 2013
- [ONDRAF 2017] Lettres de l'ONDRAF à sa tutelle, Politique nationale pour la gestion à long terme des déchets radioactifs des catégories B & C, réf. JPM/MDE/2017-0354, 15 mars 2017 // Nationaal beleid voor het langetermijnbeheer van het radioactieve afval van de categorieën B en C, ref. JPM/MDE/2017-0628, 15 maart 2017
- [ONDRAF 2018a] Lettres de l'ONDRAF à sa tutelle, Proposition de politique nationale de gestion à long terme des déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie, réf. MDE/PHL/AV/2018-1685, 25 juin 2018, et annexe 3. « Avant-projet d'arrêté royal établissant le processus d'adoption de la politique nationale relative à la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et définissant la solution de gestion à long terme de ces déchets » // Voorstel van nationaal beleid voor het langetermijnbeheer van hoogactief en/of langlevend afval, ref. MDE/PHL/AV/2018-1686, 25 juni 2018, en bijlage 3. "Voorontwerp van koninklijk besluit tot vaststelling van het goedkeuringsproces voor de nationale beleidsmaatregelen met betrekking tot het langetermijnbeheer van geconditioneerd hoogradioactief en/of langlevend afval en tot bepaling van de beheeroplossing op lange termijn voor dit afval"
- [ONDRAF 2018b] ONDRAF/NIRAS, Evaluation of the overnight cost of geological disposal of category B&C waste — Costing 2018, report NIROND-TR 2017-31 E V1, June 2018
- [ONDRAF 2019a] NIRAS, Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie A-afval in Dessel, rapport NIROND-TR 2011-01, Versie 3, januari 2019

- [ONDRAF 2019b] ONDRAF/NIRAS, Deep borehole disposal concept of high-level and/or long-lived waste: Technology watch – Status 2019, report NIROND-TR 2019-03 E, February 2019
- [ONDRAF 2019c] ONDRAF, Présentation de l’inventaire technique des déchets radioactifs 2018, note 2019-0662, 22 mars 2019
- [ONDRAF 2019d] ONDRAF/NIRAS, Monitoring international developments regarding shared geological repositories for high-level and/or long-lived waste: status as of March 2019, report NIROND-TR 2019-07 E, June 2019
- [ONDRAF 2019e] Lettre de l’ONDRAF à la Présidente de la Commission particulière en charge du débat PNGMDR, Commission nationale du débat public (CPDP) — France, Contribution de l’ONDRAF au débat public relatif au PNGMDR et, en particulier, à la gestion à long terme des déchets de haute activité à vie longue, réf. PHL/micu/2019-1975, 2 septembre 2019
- [Peeters & Marghem 2016] Lettre de la tutelle de l’ONDRAF à l’ONDRAF, Nationaal beleid voor het langetermijnbeheer van het radioactieve afval van de categorieën B en C, réf. IND/10/KP/FL/2016/7/010, 7 november 2016
- [Resource Analysis 2010] Resource Analysis, Strategic Environmental Assessment (SEA) pour le Plan Déchets de l’ONDRAF — Rapport principal, juin 2010
- [RWM 2016a] Radioactive Waste Management, Geological Disposal — Generic Disposal Facility Design, NDA Report no. DSSC/412/01, December 2016
- [RWM 2016b] Radioactive Waste Management, Geological Disposal — Technical Background to the generic Disposal System Safety Case, NDA Report no. DSSC/421/01, December 2016
- [SGDN 2013] Société de gestion des déchets nucléaires, Rapport de suivi des progrès en matière de retraitement, de séparation et de transmutation, Mise à jour 2013
- [SGDN 2019] Société de gestion des déchets nucléaires, Mise en œuvre de la Gestion adaptative progressive 2019 à 2023, mars 2019
- [SKB 2011] SKB, Environmental Impact Statement — Interim Storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel, March 2011
- [Sowder *et al.* 2016] Sowder, A., McCullum, R., Kindfuller, V., Why Demonstration of a Deep Borehole Disposal Concept Matters to the Nuclear Industry, Proceedings of the 15th International High-Level Radioactive Waste Management (IHLRWM) Conference, Charleston, SC, 12-16 April 2015
- [SPF Economie 2016a] SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie, Etude comparative de stratégies de gestion du combustible nucléaire belge (Volume 2 + erratum), 29 janvier 2016
- [SPF Economie 2016b] SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie, Arrêté ministériel du 3 octobre 2016 portant fixation du premier Programme National de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs, Moniteur belge du 15 juin 2017
- [SPF Santé 2007a] SPF Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement, Document d’orientation pour l’évaluation des incidences environnementales de certains plans et programmes au niveau fédéral — Document explicatif du screening, juillet 2007
- [SPF Santé 2007b] SPF Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement, Document d’orientation pour l’évaluation des incidences environnementales de certains plans et programmes au niveau fédéral — Document de screening, juillet 2007
- [SPF Santé 2007c] SPF Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement, Document d’orientation pour l’évaluation des incidences environnementales de certains plans et programmes au niveau fédéral — Document explicatif du scoping, juillet 2007

- [SPF Santé 2007d] SPF Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement, Document d'orientation pour l'évaluation des incidences environnementales de certains plans et programmes au niveau fédéral — Document de scoping, juillet 2007
- [Traité sur l'Antarctique 1959] Traité sur l'Antarctique, 1^{er} décembre 1959
- [Traité sur l'espace 1967] Traité sur les principes régissant les activités des Etats en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes, 27 janvier 1967
- [Vandenberghe & Laga 1996] Vandenberghe, N. & Laga, P., De aarde als fundament, Een inleiding tot de geologie voor ingenieurs, Leuven, Acco, 1996
- [Wouters & Vandenberghe 1994] Wouters, L. & Vandenberghe, N., Géologie de la Campine — Essai de synthèse, publication ONDRAF NIROND-94-12, octobre 1994