2021

Dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo

Pièce 6

Etude d'impact du projet global Cigéo

Volume II

Justification et description du projet global Cigéo



EDF · orano · cea

Haute Marne le Département · Rte · SNCF RÉSEAU · SIAEP d'Échenay · SIVU du Haut Ornain

ANDRA — Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

Mise à jour du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo

Suite aux recommandations émises dans le cadre du processus d'évaluation environnementale et notamment suite à l'avis de l'Autorité environnementale (Ae), des mises à jour ont été apportées par l'Andra dans certaines pièces du dossier (déposé pour instruction le 3 août 2020[1]) avant son passage en enquête publique.

Pour assurer la clarté de l'information du public, l'Andra assure la traçabilité de ces mises à jour.

Toutes les adaptations (modifications ou ajouts) se matérialisent par un surlignage gris dans le corps du texte, les corrections mineures de forme et de mise en cohérence ne sont pas matérialisées.

[1] Pour information, le dossier soumis à instruction a été rendu public sur le site internet de l'Andra - **https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference**

Sommaire

1. La radioactivité et les déchets radioactifs 7

1.1 La radioactivité 8

1.1.1 Le phénomène physique 8
1.1.2 Les usages de la radioactivité 8
1.1.3 L'exposition à la radioactivité 9
1.1.4 Les niveaux d'exposition à la radioactivité en France 9
1.1.5 Les effets sur la santé de l'exposition à la radioactivité 10

1.2 Les déchets radioactifs 11

1.2.1 Qu'est-ce qu'un déchet radioactif ? 11
1.2.2 Les principales sources de production des déchets radioactifs 11
1.2.3 Les approches et stratégies pour la gestion des déchets radioactifs 12
1.2.4 La classification française des déchets radioactifs et les filières de gestion en France 13
1.2.5 Les volumes, activités et répartitions des différentes catégories de déchets par niveaux d'activité 15
1.2.6 Les centres de stockage de déchets radioactifs existants en France 15

1.3 Les spécificités des déchets HA et MA-VL 16

1.3.1 Les déchets de haute activité 16
1.3.2 Les déchets de moyenne activité à vie longue 16
1.3.3 La dangerosité des déchets HA et MA-VL 16

2. Les solutions de substitution examinées et la justification des principales raisons techniques et environnementales des choix effectués 19

2.1 Les choix stratégiques pour la gestion des déchets HA et MA-VL 20

2.1.1 Le contexte 20
2.1.2 Les exigences de protection de l'homme et de l'environnement 21
2.1.3 La gestion actuelle des déchets HA et MA-VL en France par entreposage 22
2.1.4 La spécificité de la gestion des déchets HA 23

2.2 Le choix du stockage géologique parmi les différentes pistes de gestion des déchets radioactifs HA et MA-VL 24

2.2.1 Le contexte 24
2.2.2 L'entreposage de longue durée 24
2.2.3 La réduction de la dangerosité des déchets par la transmutation 25
2.2.4 L'envoi dans l'espace 28
2.2.5 L'évacuation dans les fonds marins 29
2.2.6 Le stockage dans le milieu géologique continental 31
2.2.7 La voie du stockage en formation géologique profonde est adoptée internationalement 40
2.2.8 La synthèse comparative des différents modes de gestion des déchets HA et MA-VL envisagés et les raisons justifiant le choix du stockage géologique 41

2.3 Le choix français du stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien 49

2.3.1 Les étapes de la création du Laboratoire souterrain de recherche de l'Andra à Bure 49
2.3.2 Les travaux dans le Laboratoire souterrain confirment le choix technique du Callovo-Oxfordien pour le stockage des déchets HA et MA-VL 51
2.3.3 Les investigations depuis la surface confirment le choix technique du Callovo-Oxfordien pour le stockage des déchets HA et MA-VL 59
2.3.4 Le Parlement et le gouvernement confirment le choix du stockage en couche géologique profonde 60
2.3.5 Les départements volontaires pour l'accueil d'un laboratoire souterrain confirment leur engagement pour l'accueil d'un stockage en couche géologique profonde 63

2.4 Une installation industrielle sûre pendant son fonctionnement et à long terme après sa fermeture 64

2.4.1 L'importance des itérations entre sureté, conception et connaissances dans le développement progressif du centre de stockage Cigéo 64
2.4.2 Un centre de stockage sûr après sa fermeture et sur le long terme 75
2.4.3 Un centre de stockage Cigéo sûr en phase de fonctionnement 79

2.5 Un projet développé en dialogue avec la société 91

2.5.1 L'information et le dialogue local 91
2.5.2 Des échanges pour prendre en compte les préoccupations du territoire et préparer l'intégration du projet global Cigéo 92
2.5.3 La démarche de dialogue et la concertation de l'Andra 93
2.5.4 La contribution de l'Andra au dispositif de santé publique 97

2.6 Les choix d'implantation du centre de stockage Cigéo 98

2.6.1 Le choix d'implantation des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo 98
2.6.2 Les choix d'implantation des ouvrages de surface du centre de stockage Cigéo 103

2.7 Les choix pour la conception du centre de stockage Cigéo 119

2.7.1 La démarche de développement durable 119
2.7.2 L'approvisionnement en énergie 120
2.7.3 L'adduction d'eau 121
2.7.4 La gestion des eaux et les rejets 122
2.7.5 Le développement progressif de la zone de verses 132
2.7.6 La priorité au transport ferroviaire pour le transport des colis de déchets et des matériaux 133
2.7.7 Le choix de l'entreposage sur les sites des producteurs 133

2.8 Les choix d'implantation des opérations du projet global Cigéo liés à la construction et au fonctionnement du centre de stockage Cigéo 134

2.8.1 L'alimentation électrique 134
2.8.2 L'adduction d'eau 140
2.8.3 La mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 140
2.8.4 La déviation de la route départementale D60/960 143
2.8.5 L'expédition et transport des colis de déchets radioactifs 144
2.8.6 Les opérations de caractérisation et de surveillance environnementale 145

3. Les déchets destinés au centre de stockage Cigéo 147

3.1 Les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) 148

3.2 Les notions d'inventaire de référence et d'inventaire de réserve 148

3.3 L'inventaire de référence retenu pour la conception du centre de stockage Cigéo 149

3.4 L'inventaire de réserve pour lequel des adaptations du centre de stockage Cigéo sont étudiées 150

3.5 Les déchets d'éventuelles futures installations nucléaires 151

4. La description des installations du projet global 153

4.1 Le projet global Cigéo 154
4.2 La localisation du projet global Cigéo 154
4.3 Le centre de stockage Cigéo 156
4.3.1 L'organisation générale du centre de stockage Cigéo 156
4.3.2 Les principes de fonctionnement du centre de stockage Cigéo 158
4.3.3 Les ouvrages de surface en zone descenderie 161
4.3.4 Les ouvrages de surface en zone puits 171
4.3.5 La zone d'implantation des ouvrages souterrains 181
4.3.6 La liaison intersites 187
4.3.7 L'installation terminale embranchée 188
4.3.8 Les principales modalités d'exécution des travaux du centre de stockage Cigéo menés lors des phases d'aménagements préalables et de construction initiale 190
4.4 Les opérations du projet global Cigéo, situées hors du centre de stockage 193
4.4.1 L'alimentation électrique 193
4.4.2 L'adduction d'eau 203
4.4.3 La mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 205
4.4.4 La déviation de la route départementale D60/960 208
4.4.5 L'expédition et le transport des colis de déchets 209
4.4.6 Les opérations de caractérisation et de surveillance environnementale 211

5. Le phasage du projet global Cigéo et la réversibilité du stockage 217

5.1 Les phases temporelles successives de déploiement du centre de stockage Cigéo 218
5.2 La phase industrielle pilote 219
5.2.1 L'origine de la phase industrielle pilote et son inscription dans la réglementation 219
5.2.2 Les apports techniques de la phase industrielle pilote 219
5.2.3 Les apports de la phase industrielle pilote en termes de gouvernance 220
5.2.4 Le déroulement et l'issue de la phase industrielle pilote 220
5.2.5 Les impacts environnementaux de la phase industrielle pilote 221
5.3 La description des phases temporelles de déploiement du centre de stockage Cigéo 221
5.3.1 La phase d'aménagements préalables 221
5.3.2 La phase de construction initiale du centre de stockage Cigéo 221
5.3.3 La phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo 222
5.3.4 La phase de démantèlement et de fermeture 223
5.3.5 Les phases de surveillance et de post-surveillance du centre de stockage Cigéo 223
5.3.6 Synthèse des phases de déploiement du projet global Cigéo 225
5.4 La réversibilité du stockage 226
5.4.1 Le concept de la réversibilité et les exigences réglementaires associées 226
5.4.2 Les possibilités offertes par la progressivité de la construction du centre de stockage Cigéo 226
5.4.3 La flexibilité de l'exploitation du centre de stockage 226
5.4.4 Le scénario de fermeture du centre de stockage Cigéo 227
5.4.5 L'adaptabilité de la conception du centre de stockage Cigéo 229
5.4.6 La récupérabilité 229

6. La consommation des ressources et l'estimation des émissions et résidus attendus 233

6.1 L'utilisation d'énergie et la consommation des matériaux et des ressources 234
6.1.1 L'énergie 234
6.1.2 L'eau 235
6.1.3 Les terres et matériaux excavés 235
6.1.4 Les matériaux de construction 235
6.2 Les types et estimations des émissions et résidus attendus 236
6.2.1 Les émissions atmosphériques 236
6.2.2 Les effluents liquides 237
6.2.3 Les émissions pouvant affecter le cadre de vie 238
6.2.4 Les déchets conventionnels 239
6.2.5 Les déchets radioactifs 239

7. Pourquoi engager la réalisation du centre de stockage Cigéo maintenant ? 241

7.1 Le stockage géologique est le seul mode de gestion à maturité pour la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs les plus dangereux (déchets HA et MA-VL) 242
7.2 Le projet de centre de stockage Cigéo permet d'avancer prudemment et d'offrir aux générations suivantes un mode de gestion durable des déchets HA et MA-VL 242
7.3 Le risque de la perte de compétence 243
7.4 La construction et l'exploitation du centre de stockage Cigéo ne s'oppose pas aux autres voies de gestion 243
7.5 Le projet de centre de stockage Cigéo ne préempte pas les décisions des générations futures 244

Annexes 245

Annexe 1 Les différentes catégories de déchets radioactifs et leur mode de gestion 246
Annexe 2 Les déchets de haute activité (HA) et moyenne activité vie longue (MA-VL) : description synthétique 247

Tables des illustrations 251

Références bibliographiques 255

Préambule

L'étude d'impact du projet global Cigéo est constituée de 7 volumes pour l'étude elle-même et d'un résumé non technique de ces 7 volumes.

	ÉTUDE D'IMPACT
RNT	Résumé non technique de l'étude d'impact
VOLUME I	Introduction et contexte réglementaire
VOLUME II	**Justification et description du projet global Cigéo**
VOLUME III	État actuel de l'environnement et facteurs susceptibles d'être affectés par le projet
VOLUME IV	Évaluation des incidences et mesures d'évitement, de réduction et de compensation de ces incidences
VOLUME V	Évaluation des incidences sur les sites Natura 2000
VOLUME VI	Incidences sur la santé humaine
VOLUME VII	Méthodes de réalisation

L'objet du présent document est de justifier et de décrire le projet global Cigéo, objet de la présente étude d'impact.

Le présent **VOLUME II** présente :

- la radioactivité et l'origine de la production de déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) ;
- la justification des principales raisons techniques et environnementales du choix du stockage géologique comme mode de gestion durable des déchets HA et MA-VL et les solutions de substitution examinées ;
- la justification du choix français de stocker ces déchets dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien ;
- la justification des choix d'implantation des installations souterraines et des installations de surface du projet de centre de stockage Cigéo ;
- la justification des choix techniques et environnementaux pour la conception du centre de stockage Cigéo ;
- la justification des choix d'implantation des opérations du projet global en lien avec la construction et le fonctionnement du centre de stockage Cigéo ;
- les déchets destinés au centre de stockage Cigéo ;
- la description des installations du projet global Cigéo ;
- le phasage du projet global Cigéo ;
- la consommation des ressources et les émissions et résidus attendus du projet global Cigéo ;
- les raisons pour lesquelles le projet de centre de stockage Cigéo doit être engagé maintenant.

ÉTUDE D'IMPACT ET PROJET GLOBAL CIGÉO

La présente étude d'impact identifie et apprécie les incidences sur l'environnement du projet global Cigéo comprenant le centre de stockage Cigéo et l'ensemble des opérations (installations, aménagements, constructions d'ouvrages et activités) nécessaires à la réalisation et à l'exploitation du centre de stockage Cigéo, menées par l'Andra et par d'autres maîtres d'ouvrage, en l'état actuel de leurs avancements.

De par la nature et les dimensions du centre de stockage Cigéo, ses incidences sur l'environnement constituent la part majeure des incidences de l'ensemble des opérations du projet global, même si les opérations des autres maîtres d'ouvrages sont également susceptibles d'avoir des incidences spécifiques sur l'environnement notamment de par leur localisation.

Compte tenu des nombreuses autorisations qui seront nécessaires à la réalisation de ce projet global Cigéo (autorisation de création d'une installation nucléaire de base, autorisations environnementales, permis de construire, etc.), cette étude d'impact sera actualisée dans le cadre des procédures propres à l'instruction de chacune de ces autorisations. Cette actualisation permettra, dans le respect du principe de proportionnalité[1], d'assurer l'exhaustivité et la qualité de l'évaluation des incidences environnementales du projet global Cigéo et de donner le niveau d'information requis pour chaque dossier en application du principe de spécialité[2].

Les maîtres d'ouvrage assureront ensemble, au travers desdites actualisations, l'évaluation complète des incidences du projet global, y compris les mesures adéquates d'évitement, de réduction, et le cas échéant de compensation.

Les opérations des autres maîtres d'ouvrages liées au fonctionnement du centre de stockage Cigéo ne sont pas aux mêmes stades d'avancement de leurs conceptions et de leurs processus de concertation et de validation. Ces opérations sont approfondies progressivement. Elles feront l'objet de procédures d'autorisation après l'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage.

[1] Principe de proportionnalité : (Guide THEMA du Commissariat « Le principe de proportionnalité dans l'évaluation environnementale, août 2019 (1) ») : principe cardinal de l'évaluation environnementale qui consiste à adapter le contenu de l'étude d'impact à l'ampleur du projet, plan ou programme, et aux enjeux environnementaux du territoire d'implantation. Il repose sur les trois critères suivants 1) la sensibilité environnementale de la zone susceptible d'être affectée par le projet (milieu urbain/rural, occupation de l'espace, présence d'espèces et/ou d'habitats protégés…) ; 2) l'importance et la nature des travaux, ouvrages et aménagements projetés pour les projets (type de projet, caractéristiques techniques…) ; 3) les incidences prévisibles du projet, plan ou programme au regard des enjeux environnementaux et de la santé humaine.

[2] Principe de spécialité : principe selon lequel chaque branche du droit est régie à la fois par des règles communes (appelés aussi principes généraux), mais aussi par des règles particulières applicables en compléments de ces principes généraux.

1

La radioactivité et les déchets radioactifs

1.1 La radioactivité 8
1.2 Les déchets radioactifs 11
1.3 Les spécificités des déchets HA et MA-VL 16

1.1 La radioactivité

1.1.1 Le phénomène physique

La radioactivité est un phénomène naturel qui existe depuis l'origine de l'Univers (il y a des milliards d'années) lorsque les atomes se sont formés. Tous bâtis sur le même modèle, les noyaux de ces atomes n'ont pourtant pas les mêmes propriétés.

Les atomes sont composés de trois types de particules :

- les protons, chargés positivement, présents dans le noyau ;
- les neutrons, non chargés, également présents dans le noyau ;
- les électrons, chargés négativement, qui gravitent autour du noyau.

Les isotopes sont des atomes dont le noyau possède le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons. Par exemple, l'hydrogène « classique », le deutérium et le tritium sont des isotopes qui possèdent tous un proton (cf. Figure 1-1). L'hydrogène « classique » ne possède pas de neutrons, le deutérium en possède un et le tritium en possède deux.

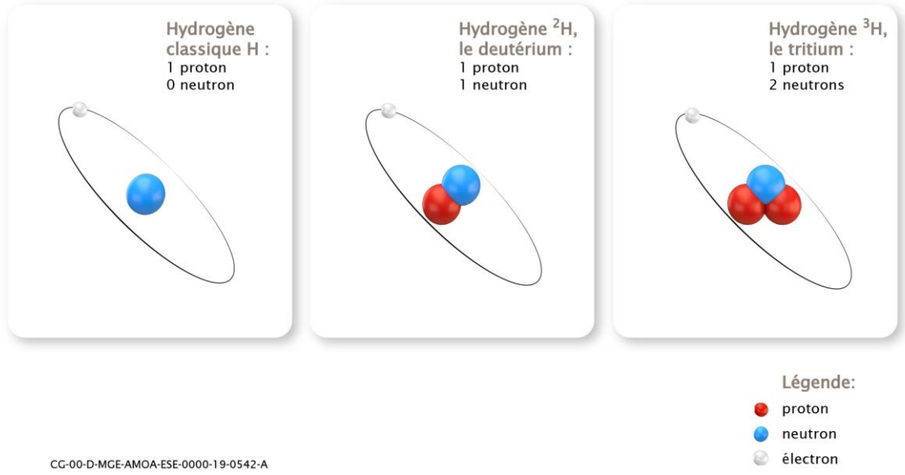


Figure 1-1 Isotopes de l'hydrogène

De son côté, l'uranium a 17 isotopes qui possèdent tous 92 protons, mais dont le nombre de neutrons varie entre 125 et 150. Seulement trois sont présents naturellement sur terre : l'uranium 238 (^{238}U) avec 146 neutrons, l'uranium 235 (^{235}U) avec 143 neutrons et l'uranium 234 (^{234}U) avec 142 neutrons. L'uranium 238 représente 99 % de l'abondance naturelle en uranium.

Les isotopes d'un même élément ont des propriétés chimiques identiques, mais des propriétés physiques différentes.

Certains isotopes sont stables et restent identiques à eux-mêmes. C'est le cas par exemple de l'hydrogène et du deutérium. D'autres sont instables et vont se désintégrer pour acquérir une meilleure stabilité. C'est le cas par exemple du tritium.

En se désintégrant, ces atomes - qu'on appelle radionucléides - expulsent de l'énergie sous forme de rayonnement et/ou de particules. Ce phénomène, appelé « radioactivité », est illustré sur la figure 1-2. Différents types de rayonnements peuvent être émis lors de la désintégration des radionucléides, par exemple les rayonnements alpha (α), bêta (β) et gamma (γ). En plus des rayonnements, une certaine quantité d'énergie peut aussi être éliminée sous forme de chaleur[3].

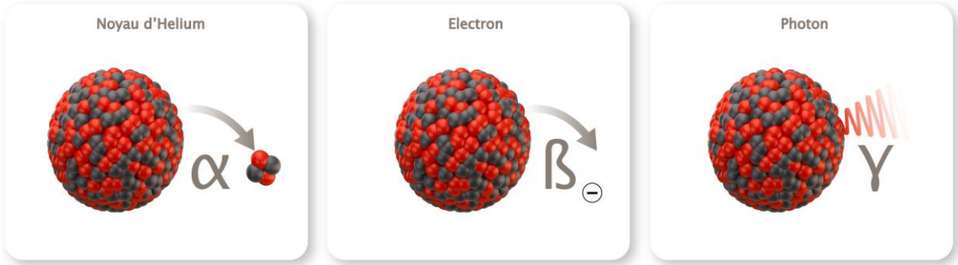


Figure 1-2 Illustration de différents types de rayonnements pouvant être émis par les radionucléides

L'unité internationale de mesure de la radioactivité est le Becquerel (Bq). Le nombre de Becquerel correspond au nombre de désintégrations qui se produisent à chaque seconde au sein d'une certaine masse de matière contenant des radionucléides. À titre d'exemple, l'activité naturelle du corps d'un adulte de 70 kg est de l'ordre de 8 000 Bq à 10 000 Bq. Cela signifie que 8 000 atomes à 10 000 atomes se désintègrent à chaque seconde dans son corps.

On appelle « période » radioactive le temps au bout duquel une quantité d'un même radionucléide est divisée par deux, suite aux désintégrations qu'il a subies. Elle est très variable en fonction des radionucléides. À titre d'exemple, une quantité donnée d'iode 131 (^{131}I) se divise par deux en 8 jours, alors qu'il faut 5 700 ans pour le carbone 14 (^{14}C).

LA RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE

La radioactivité est un phénomène physique naturel. Elle peut aussi être générée artificiellement par des activités humaines.

En 1934, Irène et Frédéric Joliot Curie ont mis en évidence la radioactivité artificielle en bombardant une feuille d'aluminium avec des noyaux d'hélium. Ils obtinrent artificiellement le phosphore 30, isotope à période très courte (environ 3 minutes).

De façon générale, la radioactivité artificielle consiste à créer des noyaux radioactifs qu'on ne trouve pas spontanément dans la nature au moyen d'un accélérateur de particule ou d'un réacteur nucléaire. Les radionucléides créés artificiellement sont largement utilisés dans le domaine médical pour l'imagerie.

1.1.2 Les usages de la radioactivité

Depuis sa découverte par Henri Becquerel, Marie et Pierre Curie au tournant du XXème siècle, la radioactivité a donné lieu à de nombreuses applications.

La radioactivité est utilisée principalement dans cinq secteurs économiques :

- la production d'électricité : centrales nucléaires et usines pour la fabrication et le traitement des combustibles nucléaires utilisés par les centrales ;

[3] Certains isotopes du plutonium, du strontium, du curium ou de l'américium présents dans certains déchets radioactifs, sont connus pour dégager des quantités significatives d'énergie thermique lors de leur désintégration.

- la défense nationale : activités liées à la force de dissuasion, à la propulsion nucléaire de certains navires ou sous-marins et à la recherche associée ;
- l'industrie classique : utilisation de sources radioactives pour diverses applications (contrôle des soudures, stérilisation du matériel médical, stérilisation et conservation de produits alimentaires...) ;
- la recherche : principalement la recherche menée dans le domaine du nucléaire par le CEA, mais aussi la physique des particules, l'agronomie, la chimie et la biologie ;
- le domaine médical : diagnostics, traitements et recherches associées.

Comme toute activité humaine, ces utilisations produisent des déchets, dont certains sont radioactifs, c'est-à-dire qu'ils contiennent des radionucléides.

1.1.3 L'exposition à la radioactivité

Lorsqu'un rayonnement traverse un matériau, il peut y déposer tout ou partie de son énergie. On dit qu'il délivre une « dose » d'énergie dans le matériau. Les principaux rayonnements produits par la radioactivité sont susceptibles de générer des ions lors de la traversée d'un matériau, c'est pourquoi ils sont dits « ionisants ».

Un matériau qui absorbe l'énergie de rayonnements ionisants est dit « irradié ». La dose absorbée varie selon le niveau de radioactivité (en Bq) de la source de rayonnement, la distance à laquelle le matériau irradié se trouve de la source et les écrans éventuels que les rayonnements doivent traverser (cf. Figure 1-3).

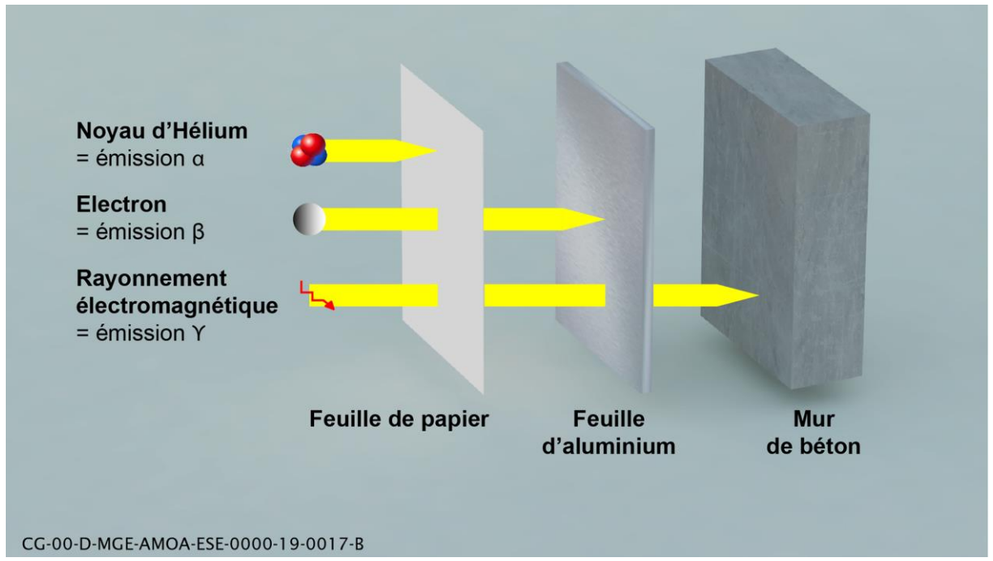


Figure 1-3 Schéma de l'atténuation par des écrans de différents rayonnements ionisants

Le gray est l'unité internationale de mesure de la « dose absorbée ». La dose absorbée correspond à la quantité d'énergie absorbée par une masse donnée de matière lorsqu'elle est exposée à des rayonnements.

L'exposition aux rayonnements ionisants peut causer des dommages aux organismes vivants. C'est pour cette raison que les activités qui utilisent des radionucléides présentent des dangers particuliers. Le risque généré par l'exposition aux rayonnements ionisants dépend de la dose absorbée par l'organisme, mais aussi du type de rayonnement et de la sensibilité particulière des tissus ou organes vivants exposés.

Pour prendre en compte le risque sanitaire de l'exposition aux rayonnements ionisants, des pondérations sont apportées à la mesure de la dose absorbée. Le Gray (dose absorbée quel que soit le type de matériau) se traduit alors en sievert, unité internationale de mesure de la « dose efficace » ou « dose efficace absorbée » par un organisme vivant. C'est le sievert qui est utilisé pour la radioprotection et pour l'évaluation des impacts sur la santé. Toutefois, cette unité est très grande et, en pratique, ce sont souvent ses sous-multiples qui sont rencontrés : le millisievert (1 mSv = 0,001 Sv) ou le microsievert (1 µSv = 0,000 001 Sv).

1.1.4 Les niveaux d'exposition à la radioactivité en France

Il existe deux grands types de sources d'exposition à la radioactivité.

Les sources naturelles :

- rayonnements d'origine cosmique ;
- rayonnements provenant d'éléments radioactifs présents naturellement dans les aliments ou dans le sol. Par exemple, le granite contient des traces d'uranium et émet du radon, un gaz radioactif naturel.

L'exposition aux sources naturelles dépend principalement des lieux d'habitation et des modes de vie. Ainsi, le personnel navigant des compagnies aériennes est significativement exposé aux rayons cosmiques.

Les sources artificielles :

- rayonnements utilisés pour des activités médicales ;
- rayonnements provenant des activités des installations nucléaires (centrales nucléaires...).

L'exposition aux sources artificielles concerne principalement les personnels de santé ainsi que les travailleurs des installations nucléaires. Les patients soumis à des examens d'imagerie médicale, comme une radiographie ou un scanner, sont également concernés. Les essais atmosphériques d'armes nucléaires et les accidents d'installations nucléaires (Tchernobyl, Fukushima...) ont disséminé des radionucléides dans l'environnement qui constitue également une source d'irradiation (2).

» L'EXPOSITION À LA RADIOACTIVITÉ PEUT SE FAIRE DE PLUSIEURS MANIÈRES (CF. FIGURE 1-4)

- On parle **d'irradiation ou d'exposition externe** lorsqu'une personne se trouve exposée à des rayonnements émis par une source radioactive située à l'extérieur du corps. Dans ce cas, l'exposition est réduite, voire cesse, dès lors que la source de radioactivité est éloignée de la personne ou si un écran est interposé entre la personne et la source.
- On parle **de contamination ou d'exposition interne** lorsqu'une personne est exposée à des rayonnements émis par des éléments radioactifs qui ont pénétré à l'intérieur de son organisme. Ceci peut se produire par inhalation de substances radioactives présentes dans l'air, par ingestion d'aliments contenant des substances radioactives ou par transfert à travers la peau. Lors d'une contamination, l'exposition aux substances radioactives se poursuit tant que la source est à l'intérieur ou au contact du corps.

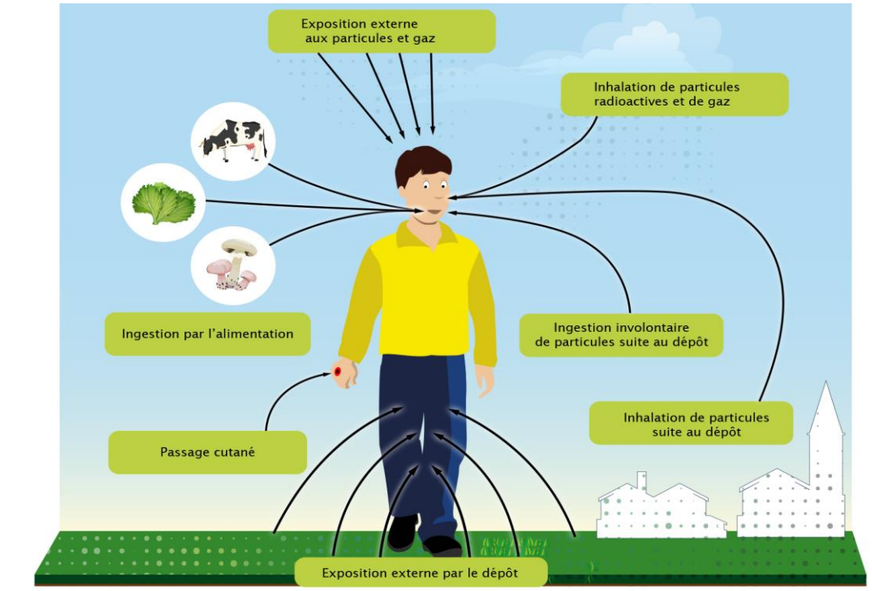


Figure 1-4 Schéma des voies d'exposition à la radioactivité

En France métropolitaine, l'exposition moyenne aux différentes sources de radioactivité représente une dose efficace absorbée par le corps entier de 4,5 millisieverts par an (mSv.an^{-1}) (3).

Cette dose est principalement liée à la radioactivité d'origine naturelle : 2,9 mSv liés à l'inhalation de radon, à l'exposition à la radioactivité naturelle du sol, à l'ingestion d'eau et d'aliments, au tabac et à l'exposition aux rayonnements cosmiques.

Une part minoritaire de l'exposition moyenne est liée aux expositions lors des diagnostics médicaux (1,6 mSv).

La part résultant des installations nucléaires est très faible (0,02 mSv) (cf. Figure 1-5). La limite réglementaire d'exposition du public pour ce type d'activité industrielle est de 1 mSv.an^{-1}.



Figure 1-5 Valeurs moyennes d'expositions aux sources de radioactivité en France (4)

1.1.5 Les effets sur la santé de l'exposition à la radioactivité

Le site internet de l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire précise les risques liés à l'exposition aux rayonnements (5).

La limite d'exposition du public est de 1 mSv.an^{-1} en dehors des expositions médicales et naturelles. Pour les travailleurs du nucléaire, la limite réglementaire d'exposition est en France de 20 mSv.an^{-1}.

En cas d'accident nucléaire, à partir d'une exposition de 10 mSv, on préconise une mise à l'abri des populations. Cette dose représente environ 2 fois la dose annuelle moyenne totale reçue par la population française et 3 fois la dose annuelle moyenne due à la radioactivité d'origine naturelle (cf. Chapitre 1.1.4 du présent document). Au-delà de 50 mSv[4], l'évacuation est recommandée. Cela représente 15 fois la dose annuelle moyenne reçue par la population française.

Pour un niveau inférieur à 100 mSv, aucun effet à long terme sur la santé n'a été démontré. Les études n'ont pas établi de façon indiscutable l'existence d'une relation entre dose de rayonnements reçus et risque de cancers ou maladies non cancéreuses notamment en raison des incertitudes qui accompagnent ce type d'étude.

Au-delà de 100 mSv, des effets à long terme des rayonnements ionisants ont été démontrés par des études épidémiologiques (étude des populations d'Hiroshima et de Nagasaki). Ces études menées pendant plus de 60 ans sur près de 90 000 survivants des bombardements nucléaires ont montré avec certitude que le risque de cancers augmente de manière significative chez les personnes ayant reçu une dose de rayonnements ionisants supérieure à 100 mSv.

[4] En cas de situation d'urgence radiologique, les valeurs seuils de mise à l'abri et d'évacuation de la population sont fixées respectivement à 10 mSV et à 50 mSv par la décision n° 2009-DC-0153 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 18 août 2009 (6) et reprises par l'article D 1333-84 du code de l'environnement.

1.2 Les déchets radioactifs

1.2.1 Qu'est-ce qu'un déchet radioactif ?

Selon le code de l'environnement, un déchet, de façon générale, correspond à « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (article L. 541-1-1 du code de l'environnement). Un déchet est considéré comme « ultime », s'il n'est plus susceptible d'être traité « dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux ».

Toujours selon le code de l'environnement, les déchets radioactifs sont « des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée ou qui ont été requalifiées comme tels par l'autorité administrative » (article L. 542-1-1 du code de l'environnement). Ces déchets sont produits par les industries utilisant les propriétés de la radioactivité (cf. Chapitre 1.1.2 du présent document).

Les déchets radioactifs ultimes sont « des déchets radioactifs qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux » (article L. 542-1-1 du code de l'environnement).

En fonction de leur mode de production et de leur nature, les déchets radioactifs contiennent, en leur sein ou à leur surface, des radionucléides (uranium, radium, cobalt…) qui émettent des rayonnements nocifs. Les déchets radioactifs sont donc considérés comme des substances dangereuses qui doivent être gérées dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement.

En pratique, les déchets radioactifs sont des substances de nature très diverses. Il s'agit par exemple d'équipements déclassés ou hors d'usage (pompes, filtres, câbles…), de pièces et débris métalliques (coques issues du traitement des combustibles, structures démantelées…), de boues radioactives issues des procédés de décontamination d'effluents et de solutions radioactives.

Au titre de sa mission d'intérêt général, l'Andra réalise et publie périodiquement l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs. Cet Inventaire national fournit chaque année une vision aussi complète et exhaustive que possible des quantités de matières et déchets radioactifs présents sur le territoire français. Il est complété tous les trois ans par des estimations des quantités de déchets à produire selon plusieurs scénarios contrastés liés au devenir des installations nucléaires et à la politique énergétique à long terme de la France.

Selon l'Inventaire national, il existait en France fin 2017 environ 1 620 000 m^3 de déchets radioactifs (7).

1.2.2 Les principales sources de production des déchets radioactifs

Les centrales nucléaires de production d'électricité, les usines qui participent à la fabrication du combustible pour ces centrales et les installations de recherche associées sont les principaux producteurs de déchets radioactifs. Les déchets résultent directement de leurs activités, de leur maintenance et, à l'issue de leur fonctionnement, de leur démantèlement.

Plusieurs générations successives de réacteurs nucléaires ont été construites en France pour la production d'électricité dans les centrales nucléaires :

- la première génération, aujourd'hui arrêtée, comprend neuf réacteurs de type « uranium naturel-graphite-gaz » (UNGG) construits dans les années 1950-1960 :
  - ✓ sur le centre du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) de Marcoule (Gard – réacteurs G1, G2 et G3) ;
  - ✓ sur les sites EDF de Chinon (Indre-et-Loire – réacteurs Chinon A1, A2 et A3), Bugey (Ain – réacteur Bugey 1) et Saint-Laurent-des eaux (Loir-et-Cher – réacteurs Saint-Laurent A1 et A2) ;
- la deuxième génération correspond aux réacteurs à eau pressurisée actuellement en fonctionnement. Elle est constituée de 58 réacteurs en fonctionnement répartis sur 19 sites, mis en service entre 1977 et 1999. Le premier réacteur de cette génération, mis en service sur le site de Chooz (Ardennes – réacteur Chooz A), est en cours de démantèlement.
- la troisième génération correspond au réacteur EPR (Evolutionary Power Reactor) de Flamanville (Manche) actuellement en construction. Ce type de réacteur appartient aussi à la filière des réacteurs à eau pressurisée.

D'autres types de réacteurs électronucléaires sont aujourd'hui arrêtés. Il s'agit du prototype industriel de réacteur à eau lourde du site EDF de Brennilis (Finistère – réacteur EL 4), des réacteurs à neutrons rapides du site EDF de Creys-Malville (Isère - réacteur Superphénix) et du centre CEA de Marcoule (Gard – réacteur Phénix).

Les usines qui participent à la fabrication et au recyclage du combustible nucléaire permettent notamment d'enrichir l'uranium (pour augmenter sa teneur en ^{235}U), de constituer les assemblages de combustible utilisés dans les réacteurs et de les traiter après utilisation pour en récupérer la part valorisable[5]. Ces opérations sont réalisées dans des installations des groupes Framatome ou Orano, par exemple sur les sites de Romans sur Isère (Drôme, FBFC), Marcoule (Gard, Melox) et de La Hague (Manche).

Les déchets radioactifs produits par le secteur électronucléaire (cf. Figure 1-6) au sens large (centrales et usines de fabrication des combustibles) représentent fin 2017 environ 59 % du volume total des déchets radioactifs (7).

Les principales installations de recherche productrices de déchets radioactifs sont exploitées par le CEA, notamment pour la conception de réacteurs de nouvelles générations, pour la gestion des combustibles et des déchets radioactifs et pour la Défense nationale. Parmi les principaux centres du CEA conduisant des activités nucléaires, on peut citer ceux de Marcoule (Gard) et de Cadarache (Bouches-du-Rhône). Outre les activités du CEA, la recherche menée dans le secteur médical, la physique des particules, l'agronomie, la chimie, la biologie produit elle-aussi des déchets radioactifs. Au total, les déchets produits par la recherche représentent fin 2017 environ 28 % du volume total des déchets radioactifs (7).

Le secteur de la défense concerne principalement la force de dissuasion, dont la propulsion nucléaire de certains navires de la Marine nationale et les activités liées aux armes du centre CEA de Valduc (Côte d'Or). Les déchets produits par le secteur de la défense représentent fin 2017 environ 9 % du volume total des déchets radioactifs (7).

Les autres activités utilisant la radioactivité (industrie, irradiateurs, diagnostics médicaux…) produisent le restant des déchets radioactifs, soit environ 4 %.

[5] Dans les combustibles déchargés des réacteurs après utilisation, de l'uranium et du plutonium peuvent être récupérés et réutilisés pour fabriquer de nouveaux combustibles.

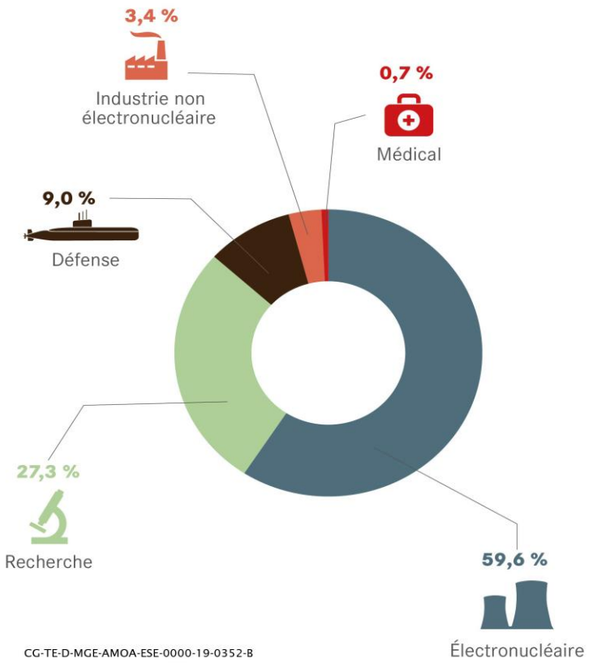


Figure 1-6 *Répartition par secteur économique du volume de déchets (en équivalent conditionné) déjà stockés ou destinés à être pris en charge par l'Andra à fin 2017 (7)*

1.2.3 Les approches et stratégies pour la gestion des déchets radioactifs

L'article L. 542-1 du code de l'environnement fixe les objectifs de la gestion durable des déchets radioactifs. Selon cet article, « *la gestion durable des matières et des déchets radioactifs de toute nature, résultant notamment de l'exploitation ou du démantèlement d'installations utilisant des sources ou des matières radioactives, est assurée dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement. La recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sont entreprises afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures*. »

Lorsqu'ils sont produits, les déchets radioactifs se trouvent sous forme brute, gazeuse, liquide ou solide.

Trois approches ou stratégies pour leur gestion sont décrites par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)[6] :

- « diluer et disperser »,
- « différer et décroître »
- « concentrer et confiner ».

Les « approches » de gestion au sens de l'AIEA sont parfois dénommées « filières », « voies » ou « solutions » de gestion dans les textes français.

L'approche « diluer et disperser » correspond au rejet dans le milieu naturel d'effluents liquides et gazeux. C'est une pratique globalement considérée comme légitime pour la gestion de certains effluents dès lors qu'elles sont appliquées dans les limites et conditions fixées par les organismes de réglementation. Le rejet d'effluents dans le milieu naturel est pratiqué par les industries (cheminées des usines, centrales thermiques, rejets de station d'épuration des collectivités…) et par les particuliers (échappement des voitures individuelles, chauffage, assainissement par épandage…). Pour les rejets d'effluents radioactifs gazeux et liquides dans l'environnement, c'est l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) qui fixe les autorisations pour chaque installation nucléaire après avoir vérifié que leurs caractéristiques le permettent et qu'elles ne portent atteinte, ni à la santé des personnes, ni à la qualité de l'environnement. Les exploitants des installations nucléaires sont tenus de réduire l'impact de ces rejets à des valeurs aussi basses que possible (8).

L'approche « différer et décroître » implique souvent de placer temporairement les déchets radioactifs dans une installation d'entreposage afin d'attendre que leur radioactivité décroisse. Elle constitue un mode de gestion durable pour les déchets radioactifs à vie très courte, dont la radioactivité disparait naturellement par décroissance radioactive sur une durée maximale de quelques années. Ils sont ensuite éliminés dans une filière conventionnelle correspondant à leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. Pour les autres déchets radioactifs, cette approche permet d'attendre que des conditions de transport ou de disponibilité soient réunies avant leur transfert vers une unité de conditionnement, un autre entreposage d'attente ou une installation de stockage.

DÉFINITION DES TERMES « ENTREPOSAGE » ET « STOCKAGE »

Le code de l'environnement (article L. 542-1-1) définit l'entreposage de matières ou de déchets radioactifs comme « l'opération consistant à placer ces substances à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, dans l'attente de les récupérer ». Cette définition est équivalente à celles données par la directive européenne du 19 juillet 2011 et par l'AIEA (9).

Le code de l'environnement (article L. 542-1-1) définit le stockage des déchets radioactifs comme « l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive […] ». La directive européenne du 19 juillet 2011 (10) définit le stockage comme « le dépôt de combustible usé ou de déchets radioactifs dans une installation sans intention de retrait ultérieur ». Elle rejoint la définition du stockage définitif donnée par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), à savoir « la mise en place de déchets radioactifs dans une installation ou un emplacement sans intention de les récupérer » (9).

La notion de stockage se distingue donc de la notion d'entreposage par son caractère potentiellement définitif et par l'absence d'intention de récupérer les déchets dans le futur, au moment où ils sont stockés.

L'approche « concentrer et confiner » correspond à la réduction du volume des déchets et au confinement des radionucléides qu'ils contiennent. Le confinement est obtenu en premier lieu grâce à un processus de conditionnement destiné à empêcher ou à réduire considérablement le risque de leur dispersion dans l'environnement.

[6] Créée en 1957, l'AIEA a pour mission de promouvoir l'utilisation sûre des technologies nucléaires à des fins pacifiques. C'est une organisation des Nations unies qui regroupait, en janvier 2014, 161 États membres. Les activités de l'AIEA consistent notamment en la rédaction de textes, appelés « normes de sûreté » ou « Safety Standards », décrivant les principes et pratiques de sûreté ; les États membres peuvent utiliser ces textes comme base de leur réglementation nationale (Source ASN).

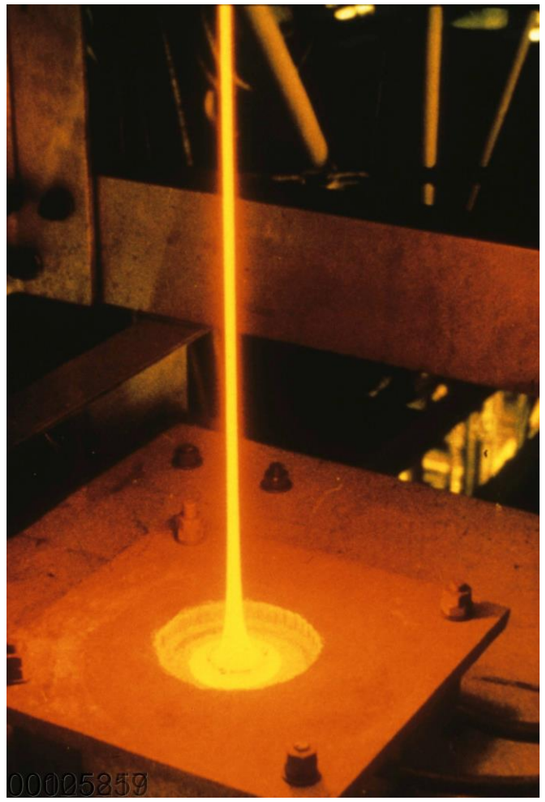


Figure 1-7 *Coulée de verre en fusion contenant des déchets de haute activité (Source Orano)*

Le conditionnement représente l'ensemble des opérations consistant à introduire des déchets dans un conteneur[7], où ils sont incorporés, ou non, dans un matériau dit « d'enrobage » (cf. Figure 1-7). Les opérations de conditionnement comprennent par exemple le compactage, la vitrification, la cimentation, le bitumage, la mise en conteneur (cf. Figure 1-8). Elles permettent de constituer des « colis de déchets », dans lesquels les déchets radioactifs sont mis sous une forme convenant à leur transport, leur entreposage ou leur stockage. La mise en stockage des colis de déchets ajoute à cette approche le confinement des déchets radioactifs sur de grandes échelles de temps, adaptées à leurs caractéristiques physico-chimiques.



Figure 1-8 *Exemples de colis de déchets - déchets de haute activité (HA) vitrifiés à gauche et déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) cimentés à droite*

1.2.4 La classification française des déchets radioactifs et les filières de gestion en France

Il n'existe pas de critère unique permettant de déterminer la nocivité d'un déchet radioactif et la gestion qui lui est appropriée. Pour cela, il est nécessaire d'étudier non seulement la radioactivité des différents radionucléides qu'il contient, mais aussi de prendre en compte sa nature physico-chimique et son éventuelle toxicité chimique. Divers autres facteurs, comprenant notamment l'exposition professionnelle induite, la sûreté à long terme et les aspects socio-économiques, doivent aussi être pris en compte.

Une fois qu'une filière de gestion a été retenue pour un déchet, un ensemble d'opérations adaptées à ses spécificités est mis en œuvre en vue d'assurer sa mise en sécurité définitive conformément aux exigences de L. 542-1 du code de l'environnement. Parmi ces opérations on peut citer le regroupement, le contrôle, le traitement, le rejet, le conditionnement, l'entreposage, le transport et le stockage.

Pour identifier la gestion appropriée aux différents déchets radioactifs en fonction de leurs spécificités, la France s'est munie d'une classification (11) (cf. Figure 1-9) qui repose principalement sur le niveau de radioactivité et sur la durée de la période radioactive (cf. Chapitre 1.1 du présent document) :

- quatre niveaux de radioactivité des déchets radioactifs ont été définis : la très faible activité (TFA), la faible activité (FA), la moyenne activité (MA) et la haute activité (HA) ;
- trois durées de période radioactive ont été retenues : les déchets à vie très courte de période inférieure à 100 jours, les déchets à vie courte de période inférieure à 31 ans et les déchets à vie longue de période supérieure à 31 ans.

Cette classification pose les principes d'orientation d'une catégorie de déchets vers une filière de gestion. Toutefois, un déchet peut très bien relever d'une catégorie de la classification et ne pas être accepté dans la filière correspondante du fait de ses autres caractéristiques : la catégorie du déchet n'est pas obligatoirement assimilable à sa filière de gestion.

[7] Une étape de préparation des déchets peut éventuellement précéder la mise en conteneur (pré-conditionnement).



Figure 1-9 *Filières de gestion développées pour les différentes catégories de déchets*

1.2.5 Les volumes, activités et répartitions des différentes catégories de déchets par niveaux d'activité

Compte tenu des filières de gestions retenues, les déchets sont souvent regroupés en 6 grandes catégories :

- les déchets à vie très courte (VTC). Leur activité varie très rapidement par décroissance radioactive ;
- les déchets de très faible activité (TFA). Leur niveau d'activité est généralement inférieur à cent becquerels par gramme ;
- les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC). Leur niveau d'activité se situe entre quelques centaines, jusqu'à environ un million de becquerels par gramme ;
- les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). Leur activité est variable en fonction de leur nature (déchets de graphite, déchets radifères...). Elle peut atteindre jusqu'à environ cent mille becquerels par gramme ;
- les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL). Leur activité est de l'ordre d'un million à un milliard de becquerel par gramme ;
- les déchets de haute activité. Leur niveau d'activité est de l'ordre de plusieurs milliards de becquerels par gramme.

La figure 1-10 illustre la répartition en volumes et en activité des déchets HA, MA-VL, FA-VL, FMA-VC et TFA déjà stockés en France ou destinés à être pris en charge par l'Andra (7).

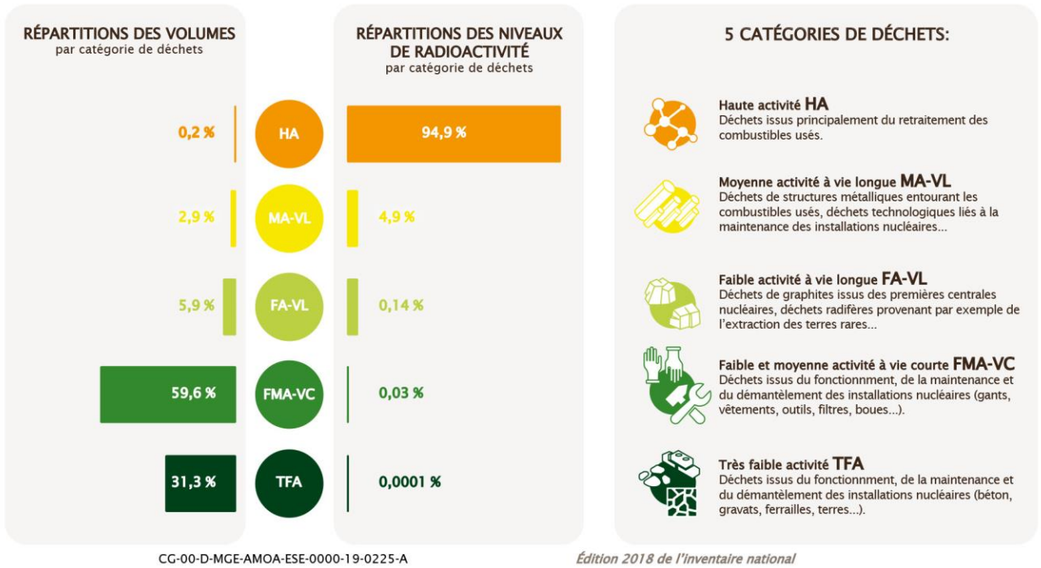


Figure 1-10 Répartition des déchets radioactifs en France (7)

La répartition des volumes et des activités des déchets (7) montre que la plus grande part des déchets, environ 90 % du volume, sont de faible activité (environ 0,3 % de l'activité totale). En revanche, une part très minoritaire, représentant environ 0,2 % du volume total, concentre à elle seule près de 95 % de la radioactivité totale. En lien direct avec l'approche de « concentration et de confinement », ces déchets de haute activité ont été concentrés pour réduire le volume des déchets à gérer. Ils sont vitrifiés pour confiner les substances radioactives en les bloquant au cœur du matériau vitreux.

Les déchets à vie très courte (VTC), principalement issus des activités médicales et dont la radioactivité disparaît en quelques dizaines de jours et au maximum sur quelques années, ne sont pas pris en charge par l'Andra. Leur volume, environ 2 000 m^3, est stable (7). Après entreposage de décroissance, ils sont éliminés dans des filières conventionnelles adaptées à leurs caractéristiques.

Des précisions sur la nature des différentes catégories de déchets sont présentées dans l'annexe 1 au présent volume.

1.2.6 Les centres de stockage de déchets radioactifs existants en France

Le stockage de déchets radioactifs est une pratique commune dans le monde pour la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs. Parmi les nombreux centres de stockage actuellement en cours d'exploitation dans le monde, on peut citer à titre illustratif les centres d'El Cabril en Espagne, de Forsmark en Suède, de Rokkasho au Japon, de Vaalputs en Afrique du sud ou d'Andrews dans l'état du Texas.

La France possède 3 centres de stockage de déchets radioactifs sous la responsabilité de l'Andra (cf. Tableau 1-1).

Tableau 1-1 Centres de stockage de déchets radioactifs existants en France

Déchets de très faible activité (TFA)	 *Figure 1-11 Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES) dans l'Aube - en exploitation*
Déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC)	 *Figure 1-12 Centre de stockage de la Manche (CSM) – centre exploité de 1969 à 1994 – en phase de démantèlement et de fermeture*



Figure 1-13 Centre de stockage de l'Aube (CSA) – en exploitation

Les centres de stockage français sont adaptés aux déchets de très faible activité (TFA) et de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) qui constituent plus de 90 % du volume de déchets radioactifs produits chaque année en France.

À ce jour, la France ne dispose pas de centre de stockage pour les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) et pour les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL). Pour compléter le système industriel existant, l'Andra est chargée d'étudier la conception de centres de stockage adaptés à leur prise en charge.

Le projet Cigéo, constitue le projet français de centre de stockage des déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL).

En l'absence d'un centre de stockage disponible pour leur mise en sécurité définitive, les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) produits par les activités nucléaires françaises sont actuellement entreposés dans des installations d'Orano, du CEA et d'EDF, la plus grande part se trouvant actuellement sur le site Orano de La Hague (Manche) et sur les centres CEA de Marcoule (Gard) et de Cadarache (Bouches-du-Rhône) (cf. Chapitres 0 et 2.1.4 du présent document).

Au total, les volumes de déchets actuellement entreposés sont d'environ 3 900 m³ de déchets HA et d'environ 42 000 m³ de déchets MA-VL (cf. Chapitre 3 du présent document). Si l'on considère les volumes qui seront encore générés par les installations nucléaires existantes au terme prévisible de leur exploitation et de leur démantèlement, les déchets déjà produits représentent environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL totaux (7).

1.3 Les spécificités des déchets HA et MA-VL

1.3.1 Les déchets de haute activité

Les déchets HA présentent un niveau de radioactivité de l'ordre de plusieurs milliards de becquerels par gramme et contiennent des quantités importantes de radionucléides à période longue.

Les déchets HA sont très radioactifs car ils contiennent des produits de fission et des actinides mineurs formés dans le combustible nucléaire lors de son passage dans le cœur du réacteur nucléaire. Ce sont les résidus non recyclables de la « combustion nucléaire ». Lors du retraitement du combustible nucléaire, ces radionucléides sont séparés du reste du combustible irradié, c'est-à-dire de l'uranium et du plutonium qui constituent sa part valorisable. Dans les déchets HA, il reste quelques traces non séparées d'uranium et de plutonium.

Les déchets HA contiennent aussi des produits d'activation, issus notamment d'impuretés présentes initialement dans les pastilles combustibles, ainsi que des « fines », qui sont des particules insolubles produites pendant le retraitement lors du cisaillage et lors de la dissolution du combustible. Les produits d'activation et les fines représentent une part plus faible de l'activité des déchets HA.

Les déchets HA sont conditionnés sous forme vitrifiée. Pour cette vitrification, les déchets HA sont d'abord « calcinés » (pour former des oxydes de produits de fission et actinides). Ensuite, les calcinats sont mélangés avec de la fritte de verre et des adjuvants et chauffés à plus de 1 000 °C dans un creuset de vitrification. Le déchet vitrifié chaud est ensuite coulé dans un conteneur en acier inoxydable. Son couvercle en acier inoxydable est soudé.

La vitrification des déchets HA dans les ateliers de vitrification de Marcoule et de La Hague a permis d'améliorer considérablement la sûreté de leur entreposage, en comparaison de la situation antérieure où l'entreposage des déchets HA s'effectuait sous forme liquide, dans des cuves.

Au terme de la vitrification, les déchets initiaux (produits de fission, actinides et produits d'activation) présents dans un colis de déchets HA représentent environ 9 kilogrammes, soit de l'ordre de 2 % de la masse du colis. Malgré une certaine « dilution » des déchets initiaux dans le verre lors de l'étape de vitrification, les colis de déchets HA restent très concentrés. Au total, ils ne représentent que 0,2 % du volume total des déchets radioactifs existants, mais contiennent près de 95 % de leur radioactivité totale.

La grande concentration de la radioactivité dans les déchets HA se traduit par un dégagement thermique élevé, dont une part importante est due à leur teneur en césium 137 (^{137}Cs) et en strontium 90 (^{90}Sr). Ce dégagement thermique décroît d'environ 50 % tous les 30 ans en lien avec la décroissance radioactive de ces radionucléides.

1.3.2 Les déchets de moyenne activité à vie longue

Les déchets MA-VL présentent un niveau de radioactivité de l'ordre d'un million à un milliard de becquerels par gramme. Ils contiennent, comme les déchets HA, des quantités importantes de radionucléides à période longue.

Les déchets MA-VL se composent principalement :

- de structures métalliques séparées lors du traitement des combustibles nucléaires ;
- de composants métalliques ayant séjourné dans des réacteurs nucléaires ;
- de déchets issus de la maintenance des installations nucléaires et de leur démantèlement ;
- de résidus de la décontamination des effluents d'exploitation des installations nucléaires.

Les modes de conditionnement des déchets MA-VL sont très variables et adaptés à leurs natures variées. Les principales sont le compactage, le bitumage et la cimentation.

Les déchets MA-VL représentent un peu moins de 3 % du volume total des déchets radioactifs et contiennent près de 4 % de leur radioactivité totale.

1.3.3 La dangerosité des déchets HA et MA-VL

Les déchets HA et MA-VL concentrent plus de 99 % de la radioactivité de l'ensemble des déchets radioactifs dans un volume ne représentant qu'un peu plus de 3 % du volume total (cf. Figure 1-10).

Leur niveau de radioactivité leur confère une forte dangerosité radiologique. Un individu qui se placerait au voisinage immédiat de déchets HA, sans protection, aurait une espérance de vie de quelques minutes du fait de leur rayonnement.

De par leurs natures et leurs concentrations nettement plus faibles en radionucléides, les déchets MA-VL sont en général moins irradiants, mais ils restent dangereux. Cela s'illustre bien par l'exemple des colis standards de déchets compactés (CSD-C) d'Orano produits à La Hague. Ces déchets contiennent des structures métalliques issus du traitement des assemblages combustibles (coques issues du cisaillage des gaines et embouts des assemblages cisaillés). Ils figurent parmi les déchets radioactifs MA-VL les plus irradiants. Si une personne était exposée directement au rayonnement émis par un de ces colis de déchets, sans protection, l'irradiation serait environ cent fois moindre qu'en présence d'un colis de déchets HA. Elle provoquerait néanmoins rapidement des lésions et pourrait être létale en cas d'exposition prolongée.

Les déchets HA et MA-VL sont également dangereux dans le cas où des personnes inhaleraient les poussières qui seraient émises à proximité des colis si un accident entraînait une perte de confinement. Une ingestion ou une inhalation de particules de déchets HA et MA-VL pourrait entraîner une contamination interne et une irradiation de

l'organisme potentiellement très grave pour la santé. La concentration élevée des actinides mineurs dans les déchets HA et MA-VL[8] les rend particulièrement dangereux en cas d'exposition interne. En effet, les actinides, qui sont des émetteurs de particules alpha, ont en cas d'ingestion ou d'inhalation des effets sanitaires potentiellement très graves. Le conditionnement des déchets et notamment leur vitrification a pour effet notable de limiter très fortement l'émission de particules et de poussières (aérosols) en cas d'accident.

En cas de dispersion dans l'environnement, l'ingestion ou l'inhalation de particules ou de poussières émises par les déchets radioactifs HA et MA-VL comporte des risques. Les phénomènes de dispersion, de dilution, de déposition, d'intégration partielle dans la chaîne alimentaire et de métabolisation tendent toutefois à réduire les risques d'exposition aigüe. Les mécanismes d'estimation des conséquences radiologiques font alors appel à des modèles spécifiques en fonction des voies d'exposition (cf. Volume 6 de la présente étude d'impact).

Même si la radioactivité des déchets HA et MA-VL décroit, les échelles de temps associées à leur dangerosité sont très longues. En ordre de grandeur, ce n'est qu'au bout de plusieurs centaines de milliers d'années que leur radioactivité approchera la radioactivité initiale des déchets de faible activité qui peuvent être stockés en surface ou à faible profondeur.

Malgré cette dangerosité intrinsèque des déchets radioactifs, les installations de gestion des colis de déchets HA et MA-VL, de par leurs conceptions très robustes et de par leur unique objectif de mise en sécurité de ces déchets, génèrent peu d'exposition du public et de l'environnement en situations normales et dégradées. L'exposition maximale du public liée aux activités du centre de stockage Cigéo, estimée par l'Andra et évaluée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et ses appuis techniques en 2018 au stade du dossier d'options de sûreté, est de l'ordre du microsievert en situation normale et de quelques millisievert en situation dégradée (cf. Chapitres 2.1 et 2.4 du présent document et volume 6 de la présente étude d'impact). En situation accidentelle, elles seraient dans tous les cas inférieurs à la valeur de 10 mSv fixée comme seuil de mise à l'abri des populations en cas d'accident nucléaire (article D 1333-84 du code de l'environnement).

Synthèse

Différents secteurs économiques utilisent les propriétés de la radioactivité et produisent des déchets radioactifs. Il s'agit de :

- la production d'électricité ;
- la défense nationale ;
- l'industrie classique ;
- la recherche ;
- le domaine médical.

Les déchets radioactifs sont des substances qui contiennent des éléments radioactifs et émettent des rayonnements qui leur confèrent une dangerosité spécifique en fonction de leur nature et de leur niveau de radioactivité.

La classification française des filières de gestion des déchets radioactifs repose sur deux paramètres permettant de définir le mode de gestion approprié : le niveau de radioactivité et la période radioactive des éléments.

Des filières de gestion durable ont été développées pour la mise en sécurité définitive des déchets à vie très courtes (VTC), pour les déchets de très faible activité (TFA) et pour les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC). Environ 90 % des déchets produits annuellement peuvent être ainsi stockés dans les centres exploités par l'Andra.

Afin de compléter le système global de gestion durable des déchets radioactifs, l'Andra mène des études pour concevoir des solutions techniques permettant, à terme, une mise en sécurité définitive des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) et des déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL).

Les déchets HA et MA-VL représentent un peu plus de 3 % du volume total des déchets, mais concentrent à eux seuls environ 99 % de la radioactivité totale des déchets radioactifs. Ces catégories de déchets sont celles qui présentent la dangerosité la plus grande et la plus durable dans le temps.

Il existe actuellement environ 3 900 m^3 de déchets HA et environ 42 000 m^3 de déchets MA-VL français entreposés en France en attente d'une filière durable de gestion. Si l'on considère les volumes qui seront encore générés par les installations nucléaires existantes, cela représente environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL totaux prévisibles.

Le projet de centre de stockage Cigéo constitue le projet français de centre de stockage des déchets HA et MA-VL en vue de leur mise en sécurité définitive.

[8] À titre d'exemple de teneur en actinide mineur dans les déchets, l'américium 241 (^{241}Am) est présent à raison d'environ 10^{14} becquerels par colis de déchets vitrifiés et d'environ 10^{11} becquerels par colis MA-VL de déchets compactés de type CSD-C.

2

Les solutions de substitution examinées et la justification des principales raisons techniques et environnementales des choix effectués

2.1 Les choix stratégiques pour la gestion des déchets HA et MA-VL 20
2.2 Le choix du stockage géologique parmi les différentes pistes de gestion des déchets radioactifs HA et MA-VL 24
2.3 Le choix français du stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien 49
2.4 Une installation industrielle sûre pendant son fonctionnement et à long terme après sa fermeture 64
2.5 Un projet développé en dialogue avec la société 91
2.6 Les choix d'implantation du centre de stockage Cigéo 98
2.7 Les choix pour la conception du centre de stockage Cigéo 119
2.8 Les choix d'implantation des opérations du projet global Cigéo liés à la construction et au fonctionnement du centre de stockage Cigéo 134

2.1 Les choix stratégiques pour la gestion des déchets HA et MA-VL

2.1.1 Le contexte

Il existe actuellement environ 3 900 m³ de déchets HA et environ 42 000 m³ de déchets MA-VL français entreposés en attente d'une filière durable de gestion. Si l'on considère les volumes qui seront encore générés par les installations nucléaires existantes, cela représente environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL totaux prévisibles (7).

La dangerosité de ces déchets HA et MA-VL nécessite de mettre en place, aux différentes étapes de leur gestion, des dispositifs appropriés de sécurité et de protection de la santé des personnes et de l'environnement. De tels dispositifs sont mis en œuvre dans les entreposages dans lesquels les déchets HA et MA-VL déjà produits sont actuellement conservés à titre temporaire (cf. Chapitre 1.2.3 du présent document). Toutefois, cette étape d'entreposage ne présente pas un caractère pérenne. Les installations d'entreposage ont une durée de vie limitée et elles nécessitent d'être renouvelés périodiquement pour maintenir leur niveau de sûreté (cf. Chapitres 1.2.3, 0 et 2.2.2 du présent document).

Selon le code de l'environnement, la gestion durable des déchets a pour objectif leur mise en sécurité définitive pour prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations suivantes. En effet, ce sont les générations actuelles qui ont exercé les activités nucléaires et qui en ont bénéficié (cf. Chapitre 1.1.2 du présent document). Il est donc de leur responsabilité (article L. 542-1 du code de l'environnement) de déployer les options techniques permettant d'assurer la gestion pérenne et sûre des déchets HA et MA-VL produits, sans en reporter indéfiniment la charge de générations en générations. L'exposé des motifs de la loi votée en 2016 pour préciser les modalités de création d'un stockage géologique (12)(13), portée au Parlement par des élus d'engagements politiques différents, évoque la volonté d'élus « *qui ont en commun de ne pas laisser aux générations à venir, sans solution face à une situation dont nous avons bénéficié et dont nous bénéficierons encore plusieurs décennies* » et le refus de « *l'égoïsme générationnel qui consisterait à laisser aux générations nouvelles le soin d'assumer seules les contreparties de nos avantages accumulées pendant la période de production de nos réacteurs* ».

Aujourd'hui, des financements, des ressources humaines, des compétences et des moyens techniques sont disponibles pour engager des décisions visant à mettre définitivement en sécurité les déchets HA et MA-VL. Ces connaissances et ces moyens financiers et techniques sont accessibles en raison de l'existence de l'industrie électronucléaire actuelle, adossée à un important secteur de recherches nucléaires. Ces moyens ont été développés et encadrés par des politiques nationales sur plusieurs décennies.

Compte tenu des déchets HA et MA-VL déjà produits[9], la question de leur gestion durable est indépendante du fait que leur production perdure ou cesse à l'avenir. Elle doit être bien distinguée des décisions concernant l'avenir des programmes militaires ou de la filière électronucléaire.

LE FINANCEMENT DE LA GESTION DURABLE DES DÉCHETS HA ET MA-VL

La loi du 28 juin 2006 (14) prévoit un cadre pour le financement de la gestion durable des déchets HA et MA-VL avec la création de plusieurs fonds spécifiques destinés à financer les études et les recherches, les études de conception et travaux préalables, ainsi que la construction, le fonctionnement, le démantèlement et la fermeture d'un centre de stockage en couche géologique profonde adapté à ces types de déchets.

L'ensemble de ces dépenses est financé intégralement par les producteurs de déchets, conformément au principe « pollueur-payeur » (article L. 110-1 II 3° du code de l'environnement) et de l'article L. 542-1 du code de l'environnement.

Les principes de financement fixés par les articles L. 542-12-2 et L. 542-12-3 du code de l'environnement instituent respectivement au sein de l'Andra :

- un fonds destiné au financement de la construction, de l'exploitation, de la fermeture, de l'entretien et de la surveillance des installations d'entreposage ou de stockage des déchets de haute activité ou des déchets de moyenne activité à vie longue construites ou exploitées par l'Andra. Ce fonds aura pour ressources les contributions des exploitants d'installations nucléaires de base définies par des conventions.
- un fonds destiné à financer les études nécessaires à la conception des installations de stockage des déchets radioactifs de haute activité et des déchets de moyenne activité à vie longue construites par l'Andra, ainsi que les opérations et travaux préalables au démarrage de la phase de construction de ces installations. Ce fonds a pour ressources le produit de la contribution spéciale prévue au I de l'article 58 de la loi n° 2013-1279 du 29 décembre 2013 (15) de finances rectificative pour 2013.

Les études et recherches bénéficient également d'un financement par fonds créé à l'article L. 542-121 du code de l'environnement, fonds destiné au financement des recherches et études sur l'entreposage et le stockage en couche géologique profonde des déchets radioactifs. Ce fonds a pour ressources le produit de la taxe dite de "recherche" additionnelle à la taxe sur les installations nucléaires de base prévue au V de l'article 43 de la loi de finances pour 2000 (n° 99-1172 du 30 décembre 1999 (16)). Ce fonds finance notamment les études de recherches et développement de l'Andra et les coûts de fonctionnement du Laboratoire souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne (cf. Chapitres 2.3.1 et 2.3.2 du présent document).

En complément de ces fonds, un dispositif de sécurisation de la disponibilité des financements auprès des producteurs de déchets a été instauré par la loi du 28 juin 2006 (14). Les articles L. 594-1 et L. 594-2 du code de l'environnement prévoient notamment que :

- les exploitants d'installations nucléaires de base évaluent les charges de gestion de leurs combustibles usés et déchets radioactifs ;
- ils constituent les provisions correspondant à ces charges et affectent, à titre exclusif, à la couverture de ces provisions les actifs nécessaires ;
- ils comptabilisent de façon distincte ces actifs qui doivent présenter un degré de sécurité et de liquidité suffisant pour répondre à leur objet. Leur valeur de réalisation doit être au moins égale au montant des provisions, à l'exclusion de celles liées au cycle d'exploitation.

En application de l'article L 594-4 du code de l'environnement, un dispositif de contrôle a été mis en place. Les exploitants transmettent tous les trois ans à l'autorité administrative compétente un rapport décrivant l'évaluation des charges, les méthodes appliquées pour le calcul des provisions afférentes à ces charges et les choix retenus en ce qui concerne la composition et la gestion des actifs affectés à la couverture des provisions. Ils transmettent tous les ans à l'autorité administrative compétente une note d'actualisation de ce rapport et l'informent sans délai de tout événement de nature à en modifier le contenu.

[9] Des colis de déchets sont produits depuis le début des années soixante.

2.1.2 Les exigences de protection de l'homme et de l'environnement

Toutes les installations nucléaires, y compris les installations de stockage de déchets, sont soumises à des objectifs réglementaires de protection de l'homme et de l'environnement, fixés par l'ASN, en cohérence avec les recommandations de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).

LA COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (CIPR)

Créée en 1928, la CIPR est une organisation non-gouvernementale dont l'objectif est d'apprécier l'état des connaissances sur les effets des rayonnements afin d'identifier leurs implications du point de vue des règles de protection à adopter.

La CIPR analyse les résultats des recherches effectuées dans le monde et examine les travaux d'autres organisations internationales. Elle émet des recommandations générales, destinées, en particulier, aux organismes réglementaires, sur les règles de protection et les niveaux d'exposition à ne pas dépasser (source ASN).

D'une manière générale, la conception des installations nucléaires doit viser à maintenir leur impact radiologique au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu notamment de l'état des techniques et des facteurs économiques et sociaux.

La réglementation française fixe à 1 millisievert (mSv) la dose efficace[10] maximale (cf. Chapitre 1.1.3 du présent document) admissible à laquelle chaque personne du public peut être exposée en une année de la part de l'ensemble des activités nucléaires, c'est-à-dire sans compter l'exposition liée à la radioactivité naturelle et les doses reçues lors des examens ou des traitements médicaux[11] (article R. 1333-11 du code de la santé publique).

Pour comparaison, l'exposition efficace moyenne liée à la radioactivité naturelle des français de métropole est estimée à 2,9 mSv/an (exposition du corps entier au radon, aux rayonnements telluriques, aux rayonnements cosmiques, aux denrées alimentaires et au tabac) (cf. Chapitre 1.1.4 du présent document). L'exposition de chaque individu peut varier significativement autour de cette valeur moyenne selon son lieu d'habitation et son mode de vie (3). Les doses susceptibles d'être reçues lors d'examens ou de traitements médicaux peuvent être nettement supérieures à ces valeurs. Ces expositions liées aux pratiques médicales et les risques qu'elles induisent sont compensés par les bénéfices attendus pour la santé des patients.

Concernant les expositions dues aux activités humaines, hors médecine, chaque personne du public est susceptible d'être exposée en parallèle à plusieurs sources de rayonnement, par exemple lorsque plusieurs installations nucléaires coexistent dans une même zone. Pour prendre en compte cette situation, la dose efficace individuelle maximale potentiellement générée par une seule installation, dénommée « contrainte »[12], est réduite à une fraction de la limite réglementaire totale de 1 mSv/an. Ainsi, la somme des expositions ne dépasse pas la limite par individu.

Pour les centres de stockage de déchets radioactifs de l'Andra, la contrainte de dose efficace individuelle est fixée, pour chaque centre, à 0,25 mSv/an pour le public. Cette contrainte de dose des installations française de stockage de déchets radioactifs est plus contraignante que la valeur classiquement retenue à l'international pour ce type d'installation. La CIPR et l'AIEA retiennent en effet une contrainte de dose de 0,3 mSv/an ((9).

Une dose efficace individuelle de 0,25 mSv correspond à une exposition très faible. Elle est similaire à la dose que chacun d'entre nous reçoit annuellement par la seule présence, dans notre propre corps, d'éléments radioactifs d'origine naturelle (auto-irradiation). Elle représente environ 10 % de l'exposition efficace moyenne des français de métropole par la radioactivité naturelle.

Si la contrainte de 0,25 mSv/an est applicable à la phase de fonctionnement et de démantèlement des installations, elle l'est aussi sur le long terme. Son respect équivaut à la mise en sécurité définitive des déchets. En effet, la CIPR stipule que les individus et les populations à l'avenir devraient bénéficier au moins du même niveau de protection vis-à-vis des déchets que la génération actuelle. De plus elle prévoit que soient prises en compte la période d'exploitation de l'installation accueillant les déchets, la période suivante au cours de laquelle la société restera en mesure de mettre en place une surveillance réglementaire et un contrôle administratif du site, mais aussi la période plus lointaine où la société pourrait ne plus être en mesure de garder un œil vigilant sur l'installation, voire où la mémoire de l'installation aurait été perdue.

LES EXIGENCES DU GUIDE DE SÛRETÉ DE L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (ASN) CONCERNANT LES STOCKAGE EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE

Le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde de l'ASN (19) indique que « *la protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde* ».

Pour s'assurer de l'adéquation du stockage à l'objectif fondamental, le guide de sûreté impose que des évaluations de l'impact radiologique soient effectuées, pendant l'exploitation du centre comme pour toute autre installation nucléaire, ainsi qu'à long terme après sa fermeture : « *Pour la situation de référence après la fermeture de l'installation de stockage, les doses efficaces individuelles calculées ne devront pas excéder la valeur de 0,25 mSv/an pour des expositions prolongées liées à des événements certains ou très probables.* »

L'évaluation de l'impact radiologique sur les personnes dépend de l'état de l'évolution intrinsèque des déchets et de l'installation, mais aussi du mode de vie de ces personnes. Aux grandes échelles de temps, faute de connaitre l'évolution future du mode de vie, le guide de sûreté de l'ASN mentionne de fonder l'évaluation sur l'hypothèse d'une constance de ce mode de vie (consommation de denrées alimentaires, modes d'exposition…).

Plus généralement, le guide de sûreté définit aussi les conditions dans lesquelles l'augmentation des incertitudes avec le temps est à prendre en compte, y compris l'occurrence de « situations altérées ».

Les évaluations de l'impact radiologique du centre de stockage Cigéo sont présentées dans les volumes IV et VI de la présente étude d'impact.

[10] La « dose efficace » mesure l'exposition d'une personne aux rayonnements en tenant compte de leur impact biologique sur les tissus affectés. Elle s'exprime en sieverts ou millisieverts.

[11] Il s'agit de dose d'exposition du corps entier, sachant que pour les expositions d'un organe ou d'un tissu, on considère des limites de dose équivalentes : ainsi, les limites de doses équivalentes pour le cristallin et pour la peau sont fixées respectivement à 15 mSv/an et à 50 mSv/an.

[12] La notion de contrainte de dose a été introduite en 1991 par la CIPR (publication n°60) (17). C'est une restriction appliquée aux doses résultant de l'exposition à une source unique. Elle vise à réduire les inégalités de distribution des doses entre individus. Elle est reprise par la directive 2013/59/EURATOM du conseil du 5 décembre 2013 (18) comme étant « *une restriction définie comme plafond prospectif de doses à l'individu, utilisée pour définir l'éventail d'options envisagées dans le processus d'optimisation pour une source de rayonnement donnée en situation d'exposition planifiée* ».

2.1.3 La gestion actuelle des déchets HA et MA-VL en France par entreposage

Les déchets HA et MA-VL déjà produits sont actuellement entreposés dans des bâtiments dédiés des installations nucléaires d'EDF, d'Orano et du CEA[13].

L'entreposage des colis de déchets HA et MA-VL s'effectue « à sec ». L'entreposage « sous eau », souvent dénommé entreposage en « piscine », est parfois utilisé pour certains déchets MA-VL en attente de conditionnement[14]. Cela ne constitue néanmoins qu'une pratique marginale en termes de volumes de déchets concernés.

Les protections apportées par les installations d'entreposage de colis de déchets à sec (cf. Figure 2-1 et figure 2-2) sont de plusieurs natures :

- des parois épaisses autour des colis pour empêcher le rayonnement d'atteindre les opérateurs et *a fortiori* le public ;
- des barrières de confinement s'opposant à la dispersion de particules radioactives dans les installations elles-mêmes et dans l'environnement. La première de ces barrières est généralement constituée par le conditionnement du déchet lui-même (conteneur et matrice). Les autres reposent sur les parois du bâtiment et sur son système de ventilation. Les barrières font l'objet d'une surveillance ;
- un contrôle d'accès interdisant à toute personne non avertie de s'approcher des déchets ;
- une résistance des installations d'entreposage aux perturbations naturelles (séismes, phénomènes climatiques, conditions atmosphériques…) et humaines (défaillances, accidents, malveillance…), ainsi qu'aux perturbations apportées par les déchets eux-mêmes (principalement la chaleur dégagée par les déchets HA).



Figure 2-1 *Hall d'entreposage de l'atelier de vitrification R7 UP2 800 d'Orano à La Hague © Orano*

S'agissant de bâtiments constitués de béton (cf. Figure 2-3) et d'acier et comportant des équipements mécaniques et électriques, les installations d'entreposage ont une durabilité limitée. Le vieillissement et l'obsolescence la restreignent en général à une cinquantaine d'années. Divers entrepôts, construits dans les années 1960 ou 1970, sont ainsi en cours de reprise aujourd'hui. Les colis de déchets en sont retirés et ils sont transférés, parfois après modification de leur conditionnement initial,[15] vers des installations d'entreposage plus modernes. Pour ces nouvelles installations d'entreposage, une durabilité plus importante est envisagée. Plusieurs dizaines d'années de plus sont visées par leur conception (plusieurs dizaines d'années au-delà de 50 ans).

Des projets de nouveaux entrepôts sont développés par les producteurs sur leurs sites. En effet, les capacités d'entreposage actuellement disponibles sur ces sites ne permettront pas de gérer l'ensemble des déchets dont la production régulière est prévue ou ceux qui devront être retirés des installations les plus anciennes. Les besoins en entreposage sont évalués périodiquement et suivis par l'État et les parties prenantes dans le cadre du plan national pour la gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) (20). Dans son avis du 1er décembre 2020 (21), l'ASN constate « *que les dates de saturation des entreposages existants et les besoins futurs en entreposage pour les 20 prochaines années ont été globalement bien identifiés par les producteurs. Toutefois, les estimations des capacités d'entreposage doivent être consolidées par l'ensemble des producteurs en intégrant des marges pour faire face à d'éventuels aléas sur les filières de gestion des déchets concernés, et ainsi être en mesure d'anticiper les besoins de capacités d'entreposage complémentaires et les procédures d'autorisation correspondantes.* »

Tous les déchets passent, sous une forme ou une autre, par une phase d'entreposage, parfois longue (cf. Chapitre 1.3 du présent document). La gestion des déchets radioactifs actuelle prévoit un système combinant l'entreposage et le stockage.

Le besoin d'installations d'entreposage perdure jusqu'à l'échéance de la mise en sécurité définitive des déchets HA et MA-VL, c'est-à-dire jusqu'à la fermeture définitive du centre de stockage (cf. Chapitres 5.1, 5.3.4, 5.4.4 et 7.4 du présent document).

LE PLAN NATIONAL DE GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) a été institué par la loi du 28 juin 2006 (14).

La loi a fixé trois grandes orientations que le PNGMDR doit suivre :

- la réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs est recherchée notamment par le retraitement des combustibles usés et le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs ;
- les matières radioactives en attente de traitement et les déchets radioactifs ultimes en attente d'un stockage sont entreposés dans des installations spécialement aménagées à cet usage ;
- après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant, pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection, être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde.

Les analyses prospectives, sur lesquelles le plan s'appuie, sont élaborées dans le cadre que la politique énergétique. Le PNGMDR a été publié pour la première fois en 2007, puis a fait l'objet de trois nouvelles éditions en 2010, en 2013 et en 2016, conformément aux dispositions de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement, qui prévoit une mise à jour triennale du plan.

Le PNGMDR prend la forme d'un document comportant trois parties, consacrées aux principes et objectifs de la gestion des matières et des déchets radioactifs, au bilan et aux perspectives d'évolution des filières de gestion existantes, ainsi qu'aux besoins et perspectives pour les filières de gestion à mettre en place.

Pour chaque filière, existante ou à mettre en place, le document présente un état des lieux complet, prenant en compte les dernières données disponibles, puis formule des propositions ou fixe des objectifs.

Le PNGMDR a fait l'objet d'un débat public organisé par la Commission nationale du débat public (CNDP) du 17 avril au 24 septembre 2019 (cf. Chapitre 2.5.3.3 du présent document).

[13] L'entreposage de déchets radioactifs est défini par le code de l'environnement (article L. 542-1-1) comme *« l'opération consistant à placer ces substances à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, dans l'attente de les récupérer »* (cf. paragraphe 1.2.3 du présent document).

[14] Les piscines d'entreposage de combustibles usés en attente d'évacuation ou de traitement, notamment celles situées sur les sites des centrales EDF, peuvent accueillir certains déchets MA-VL particuliers non encore conditionnés.

[15] Le reconditionnement des colis de déchets conduit généralement à augmenter leur volume.



Figure 2-2 *Exemple d'installation d'entreposage de déchets MA-VL : installation STE3 du site Orano de La Hague (photo prise à travers un hublot de protection) ©Orano*

La mise en œuvre des meilleures technologies disponibles en matière de génie civil et de matériaux, l'utilisation du retour d'expérience et les progrès issus des études et des recherches menées sur l'entreposage, notamment celles réalisées dans le cadre de la loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 (14), ouvrent la perspective de conférer une durée de fonctionnement de l'ordre du siècle aux nouvelles installations industrielles d'entreposage[16]. Pour atteindre cette performance, certaines options techniques sont à retenir lors de leur construction (choix des matériaux, épaisseurs d'enrobage des armatures des bétons de structure, conditions thermiques et hydriques à l'intérieur de l'entrepôt) (23).

Quelle que soit la durabilité des installations d'entreposage, au terme d'une certaine durée de fonctionnement, même séculaire, les colis de déchets doivent en être retirés et être transférés dans d'autres installations pour assurer à nouveau une protection efficace de l'homme et de l'environnement.

2.1.4 La spécificité de la gestion des déchets HA

Les études et recherches effectuées en France et dans les autres pays pour la gestion durable des déchets HA et MA-VL tiennent compte de la nature et des propriétés de ces déchets.

Outre un rayonnement externe très important, les colis de déchets HA produisent de la chaleur. En effet, ils contiennent des radionucléides (^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am, ^{244}Cm…) dégageant une quantité significative d'énergie thermique lors de leurs désintégrations radioactives.

Au moment de leur production, les colis de déchets HA produisent une quantité de chaleur très importante, de l'ordre de plusieurs milliers de Watt par colis. Cette chaleur est une contrainte de conception importante des installations qui les accueillent.

La décroissance radioactive des radionucléides entraîne une diminution forte de cette chaleur sur une durée de l'ordre du siècle, réduisant progressivement les contraintes de conception des installations. Ensuite, la décroissance de la chaleur est plus lente. Ce n'est qu'au-delà du millénaire qu'intervient une nouvelle réduction significative du dégagement de chaleur.

Ainsi, les propriétés des colis de déchets HA, importantes pour les installations qui les accueillent, peuvent se concevoir en deux périodes :

- une première période allant au plus jusqu'à une centaine d'années, caractérisée par une forte dissipation de chaleur, pour laquelle les installations d'entreposage en surface sont particulièrement adaptées. En effet, des dispositions classiques de ventilation (ventilation forcée au moyen de ventilateurs ou ventilation naturelle par tirage dans des cheminées) permettent de les refroidir efficacement en utilisant de l'air frais ;
- une seconde période, où les caractéristiques thermiques de ces déchets évoluent peu à l'échelle humaine.

En pratique, pour les colis de déchets HA français, le passage entre ces deux périodes intervient progressivement pendant la durée prévue de leur entreposage. Les colis de déchets HA existants ou à produire passent dans la seconde période avant les années 2150.

Il existe néanmoins certains colis de déchets de HA, dénommés « HA0 » (par opposition aux « HA1 » et « HA2 » plus thermiques), qui produisent moins de chaleur et pour lesquels une telle approche n'est pas justifiée. Ils offrent la possibilité de développer un quartier « pilote HA », dès le début du fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

Les déchets MA-VL n'évoluent pas non plus significativement en termes de caractéristiques thermiques ou radiologiques dans les entreposages sur une durée séculaire. En matière de gestion des déchets, il n'y a pas de gain substantiel à attendre qui justifierait, sur le plan technique, leur maintien en entreposage sur des durées prolongées.

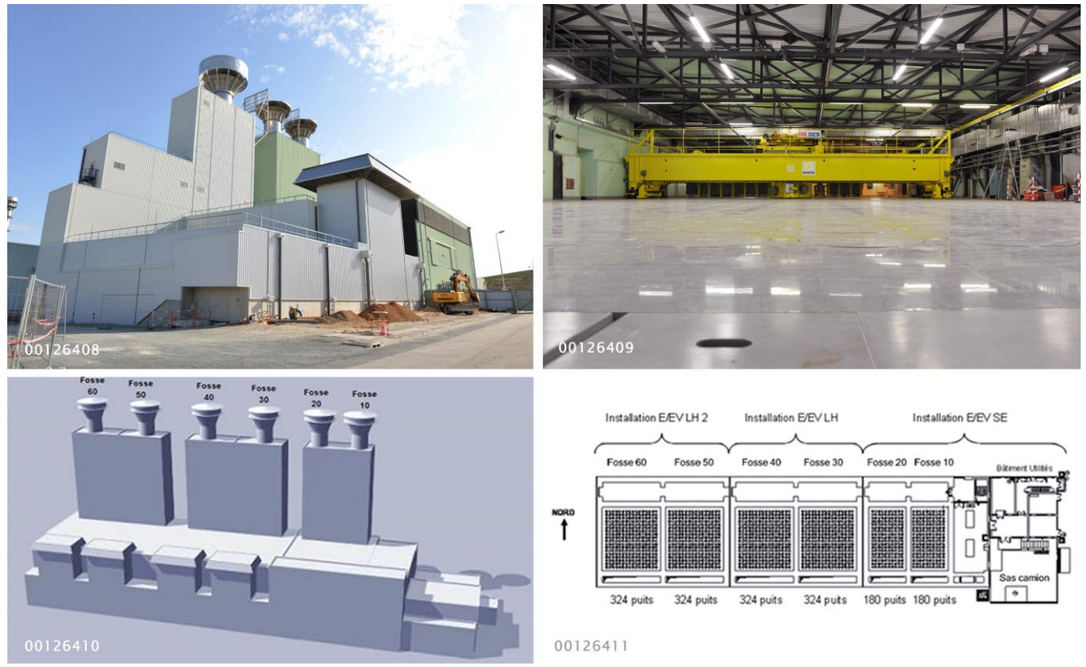


Figure 2-3 *Exemple d'installation d'entreposage de déchets HA : installation E-EV-SE du site Orano de La Hague (Source : Orano)*

[16] Les études et recherches sur l'entreposage sont conduites en vue de créer de nouvelles installations d'entreposage ou de modifier les installations existantes, pour répondre aux besoins, notamment en termes de capacité et de durée, recensés par le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. L'Andra a publié en 2013 un bilan des études et recherches sur l'entreposage des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue (22).

2.2 Le choix du stockage géologique parmi les différentes pistes de gestion des déchets radioactifs HA et MA-VL

2.2.1 Le contexte

La recherche et l'étude des pistes de gestion durable des déchets radioactifs HA et MA-VL a été initiée de longue date dans la plupart des pays ayant développé des programmes nucléaires militaires ou électronucléaires.

En France, le rapport Castaing (1983) et les rapports Goguel produits en 1987 (24) et 1988 (25), présentent déjà des pistes de gestion et une première analyse de leur faisabilité.

En mai 2019, dans le cadre du débat public relatif au plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), l'IRSN a établi, à la demande de la Commission nationale du débat public un « Panorama international des recherches sur les alternatives au stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue » (26).

Le présent chapitre inventorie les pistes étudiées ou évoquées pour la gestion à long terme des déchets HA et MA-VL et fait le point sur leur maturité technique et sur leurs avantages respectifs pour la gestion des déchets HA et MA-VL.

2.2.2 L'entreposage de longue durée

Le code de l'environnement (article L. 542-1-1) définit l'entreposage de matières ou de déchets radioactifs comme « l'opération consistant à placer ces substances à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, dans l'attente de les récupérer ». Cette définition est équivalente à celles données par la directive européenne du 19 juillet 2011 et par l'AIEA (9).

La gestion des déchets HA et MA-VL peut s'envisager par prolongation de leur entreposage dans des installations du type de celles qui les abritent actuellement (cf. Chapitre 2.1.3 du présent document). En pratique, cela nécessite la construction périodique de nouvelles installations d'entreposage, puis le transfert des colis de déchets vers ces dernières, éventuellement après reconditionnement.

Une installation centralisée, éventuellement implantée à proximité de la surface, pourrait également être envisagée. Sur la base des technologies et de l'expérience disponibles, l'entreposage de longue durée est applicable à l'ensemble des colis de l'inventaire de référence des colis HA et MA-VL (cf. Chapitre 3 du présent document).

Il est à noter que la stratégie d'entreposage présente pour la génération actuelle un intérêt financier immédiat. En effet, elle diffère les investissements nécessaires à la mise en œuvre d'un dispositif de gestion à caractère définitif. Inversement, les coûts des investissements pour de nouveaux entreposages s'ajoutent au coût global, si un dispositif de gestion à caractère définitif, par exemple un stockage, est décidé dans le futur.

Sur le plan environnemental, la construction d'un ou de plusieurs entreposages de longue durée aurait un impact brut fort, comparable à celui d'un centre de stockage géologique, notamment s'il s'agit d'un entreposage centralisé implanté à proximité de la surface. En effet, une telle installation centralisée nécessiterait le même ordre de grandeur de capacité en termes de volume de colis accueillis et des infrastructures robustes en béton armé. Leur fonctionnement et leur démantèlement aurait un impact modéré. De plus, ils impliqueraient, à terme, de reprendre des activités de transport de substances radioactives en nombre relativement élevé, puisqu'à l'issue de son fonctionnement, il faudrait désentreposer les colis et les transférer vers d'autres installations de gestion.

Jusqu'en 2006, des études et recherches ont été menées par le CEA en vue d'augmenter la durée d'entreposage au sein d'une même installation. L'objectif était de dépasser le siècle dans un entreposage dit « de longue durée ». Les concepts d'installations étudiés, à la surface du sol ou à proximité de la surface (sub-surface), reposent sur un dimensionnement et sur des matériaux spécifiquement choisis pour leur durabilité. Leur fonctionnement est aussi « passif » que possible, c'est-à-dire qu'il requiert le moins d'actions humaines possibles pour la maintenance et la surveillance, jusqu'à ce qu'il soit décidé d'en retirer les colis de déchets. Pour cette raison, l'entreposage produit très peu de nouveaux déchets pendant son fonctionnement. Une durabilité de ces installations jusqu'à trois siècles a été avancée au plan technique (22). Le principe d'un entreposage de durée encore beaucoup plus longue a parfois été évoqué en se fondant sur l'expérience des pyramides ou mausolées antiques subsistant aujourd'hui. Les études ont néanmoins montré que leur fonctionnement ne pouvait pas être complétement « passif » et qu'une interruption prolongée de la maintenance et de la surveillance des installations pourrait mettre leur sûreté en défaut et entraîner des risques très importants. Une telle interruption pourrait survenir par exemple à la suite d'une crise sociétale et d'une dégradation temporaire du contrôle institutionnel (crise, guerre, abandon…). Un éventuel arrêt de la maintenance et un abandon définitif de telles installations se traduirait, à termes, par des impacts sanitaires et environnementaux majeurs. En effet, la dégradation des installations et la perte du confinement de colis de déchets conservant encore une grande dangerosité, à proximité de la biosphère, aurait des effets négatifs significatifs sur l'homme et l'environnement. À cet égard, leur implantation en surface ou à proximité de la surface ne les rend pas insensibles aux agressions externes.

» ENTREPOSAGE ET STOCKAGE EN SURFACE ET À FAIBLE PROFONDEUR

Une installation d'entreposage à la surface ou proche de la surface ne doit pas être confondue avec une installation de stockage en surface ou à faible profondeur.

Une installation d'entreposage à la surface ou proche de la surface est conçue pour y conserver les déchets à titre temporaire, avant de les diriger vers une autre installation de gestion (cf. Chapitres 1.2.3 et 0 du présent document). Dans son avis du 1er décembre 2020 (21), l'ASN estime que « *les entreposages à faible profondeur ne présentent pas d'avantage déterminant, en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection, par rapport aux entreposages en surface.* » La notion « d'entreposage pérenne » n'est pas conforme au code de l'environnement (article L. 542-1-1). Elle comporte une contradiction interne (oxymore). En termes techniques, et notamment pour la gestion des risques, une installation d'entreposage centralisée de colis de déchets, dès lors qu'elle serait enterrée, présenterait des spécificités de même nature qu'une installation de stockage en couche géologique profonde (contexte souterrain, galeries de manutention, alvéoles pour les colis, investissements et temps de construction et de développement, transports…). Toutefois, elle ne présenterait pas l'avantage de pouvoir, à terme, être définitivement fermée. Par ailleurs, elle resterait plus sensible aux agressions externes compte tenu de sa plus faible profondeur et impliquerait un nombre plus important de manutentions pour expédier les colis de déchets vers la filière suivante, ce qui augmenterait les risques (cf. Chapitre 2.2.8.5 du présent document).

Dans les stockages, il est possible de laisser les déchets sans limite de temps. Des installations de stockage en surface existent en France pour les déchets de très faible activité (TFA) et pour les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) (cf. Chapitre 1.2.6 du présent document). Des concepts de stockage à faible profondeur sont actuellement étudiés par l'Andra pour les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). Ces derniers sont nettement moins dangereux que les déchets HA et MA-VL. Leur radioactivité résiduelle dans un millier d'années sera en moyenne 10 000 fois inférieure à celle des déchets HA et 100 fois inférieure à celle des déchets MA-VL (cf. Chapitre 1.2.5 de ce document). Le stockage de déchets HA et MA-VL en surface ou à faible profondeur n'est pas techniquement possible. Il ne permettrait pas de respecter durablement les objectifs de protection de l'homme et de l'environnement fixés par l'Autorité de sûreté (cf. Chapitre 2.1.2 du présent document).

En 2006, après évaluation des résultats des études sur l'entreposage de longue durée du CEA, la Commission nationale d'évaluation (27)) a estimé que la possibilité de prolonger au-delà d'un maximum de 100 ans, la période d'exploitation d'un entreposage n'était pas démontrée.

Pour sa part, après instruction des études du CEA, l'Autorité de sûreté nucléaire a considéré « que l'entreposage de longue durée ne peut pas constituer une solution définitive pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité à vie longue » car il « suppose le maintien d'un contrôle de la part de la société et leur reprise par les générations futures, ce qui semble difficile à garantir sur des périodes de plusieurs centaines d'années » (28). À l'issue de son fonctionnement, l'entreposage de longue durée nécessite donc la mise en œuvre d'une filière suivante de gestion des déchets HA et MA-VL.

Corollairement, l'entreposage de longue durée pose une question d'éthique intergénérationnelle. En effet une pérennisation de l'entreposage, se limitant à compter sur la capacité des générations suivantes à entretenir et à renouveler les installations, constitue une stratégie d'ajournement de la gestion durable des déchets HA et MA-VL opposée aux exigences du code de l'environnement (cf. Chapitres 2.1.1 et 2.1.2 du présent document)[17]. Elle revient à transmettre aux générations suivantes des déchets de forte dangerosité et les risques associés, sans progrès dans la recherche ou dans la mise en œuvre d'une mise en sécurité définitive. Elle ne constitue pas un mode de gestion responsable.

La directive européenne 2011/70/EURATOM du 19 juillet 2011 (10) établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs considère ainsi que « *l'entreposage de déchets radioactifs, y compris à long terme, n'est qu'une solution provisoire qui ne saurait constituer une alternative au stockage* » (considérant n° 21).

Le prolongement de l'entreposage est parfois évoqué comme une solution permettant de reporter de plusieurs dizaines d'années le choix d'un mode de gestion à caractère définitif (cf. Figure 2-3) et de poursuivre dans l'intervalle les recherches sur de nouvelles voies de gestion définitive alternatives au stockage géologique. Les voies de gestion des déchets HA et MA-VL imaginées en alternative au stockage géologique sont présentées à la suite de ce chapitre (cf. Chapitre 2.2 du présent document). L'étude de certaines de ces voies n'a pas été poursuivie, notamment pour des raisons de maîtrise des risques, d'autres, parfois très récentes restent à approfondir. Il faut toutefois indiquer que le niveau actuel des avancées techniques amène à la prudence sur la faisabilité industrielle des alternatives qui restent à l'étude. D'autres idées pourront naturellement émerger au fil des développements techniques et des contraintes sociales et environnementales. Toutefois, le report d'une décision relative au stockage géologique, en attente de l'émergence hypothétique d'une solution de gestion alternative, constitue un « pari » qu'il faut mettre en balance avec les dangers et les charges qu'il fait peser sur les générations à venir (cf. Chapitres 2.1.1 et 2.1.2 du présent document) et des incertitudes quant à l'avenir. Inversement, l'engagement progressif d'un stockage des déchets HA et MA-VL n'exonère pas de poursuivre les efforts de recherche pour réduire les risques de leur gestion. Si de nouvelles techniques industrielles venaient à apparaître, utiles pour la gestion des déchets, elles seraient naturellement mises à profit. Toutefois, il est peu probable qu'elles puissent concerner toutes les natures de déchets, notamment ceux déjà conditionnés (vitrifiés, cimentés, métalliques, bitumés…). Elles viendraient donc compléter la voie du stockage, mais celle-ci resterait utile pour les déchets restants.

LES CONCLUSIONS DE L'ASN RELATIVES À L'ENTREPOSAGE DE LONGUE DURÉE DANS SON AVIS DU 1ER FÉVRIER 2006 RELATIF AUX RECHERCHES MENÉES DANS LE CADRE DE LA LOI DU 30 DÉCEMBRE 1991

« Les recherches menées sur l'étude des procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée de ces déchets confirment que l'entreposage est une étape nécessaire pour permettre le refroidissement de certains colis de déchets avant leur stockage en formation géologique profonde ».

« En revanche, l'ASN estime qu'il ne serait pas raisonnable de retenir comme solution de référence la solution consistant à renouveler plusieurs fois un entreposage de longue durée, car elle suppose le maintien d'un contrôle de la part de la société et la reprise des déchets par les générations futures, ce qui semble difficile à garantir sur des périodes de plusieurs centaines d'années ».

« L'ASN considère que l'entreposage de longue durée ne peut pas constituer une solution définitive pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité à vie longue ».

Ces conclusions ont été rappelées par l'ASN dans son avis du 1er décembre 2020 (21).

[17] Selon le code de l'environnement, la gestion durable des déchets a pour objectif leur mise en sécurité définitive pour prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations suivantes.

2.2.3 La réduction de la dangerosité des déchets par la transmutation

2.2.3.1 Le principe de la transmutation

La réduction de la dangerosité des déchets HA et MA-VL est une piste technique qui vise à faciliter les étapes de leur gestion à long terme ou même à accéder directement à leur mise en sécurité définitive si leur dangerosité peut être annihilée.

La piste la plus marquante pour réduire la dangerosité des déchets radioactifs est la transmutation des radionucléides contenus dans les déchets et plus particulièrement les radionucléides à vies longues, par exemple l'Américium 243 (période de 7380 ans) ou l'iode 129 (15,7 millions d'années)[18].

La transmutation est une réaction nucléaire (cf. Figure 2-4). Comme toutes les réactions nucléaires, naturelles ou artificielles (cf. Chapitre 1.1.1 du présent document), elle transforme des atomes en d'autres atomes de nature chimique différente. Les réactions nucléaires de fission et de fusion ou les désintégrations associées à la décroissance radioactive mettent en œuvre des transmutations.

L'objectif de son utilisation pour la gestion des déchets consiste à transformer ces radionucléides à vie longue en d'autres radionucléides de période plus courte et qui cessent donc plus rapidement d'être nocifs, ou de les transformer en des éléments possédant une dangerosité plus faible. Les réactions de transmutation artificielle, pour la gestion des déchets, ne peuvent être effectuées qu'au sein de réacteurs nucléaires. La transmutation nécessite donc le développement de nouvelles installations.

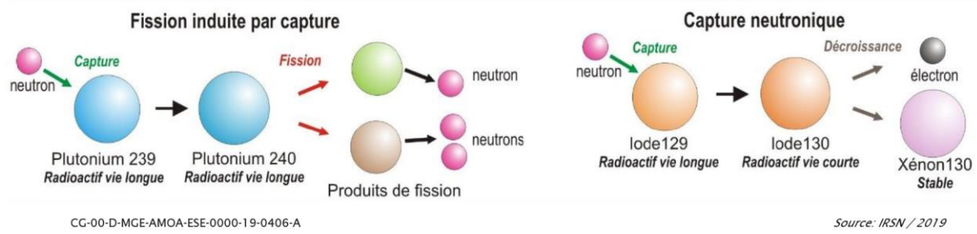


Figure 2-4 Transmutation par fission (à gauche) ou par capture de neutron (à droite) (26)

La séparation et la transmutation ont été étudiées notamment par le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) depuis 1991 dans le cadre d'un programme de recherche dédié fixé par la loi (29) (cf. Figure 2-5).

[18] Actinides : famille de composés radioactifs utilisés dans des réacteurs nucléaires, existant à l'état naturel comme l'uranium et le thorium ou synthétisés par l'industrie nucléaire comme le plutonium



Figure 2-5 *Fabrication par voie sèche (broyage, pressage, frittage et gainage) de combustibles d'études, cibles de transmutation et matrices de confinement. © A. Gonin/CEA*

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES EN RÉACTEUR : L'EXEMPLE DE LA FISSION DE L'URANIUM 235

La fission nucléaire est le phénomène par lequel un noyau lourd (c'est-à-dire composé d'un grand nombre de protons et de neutrons, par exemple l'uranium ou le plutonium) est désintégré par division, généralement en deux noyaux plus légers. Il existe des fissions spontanées et des fissions induites.

La fission spontanée correspond à la désintégration d'un noyau sans apport d'énergie extérieure. Elle n'est possible que pour les noyaux les plus lourds.

La fission induite a lieu lorsqu'un noyau lourd se désintègre sous l'effet d'une énergie externe, généralement la capture d'un neutron. C'est le cas de l'isotope 235 de l'uranium naturel.

En réacteur, l'^{235}U peut absorber un neutron et se fragmenter en produits de fission par des réactions de fission qui produisent elles-mêmes des neutrons (cf. Figure 2-6).

Un autre isotope présent dans l'uranium naturel, ^{238}U peut se transformer par capture d'un neutron, puis désintégration, en plutonium (^{239}Pu) qui peut se fissionner à son tour. La capture des neutrons peut aussi former d'autres actinides dits « mineurs » (neptunium, américium, curium).

Produits de fission et actinides mineurs constituent *in fine* des déchets.

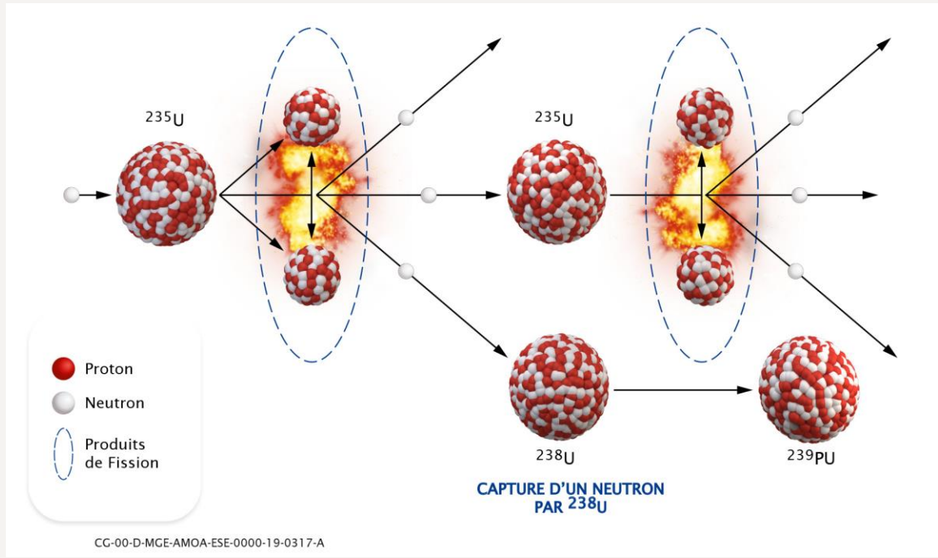


Figure 2-6 *Principe de la réaction nucléaire en chaîne de fission de noyaux d' 235U et de la formation de 239Pu initiée par la capture d'un neutron par un atome d' 238U*

2.2.3.2 Les radionucléides visés par la transmutation

La transmutation est nécessairement précédée d'une étape de séparation, d'une part des radionucléides à transmuter, d'autre part des autres éléments chimiques auxquels ils sont mélangés dans les déchets. Cette étape est plus ou moins complexe selon la nature des déchets et des radionucléides et éléments à séparer. Elle fait appel, soit à des procédés chimiques (après dissolution des déchets) du même type que ceux des usines Orano de La Hague pour le traitement des combustibles usés[19], soit à des procédés pyrochimiques qui restent à développer sur le plan industriel[20].

Actuellement, les seuls procédés industriels de séparation opérationnels dans le secteur nucléaire permettent de récupérer et de purifier le plutonium, l'uranium et l'américium. Des procédés ont été étudiés pour séparer industriellement les autres actinides (curium et neptunium). Leur mise en œuvre industrielle nécessiterait de construire de nouvelles installations du type de celles de l'usine Orano de La Hague. L'expérience industrielle de la séparation chimique des actinides, leurs rendements potentiels de transmutation (cf. Chapitre 2.2.3.3 du présent document) et leur dangerosité élevée (toxicité, vie longue, criticité, émission de rayonnements ionisants) désignent les actinides comme des radionucléides particulièrement intéressants pour la transmutation.

La transmutation des produits de fission à vie longue (^{129}I, ^{99}Tc, ^{135}Cs) est également théoriquement possible. Toutefois, sa mise en œuvre industrielle est encore plus complexe que celle des actinides. En effet, les produits de fission ont des rendements théoriques de transmutation relativement faibles et ils peuvent poser des problèmes de corrosion en fonction de leur nature chimique. À ce jour, la transmutation n'apparaît donc pas applicable à l'ensemble des radionucléides à vie longue. De plus, avant d'entreprendre leur transmutation, il faudrait non seulement les séparer des autres éléments présents dans les déchets, mais également de leurs propres isotopes stables ou à vie courte. Dans le cas du césium, le ^{135}Cs, à période de décroissance longue, devrait ainsi être séparé[21] du ^{133}Cs stable et des ^{134}Cs et ^{137}Cs, à courte durée de décroissance. Si certaines techniques de laboratoire laissent envisager la possibilité de séparer physiquement des quantités microscopiques d'isotopes de produits de fission[22], ce type de séparation n'a jamais été mise en œuvre à l'échelle industrielle et elle apparaît très complexe.

[19] Procédé PUREX pour « Plutonium and uranium refining by extraction ».
[20] La pyrochimie consiste à utiliser de manière complémentaire un procédé à haute température, par exemple un bain de sels fondus, et des techniques séparatives, par exemple des systèmes d'électrodes, pour isoler sélectivement certains éléments chimiques.
[21] La séparation isotopique est actuellement pratiquée industriellement sur l'uranium dans l'usine d'enrichissement Georges Besse II sur le site nucléaire Orano du Tricastin (Drôme).
[22] Techniques utilisant des lasers, des champs magnétiques et des plasmas.

En l'état actuel des connaissances, la transmutation ne s'applique pas aux produits d'activation, c'est-à-dire aux radionucléides créés, en particulier au cœur des réacteurs nucléaires, par l'irradiation prolongée des matériaux par des neutrons[23]. Certains produits d'activation à vie longue sont présents dans les déchets radioactifs (^{14}C, ^{36}Cl, ^{59}Ni…). La séparation sélective de ces radionucléides et leur transmutation présentent les mêmes difficultés que celles des produits de fission. Leur mise en œuvre industrielle n'apparaît pas envisageable sur la base des technologies connues.

2.2.3.3 Les types de réacteurs nucléaires envisagés pour la transmutation

Les centrales nucléaires actuellement en service en France pour la production d'électricité (cf. Chapitre 1.2.2 du présent document) peuvent transmuter uniquement certains isotopes de l'uranium et du plutonium[24]. La transmutation de plutonium et d'uranium y est, de fait, déjà partiellement réalisée, par l'utilisation de combustibles nucléaires issus du retraitement (MOX). Des études et recherches sont en cours pour évaluer la capacité de ce type de centrale pour transmuter l'ensemble du stock de plutonium (multi-recyclage du plutonium), le cas échéant, en renouvelant le parc actuel de centrales. Ce multi-recyclage pourrait, théoriquement, consommer la quasi-totalité du plutonium produit, mais génèrerait en revanche une quantité plus importante d'actinides mineurs (neptunium, américium, curium).

Pour aller plus loin sur les possibilités de transmutation, les études et recherches françaises se sont fondées principalement sur une nouvelle génération de réacteurs nucléaires de la filière dite « à neutrons rapides » et refroidis au sodium. Ces études et recherches ont montré qu'une telle filière, associés à une séparation plus poussés que celle pratiquée dans l'usine Orano de La Hague, serait capable de transmuter le plutonium (y compris celui contenu dans les combustibles usés MOX actuellement entreposés) et, au prix d'une plus grande complexité, l'américium, voire le curium.

D'autres types de réacteurs à neutrons rapides sont étudiés dans le monde avec un objectif de transmutation des actinides. Outre des réacteurs refroidis par du gaz, du plomb fondu ou un mélange de plomb et de bismuth, on notera en particulier les réacteurs à sels fondus, par exemple des sels de fluorure de lithium (LiF) et de fluorure de béryllium (BeF_2)[25]. Dans ces derniers, une séparation pyrochimique s'effectuerait sur le site même du réacteur, en « ligne » avec la réaction nucléaire, sans recours à des usines de séparation et de fabrication de combustible.

D'autres études et recherches portent sur des systèmes dits « hybrides » comportant un réacteur nucléaire associé à un dispositif externe apportant un flux complémentaire de neutrons pour entretenir la réaction nucléaire. Plusieurs principes techniques sont considérés pour ce dispositif externe. Le plus avancé, proposé notamment par le Professeur Carlo Rubbia (prix Nobel de physique en 1984)[26], associe un accélérateur de protons et une cible de spallation[27]. Ce principe est prévu d'être expérimenté dans le cadre du projet MYRRHA[28] conçu en Belgique par le SCK·CEN[29] en coopération internationale (cf. Figure 2-7).

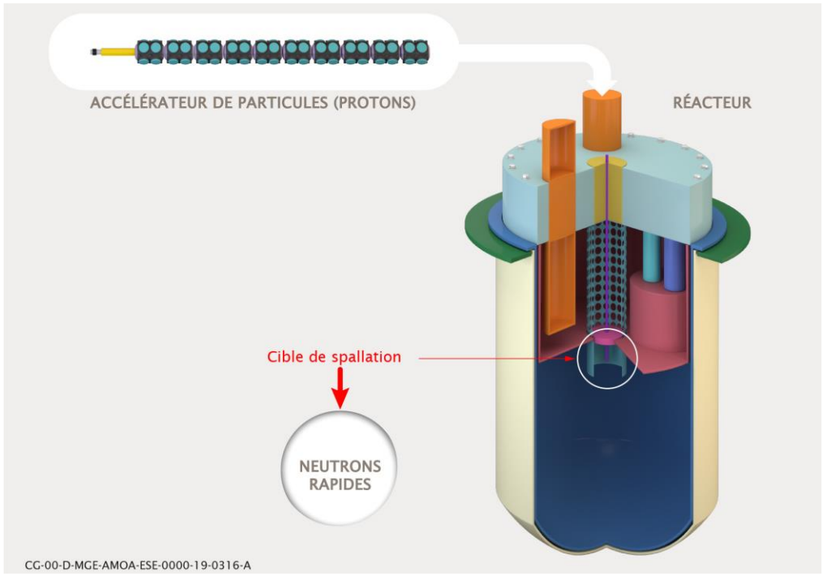


Figure 2-7 Schéma de principe d'un système hybride associant un accélérateur de particules et un réacteur

Une autre alternative pour la production des neutrons consiste à utiliser un tokamak[30], installation du type du réacteur expérimental de fusion ITER en construction à Cadarache.

De manière encore plus exploratoire, une fusion nucléaire deutérium-tritium[31] utilisant un laser de très forte puissance est envisagée comme source indirecte de neutrons. Ces lasers bénéficieraient des derniers développements issus des recherches notamment du Professeur Gérard Mourou[32] (prix Nobel de physique en 2018 avec Donna Theo Strickland et Arthur Ashkin).

Partant des progrès en matière de lasers de très forte puissance, une autre piste évoquée éviterait même la production externe de neutrons. Il s'agit d'une transmutation par photofission. Dans cette réaction nucléaire, le noyau atomique à transmuter est excité par interaction avec des photons à haute énergie (gamma ou X). Cette technique a permis la transmutation en laboratoire d'uranium, de thorium et d'iode (26). Dans tous les cas, des défis scientifiques et technologiques majeurs resteraient à surmonter pour mettre en œuvre cette technologie qui n'en est qu'aux prémices de son développement.

2.2.3.4 Les limites des techniques de la transmutation pour la gestion des déchets

Au stade actuel, la transmutation totale des radionucléides à vie longue n'est pas maîtrisée du point de vue scientifique et technologique. Elle correspond encore plutôt à une piste de recherches. Elle n'a été réalisée que sur de petites quantités de matières et n'a pas été industrialisée. Une mise en œuvre opérationnelle nécessiterait de lever divers verrous technologiques en matière de séparation et de fonctionnement des réacteurs et des autres dispositifs nécessaires à la transmutation.

---

23 Les produits d'activation sont des radionucléides formés au sein même d'un matériau à partir d'isotopes non-radioactifs présent initialement dans ce matériau et qui, dans certaines conditions d'irradiation, sont susceptibles de « capturer » des neutrons et de se transformer en isotopes radioactifs.

24 Les centrales nucléaires en service utilisent des réacteurs à eau pressurisée dans lesquels les neutrons sont ralentis (modérés) par l'eau de refroidissement.

25 Le combustible de ces réacteurs se trouve sous forme liquide, dissoute dans des sels de chlorure ou de fluorure, et joue le rôle de caloporteur.

26 Ce prix est partagé avec Simon van der Meer pour leurs travaux sur les particules W et Z.

27 La spallation est une réaction nucléaire à haute énergie dans laquelle un noyau-cible frappé par une particule incidente émet un jet de particules plus légères et produit un noyau dont la masse est en général comparable à celle du noyau d'origine. Le carbone 14 est ainsi produit naturellement par spallation de l'azote dans la haute atmosphère sous l'effet des rayonnements cosmiques.

28 MYRRHA pour « Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications ». Le caloporteur envisagé pour MYRRHA est un mélange de plomb et bismuth.

29 Centre d'étude de l'énergie nucléaire

30 Le tokamak (du russe тороидальная камера с магнитными катушками, chambre toroïdale avec bobines magnétiques) est un réacteur permettant de créer et de confiner un plasma de fusion grâce à des champs magnétiques intenses.

31 La réaction de fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium pour former un noyau d'hélium produit une grande quantité d'énergie et un neutron libre.

32 Laser amplifié par dérive de fréquence « Chirped Pulse Amplification ».

La mise en œuvre industrielle de la transmutation nécessiterait un effort substantiel pour la construction d'un parc complet de réacteurs nucléaires dédiés et de ses installations supports pour séparer les radionucléides à transmuter, préparer les combustibles des réacteurs, traiter et conditionner les nouvelles substances radioactives produites. Les transports de substances radioactives entre les différentes installations seraient nombreux. Au-delà des difficultés techniques et de l'impact environnemental de la construction, du fonctionnement et du démantèlement de ces installations nucléaires, la mise en place d'une telle filière industrielle est un pari sur l'avenir qui ne peut pas être garanti compte tenu notamment des incertitudes socio-politiques et économiques pesant sur le choix d'un recours durable aux activités nucléaires. De plus, certains systèmes de transmutation présentent peu d'intérêt pour la production d'énergie compte tenu de leurs coûts élevés et de leur faible bilan énergétique (différence entre l'énergie qu'ils produisent et celle nécessaire à leur fonctionnement, en particulier les dispositifs externes de production de neutrons et les lasers de très forte puissance).

En outre, faisant appel à des réactions nucléaires, les procédés de transmutation, quels que soit les types envisagés, produisent eux-mêmes des déchets radioactifs[33]. Les déchets qui seront produits par la filière de transmutation sont donc *a minima* des déchets MA-VL[34], mais aussi des déchets HA issus du fonctionnement des réacteurs nucléaires. L'éventuelle filière de transmutation devra donc nécessairement être adossée à une filière de gestion des nouveaux déchets radioactifs qu'elle produirait, dont les caractéristiques physiques et les quantités ne peuvent pas être bien cernées à ce stade. On peut considérer en première approximation que leur quantité serait du même ordre que celles de l'inventaire de référence actuel (cf. Chapitre 3 du présent document).

Par ailleurs, la transmutation ne semble pas applicable en l'état actuel des recherches aux déchets HA et MA-VL déjà produits. Dans le cas des déchets HA, ceux-ci ont été vitrifiés pour réduire durablement les risques de dispersion des radionucléides qu'ils contiennent. La séparation préalable à toute transmutation nécessiterait donc de très lourdes étapes de dévitrification et de traitement[35]. Avec les techniques et les installations actuelles, l'extraction des radionucléides des déchets HA vitrifiés est quasiment inenvisageable. Il en va de même des déchets MA-VL, conditionnés notamment par compactage ou cimentation. L'extraction des radionucléides à vie longue qu'ils contiennent serait très complexe compte tenu de leur grande variété et de leur volume très important. Elle est quasi-inenvisageable physiquement pour les déchets activés. Ainsi l'éventuelle transmutation n'est pas capable, à elle-seule, de gérer l'ensemble des déchets HA et MA-VL existants de manière définitive. Elle serait nécessairement adossée à une filière de gestion des déchets non transmutés de l'inventaire actuel. L'ASN a confirmé ce point en indiquant que, même en cas de mise en œuvre de la transmutation, l'élimination des déchets HA « *ne sera pas totale. Une autre solution de référence est nécessaire (28)* ».

En termes de risques, les réacteurs de transmutation, comme tous les réacteurs nucléaires, sont susceptibles d'entraîner des conséquences importantes en cas d'accident grave pendant leur fonctionnement. Leur capacité à garantir une mise en sécurité définitive des déchets radioactifs dépend en fait, non pas de leur fonctionnement propre, mais de la mise en œuvre de la filière de gestion des déchets actuels non-transmutés et de la filière suivante de gestion des déchets produits par la transmutation. En cas de non-mise en œuvre de ces filières ou de perte de contrôle institutionnel (crise, guerre, abandon…) sur la durée prolongée du fonctionnement de la filière suivante, les conséquences pourraient être très importantes.

LES CONCLUSIONS DE L'ASN RELATIVES À LA SÉPARATION/TRANSMUTATION DANS SON AVIS DU 1ER FÉVRIER 2006 RELATIF AUX RECHERCHES MENÉES DANS LE CADRE DE LA LOI DU 30 DÉCEMBRE 1991

« L'ASN considère que la faisabilité technologique de la séparation et de la transmutation n'est pas acquise à ce jour. Même en cas de mise en œuvre d'une telle solution, l'élimination des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue ne sera pas totale. Une autre solution de référence est nécessaire ».

L'ASN a par ailleurs émis un autre avis sur la séparation/transmutation le 4 juillet 2013 (30) qui complète son évaluation : « *l'ASN considère que les gains espérés de la transmutation des actinides mineurs en termes de sûreté, de radioprotection et de gestion des déchets n'apparaissent pas déterminants au vu notamment des contraintes induites sur les installations du cycle du combustible, les réacteurs et les transports, qui devraient mettre en œuvre des matières fortement radioactives à toutes les étapes. […] En conséquence, l'ASN considère que les possibilités de séparation et de transmutation des éléments radioactifs à vie longue ne devraient pas constituer un critère déterminant pour le choix des technologies examinées dans le cadre de la quatrième génération.* »

Dans son avis du 1er décembre 2020 (21), l'ASN rappelle que « *les perspectives de transmutation à une échelle industrielle des déchets déjà conditionnés de l'inventaire de référence de Cigéo ne sont pas crédibles* ».

2.2.4 L'envoi dans l'espace

L'envoi des déchets radioactifs dans l'espace permettrait de les éloigner définitivement des hommes et de l'environnement. Cette technique a fait l'objet d'évaluations relativement détaillées aux États-Unis dans les années 1970 (NASA) en se fondant notamment sur le développement de la navette spatiale[36]. Diverses possibilités de destination ont été envisagées dans ces études, notamment la surface de la Lune et une orbite autour du Soleil. L'évacuation hors du système solaire[37] a été évoquée par certains chercheurs.

L'envoi dans l'espace nécessite de disposer d'engins aérospatiaux (fusées, navettes…) adaptés aux niveaux d'activité des déchets et à leur dangerosité. Compte tenu des volumes de déchets déjà produits, elle impose un nombre conséquent de lancements. En pratique, son coût la limiterait à des déchets HA non vitrifiés pour réduire autant que possible les masses impliquées. Les études l'ont exclue pour les autres déchets qui représentent des masses trop importantes (plusieurs dizaines de milliers de tirs seraient nécessaires à l'échelle mondiale). Ainsi, l'envoi dans l'espace n'est pas capable, à lui-seul, de gérer l'ensemble des déchets HA et MA-VL existants de manière définitive.

---

33 À cet égard, s'il est à juste titre considéré que la filière des réacteurs de fusion présente l'intérêt de ne pas produire de déchets de haute activité (HA), le réacteur ITER produit des déchets notamment MA-VL qui sont comptabilisés dans l'Inventaire national publié par l'Andra.

34 Le fonctionnement, la maintenance et le démantèlement des réacteurs de transmutation produirait nécessairement des déchets, soit contaminés par des radionucléides à vie longue, soit activés par les neutrons. L'activation est liée à la capture des neutrons d'un réacteur par des atomes non radioactifs présents dans les matériaux au voisinage. Ces atomes sont dénommés « produits d'activation ». Certains présentent une période de décroissance longue.

35 Les études ont montré la très grande résistance du verre à toute forme d'attaque chimique ou physique. C'est d'ailleurs la raison initiale du choix de ce matériau pour confiner efficacement les radionucléides.

36 La navette spatiale américaine a été conçue à partir du début des années 1970. Son vol inaugural eut lieu en avril 1981 et son retrait du service en juillet 2011. 135 vols ont été effectués au total. Deux accidents ayant conduit à la perte de deux des cinq engins opérationnels et à celle de leurs équipages sont survenus (*Challenger* en 1986 et *Columbia* en 2003).

37 Sans cibler particulièrement des trous noirs, ce qui n'aurait pas de sens en termes de distance-temps.



Figure 2-8 Lanceur spatial de forte capacité

Outre son coût[38], le principal frein au développement de l'envoi des déchets dans l'espace tient aux niveaux de fiabilité des lancements spatiaux[39] et aux conséquences potentielles pour le public et l'environnement en cas d'échec d'un tir et de retombées des résidus radioactifs sur terre. À l'heure actuelle, la fiabilité d'un lanceur, bien que jugée importante et suffisante pour l'envoi d'astronautes dans l'espace, est très inférieure à celle d'une installation nucléaire (de plusieurs ordres de grandeurs).

Par ailleurs, l'impact environnemental de ces lancements n'a pas été examiné à l'époque de ces études et l'utilisation de l'espace pose des questions de droit international à l'instar de l'utilisation des mers (cf. Chapitre 2.2.5 du présent document). L'ensemble de ces enjeux ont conduit à écarter l'option de l'envoi dans l'espace au moyen d'engins aérospatiaux.

Le principe d'un ascenseur spatial, potentiellement plus sûr et mieux adapté à de lourdes charges, a été évoqué depuis les années 1950 en substitution aux fusées. Son principe consiste à tendre un câble entre la terre et un satellite. Ce câble servirait de support-guide à des cabines. Une fois parvenus à l'extrémité de l'ascenseur, les déchets devraient encore être propulsés hors de la cabine et plus loin dans l'espace. Malgré les développements actuels et ceux imaginables à l'avenir, notamment dans le domaine des matériaux, l'ascenseur spatial n'a pas de perspective concrète de mise en pratique et relève encore de la science-fiction.

2.2.5 L'évacuation dans les fonds marins

2.2.5.1 L'immersion dans les océans

Des campagnes d'immersion de déchets ont été réalisées entre 1946 et 1993 par 14 pays sur plus de 80 sites situés dans les océans Pacifique, Atlantique et Arctique.

Les déchets radioactifs immergés se présentaient sous deux formes :

- des déchets liquides, directement déversés dans les océans sur des sites dédiés ou rejetés en conteneurs, mais non solidifiés ;
- des déchets solides non conditionnés ou conditionnés dans des fûts métalliques après incorporation dans du béton ou du bitume.

[38] Le coût de mise sur orbite d'un satellite est de l'ordre de 10 000 €/kg à 50 000 €/kg.

Seuls l'ex-URSS et les États-Unis ont immergé d'autres types de déchets radioactifs, notamment des cuves de réacteurs nucléaires contenant encore, pour certaines, du combustible.

La France a pris part à deux opérations d'immersion coordonnées par l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE en 1967 et en 1969. En 1969, elle a fait le choix d'ouvrir un centre de stockage continental : le Centre de stockage de la Manche (CSM), exploité par l'Andra jusqu'en 1994 et aujourd'hui en phase de démantèlement.

LES DÉCHETS IMMERGÉS PAR LA FRANCE (SOURCE : INVENTAIRE NATIONAL DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS)

L'activité radioactive totale des déchets immergés dans le monde entre 1946 et 1993 était de 85 000 téra becquerels (TBq) à la date de leur immersion.

Les déchets radioactifs immergés par la France lors des campagnes coordonnées par l'Agence de l'énergie nucléaire (AEN), en amont de la mise en service du centre de stockage de la Manche en 1969, représentait une activité totale d'environ 350 TBq à la date de leur immersion.

Les déchets liés aux expérimentations nucléaires françaises dans le Pacifique (déchets des expérimentations et du démantèlement des installations) ont été stockés sur place dans des puits ou immergés. Leur activité représentait une activité inférieure à 0,1 TBq au moment de leur immersion.

L'activité des déchets immergés par la France reste faible par rapport à l'activité totale stockée au CSM à sa date de fermeture, soit 46 900 TBq.

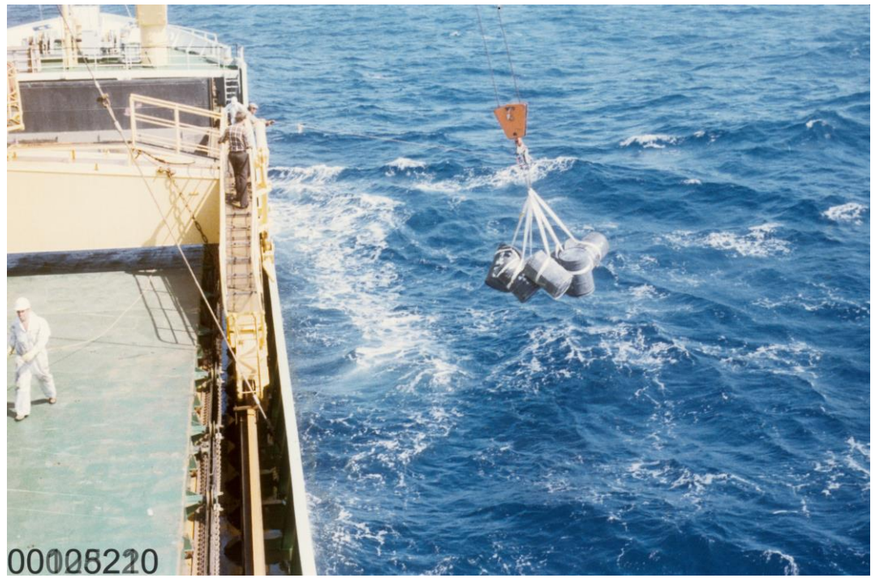


Figure 2-9 Campagne d'immersion de déchets radioactifs en mer dans les années 1960

Depuis 1993, toute immersion de déchets radioactifs est définitivement interdite par le droit international. Cette interdiction a constitué une application concrète de la Convention de Londres sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets, entrée en vigueur dès 1972 (31).

[39] Ariane 4 a par exemple connu 3 échecs pour 116 lancements.

2.2.5.2 L'enfouissement dans les sédiments marins

Pour les déchets les plus dangereux, particulièrement les déchets HA, des études et recherches ont été menées sur leur enfouissement dans les formations sédimentaires au fond des océans (« sub seabed disposal »).

Une option particulièrement étudiée consiste à les placer dans des conteneurs en forme d'ogive (« pénétrateurs »), capables, après avoir été lâchés à la surface de l'eau, d'atteindre le fond et de pénétrer à l'intérieur des sédiments. Avec le dépôt progressif de nouveaux sédiments au fond de l'océan, la profondeur d'enfouissement augmente ensuite régulièrement (cf. Figure 2-10).

Une autre option consiste à réaliser des forages sous-marins profonds dans les sédiments à l'aide de techniques inspirées de l'exploitation pétrolière, puis d'y treuiller les déchets avant de sceller les forages (cf. Figure 2-10).

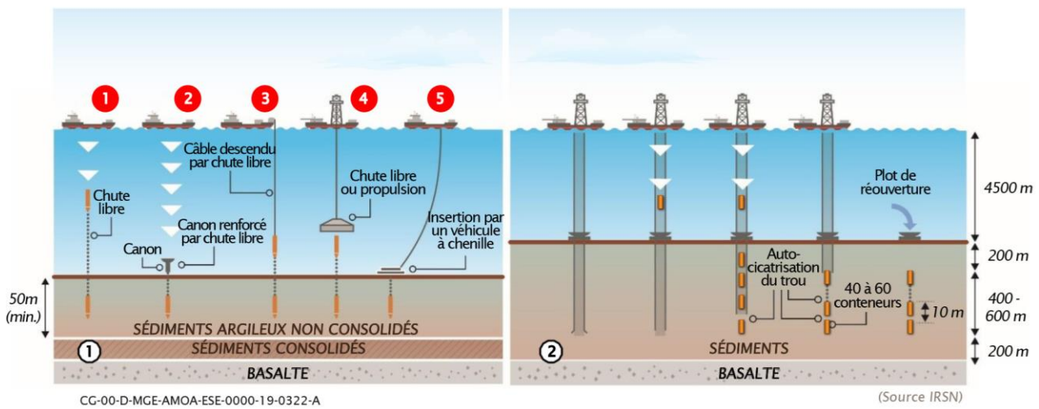


Figure 2-10 *Principes de deux concepts d'enfouissement de déchets dans les sédiments des fonds sous-marins (26)*

S'agissant d'une forme de gestion océanique, ce concept n'est plus permis par le cadre fixé par la Convention de Londres. Une révision de cette convention internationale ne semble pas envisageable à ce jour.

2.2.5.3 L'utilisation de la tectonique des plaques

La surface de la terre est découpée à la manière d'un puzzle en une mosaïque de plaques tectoniques en mouvement les unes par rapport aux autres. Ces mouvements sont notamment à l'origine de phénomènes volcaniques et de séismes. Lorsqu'une plaque océanique plonge sous une autre et s'enfonce vers le manteau terrestre, elle crée une zone de « subduction ».

La réalisation de forages sous-marins dans une plaque océanique, à proximité d'une zone de subduction (cf. Figure 2-11), a été imaginée. Il s'agirait ensuite d'y descendre les colis de déchets depuis un bateau de forage au moyen d'un treuil. En plongeant sous une autre plaque, océanique ou continentale, la plaque d'accueil entrainerait très progressivement les déchets vers le manteau terrestre.

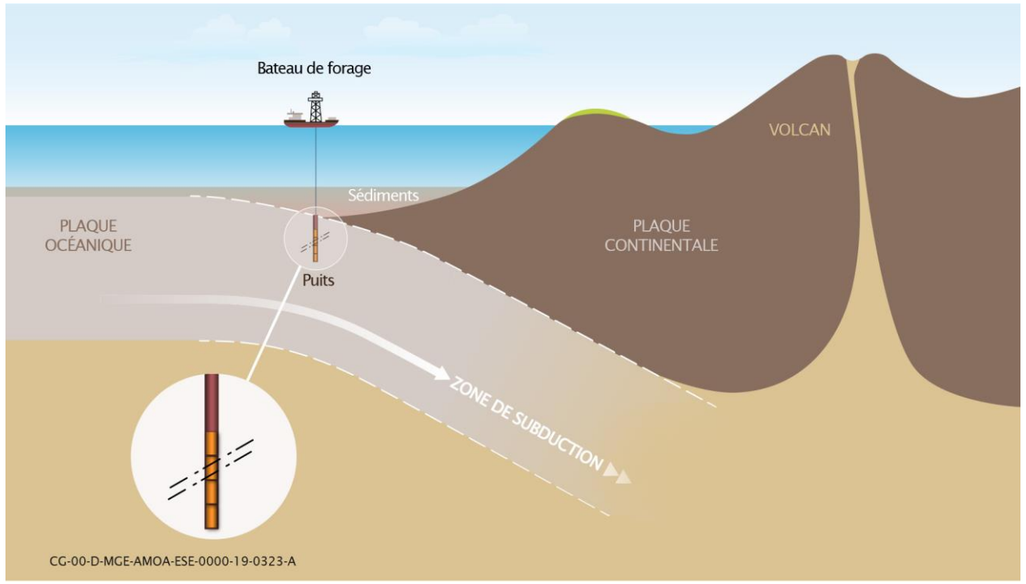


Figure 2-11 *Principe de stockage de déchets radioactifs dans une zone de subduction*

Ce concept présente plusieurs limites techniques qui en réduisent fortement la faisabilité :

- le mécanisme de subduction est très lent. En pratique, ce n'est qu'après plusieurs dizaines de milliers d'années ou plus que les déchets se retrouveraient profondément enfouis dans le manteau ;
- si les forages sous-marins n'atteignent pas le substratum basaltique mais s'arrêtent dans les sédiments sus-jacents, on ne peut exclure qu'au niveau de la zone de subduction les déchets se retrouvent dispersés dans les sédiments, voire dans l'eau plutôt que d'être entrainés vers le manteau ;
- il conviendrait enfin de s'assurer que le volcanisme associé à la subduction ne risquerait pas de ramener une part de la radioactivité des déchets en surface.

S'agissant d'une forme de gestion océanique, ce concept n'est plus permis par le cadre fixé par la Convention de Londres. Une révision de cette convention internationale ne semble pas envisageable à ce jour.

2.2.5.4 L'utilisation des calottes polaires

L'utilisation des calottes polaires pour isoler des déchets HA a aussi été envisagée, partant du constat que ces calottes ont été capables de piéger et de conserver des gaz, des radionucléides et des particules atmosphériques sur plusieurs centaines de milliers d'années. La chaleur dégagée par les colis de déchets HA pourrait être mise à profit pour fondre la glace localement et permettre aux colis de s'enfoncer progressivement au sein de l'épaisseur du glacier.

Les risques de réchauffement climatique actuellement identifiés remettent en question la durabilité de cette option. Par ailleurs, elle est incompatible avec les traités internationaux, notamment le Traité du 1er décembre 1959 sur l'Antarctique (32).

2.2.6 Le stockage dans le milieu géologique continental

2.2.6.1 Le principe du stockage géologique

Le stockage géologique consiste à placer les colis de déchets radioactifs dans des ouvrages construits dans le sous-sol continental, à une profondeur permettant d'isoler les déchets de l'homme et de l'environnement, pour tirer parti des propriétés naturelles des roches sur de grandes échelles de temps.

Dans un stockage géologique :

- le rayonnement des déchets ne peut pas atteindre les êtres vivants compte tenu de la très forte épaisseur de roche les séparant de la surface du sol ;
- la profondeur et la stabilité des formations géologiques mettent les déchets à l'abri des perturbations d'origine naturelle (intempéries, érosion, inondation, désertification…) et humaine (chantiers, destruction, pillage, agressions…) ayant lieu à la surface. Les roches choisies sont souvent stables depuis des dizaines de millions d'années et les prévisions permettent de prévoir le maintien de cette stabilité géologique sur des millions d'années à venir (phénomènes d'érosion, de soulèvement, de volcanisme lié aux mouvements tectoniques…). De plus, sur le continent, les propriétés des roches peuvent être étudiées de façon approfondies par des investigations depuis la surface et dans des laboratoires dédiés ;
- les propriétés et l'épaisseur de la formation géologique dans laquelle les déchets sont placés assurent le confinement sur de grandes échelles de temps, en complémentarité avec le conditionnement des déchets et la conception des ouvrages de stockage. En pratique, les substances radioactives et toxiques contenues dans les déchets sont piégées dans la roche. Si elles reviennent un jour au contact d'êtres vivants, se sera dans des centaines de milliers d'années. Leur dangerosité aura été annihilée avec le temps par la décroissance radioactive et la dispersion[40]. Les circulations d'eau souterraine sont le principal vecteur de transport de ces substances jusqu'à la biosphère. Dans un stockage, il est donc essentiel de choisir le site d'implantation et de concevoir les ouvrages de sorte à réduire au maximum le risque de circulation d'eau au contact des déchets ;
- la profondeur du stockage réduit l'éventualité d'une intrusion humaine involontaire, car des forages à de telles profondeurs sont peu fréquents. En effet, ils sont coûteux et ne sont effectués qu'avec des intentions précises d'investigation géologique. Les zones recherchées pour les stockages géologiques ne présentent aucun intérêt exceptionnel en termes de ressources naturelles dans leur sous-sol. Le choix de ce type de zone, pauvre en ressource, vise à réduire encore le risque qu'un forage profond soit réalisé à leur proximité. Ainsi, même si les restrictions d'usage du terrain en surface, voire la mémoire même de l'existence du stockage, disparaissent avec le temps, la probabilité d'intrusion humaine involontaire dans un stockage géologique est très réduite par rapport à un ouvrage de surface ou proche de la surface. Compte tenu de la conception du stockage, même si un forage devait involontairement le traverser, les conséquences à long terme resteraient limitées (cf. Chapitre 2.4 du présent document).

Le principe du stockage géologique est de pouvoir accueillir les déchets sans limite de temps. C'est ce qui le différencie du principe de l'entreposage qui est nécessairement temporaire (cf. Chapitres 1.2.3, 0 et 2.2.2 du présent document).

À la fin de son remplissage, une fois que les déchets y ont tous été introduits, le stockage géologique est « fermé ». La fermeture consiste à démonter les équipements d'exploitation et à construire des ouvrages spécifiques, complémentaires de la barrière géologique (remblais de galeries, murs, scellements…), pour assurer le bon confinement des déchets sur de très grandes échelles de temps.

Le milieu géologique est choisi et l'installation de stockage est conçue de telle sorte qu'après la fermeture définitive de l'installation, la sûreté est assurée de façon passive, c'est-à-dire que les personnes et l'environnement sont protégés des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans plus nécessiter d'action humaine (ventilation, maintenance…).

La mise en œuvre de tels dispositifs passifs est prévue par la directive européenne 2011/70/EURATOM (10), elle-même fondée sur les recommandations de sûreté nucléaire de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Considérant que « *les déchets radioactifs (…) doivent être confinés et isolés durablement des êtres humains et de la biosphère* » (considérant 21), la directive prescrit que les politiques nationales des pays membres en matière de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs reposent notamment sur le principe suivant : « *le combustible usé et les déchets radioactifs sont gérés de manière sûre, y compris à long terme grâce à des dispositifs de sûreté passive* » (article n° 4-3-c).

Le stockage géologique répond complètement à l'objectif d'une gestion durable des déchets les plus dangereux telle que définie dans le code de l'environnement (article L. 542-1 du code de l'environnement). En effet, il répond au double objectif (cf. Chapitres 2.1.1 et 2.1.2 du présent document) :

- d'éviter progressivement de mobiliser les générations futures pour gérer ces déchets, grâce au caractère passif des dispositions de protection ;
- de protéger durablement l'homme et l'environnement, en isolant les déchets et en confinant durablement les substances dangereuses qu'ils contiennent.

Aucune des pistes visant à réduire la dangerosité des déchets ou à gérer les déchets dans l'espace ou dans les océans n'offre de perspectives réalistes pour gérer l'ensemble des déchets HA et MA-VL, que ce soit pour des raisons d'éthique, de faisabilité technique ou de possibilité juridique (cf. Chapitres 2.2.1 au 2.2.5 du présent document). Aucune ne permet de se dispenser d'un stockage durablement passif (cf. Tableau de synthèse comparatif des modes de gestion des déchets HA et MA-VL au chapitre 2.2.8 du présent document).

À l'inverse, plusieurs concepts techniques sont accessibles pour mettre en œuvre le stockage géologique. Ils mettent en jeu différents types de roches (socle cristallin, granite, sel, argile…) et différentes techniques (forages, techniques minières…). Ces concepts sont décrits à la suite du présent chapitre. Compte tenu de leur état de maturité et de leurs avantages techniques, ils apparaissent incontournables en matière de gestion durable des déchets les plus dangereux.

2.2.6.2 Le stockage en forages profonds verticaux très profonds dans le socle cristallin

Le stockage par forages très profonds dans le « socle cristallin » a pour objectif de stocker les déchets dans des roches très anciennes (parfois jusqu'à 600 millions d'années ou plus), dures, sur lesquelles reposent éventuellement des couches plus récentes formées par des dépôts sédimentaires.

Ce concept de stockage repose sur l'absence théorique d'échange entre les eaux souterraines reliées à la biosphère[41] et le socle cristallin très profond. Des conditions géologiques appropriées sont nécessaires à sa mise en œuvre. Elles concernent, d'une part l'épaisseur du socle et celle de l'éventuelle couverture sédimentaire au-dessus du socle, d'autre part les caractéristiques géologiques locales du socle lui-même[42].

Pour atteindre le socle cristallin, des forages verticaux très profonds sont réalisés depuis la surface (5 kilomètres de profondeur environ). Les colis de déchets sont descendus par treuillage dans les forages, où ils sont empilés, potentiellement sur de grandes hauteurs (par exemple les 2 kilomètres inférieurs) (cf. Figure 2-12). Le socle cristallin étant présent partout dans le sous-sol (mais à des profondeurs variables), ce concept a l'avantage, dans son principe, de permettre le stockage des colis dans des forages creusés au plus près des installations d'entreposage actuelles. Sous réserve de sa faisabilité et de sa démonstration de sûreté, restant à acquérir, le concept permettrait ainsi de limiter le nombre de sites à nucléariser et réduirait au maximum les transports de substances radioactives sur la voie publique. L'impact environnemental de son creusement et de son fonctionnement serait en théorie modéré et les conséquences sur la santé et l'environnement en cas d'accident seraient faibles compte tenu de la grande profondeur séparant les colis affectés et la biosphère.

[40] Leur transfert à très long terme des substances dangereuses, depuis le stockage éventuellement jusqu'à la biosphère, mettrait en œuvre des phénomènes très lents de dissolution, de diffusion, de rétention et de migration dans de très grands volumes de roche qui garantissent que la teneur de ces substances dans l'environnement serait extrêmement faible et ne présenterait pas un danger pour les êtres vivants.

[41] Les eaux du système hydraulique souterrain reliées à la biosphère peuvent arriver naturellement à la surface et rentrer au contact direct des êtres vivants ou être pompées par l'homme qui les exploite comme une ressource.

[42] Fracturation, contexte tectonique

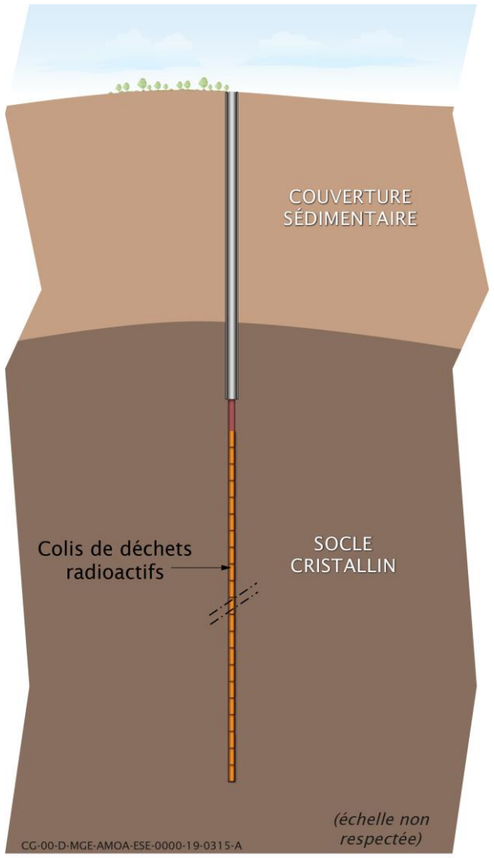


Figure 2-12 Principe du stockage en forages profonds verticaux dans le socle cristallin

La maturité technique du concept de stockage en forages profonds dans le socle cristallin ne permet pas encore sa mise en œuvre industrielle pour les colis de déchets HA et pour les colis de déchets MA-VL.

Si le forage et la descente par treuillage de colis de déchets semblent techniquement réalisables (33), la capacité à se prémunir du risque de chute ou de coincement durant leur descente reste à vérifier.

Par ailleurs, le diamètre des forages reste encore trop limité. Les meilleures technologies disponibles permettent d'envisager des diamètres allant jusqu'à 400 mm environ, ce qui est trop petit pour laisser passer des colis de déchets HA[43]. Même en imaginant que les progrès en matière de forages permettent un jour d'y descendre les colis HA actuels et certains colis de déchets MA-VL (environ 35 % des colis MA-VL ont une géométrie similaire à celle des colis HA), les colis MA-VL les plus volumineux et les plus lourds ne sont pas adaptés à ce mode de stockage. En effet, les colis MA-VL les plus encombrants de l'inventaire de référence actuel peuvent atteindre 5 m^3 et peser jusqu'à environ 10 tonnes. Pour ce type d'objet, la construction de puits et le treuillage sont inenvisageables.

En l'état actuel des connaissances, les forages profonds ne sont donc pas capables de prendre en charge tous les colis de déchets. Ce mode de gestion serait donc forcément adossé à une autre installation de stockage, creusée par des techniques minières classiques, pour les colis MA-VL les plus volumineux et les plus lourds.

Une fois les colis placés dans le forage, son mode de fermeture nécessite encore des travaux de recherche et de développement importants. La capacité à le sceller de façon hermétique est en effet cruciale pour éviter les perturbations[44] et éviter toute migration verticale des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets.

Par ailleurs, si ce concept a le mérite d'interposer une grande distance entre les déchets et l'environnement (cinq à dix fois supérieure à celle d'un stockage géologique conventionnel, (cf. Chapitre 2.2.6 du présent document), il pose des questions fondamentales liées aux connaissances géologiques limitées disponibles sur le socle cristallin profond (effet des fortes températures, pression et salinité régnant à très grande profondeur…)[45]. L'acquisition de connaissances appropriées à sa démonstration de sûreté à long terme nécessiterait des recherches longues et complexes. De plus, s'agissant de la sûreté en fonctionnement, le concept rend très difficile la surveillance des colis stockés en raison d'une part de l'exiguïté des forages, d'autre part des difficultés à implanter et à maintenir des dispositifs de mesures dans un tel environnement. Cette absence de surveillance pourrait rendre très difficile la démonstration de sûreté de ce type d'installation pendant leur fonctionnement, voire être considérée comme rédhibitoire.

De plus, le stockage en forages profonds dans le socle cristallin n'est pas compatible avec le contexte réglementaire français actuel fixé par le code de l'environnement :

- le socle cristallin profond ne peut pas être étudié directement par un laboratoire souterrain, alors que ce type d'étude est exigée par le code de l'environnement. En effet, au-delà de plusieurs kilomètres de profondeur, les conditions d'environnement (chaleur, pression, distance de la surface) ne permettent plus de construire et d'exploiter une installation de recherche (conditions inacceptables pour le travail du personnel et pour le fonctionnement des équipements). Le socle cristallin peut uniquement être étudié au moyen de forages. Cela limite les possibilités d'acquisition de connaissances et ne permet pas d'essais de vérification *in situ*, alors même que la réussite du concept est fortement liée aux conditions géologiques locales ;
- le stockage en forages très profonds est irréversible, alors que le code de l'environnement exige la réversibilité du stockage en couche géologique profonde . Les contraintes mécaniques s'exerçant sur un forage de plusieurs kilomètres et les déformations attendues réduisent rapidement son diamètre. Les colis n'ont plus la place pour être treuillés hors du stockage. De plus, aucune surveillance de l'état des colis stockés n'est réellement envisageable. Le retrait des colis devient donc rapidement impossible. Il ne permet pas de débuter par une phase de développement progressive et complètement réversible, du type de la phase industrielle pilote développée pour le centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 5.2 du présent document).

En conclusion, le stockage en forages verticaux profonds dans le socle cristallin n'a pas la maturité technologique suffisante pour être mis en œuvre industriellement. Des avancées scientifiques et technologiques très importantes sont encore nécessaires pour son développement et pour démontrer qu'il a capacité à confiner efficacement les déchets. En l'état actuel des connaissances, il ne semble pas applicable aux déchets MA-VL les plus volumineux et les plus lourds. Ne pouvant pas être étudié au moyen d'un laboratoire souterrain et ne pouvant pas garantir la réversibilité, il ne constitue pas un mode de gestion acceptable pour le stockage des déchets HA et MA-VL car il ne répond pas à ces deux exigences du code de l'environnement (article L. 542-10-1).

DES FORAGES SOUS LES VOLCANS

Un concept alternatif au stockage en forages profonds dans le socle cristallin a aussi pu être évoqué. Il s'agirait d'utiliser des forages profonds pour introduire les déchets dans des chambres magmatiques situées dans la croûte terrestre. Cependant, même si les difficultés technologiques pouvaient être aplanies, un tel concept ne rend pas le service attendu. En effet, la circulation magmatique dans un volcan est montante. La radioactivité des déchets risque donc d'être relâchée dans l'environnement *via* la lave et les gaz dégagés lors des éruptions[46].

[43] Le diamètre du colis de déchets HA tel qu'aujourd'hui entreposé à La Hague est de 430 mm. A ce diamètre doit être ajouté a minima un jeu de manutention pour permettre le treuillage dans le forage, ainsi que l'épaisseur d'un conteneur : le conteneur étudié par l'Andra pour le projet global Cigéo a un diamètre externe de 570 mm.

[44] Un gradient de salinité important doit être éviter le long du forage.

[45] En particulier, les niveaux de température attendus de situent en dehors de la plage dans laquelle le comportement des radionucléides dissous dans l'eau est connu et contrôlé.

[46] Il est à noter que la température du magma n'est pas nécessairement suffisante pour fondre certains constituants des déchets.

2.2.6.3 Le stockage en forages profonds verticaux dans un dôme de sel

Une variante des forages profonds verticaux dans le socle cristallin est étudiée en Allemagne. Elle consiste à réaliser des forages profonds verticaux dans un dôme de sel (« diapir ») (cf. Figure 2-13).

Ce concept est lié à la présence de grandes quantités de sel dans le sous-sol allemand, notamment au nord-est du territoire. Les forages verticaux sont adaptés à la géométrie verticale de ce type particulier de formation géologique. Le confinement repose sur la quasi-imperméabilité du sel à l'eau (cf. Chapitre 2.2.6.5a) du présent document).

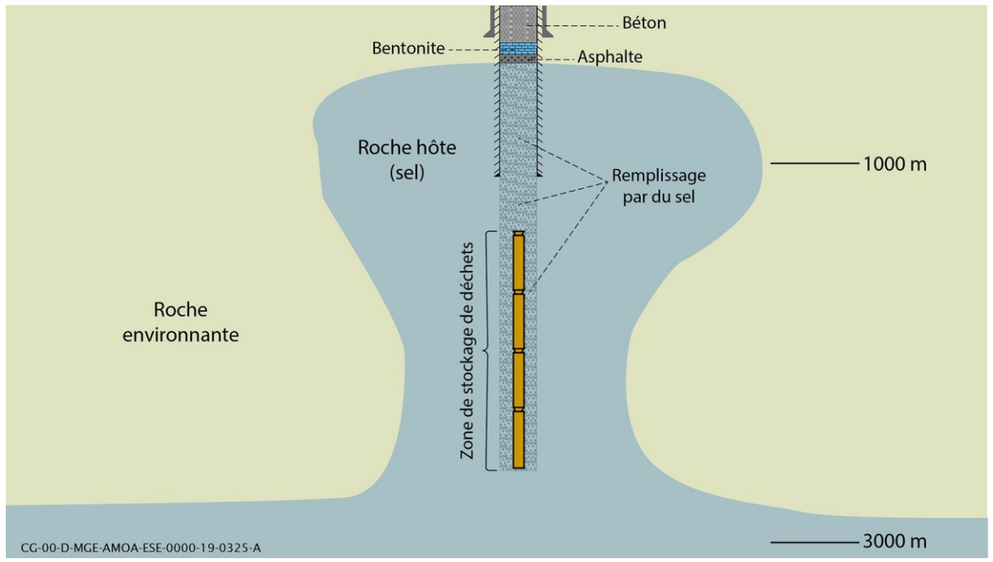


Figure 2-13 Principe du stockage en forages profonds verticaux dans le sel (34)

Ce concept pose des difficultés analogues au stockage en forages profonds verticaux dans le socle cristallin en termes de sûreté des opérations de treuillage, de limitation des tailles de colis concernés et de difficultés de retrait (cf. Chapitre 2.2.6.2 du présent document). Il ne permet pas de mettre en place une stratégie de développement progressive et réversible, de type de la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 2.2.6.2 5.2 du présent document). Ne pouvant pas être étudié au moyen d'un laboratoire souterrain et ne pouvant pas garantir la réversibilité, il ne constitue pas un mode de gestion acceptable pour le stockage des déchets HA et MA-VL car il ne répond pas à ces deux exigences du code de l'environnement (article L. 542-10-1).

2.2.6.4 Le stockage en forages profonds dirigés en formations sédimentaires

Dans le même esprit que les stockages en forages verticaux (cf. Chapitres 2.2.6.2 et 2.2.6.3 du présent document), des forages dirigés (cf. Figure 2-14), c'est-à-dire des forages initialement verticaux, puis progressivement déviés, pourraient être utilisés pour stocker des colis de déchets.

Dans un forage dirigé, la partie inférieure, où reposent les déchets, peut être orientée jusqu'à l'horizontale de manière à s'adapter à la géométrie de la formation géologique choisie.

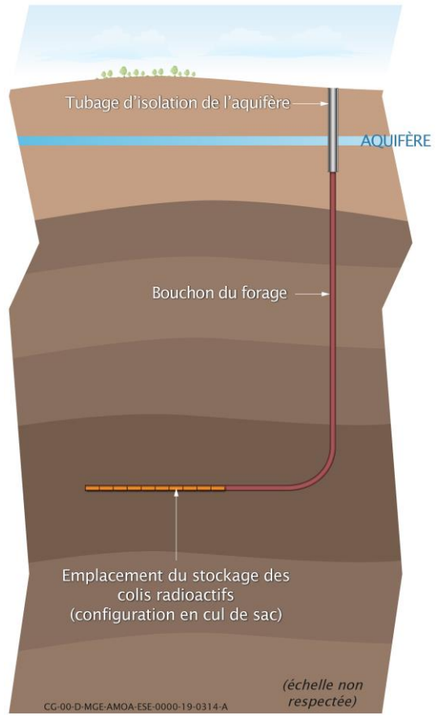


Figure 2-14 Principe du stockage en forages profonds dirigés en formation sédimentaire

Les forages dirigés permettent en principe d'atteindre des formations géologiques de toutes natures, en particulier sédimentaires, à moindre profondeur. Ce concept permet d'utiliser des formations géologiques situées à des profondeurs de l'ordre du kilomètre où les conditions d'environnement sont moins extrêmes qu'à grande profondeur (pression, température…).

Ce concept pose des difficultés analogues au stockage en forages profonds verticaux dans le socle cristallin et dans le sel en termes de sûreté des opérations de treuillage, de limitation des tailles de colis concernés et de difficultés de retrait (cf. Chapitres 2.2.6.2 et 2.2.6.3 du présent document). Il ne permet pas de mettre en place une stratégie de développement progressive et réversible, de type de la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo (cf. Chapitres 2.2.6.2 et 5.2 du présent document). Ne pouvant pas être étudié au moyen d'un laboratoire souterrain et ne pouvant pas garantir la réversibilité, il ne constitue pas un mode de gestion acceptable pour le stockage des déchets HA et MA-VL car il ne répond pas à ces deux exigences du code de l'environnement (article L. 542-10-1).

2.2.6.5 Le stockage dans des installations creusées en couche géologique profonde au moyen de techniques minières

Parmi l'ensemble des voies de gestion des déchets HA et MA-VL ayant fait l'objet d'études et recherches depuis les années 1970, le stockage dans une installation dédiée, creusée dans une formation géologique profonde au moyen de techniques minières, est certainement celle qui a fait l'objet du plus de recherches et d'études. Ce type d'installation est parfois dénommé stockage « conventionnel ». Différents types de roches sont envisagées dans le monde pour ce type de stockage, en fonction du milieu géologique national des différents pays. Les principales sont le sel, le granite et l'argile.

Le stockage en couche géologique profonde au sein d'une installation dédiée, creusée au moyen de techniques minières, est considéré à l'échelle internationale comme suffisamment mature pour être mis en œuvre aujourd'hui pour les déchets radioactifs les plus dangereux. Il est pratiqué depuis les années 1970 pour les déchets industriels les plus dangereux, notamment en Allemagne.

La directive européenne 2011/70/EURATOM du 19 Juillet 2011 (10) établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs indique qu'» *il est impératif* [...] *de mettre en place un stockage dans des installations appropriées qui serviront d'emplacement final* » et que « *sur le plan technique, le stockage en couche géologique profonde constitue, actuellement, la solution la plus sûre et durable en tant qu'étape finale de la gestion des déchets de haute activité et du combustible considéré comme déchet* » (cf. Chapitre 2.2.7.1 du présent document). De plus, il présente l'avantage d'être capable de prendre en charge tous les déchets concernés et de se suffire à lui-même pour leur gestion à caractère définitif, contrairement à toutes les autres pistes évoquées dont aucune ne permet de gérer à la fois l'ensemble des déchets HA et l'ensemble des déchets MA-VL (cf. Chapitres 2.2.2 à 2.2.6.4 du présent document et tableau de synthèse comparatif du chapitre 2.2.8.7).

Les principaux types de stockage dans des installations creusées par techniques minières, étudiés dans le monde dans différents types de roches, sont présentés dans le présent chapitre 2.2.6.5. Les différents types de roches étudiés en France et la justification du choix de l'argile pour y implanter le centre de stockage Cigéo sont présentés au chapitre 2.3 du présent document.

a) Le stockage dans des installations creusées en couche géologique profonde dans le sel

Le sel est une roche qui présente certaines propriétés favorables pour le stockage de déchets radioactifs :

- la quasi absence d'eau au sein de la formation salifère empêche la migration de substances radioactives ;
- la conductivité thermique élevée du sel facilite le stockage des déchets HA.

En revanche, la solubilité du sel dans l'eau le rend sensible aux cas d'intrusion accidentelle d'eau dans le stockage.

Un stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde dans le sel, dénommé WIPP[47], est exploité depuis 1991 aux États-Unis (Nouveau-Mexique). Des déchets comparables aux déchets MA-VL français y sont stockés. Des incidents d'exploitation, non liés au type de roche, ont suspendu son exploitation du 14 février 2014 au 10 avril 2017. L'exploitation a aujourd'hui repris.

Le sel, très présent dans le sous-sol de l'Allemagne, a été particulièrement étudié dans ce pays. Des puits et des galeries de reconnaissance ont été creusés dans le dôme de sel de Gorleben (Basse Saxe) en vue de l'implantation d'un stockage de déchets HA. Le programme national allemand de recherche d'un site pour un stockage en couche géologique profonde a néanmoins été réorienté en 2017 vers une nouvelle approche, ouverte sur tous les types de roches (35).

En Allemagne toujours, l'ancienne mine de sel de Asse (Basse Saxe) a été utilisée pour y mener des expériences et pour y stocker des déchets radioactifs peu irradiants (cf. Figure 2-16). Il a été décidé en 2013 de les en retirer, car des creusements des parties de l'ancienne mine étaient préjudiciables au stockage. En effet, ils ont déstabilisé la roche et permis l'intrusion accidentelle d'eau et la solubilisation de sel (source : Bundesgesellschaft für Endlagerung).

EVÉNEMENTS AYANT AFFECTÉ LES STOCKAGES DE DÉCHETS RADIOACTIFS DANS LE SEL GEMME

Deux évènements ont entraîné l'arrêt, pour l'un temporaire et pour l'autre définitif, de l'exploitation d'installations de stockage dans le sel, aux États-Unis (WIPP – Waste Isolation Pilot Plant) et en Allemagne (Mine de Asse). L'évènement ayant affecté le WIPP n'est pas relié à la nature de la roche dans laquelle cette installation se trouve. En revanche, celui qui a affecté la mine de Asse est directement lié aux caractéristiques spécifiques du sel.

L'événement ayant affecté le WIPP aux États-Unis

Depuis 1991, le centre de stockage du WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) situé à Carlsbad dans l'État du Nouveau-Mexique reçoit des colis de déchets comparables à des déchets MA-VL, issus exclusivement du programme de défense américain. Il est implanté dans une couche de sel à une profondeur de 655 mètres.

Deux incidents successifs ont eu lieu au WIPP en 2014. Le 5 février 2014, un incendie s'est déclaré dans un camion de transport de sel à moteur diesel dans une galerie souterraine en chantier (sans présence de colis de déchets à proximité). Le rapport d'analyse a montré que le véhicule n'avait pas fait l'objet d'une maintenance régulière. Lorsque l'incendie s'est déclaré sur le camion, le dispositif d'alerte embarqué par alarme visuelle s'est déclenché mais n'a pas entrainé une réaction appropriée des opérateurs : d'une part l'alarme était masquée par divers matériaux et d'autre part le site ne disposait pas de procédure de crise et le personnel n'avait pas été formé à l'évacuation d'urgence.



Figure 2-15 Photographie du camion incendié au WIPP (37)

Puis le 14 février 2014, une réaction exothermique à l'intérieur d'un colis de déchets stocké dans une autre galerie provoque un relâchement de radioactivité à l'extérieur, en surface. Les éléments tirés de l'analyse des causes de cet accident montrent notamment que le producteur des déchets à l'origine du relâchement avait procédé à un changement de conditionnement de ses déchets, sans en avertir le WIPP : il avait remplacé un matériau argileux par un matériau organique. Le colis de déchets incriminé n'était donc pas conforme sans que cela ait été détecté lors de son admission sur le centre.

Les analyses post-accident ont exploré la possibilité d'un lien de causalité entre le premier incident, qui aurait élevé la température dans l'installation souterraine, et le second, qui aurait pu être amorcé

[47] Waste Isolation Pilot Plant

par cette élévation de température. Un plan de remise en sûreté et exploitation du WIPP a été élaboré fin 2014 et mis en œuvre à partir de début 2015.

Les activités de mise en place des déchets ont repris en janvier 2017, après approbation des autorités.

Le retour d'expérience de cet événement réalisé par l'IRSN met en avant l'importance de la maîtrise du contenu des colis de déchets, la nécessité de prévoir des dispositions permettant de détecter suffisamment tôt une anomalie et de prévoir à la conception de l'installation les dispositions qui permettront de limiter les conséquences d'éventuelles dérives survenant en exploitation.

En ce qui concerne les colis, l'Andra définit, en application de la réglementation française, des spécifications d'acceptation des colis qui seront soumises à l'ASN pour approbation. Le respect de ces spécifications sera garanti par un processus d'approbation et d'acceptation des colis incluant des contrôles par les producteurs de déchets et par l'Andra, dont certains sont déjà réalisés afin de garantir dès à présent la maîtrise du contenu et du comportement des colis.

L'événement ayant affecté la mine de Asse en Allemagne

L'ancienne mine de potasse et de sel de Asse en Allemagne (Basse Saxe), dont l'exploitation a commencé en 1906, a été utilisée de 1965 à 1978 pour y stocker des déchets radioactifs de faible et moyenne activité (dont environ un pour cent s'apparente à des MA-VL). Le gisement de sel et de potasse de la mine de Asse se présente sous la forme d'un « dôme » (par opposition à une couche horizontale).

L'extraction de sel depuis 1906 s'est traduite par la création d'un nombre important de galeries et de grandes cavités laissées vides dans le dôme (représentant un volume total de 3,5 10^6 m^3). Quelques-unes des cavités issues de l'exploitation minière ont été réutilisées pour y placer les déchets radioactifs.

Les grands volumes vides créés dans le dôme par l'exploitation minière y génèrent progressivement d'importantes déformations qui se propagent jusqu'à l'un des flancs latéraux du dôme. Cela conduit à des venues d'eau souterraine provenant des formations géologiques adjacentes. Le sel étant sujet à dissolution, une intrusion d'eau à l'intérieur d'une formation saline tend en général à s'accentuer avec le temps. De la saumure contaminée a ainsi été repérée à partir de 1994 à l'intérieur de l'installation souterraine. Aujourd'hui, malgré des travaux de remblayage au voisinage des déchets, un risque d'effondrement des cavités souterraines et une arrivée d'eau susceptible de faire migrer des substances radioactives hors du stockage sont redoutés.

L'Allemagne a étudié plusieurs options pour la gestion du site : poursuivre le remblayage des cavités souterraines, déplacer ou retirer des colis de déchets stockés. L'option du retrait a été décidée. L'opération est néanmoins rendue complexe par le fait que le stockage n'avait pas été initialement conçu pour être récupérable. Concernant la gestion de ses déchets de façon générale, l'Allemagne a relancé la recherche d'un site en vue de l'enfouissement de ceux-ci.

Le retour d'expérience des événements survenus à Asse confirme l'intérêt des dispositions prises pour la conception du centre de stockage Cigéo. La conception du centre de stockage Cigéo est en effet dédiée au stockage des déchets radioactifs, elle n'utilise pas de cavités existantes et les dispositions sont prises pour permettre la récupérabilité des colis de déchets. Une séparation totale de la zone d'exploitation nucléaire et de la zone où sont effectués les travaux de creusement est également retenue pour le centre de stockage Cigéo.



Figure 2-16 Galerie de sel : laboratoire souterrain d'Asse (Allemagne)

Un autre stockage de déchets radioactifs peu irradiant dans le sel a été exploité en Allemagne sur le site de Morsleben (Saxe-Anhalt). Ce centre de stockage est aujourd'hui fermé.

L'UTILISATION DU SEL GEMME POUR LE STOCKAGE DE DÉCHETS INDUSTRIELS TOXIQUES

Le sel gemme est couramment utilisé pour le stockage géologique de certains déchets dangereux industriels non radioactifs.

De façon générale, les déchets industriels dangereux peuvent être stockés dans des installations dédiées en surface ou sub-surface sous certaines conditions (équipements spéciaux et système d'étanchéité) pour éviter que les polluants qu'ils contiennent se répandent dans l'environnement. En 2012, la France dénombrait ainsi 13 « installations de stockage de déchets dangereux » (ISDD). Seuls les déchets qui, après stabilisation ou solidification, respectent les limites de lixiviation imposées par la réglementation européenne y sont admissibles. Ceux qui ne peuvent pas être suffisamment insolubilisés sont transférés dans des installations de stockage géologique (il s'agit par exemple de déchets contenant du mercure).

On trouve de telles installations en Allemagne dans d'anciennes mines de sel. Les sites de Herfa-Neurode (Land de la Hesse) et de Zielitz (Land de la Saxe-Anhalt), exploités par la société allemande K+S, offrent une capacité annuelle de stockage géologique de 330 000 tonnes de déchets dangereux. Ils sont exploités pour le stockage de déchets industriels dangereux respectivement depuis 1972 et 1995.

En France, une installation similaire aux stockages allemands, « Stocamine », avait été développée dans une ancienne mine de potasse en Alsace. Cette installation accueillait à la fois des déchets dangereux admissibles en ISDD et des déchets lixiviables ne pouvant être gérés qu'en stockage géologique. Elle a été exploitée de 1999 à 2002.

Un incendie s'est déclaré dans l'une des galeries de l'installation souterraine le 10 septembre 2002. Il a été provoqué par des réactions chimiques à l'intérieur de colis de déchets dont il s'est avéré qu'ils ne respectaient pas les conditions d'admission. Onze jours ont été nécessaires aux pompiers pour maîtriser l'incendie. Cet incendie a entraîné l'arrêt de l'exploitation de l'installation.

Les études menées ensuite pour définir les modalités de fermeture du site ont révélé une insuffisance de l'étude d'impact à long terme. Il a ainsi été décidé que les déchets mercuriels et le Zirame (produit chimique fongicide) seront retirés de l'installation.

À l'instar de l'accident survenu dans le WIPP (USA), l'incendie de Stocamine montre l'importance de la mise en œuvre d'un processus rigoureux d'acceptation et de contrôle des déchets dans une installation de stockage et de celle d'intégrer à la conception des dispositions adaptées de réduction des risques d'incendie. Elle souligne aussi la nécessité de prendre en compte les grandes échelles de temps dans la définition de méthodes de gestion des déchets.

Le retour d'expérience de Stocamine ne remet pas en question le principe de la mise en sécurité des déchets toxiques dans le sel gemme. Sauf exception, les déchets retirés de Stocamine sont reconditionnés et stockés définitivement dans une mine de sel en Allemagne à Sondershausen (Thuringe).

b) Le stockage dans des installations creusées en couche géologique profonde dans le granite

Un massif granitique profond et de vaste dimension est une formation géologique qui offre une grande flexibilité pour la conception architecturale d'un stockage de déchets HA et MA-VL. En effet, le granite est une roche dure, très peu poreuse et très peu perméable. Sa résistance mécanique permet d'excaver la roche sans exiger de soutènement important. Sa conductivité thermique permet de dissiper aisément la chaleur émise par des déchets radioactifs. L'environnement chimique créé en profondeur est favorable à la durabilité des matériaux utilisés et à l'immobilisation des radionucléides.

En revanche, à l'échelle d'un massif, le granite n'est pas une formation géologique monolithique et homogène (cf. Figure 2-17). Il est parcouru par des fractures de tailles variables qui peuvent affecter la perméabilité de la roche. L'eau présente dans ces failles peut se déplacer de façon significative. En conséquence, dans les installations de stockage dans le granite, les colis de déchets radioactifs sont conçus pour constituer la principale barrière sur laquelle repose le confinement à long terme des radionucléides.



Figure 2-17 Exemple de roche granitique

La Finlande et la Suède (cf. Figure 2-19), dont les sous-sols sont essentiellement constitués de granite, développent des stockages profonds en milieu granitique pour les déchets de haute activité (en pratique des combustibles usés dans les contextes nationaux finlandais et suédois). Avec la France, la Finlande et la Suède sont les pays les plus avancés dans le développement technique d'un stockage en couche géologique profonde.

En Finlande, le processus d'implantation d'un stockage géologique a été achevé il y a 20 ans, lorsqu'un site proche de la centrale nucléaire d'Olkiluoto a été sélectionné avec l'accord de la municipalité d'Eurajoki.

En 2004, Posiva a posé la première pierre en construisant le laboratoire de recherche « Onkalo » sur le futur site de stockage. L'objectif d'Onkalo était d'organiser des recherches souterraines dans un site propice au stockage de combustible nucléaire irradié et de fournir des informations sur le substrat rocheux d'Olkiluoto. Dès le début, le laboratoire d'Onkalo était conçu pour faire partie du futur centre de stockage.

Le concept du stockage finlandais est basé sur la technologie de stockage du combustible usé encapsulé dans des conteneurs en cuivre (technologie suédoise dite KBS-3 (cf. Figure 2-18). Les galeries de stockage sont situées à une profondeur d'environ 500 mètres à l'intérieur du massif granitique d'Olkiluoto. Les conteneurs en cuivre contenant les déchets sont ensuite placés dans des alvéoles verticaux forés au sol des galeries. Une barrière ouvragée en bentonite est placée à l'intérieur des alvéoles autour des conteneurs. Les galeries de stockage sont remblayées avec des blocs de bentonite et sont scellées à l'aide d'un scellement ou bouchon spécifique à leur extrémité. L'isolement et le confinement à long terme reposent principalement sur le conteneur de stockage et les barrières ouvragées.

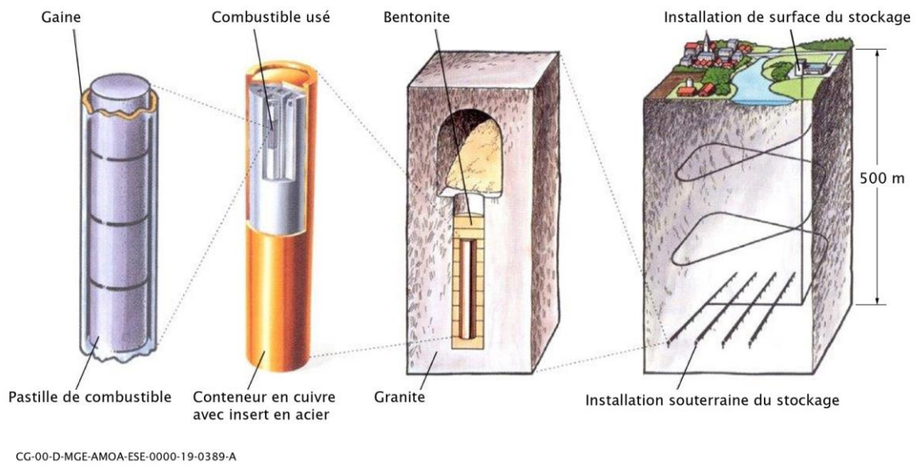


Figure 2-18 Concept suédois KBS-3 de stockage de combustibles usés (Source : SKB)

Un permis de construire - le premier au monde pour un stockage de combustibles usés - a été délivré en 2015. Aujourd'hui, les travaux de construction sont bien avancés avec plusieurs km de galeries déjà creusées. Le forage du puits destiné à acheminer dans le stockage les conteneurs de combustible irradié encapsulé est en cours de réalisation. Approuvés par l'autorité finlandaise de sûreté nucléaire (STUK), les préparatifs sont également en cours pour la construction du tunnel central pour la descente des conteneurs. Parallèlement aux travaux souterrains, la construction de l'usine d'encapsulation du combustible dans les conteneurs en cuivre a débuté. Le transfert en stockage des premiers conteneurs contenant du combustible usé pourrait débuter vers le milieu des années 2020.

En Suède, une loi de 1977 impose aux propriétaires de centrales nucléaires de disposer d'un concept de stockage avant toute autre autorisation de mise en service de nouveaux réacteurs.

Un projet de concept de stockage, dit « KBS », a donc été progressivement mis en place par la société suédoise de gestion des déchets nucléaires et des combustibles usés (SKB). Après des investigations approfondies dans plusieurs sites, il a été présenté au gouvernement en 1984.

Le développement et la démonstration de la faisabilité de ce concept et de la technologie de stockage ont nécessité des tests dans un environnement géologique. Pour ce faire, les installations de la mine de Stripa à Bergslagen ont été utilisées. Des méthodes d'investigation et de caractérisation de la roche y ont été mises au point au cours de la période 1976-1992. Des études sur les propriétés thermomécaniques du massif rocheux et le scellement y ont également été menées. Dans les années 1990, SKB a construit le laboratoire dans le granite d'Äspö (Simpevarp à proximité de la ville d'Oskarshamn). Le laboratoire d'Äspö (cf. Figure 2-20) développe techniquement le concept de stockage et produit des résultats pour sa démonstration de sûreté.

En 2009, un site pour l'implantation d'un stockage géologique a été choisi par SKB. Ce site est situé à proximité de la centrale nucléaire de Forsmark, dans la commune d'Östhammar.



Figure 2-19 Lieux d'installations scandinaves liées à la gestion des déchets de haute activité

En 2011, SKB a présenté ses demandes d'autorisation pour construire l'installation de stockage à Forsmark, conformément à la loi sur les activités nucléaires et au code de l'environnement. Comme en Finlande, le concept suédois repose principalement sur le confinement du combustible usé dans des conteneurs en cuivre, entouré d'argile à environ 500 m de profondeur dans une roche granitique (concept KBS-3).

Début 2018, après un examen approfondi, l'autorité de radioprotection suédoise (SSM) a recommandé au gouvernement d'approuver la demande de SKB. La Cour de l'environnement, après 6 semaines d'audiences publiques, a recommandé au gouvernement de demander à SKB des informations complémentaires sur cinq aspects particuliers du comportement des conteneurs en cuivre dans des conditions de stockage.

Depuis lors, SKB a apporté une réponse à cette demande et un ensemble de documents a été soumis au gouvernement début avril 2019.



Figure 2-20 Visite du laboratoire de recherche souterrain suédois à Aspö : démonstrateur de conteneur de stockage en cuivre dans une galerie souterraine

c) Le stockage dans des installations creusées en couche géologique profonde dans l'argile

L'argile est une roche sédimentaire à grain très fin. Elle est le plus souvent créée à partir de particules transportées et déposées il y a des millions d'années par le vent, les fleuves ou les courants marins sous forme d'alluvions. Avec le temps, ces dépôts ont sédimenté, se sont déshydratés et ont été compactés pour former une roche[48].

L'argile (cf. :Figure 2-21) est une roche qui présente des propriétés favorables pour le stockage des déchets radioactifs :

- une couche d'argile constitue une barrière naturelle imperméable[49]. Cette propriété peut être observée dans la nature où elle est responsable du paysage particulier des régions à sous-sol argileux. L'eau ne pouvant s'infiltrer dans le sous-sol, des étangs, des lacs et des marais se créent naturellement. Dans un stockage, une couche d'argile protège les déchets et empêche les circulations rapides d'eau à leur contact ;
- dans leur quasi-totalité, les substances radioactives et toxiques sont piégées dans l'argile dans laquelle elles ne peuvent pas parcourir plus que quelques mètres[50]. Seules quelques substances particulières peuvent traverser l'argile et sortir d'un stockage. Ces substances, dites « mobiles », par exemple l'iode ou le chlore, ne se déplacent toutefois dans l'argile que par un processus extrêmement lent de diffusion. Cette propriété mesurable en laboratoire a également été observée dans la nature à Oklo (Gabon, cf. encadré ci-après) ;
- l'argile a des caractéristiques mécaniques et physiques qui lui permettent de se refermer avec le temps et de retrouver ses propriétés initiales, par exemple lorsqu'elle a été fracturée ou desséchée. On dit qu'elle « cicatrise ». Cette propriété est notamment utilisée depuis plus de 10 000 ans par les céramistes qui séparent, modèlent, sèchent, humidifient et travaillent l'argile autant que nécessaire avant sa cuisson.

[48] Phénomène de diagénèse
[49] En termes scientifiques, une couche d'argile est très faiblement perméable à l'eau.

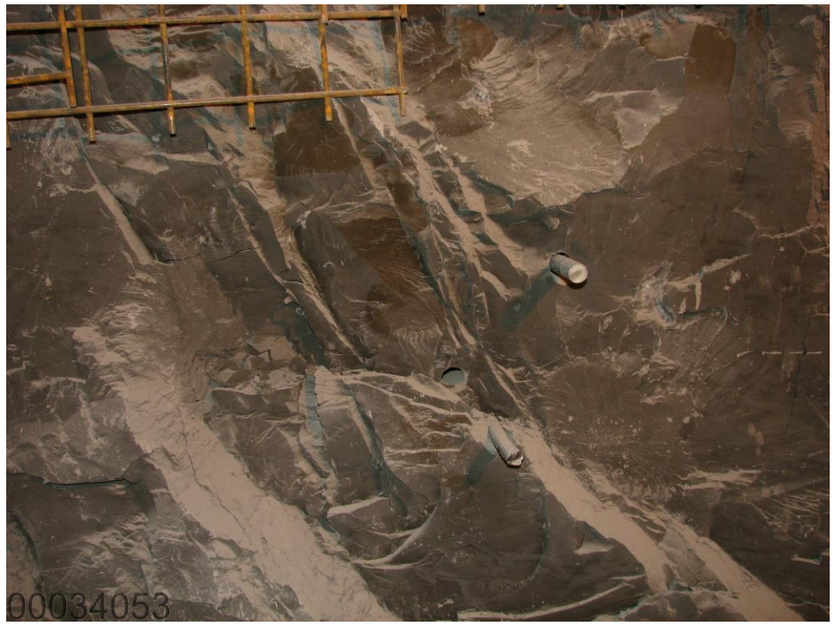


Figure 2-21 Gros plan sur une paroi de Callovo-Oxfordien dans une galerie du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

LE CONFINEMENT DANS L'ARGILE DES PRODUITS DE FISSION DU RÉACTEUR NATUREL D'OKLO, AU GABON

La mine d'uranium d'Oklo, au Gabon, renferme le seul réacteur nucléaire naturel connu. Il a constitué une base d'informations particulièrement intéressante pour l'étude du stockage géologique de déchets radioactifs.

Des circonstances particulières ont conduit, il y a 2 milliards d'années, à des réactions en chaîne dans le sous-sol de ce site riche en uranium. Les zones où elles se sont produites sont restées confinées sur plusieurs centaines de mètres dans une région qui n'a connu aucun bouleversement géologique important en deux milliards d'années.

Ce n'est qu'à une époque très récente que des phénomènes d'érosion ont amené les réacteurs au voisinage de la surface, permettant alors la découverte par l'homme de traces de produits de fission (éléments radioactifs produits lors de réactions en chaîne) devenus inoffensifs.

Très étudié dans les années 1980-1990, ce phénomène a notamment permis de conforter la capacité d'une formation argileuse à confiner les éléments radioactifs sur des échelles de temps géologiques. À Oklo, les radionucléides produits par les fissions ne se sont déplacés que de quelques centimètres dans la plupart des cas, au plus de quelques mètres.

[50] Capacité dite de « sorption » des radionucléides éventuellement solubilisés.

La capacité de l'argile à confiner durablement les déchets en a fait une des roches les plus étudiées pour la recherche de site de stockage de déchets HA et MA-VL. En effet les caractéristiques des argiles varient en fonction de leur profondeur, de la date de leur création et de leur composition physico-chimique particulières.

La Belgique a créé un laboratoire souterrain sur le centre de recherches nucléaires de Mol[51] (province d'Anvers) pour étudier la couche d'argile dite de « Boom ». Ce laboratoire, dénommé HADES[52], est situé à 225 m de profondeur. Il est exploité par le groupement d'intérêt économique (GIE) EURIDICE du SCK·CEN[53] et de l'Ondraf[54]) pour l'étude du stockage des déchets radioactifs de haute activité. Selon EURIDICE, les couches d'argiles envisagées en Belgique pour le stockage de déchets radioactifs, l'argile de Boom et les argiles yprésiennes, « *sont vieilles de dizaines de millions d'années et sont très stables*. [...]. *Elles sont de nature à convenir pour le stockage en profondeur car elles sont très peu perméables à l'eau et retiennent très longtemps les matières radioactives* » (36).

La Suisse a elle-aussi créé un laboratoire souterrain (cf. Figure 2-22 pour étudier l'argile. Il est accessible par le tunnel autoroutier du Mont Terri (canton du Jura). Il a été excavé à environ 300 mètres en-dessous de la surface. La roche qui y est étudiée est une argile à opalines[55]. Il est exploité par l'Office fédéral de topographie, Swisstopo, pour ses propres recherches et pour celles d'autres scientifiques, notamment de la NAGRA[56], société chargée d'élaborer et de réaliser en Suisse des solutions techniques permettant une gestion durable des déchets radioactifs. Selon Swisstopo, l'argile étudiée possède « *haut pouvoir de confinement, très faible perméabilité à l'eau, transport par diffusion des matières dissoutes, structure homogène, rétention des radionucléides à la surface des minéraux argileux, capacité d'auto-cicatrisation des fissures et des fractures par gonflement* », propriétés favorables pour le confinement des déchets.



Figure 2-22 *Laboratoire souterrain du Mont-Terri : maquette d'une alvéole de stockage pour le combustible usé*

D'autres pays, qui souhaitent également s'orienter vers un stockage géologique de leurs déchets radioactifs les plus dangereux dans une couche d'argile profonde, envisagent une période de tests scientifiques et technologiques, dans un laboratoire souterrain. Il s'agit notamment de la Chine, la Hongrie et du Royaume Uni.

La France possède aussi un laboratoire pour étudier le stockage dans l'argile. Il s'agit du Laboratoire souterrain du centre de Meuse/Haute - Marne, exploité par l'Andra, situé sur la commune de Bure dans la Meuse (cf. Chapitre 2.3.1 du présent document).

[51] Les communes de Mol et Dessel sont par ailleurs, candidates pour accueillir un centre de stockage de déchets radioactifs en surface.
[52] High Activity Disposal Experimental Site
[53] Studiecentrum voor kernenergie · Centre d'étude de l'énergie nucléaire

d) Le stockage dans des installations creusées en couche géologique profonde dans d'autres types de roches

Aux États-Unis, dans l'État du Nevada (Yucca Mountain), une installation de stockage dans une configuration géologique très particulière a été étudiée par le « Département de l'Énergie » (Department of Energy - DOE) pour y implanter un stockage de déchets radioactifs de haute activité. Le site, constitué d'une roche volcanique indurée, le « tuff », n'est pas situé à grande profondeur. Il est au-dessus du niveau des nappes phréatiques (cf. Figure 2-23). Cette configuration géologique originale ne se retrouve pas sur le territoire national français. Elle n'a pas été étudiée dans d'autres pays que les États-Unis. Pour des raisons de politique énergétique nationale américaine, le financement de ces études a été suspendu en 2011.



Figure 2-23 *Le site de Yucca Mountain dans le désert du Nevada*

En France, le stockage dans des schistes a aussi été examiné avant 1991 (site de Segré). Les schistes sont des roches dures potentiellement fracturées. Ils présentent une anisotropie qui doit être prise en compte pour la maîtrise de leur comportement mécanique sous chargement thermique. En France, hormis dans la région d'Angers, on trouve le plus souvent les schistes dans des zones tectoniquement actives (par exemple les Alpes) qui ne sont pas compatibles avec l'implantation d'une installation de stockage géologique de déchets radioactifs. Les départements de la région d'Angers n'ont pas candidaté pour l'implantation d'un laboratoire souterrain en vue de l'étude de la faisabilité d'un centre de stockage de déchets radioactifs.

[54] L'Ondraf est l'organisme national belge des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies.
[55] Les argiles à opalines possèdent des caractéristiques proches de celles du Callovo-Oxfordien de la Meuse/Haute-Marne.
[56] Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle - Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs.

2.2.7 La voie du stockage en formation géologique profonde est adoptée internationalement

Parmi toutes les options imaginées pour la gestion durable des déchets radioactifs HA et MA-VL, le stockage en formation géologique profonde est la voie de référence qui fait consensus à l'échelle internationale.

2.2.7.1 La position des instances internationales

L'Agence pour l'énergie atomique (AEN) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) précisait en 1999 que « *de toutes les options envisagées, l'évacuation en formation géologique profonde est le mode de gestion à long terme le plus approprié pour les déchets radioactifs à vie longue* » (37).

Pour l'Agence Internationale à l'Énergie Atomique (AIEA), le stockage en formation géologique profonde et stable, en général à plusieurs centaines de mètres sous la surface est le mode de gestion communément reconnu pour le stockage des déchets de haute activité. Il a notamment été préconisé « *comme solution de gestion à long terme pour les déchets de haute et de moyenne activité. Les études de faisabilité, les études de sûreté spécifique au site et l'expérience opérationnelle ont généralement renforcé la confiance dans la sécurité du stockage géologique* » (38).

La directive européenne 2011/70/EURATOM du 19 juillet 2011 (10) établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs considère que « l*es déchets radioactifs, y compris le combustible usé considéré comme déchet, doivent être confinés et isolés durablement des êtres humains et de la biosphère. Du fait de leur nature spécifique, à savoir de leur teneur en radionucléides, il est impératif de prendre des dispositions afin de protéger l'environnement et la santé humaine contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, y compris de mettre en place un stockage dans des installations appropriées qui serviront d'emplacement final. L'entreposage de déchets radioactifs, y compris à long terme, n'est qu'une solution provisoire* » (considérant n° 21). Elle considère également qu'il *« est communément admis que, sur le plan technique, le stockage en couche géologique profonde constitue, actuellement, la solution la plus sûre et durable en tant qu'étape finale de la gestion des déchets de haute activité et du combustible considéré comme déchet* » (considérant n° 23).

2.2.7.2 Les politiques nationales en matière de stockage profond

En Europe, la quasi-totalité des pays ayant à gérer des déchets radioactifs de types HA ou MA-VL se préparent à les stocker en formation géologique profonde, avec des degrés d'avancement différents d'un pays à l'autre. Il est à noter que certains pays disposant d'un programme nucléaire modeste n'excluent pas la possibilité de partager un même centre de stockage géologique (stockage « régional »).

La Suède et la Finlande sont particulièrement avancées dans la mise en œuvre d'un stockage de leurs déchets de haute activité (en pratique des combustibles usés non retraités). Les deux pays ont développé des laboratoires. La demande d'autorisation de création d'un stockage est en cours d'instruction en Suède. En Finlande cette autorisation a été obtenue et une première phase de travaux est en cours (cf. Chapitre 2.2.6.5 0 du présent document).

Au Royaume-Uni, un « Livre blanc » paru en 2008 a confirmé le bien-fondé scientifique du stockage géologique profond. La recherche de sites potentiels est en cours. Elle est basée sur le volontariat des communautés à accueillir une telle installation sur leur territoire.

L'Allemagne affiche également son objectif de stocker ses déchets radioactifs en formation géologique profonde, y compris ses déchets de faible activité. Ce pays a développé deux projets de stockage géologique. Le projet de Konrad (Basse Saxe) est destiné à des déchets de faible dangerosité ainsi qu'à des déchets assimilables à des MA-VL. Il s'agit d'une ancienne mine de fer en cours de conversion en vue de la mise en œuvre du stockage. Le projet de Gorleben (également en Basse Saxe) était prévu accueillir des combustibles usés et des déchets HA. Ce projet a été arrêté et une nouvelle recherche de site est initiée (cf. Chapitre 2.2.6.5a) du présent document).

La Belgique (laboratoire souterrain Hadès sur le centre de recherches nucléaires du SCK·CEN à Mol (1980)) et la Suisse (laboratoires du Grimsel dans le granite (1984) puis du Mont Terri en milieu argileux (1996)) se sont équipées de laboratoires. En Suisse, la recherche de sites pour un stockage géologique est particulièrement active.

À l'instar de l'Allemagne, ce pays considère aussi le stockage géologique pour des déchets de plus faible dangerosité.

Si l'Espagne met actuellement en priorité le développement d'une installation d'entreposage temporaire, le stockage géologique reste dans ce pays l'objectif de gestion des déchets HA et MA-VL.

Ailleurs dans le monde, de nombreux pays considèrent le stockage en formation géologique profonde comme le mode de gestion de référence de leurs déchets radioactifs les plus dangereux.

Les États-Unis exploitent, depuis 1991, le WIPP, premier et seul centre de stockage en formation géologique profonde de déchets comparables aux déchets MA-VL (cf. Chapitre 2.2.6.5a) du présent document). Pour ce qui concerne les combustibles usés et les déchets HA, une loi de 1982 sur la politique en matière de déchets nucléaires chargeait le Département de l'énergie de construire un centre de stockage final. Le site de Yucca Mountain au Nevada a fait l'objet d'investigations et de travaux depuis 1978 pour y construire un tel centre. Ces études et travaux ont été suspendus en 2012, notamment suite à des oppositions locales. Une nouvelle loi en 2017 tend à relancer le processus. Si une controverse sur le bienfondé du choix du site de Yucca Mountain persiste, le principe du stockage géologique reste clairement affiché pour la gestion à long terme des combustibles usés et des déchets HA.

Le Canada a été l'un des premiers pays à se doter d'un laboratoire de recherche souterrain pour évaluer la faisabilité du stockage géologique et développer des procédés (Laboratoire de recherche souterrain de Lac du Bonnet au Manitoba, construit à partir de 1982 et aujourd'hui fermé). Le Canada est aujourd'hui en phase de recherche de sites potentiels de stockage géologique.

En Russie, une loi adoptée en 2011 a défini les étapes de création d'un centre de stockage pour les déchets de haute activité incluant une phase de recherche dans un laboratoire souterrain, dont les travaux préparatoires à la construction sont en cours dans la région de Krasnoïarsk (Sibérie). Une décision concernant la création du stockage est attendue d'ici 2025 et l'installation pourrait être opérationnelle à partir de 2035.

En Ukraine, des études et recherches sont en cours avec le soutien de l'Union européenne pour développer un stockage géologique. L'entité publique en charge de mener ce programme est mise en place sous le contrôle de l'agence nationale ukrainienne de la zone d'exclusion de Tchernobyl.

La Chine procède à une recherche de site en vue de la construction d'un laboratoire souterrain.

Au Japon, une cartographie de sites potentiels a été publiée en 2017, mais le choix du site n'a pas encore été effectué.

En Inde, le stockage géologique dans des roches granitiques est privilégié, ce pays disposant d'un retour d'expérience important de l'extraction et de l'utilisation de cette roche[57].

De nombreuses collaborations multilatérales ou bilatérales existent entre ces pays. Les gestionnaires de déchets ont notamment créé deux instances internationales d'échanges auxquelles l'Andra participe activement :

- l'International Association for Environmentally Safe Disposal of Radioactive Material » (EDRAM), dont le but est l'échange d'information au sujet de la gestion des déchets radioactifs ;
- le « Club of Agencies » organisation informelle d'échanges entre les différentes agences européennes de gestion des déchets radioactifs.

EURAD (European Joint Programme on Radioactive Waste Management) réunit depuis 2019 une centaine d'acteurs européens impliqués dans la gestion des déchets radioactifs : agences de gestion des déchets radioactifs, comme l'Andra, supports techniques aux autorités de sûreté, comme l'IRSN, Organismes de recherche (CNRS, CEA, BRGM, Universités, etc.). Le programme Eurad, soutenu par la Commission européenne, coordonné par l'Andra, a pour objectif de mutualiser les efforts de recherche et de partager les connaissances scientifiques et techniques dans le domaine de la gestion à long terme des déchets radioactifs.

[57] Creusées dans le granit au 3e siècle avant J-C, les grottes artificielles de Barabar sont restées intactes jusqu'à nos jours.

Synthèse

La gestion durable des déchets HA et MA-VL, c'est-à-dire leur mise en sécurité définitive pour prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations suivantes, est une exigence éthique fixée par le code de l'environnement.

Il existe actuellement environ 3 900 m³ de déchets HA et environ 42 000 m³ de déchets MA-VL français entreposés en attente d'une filière de gestion durable dans les bâtiments d'entreposage des producteurs de déchets. Si l'on considère les volumes qui seront encore générés par les installations nucléaires existantes, cela représente environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL totaux prévisibles.

La recherche et l'étude des pistes de gestion durable des déchets radioactifs HA et MA-VL a été initiée de longue date dans la plupart des pays ayant développé des programmes nucléaires militaires ou électronucléaires. Leur entreposage de longue durée, la réduction de leur dangerosité, leur envoi dans l'espace, leur évacuation dans les fonds marins ou dans le magma, leur stockage dans le milieu géologique, ces modes de gestion ont tous fait l'objet d'analyses et d'évaluations.

Parmi celles-ci, le stockage en couche géologique profonde constitue le seul mode de gestion dont la faisabilité est avérée et qui permet de prendre en charge l'ensemble des déchets HA et MA-VL. Il constitue la référence internationale pour la gestion durable de ces déchets.

2.2.8 La synthèse comparative des différents modes de gestion des déchets HA et MA-VL envisagés et les raisons justifiant le choix du stockage géologique

2.2.8.1 Introduction de la synthèse comparative

La comparaison du stockage géologique avec les autres voies envisagées pour la gestion des déchets HA et MA-VL justifie le choix du stockage géologique et constitue le point de départ des étapes d'études, d'implantation, de conception et d'analyse des impacts du centre de stockage Cigéo.

Elle constitue un préalable à la justification du choix du Callovo-Oxfordien comme roche d'accueil du stockage (cf. Chapitre 2.3 du présent document), aux études approfondies pour sa démonstration de sûreté (cf. Chapitre 2.4 du présent document), aux choix d'implantation de ses installations (cf. Chapitre 2.6 du présent document), à ses choix de conception (cf. Chapitre 2.7 du présent document), ainsi qu'à ses modalités de construction, de fonctionnement, de fermeture et de démantèlement (cf. Chapitre 4 et 5 du présent document).

Le présent chapitre 2.2.8 expose et reprend sous forme de tableaux comparatifs, les analyses des principaux modes de gestion des déchets HA et MA-VL présentées dans les chapitres 2.2.2 à 2.2.7 du présent document.

Autant que de besoin, la comparaison et la justification du choix du stockage peuvent faire appel à des éléments complémentaires, présentés spécifiquement dans les chapitres portant sur le centre de stockage Cigéo aux chapitres 2.3 à 2.7, 3 et 5.4 du présent document. Il s'agit notamment d'éléments relatifs à sa sûreté, à son inventaire et à sa réversibilité. La synthèse de ses incidences environnementales est présentée dans le volume IV de la présente étude d'impact.

Les modes de gestion des déchets HA et MA-VL comparés sont :

- le stockage géologique ;
- la transmutation ;
- le stockage dans des forages très profonds ;
- l'entreposage de longue durée.

Le centre de stockage géologique qui sera pris pour référence pour la comparaison sera bien entendu le centre de stockage Cigéo. Pour les autres modes de gestion, l'exercice de comparaison exige de prendre des hypothèses concernant leur mise en œuvre industrielle :

- s'agissant de la transmutation, il est pris pour hypothèse que ce mode de gestion serait mis en œuvre dans un nouveau parc, à créer, de réacteurs nucléaires. Un certain nombre de sites nouveaux serait à nucléariser, les sites des réacteurs et centre de recherche actuels ne permettant pas, du point de vue des surfaces disponibles et des incidences environnementales supplémentaires acceptables, d'y construire tous les réacteurs du nouveau parc et toutes les nouvelles installations en support. En effet, un nouveau parc de réacteur de transmutation nécessiterait la création d'un ensemble cohérent de nouvelles installations de séparation, de traitement et de préparation des combustibles pour ces réacteurs ;
- s'agissant du stockage dans des forages très profonds, il est pris pour hypothèse qu'ils seraient creusés sur les sites d'entreposage actuels des colis HA et MA-VL, c'est-à-dire La Hague et Marcoule, sans préjudice de la démonstration de la compatibilité géologique de ces sites[58] ;
- s'agissant de l'entreposage de longue durée, il est pris pour hypothèse qu'il serait effectué dans une installation centralisée, c'est-à-dire regroupant tous les déchets de l'inventaire, implantée à faible profondeur à proximité de la surface (sub-surface) sur un site nouveau, adapté à ce type d'installation[59].

Ces hypothèses, raisonnables techniquement, ont pour objectif de permettre une estimation globale des bénéfices et incidences des différentes voies de gestion, en les comparant de façon équitable, selon des paramètres et enjeux communs et sans défavoriser ou favoriser artificiellement un mode de gestion par rapport à un autre.

Pour ne pas complexifier inutilement l'exercice de comparaison, le nombre de paramètres a été limité à une dizaine, mais qui couvrent les principaux enjeux.

Leurs analyses ont été regroupées en fonction des quatre thématiques suivantes :

- la capacité des modes de gestion à prendre en charge la totalité de l'inventaire des déchets HA et MA-VL, c'est-à-dire leur capacité à les gérer complètement et durablement. En effet, certains modes de déchets se suffisent à eux-mêmes, quand d'autres nécessitent la mise en œuvre d'une filière complémentaire ultérieure (cf. Chapitre 2.2.8.2 du présent document) ;
- la maturité technologique des différents modes de gestion, c'est-à-dire de la capacité de notre génération à les mettre en œuvre (cf. Chapitre 2.2.8.3 du présent document) ;
- la réversibilité des modes de gestion (y compris la récupérabilité des colis stockés) qui est une obligation légale incombant au stockage géologique en particulier, mais qui constitue un axe essentiel et particulier d'analyse compte tenu de la durée séculaire nécessaire à la mise en œuvre de tous les modes de gestion (cf. Chapitre 2.2.8.4 du présent document) ;
- les estimations de leurs incidences sur l'environnement et la santé humaine (cf. Chapitre 2.2.8.5 du présent document).

Une conclusion et une synthèse sous forme de tableau simplifié sont fournies à l'issue de l'exercice de comparaison.

---

[58] Une hypothèse reposant sur un nombre important de forages très profonds répartis sur le territoire n'est pas très vraisemblable techniquement et socialement. Elle desservirait artificiellement ce mode de gestion du point de vue des impacts. Inversement, si un ou deux sites étaient retenus, même hors de La Hague et Marcoule, cela ne modifierait pas notablement le résultat de la comparaison.

[59] Une hypothèse reposant sur un nombre élevé d'entreposages de longue durée sur chaque site nucléaire (Bugey, La Hague, Marcoule, Cadarache, Valduc, centrales de production d'électricité…) n'est pas très vraisemblable industriellement et elle induit une certaine complexité d'analyse par la présence sur ces sites d'installations d'entreposage « classique » déjà construites. Inversement, si un nombre limité d'entreposage de longue durée était créé, cela ne modifierait pas notablement le résultat de la comparaison.

2.2.8.2 La capacité des différents modes de gestion envisagés à prendre en charge tous les déchets de l'inventaire de référence, leur tendance à générer eux-mêmes de nouveaux déchets et leur besoin éventuel de filières de gestion de déchets radioactifs complémentaires ou ultérieures

Parmi les paramètres stratégiques à prendre en compte pour le choix d'un mode de gestion des déchets HA et MA-VL, il convient d'analyser en particulier :

- leur capacité à prendre en charge tous les déchets radioactifs de l'inventaire (cf. Chapitre 3 du présent document) ou le besoin éventuel d'installations de gestion de déchets complémentaires en parallèle de leur fonctionnement ;
- les nouveaux déchets radioactifs qu'ils produisent pendant leur propre fonctionnement ;
- le besoin qu'ils génèrent de créer une filière suivante de gestion de déchets HA et MA-VL à mettre en œuvre ultérieurement à leur fonctionnement.

Tous les modes de gestion ne sont pas capables de prendre en charge de façon équivalente l'ensemble des déchets de l'inventaire de référence actuel (déchets produits ou à produire par les installations nucléaires existantes - cf. Chapitre 3 du présent document). Dans son avis du 1er décembre 2020 (21), l'ASN rappelle que « *les perspectives de transmutation à une échelle industrielle des déchets déjà conditionnés de l'inventaire de référence de Cigéo ne sont pas crédibles* ». Seuls le stockage géologique et l'entreposage de longue durée ont la capacité de prendre en charge à eux seuls l'ensemble de l'inventaire. Il ne s'agit toutefois que d'une prise en charge temporaire pour l'entreposage, ce mode de gestion n'étant par définition, pas un mode de gestion durable. La transmutation ne concernerait que certains des radionucléides présents dans les futurs déchets HA et ne pourra pas s'appliquer à l'intégralité des futurs déchets MA-VL. Les forages très profonds permettraient de stocker la totalité des colis HA et les colis MA-VL les moins volumineux. Cependant, les colis de déchets MA-VL les plus volumineux nécessiterait des forages de diamètres trop importants. Leur gestion durable nécessiterait en parallèle la création d'un stockage géologique creusé par des techniques minières traditionnelles.

Pendant leur fonctionnement et leur démantèlement, les différents modes de gestion produisent eux-mêmes plus ou moins de déchets radioactifs. Le fonctionnement et le démantèlement d'un parc de réacteurs pour la transmutation et de ses installations supports produiraient des déchets en quantités importantes et en natures comparables à celles du parc électronucléaire actuel (HA, MA-VL et déchets susceptibles d'être stockés en surface). Les nouveaux déchets produits viendraient s'ajouter à ceux déjà existants. La transmutation est donc nécessairement associée au développement de capacités et de filières complémentaires de stockage, même s'il peut être espéré que la nocivité des futurs déchets serait réduite par rapport aux déchets actuels. Comme le stockage géologique et le stockage en forages très profonds, l'entreposage de longue durée produirait peu de déchets de fonctionnement et de démantèlement.

Enfin, seuls le stockage géologique et le stockage dans des forages très profonds (ce dernier complété par un stockage pour des déchets MA-VL) se suffisent à eux-mêmes et permettent d'envisager, à l'horizon du siècle prochain, un terme aux opérations de gestion des déchets HA et MA-VL. En revanche, la transmutation et l'entreposage de longue durée sont nécessairement suivis, dans le futur, à l'issue de leur fonctionnement, d'une autre filière de gestion de déchets radioactifs. En plus de la transmutation, il s'agira de mettre en sécurité, dans un stockage géologique, les déchets HA et MA-VL produits par le fonctionnement et le démantèlement du nouveau parc de réacteurs de transmutation et les déchets actuels non transmutés. Dans son avis du 1er décembre 2020 (21), l'ASN estime que, si des études sur la transmutation devaient être poursuivies, il conviendrait « *qu'elles soient menées dans l'optique du développement de filières complètes, intégrant le stockage des déchets issus de la transmutation et présentant un haut niveau de sûreté* ». Dans le cas de l'entreposage de longue durée, il s'agira d'engager la filière de gestion suivante imaginée et conçue pendant la période d'attente en entreposage. Celle-ci pourrait être, soit une nouvelle étape d'entreposage, repoussant encore la mise en sécurité durable des déchets, soit être basée sur un stockage géologique ou sur des technologies nucléaires de type transmutation arrivées à maturité dans l'intervalle. La transmutation et l'entreposage de longue durée perpétuent ainsi le recours aux technologies nucléaires et ne dispensent en aucun cas de la création d'un stockage géologique pour tout ou partie des déchets HA et MA-VL existants ou à produire.

Tableau 2-1 *Tableau comparatif des différents modes de gestion envisagés pour les déchets HA et MA-VL selon les critères : capacité à prendre en charge tous les déchets HA de l'inventaire actuel/capacité à prendre en charge tous les déchets MA-VL de l'inventaire actuel/production de nouveaux déchets radioactifs/nécessité d'une filière suivante*

Très favorable | Favorable | Défavorable | Très défavorable

	Stockage géologique **Création du projet de centre de stockage Cigéo**	**Transmutation** **Création d'un parc de réacteurs et de ses installations supports**	**Forages très profonds** **Création de forages sur les centres nucléaires existants**	**Entreposage de longue durée** **Création d'un entreposage centralisé enterré**
Capacité à prendre en charge tous les déchets HA de l'inventaire actuel	• Stocke tous les déchets HA de l'inventaire actuel	• Transmute uniquement certains radionucléides contenus dans les déchets HA • Ne supprime pas tous les radionucléides à vie longue dangereux pour la santé contenue dans les déchets HA (137Iode, 36Chlore, 14Carbone…) • Serait difficilement envisageable pour les déchets HA déjà produits dont la dévitrification et la séparation seraient très complexes	• Stocke tous les déchets HA de l'inventaire actuel	• Prend en charge tous les déchets HA de l'inventaire actuel de façon temporaire
Capacité à prendre en charge tous les déchets MA-VL de l'inventaire actuel	• Stocke tous les déchets MA-VL de l'inventaire actuel	• Ne transmute pas les déchets MA-VL, car il faudrait en premier lieu en séparer les radionucléides à transmuter, ce qui est très complexe compte tenu de leur grande variété et de leur volume très important. Cette séparation est quasi-inenvisageable physiquement pour les déchets activés • Nécessite donc de créer des installations de gestion des déchets non transmutés de l'inventaire actuel	• Stocke les déchets MA-VL conditionnés dans des colis peu volumineux (de géométrie identique aux colis HA) • Nécessite de créer un centre de stockage géologique pour les déchets MA-VL volumineux de l'inventaire actuel (et éventuellement pour ceux dont la démonstration de la sûreté en forage ne pourrait pas être acquise), creusé par des techniques minières conventionnelles	• Prend en charge tous les déchets MA-VL de l'inventaire actuel de façon temporaire
Production de nouveaux déchets radioactifs pendant leur propre fonctionnement et démantèlement	• Produit très peu de nouveaux déchets radioactifs et uniquement des déchets pouvant être stockés dans des installations de surface	• Produit de nouveaux combustibles irradiés, des déchets HA et MA-VL, ainsi que des déchets à stocker en surface • Les quantités totales de nouveaux déchets sont importantes (comparables à celles du parc actuel) et leurs natures sont encore mal cernées.	• Produit très peu de nouveaux déchets radioactifs et uniquement des déchets pouvant être stockés dans des installations de surface	• Produit très peu de nouveaux déchets radioactifs et uniquement des déchets pouvant être stockés dans des installations de surface
Nécessité d'une filière suivante de gestion de déchets HA et MA-VL	• Ne nécessite pas de développer une filière suivante de gestion des déchets	• Nécessite de mettre en œuvre une filière de gestion des déchets HA et MA-VL produits par le nouveau parc de transmutation et ses installations supports, c'est-à-dire, en l'état actuel des connaissances, soit un stockage géologique, soit un second parc de réacteurs de transmutation • On peut envisager que la nocivité de certains des nouveaux déchets soit moindre qu'actuellement	• Ne nécessite pas de développer une filière suivante de gestion des déchets (si un stockage dédié aux déchets MA-VL de l'inventaire actuel a été mis en œuvre en parallèle)	• Ne peut pas prendre en charge les déchets de l'inventaire de façon durable • Nécessite de mettre en œuvre une filière suivante de gestion pour les déchets HA et MA-VL de l'inventaire actuel à l'issue de leur période d'entreposage, c'est-à-dire, en l'état actuel des connaissances, soit un stockage géologique, soit un parc de réacteurs de transmutation • Selon la nature de la filière suivante choisie, elle produira plus ou moins de déchets nouveaux

2.2.8.3 La maturité technologique des différents modes de gestion et le nombre d'installations nouvelles qu'ils requièrent

Parmi les paramètres stratégiques qui rendent plus ou moins complexe la mise en œuvre d'un mode de gestion des déchets HA et MA-VL et qu'il convient donc d'analyser au moment du choix figurent en particulier :

- la maturité technologique des installations nucléaires à créer pour rendre possible leur fonctionnement ;
- le nombre d'installations nucléaires nouvelles à créer pour chaque mode de gestion.

La maturité d'une technologie traduit sa capacité à être intégrée de façon effective dans le fonctionnement d'un système industriel. Certaines technologies sont directement utilisables. Elles sont dites « à maturité ». D'autres nécessitent encore des essais et des développements, mais il peut être raisonnablement envisagé de les utiliser à court ou moyen termes. D'autres n'en sont encore qu'au stade de l'idée ou de la piste de recherches. Elles ne pourront être utilisées industriellement qu'au prix de percées technologiques et industrielles majeures qui restent très incertaines.

La maturité technologique est un paramètre stratégique essentiel à analyser pour retenir un mode de gestion. En effet, selon un principe de responsabilité intergénérationnelle, il appartient à la génération qui exploite les installations nucléaires et en tire des bénéfices de proposer un mode de gestion des déchets qu'elles produisent. Il est donc important d'analyser les modes de gestion des déchets au regard des connaissances disponibles actuellement et de la capacité technologique de notre génération à les engager. Parier sur le développement hypothétique de technologies nouvelles comporte le risque de ne pas aboutir et de reporter sur d'autres générations la décision du stockage.

Les maturités technologiques des différents modes de gestion envisagés pour les déchets HA et MA-VL, c'est-à-dire la capacité de notre génération à les utiliser de façon effective pour mettre en sécurité ces déchets, sont très inégales. Certains modes de gestion, notamment la transmutation et les forages très profonds, sont aujourd'hui plutôt assimilables à des pistes de recherches. Leurs perspectives d'industrialisation sont très incertaines compte tenu du nombre de verrous technologiques restant à lever pour les rendre utilisables (technologie de réacteurs de transmutation, technologie séparative des radionucléides à transmuter, technologie des forages très profonds de grands diamètres…). Au stade actuel des connaissances, il ne peut en aucun cas être garanti qu'elles puissent à l'avenir jouer un rôle effectif en matière de gestion industrielle des déchets HA et MA-VL. De plus, s'agissant du stockage dans les forages très profonds, sa démonstration de sûreté, même au stade des grands principes, ne peut pas encore être considérée comme acquise. En effet, les roches situées à très grande profondeur, c'est-à-dire à des profondeurs de l'ordre du kilomètre ou au-delà, ne sont pas aussi bien connues que les couches géologiques classiquement envisagées pour les installations de stockage géologique creusées au moyen de techniques minières (ces dernières sont plutôt situées à quelques centaines de mètres de profondeur et elles peuvent être étudiées par des laboratoires souterrains). Leur capacité à confiner effectivement les déchets sur le long terme doit encore être confirmée. En fonctionnement, cette technologie rend quasiment impossible la surveillance des colis stockés, ce qui pourrait rendre très difficile l'établissement de leur démonstration de sûreté et pourrait même être considéré comme rédhibitoire. De fait, si l'on considère les technologies actuelles et celles raisonnablement accessibles pour notre génération, seuls le stockage géologique et l'entreposage de longue durée sont réellement envisageables. Pour l'entreposage de longue durée, même s'il n'existe pas, à ce jour, d'études de conception abouties d'une installation centralisée, elles pourraient être menées à court terme sur la base des technologies et de l'expérience disponible. Cependant, la maturité technologique de la filière suivante (cf. Chapitre 2.2.8.2 du présent document), à choisir à l'horizon du siècle prochain, est nécessairement incertaine à ce jour. Son choix posera des questions *a priori* de même nature que celles associées aujourd'hui au choix global entre le stockage géologique, la transmutation ou les forages très profonds.

La création d'une installation nucléaire est en soi une source de complexité compte tenu des exigences requises en matière de choix de site, d'analyse environnementale globale, de processus d'autorisations administratives, d'investissement et d'acceptation sociétale. La création d'un nombre réduit d'installations constitue donc une complexité moindre pour un mode de gestion.

Le stockage géologique prend en charge tous les déchets HA et MA-VL de l'inventaire et constitue le mode de gestion qui réduit le plus le nombre d'installations nucléaires nouvelles à créer. Par rapport à la situation actuelle, le centre de stockage Cigéo ne nécessite la création que d'une seule installation nucléaire supplémentaire : lui-même. Le stockage en forages très profonds (dans l'hypothèse ils sont créés sur des sites nucléaires existants) est également économe en nouvelles installations. Il nécessite la création de deux installations de stockage en forages sur chacun des sites d'entreposage actuels des déchets HA (La Hague et Marcoule, ces derniers étant déjà très nucléarisés) et la création d'une installation de stockage géologique creusée par des techniques minières pour les déchets MA-VL les plus volumineux (et éventuellement ceux dont la démonstration de sûreté du stockage en forage très profond ne pourrait pas être acquise). La transmutation est le mode de gestion qui nécessite de créer le plus d'installations nucléaires. Elle est associée à une industrie nucléaire de taille et nature comparable à celle d'aujourd'hui, sans qu'il soit possible, à ce stade des études, de fournir un nombre précis d'installation à créer. L'entreposage de longue durée dans une installation centralisée ne nécessite la création que d'une seule installation nucléaire dans un premier temps, à laquelle viendront nécessairement s'ajouter les installations nucléaires de la filière de gestion suivante (cf. Chapitre 2.2.8.2 du présent document).

Tableau 2-2 *Tableau comparatif de la maturité technologique des différents modes de gestion selon les critères : faisabilité technique/nombre d'installations nouvelles à créer*

Très favorable | Favorable | Défavorable | Très défavorable

	Stockage géologique **Création du projet de centre de stockage Cigéo**	**Transmutation** **Création d'un parc de réacteurs et de ses installations supports**	**Forages très profonds** **Création de forages sur les centres nucléaires existants**	**Entreposage de longue durée** **Création d'un entreposage centralisé enterré**
Faisabilité technique par notre génération	• Faisabilité technique acquise (Laboratoire souterrain du CMHM, études de conception de l'installation menée au stade de l'avant-projet)	• Faisabilité technique non acquise : • Technologie des réacteurs de transmutation à développer • Technologie de séparation des radionucléides transmutés à identifier	• Faisabilité non acquise : ✓ Connaissance lacunaire des couches géologiques très profondes ✓ Technologies de creusement des forages, d'emplacement des colis et de scellement des forages à développer ✓ Sûreté en fonctionnement et après fermeture à démontrer	• Faisabilité technique accessible pour l'installation d'entreposage • La faisabilité technique du mode de gestion suivant n'est quant à elle pas acquise
Nombre d'installations nucléaires nouvelles à créer	• Une seule installation nucléaire à créer : le centre de stockage géologique lui-même	• Nombre important d'installations nucléaires à créer pour la transmutation : ✓ Installations d'extraction des radionucléides ✓ Réacteurs de transmutation de radionucléides ✓ Installations de traitement, de conditionnement des substances radioactives produites ✓ À termes, création de toutes les installations nucléaires nécessaires à la filière de gestion suivante, en nombre plus ou moins élevé en fonction du choix de cette filière (stockage géologique, seconde transmutation, forages…) ✓ Création des installations de gestion des déchets de l'inventaire actuel non-transmutés (stockage géologique, forages…)	• Deux installations nucléaires de stockage en forages nouvelles à créer sur des sites existants nucléarisés • Une installation de stockage géologique à créer pour les colis de déchets MA-VL les plus volumineux de l'inventaire actuel	• Une installation nucléaire d'entreposage centralisé nouvelle à créer • À termes, création de toutes les installations nucléaires nécessaires à la filière de gestion suivante, en nombre plus ou moins élevé en fonction du choix de cette filière (stockage géologique, transmutation, forages…)

2.2.8.4 La réversibilité des différents modes de gestion envisagés

La réversibilité est une notion définie spécifiquement pour le stockage géologique. L'article L. 542-10-1 du code de l'environnement précise que « *la réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion. La réversibilité est mise en œuvre par la progressivité de la construction, l'adaptabilité de la conception et la flexibilité d'exploitation du stockage permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets (suite notamment à une évolution de la politique énergétique). Elle inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée cohérente avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage.* » (cf. Chapitre 5.4 du présent document).

Ainsi, la réversibilité consiste à laisser des choix ouverts aux générations successives en matière de développement d'un centre de stockage géologique. Elle est donc intégralement applicable au centre de stockage Cigéo. À cet égard, le code de l'environnement prévoit que la réversibilité soit assurée sur une durée minimale qui *« à titre de précaution […] ne peut être inférieure à cent ans* ». Si elle n'est pas formellement exigée pour les autres modes de gestion, il est toutefois envisageable de les comparer en fonction de leurs capacités à être construits progressivement, à s'adapter aux progrès techniques et aux éventuelles décisions de modification d'inventaire. Il est aussi nécessaire de les comparer en termes de capacité à revenir en arrière, en particulier à retirer les colis des installations utilisées, au cas où une voie alternative de gestion était décidée ultérieurement.

S'agissant de la progressivité de la construction, tous les modes de gestion peuvent être déployés de façon assez graduelle. Il faut toutefois noter que la transmutation ne pourrait être effectivement engagée qu'après la construction et le démarrage de certaines installations clés, notamment pour la séparation des radionucléides, retardant de fait le démarrage des installations liées.

S'agissant de leur flexibilité et de leur adaptabilité graduelle aux progrès techniques et aux modifications d'inventaire, les modes de gestion sont également assez équivalents dans les limites des scénarios qui soutiennent la définition des inventaires dits « de réserves » prévus par le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (cf. Chapitre 3.4 du présent document).

S'agissant de la récupérabilité, la transmutation n'est pas véritablement concernée. En effet, elle repose sur le fonctionnement d'installations et de réacteurs dans lesquels les matières transitent et n'ont pas vocation à stationner de façon prolongée. La question de la possibilité de leur retrait ne se pose donc pas véritablement. Le stockage géologique, conformément à ses obligations réglementaires, est conçu pour que les colis puissent en être retirés pendant toute sa période de fonctionnement. Il assure, sur le plan de la récupérabilité, des fonctions équivalentes à celles d'un entreposage de longue durée centralisé. Les forages très profonds diffèrent des autres modes de gestion car ils n'offrent pas de possibilité de retrait des colis stockés. Compte tenu de leur grande profondeur d'implantation et des contraintes mécaniques induites sur les forages, après quelques mois, voire quelques années de stockage, il n'est plus techniquement envisageable d'en retirer des colis de déchets. Ceux-ci sont rapidement bloqués. Cette lacune en termes de réversibilité est un paramètre qui obère très fortement le recours éventuel aux forages très profonds.

Enfin, la transmutation et l'entreposage de longue durée nécessitent la mise en œuvre à l'issue de leur fonctionnement, d'une filière suivante de gestion des déchets HA et MA-VL (cf. Chapitre 2.2.8.2 du présent document). Si l'un de ces modes de gestion était retenu, la réversibilité de la filière suivante (stockage géologique, transmutation ou forages) ferait *a priori* partie des éléments à apprécier par les générations concernées au moment de son éventuel choix.

Tableau 2-3 Tableau comparatif des différents modes de gestion envisagés pour les déchets HA et MA-VL selon les critères liés à la réversibilité : progressivité de la construction, flexibilité de l'exploitation et adaptabilité de la conception/récupérabilité

Très favorable | Favorable | Défavorable | Très défavorable

	Stockage géologique **Création du projet de centre de stockage Cigéo**	**Transmutation** **Création d'un parc de réacteurs et de ses installations supports**	**Forages très profonds** **Création de forages sur les centres nucléaires existants**	**Entreposage de longue durée** **Création d'un entreposage centralisé enterré**
Progressivité de la construction, flexibilité et adaptabilité	• Développement progressif et flexible prévu pour le centre de stockage • Adaptable à des évolutions de la politique nationale en matière de gestion des déchets, par exemple le stockage des CU ou le stockage géologique des déchets FA-VL	• Développement progressif possible des installations de transmutation • Adaptable à des évolutions de la politique nationale en matière de gestion des déchets (sous réserve de sa faisabilité technique)	• Développement progressif et flexible possible pour les forages très profonds • Adaptable à des évolutions de la politique nationale en matière de gestion des déchets (sous réserve de sa faisabilité technique)	• Développement progressif et flexible possible pour l'entreposage centralisé • Adaptable à des évolutions de la politique nationale en matière de gestion des déchets
Récupérabilité des colis	• Installation réversible, conçue pour que les colis puissent en être retirés pendant toute la durée de son fonctionnement	• Sans objet pour les RN transmutés qui sont éliminés définitivement • Opérations sans difficulté pour les réacteurs et pour les installations supports	• Retrait rapidement inenvisageable des colis stockés	• Installation conçue pour garder les colis de façon temporaire, les colis peuvent en être retirés pendant toute la durée de son fonctionnement

2.2.8.5 Les impacts environnementaux des différents modes de gestion envisagés

Parmi les paramètres stratégiques à prendre en compte pour le choix d'un mode de gestion des déchets HA et MA-VL, il convient d'analyser en particulier ses impacts environnementaux et plus particulièrement :

- l'impact environnemental brut de leur construction, de leur fonctionnement et de leur démantèlement et fermeture, ainsi qu'à long terme ;
- le nombre de transports de colis de déchets radioactifs qu'ils nécessitent ;
- les conséquences sur la santé humaine et sur l'environnement en cas d'accident pendant le fonctionnement ;
- leur capacité à limiter les risques à long terme.

Les impacts environnementaux de la construction, du fonctionnement et du démantèlement ou de la fermeture des installations requises par les différents modes de gestion ne sont pas équivalents. Ils seraient très largement supérieurs dans le cadre de la transmutation qui implique de construire et d'exploiter un nouveau parc de réacteurs et toutes les installations industrielles en support. Les impacts environnementaux de la construction, du démantèlement et de la fermeture du stockage géologique et d'un entreposage centralisé implanté à proximité de la surface semblent comparables. Les forages très profonds ont le moins d'impact en termes de construction, de fonctionnement et de fermeture, en particulier s'ils peuvent être réalisés sur des sites nucléaires existants (le stockage géologique requis pour les seuls déchets MA-VL les plus volumineux de l'inventaire actuel aurait une taille beaucoup plus réduite que Cigéo). La particularité de la transmutation et de l'entreposage de longue durée est qu'à leurs propres impacts bruts, il faut ajouter ceux de la filière suivante (cf. Chapitre 2.2.8.2 du présent document). Le stockage géologique ou dans des forages très profonds ont quant à eux des impacts très faibles à non significatifs à long terme.

S'agissant des transports, la transmutation multiplie les besoins de déplacer les substances radioactives entre les installations actuelles, les nouvelles usines du cycle et les réacteurs de transmutation, puis vers les filières de gestion des nouveaux déchets produits. Inversement, le stockage en forages très profonds les réduit au maximum. En effet, dans l'hypothèse où ces forages sont localisés sur les sites actuels d'entreposage des colis HA, leurs transports sur la voie publique ne sont plus nécessaires. Dans un premier temps, le stockage géologique et l'entreposage de longue durée centralisé sont équivalents en termes de transport. Tous les colis sont transportés vers une unique installation. Toutefois, les futurs transports de déchets radioactifs, depuis l'entreposage de longue durée vers la filière suivante de gestion, viendront s'ajouter au nombre des transports initiaux.

S'agissant des conséquences potentielles sur la santé humaine et l'environnement en cas d'accident pendant leur fonctionnement, le stockage géologique et les forages très profonds sont équivalents. Elles restent modérées compte tenu du conditionnement des colis et de leur éloignement de la biosphère apportée par la profondeur. Pour un entreposage centralisé, elles sont potentiellement plus importantes. En effet, un entreposage de longue durée est plus sensible aux agressions externes compte tenu de sa plus faible profondeur et il implique un nombre plus important de manutentions pour expédier les colis de déchets vers la filière suivante, ce qui augmente les risques. Quant à la transmutation, elle fait appel à des réacteurs nucléaires qui sont susceptibles d'entraîner des conséquences radiologiques importantes sur de larges proportions de territoire en cas d'accident.

S'agissant des risques que font peser à long terme les différents modes de gestion, le stockage géologique et les forages très profonds sont équivalents (dans l'hypothèse où la démonstration de sûreté des forages peut être acquise – cf. Chapitre 2.2.8.3 du présent document). Ils sont passifs après fermeture et garantissent la sûreté sur de très longues échelles de temps, sans intervention humaine. Inversement, la sûreté à long terme de la transmutation et de l'entreposage de longue durée dépend de la mise en œuvre effective de la filière suivante. En cas de perte de contrôle, même momentané, de la société (guerre, abandon...), il n'est pas possible de garantir la sûreté à long terme. Si ces installations viennent à s'altérer gravement par manque de maintenance ou par agression externe, leur proximité avec la surface entraîne des conséquences potentiellement très importantes sur la santé et l'environnement.

Tableau 2-4 *Tableau comparatif des différents modes de gestion envisagés pour les déchets HA et MA-VL selon les critères : Impact environnemental brut de la construction - du fonctionnement et du démantèlement - à long terme/impact sur les transports de colis de déchets/sur la santé humaine/risques à long terme*

Non significatif | Modéré | Fort | Très fort

	Stockage géologique Création du projet de centre de stockage Cigéo	Transmutation Création d'un parc de réacteurs et de ses installations supports	Forages très profonds Création de forages sur les centres nucléaires existants	Entreposage de longue durée Création d'un entreposage centralisé enterré
Impact environnemental brut de la construction	Induit un impact brut fort pour la construction du centre de stockage Cigéo (la mise en place des mesures ERC aboutissant à un impact non significatif – à l'exception d'incidences temporaires locales lors des chantiers de surface qui peuvent être modérées)	Induit un impact brut très fort pour la construction : • d'un nouveau parc de réacteurs pour la transmutation • des installations supports • d'un stockage géologique pour les déchets de l'inventaire actuel non transmutés	Induit un impact brut modéré pour la construction : • des forages sur les sites nucléarisés • d'un centre de stockage géologique de taille réduite pour les déchets MA-VL volumineux de l'inventaire actuel	Induit un impact brut fort pour la construction de l'entreposage centralisé, comparable à celui du centre de stockage Cigéo
Impact environnemental brut du fonctionnement et du démantèlement	Induit un impact brut modéré pour le fonctionnement du centre de stockage géologique Induit un impact brut modéré pour son démantèlement et sa fermeture	Induit un impact brut fort pour le fonctionnement : • du parc de réacteurs de transmutation • des installations supports Induit un impact brut modéré pour le fonctionnement du centre de stockage géologique des déchets de l'inventaire actuel non transmutés	Induit un impact brut modéré pour le fonctionnement des forages et du centre de stockage géologique des colis MA-VL volumineux de l'inventaire actuel Induit un impact brut modéré pour leur démantèlement et leur fermeture	Induit un impact brut modéré pendant le fonctionnement de l'entreposage de longue durée Induit un impact brut modéré pour son démantèlement et sa fermeture
Impact environnemental brut à long terme	Induit un impact brut non significatif à long terme	Induit des impacts bruts potentiellement forts pour la construction, le fonctionnement et le démantèlement de la filière suivante	Induit un impact brut non significatif à long terme	Induirait des impacts bruts potentiellement forts pour la construction, le fonctionnement et le démantèlement de la filière suivante
Impact sur les transports de colis de déchets radioactifs	Nécessite des transports des colis de déchets depuis leurs entreposages actuels vers le centre de stockage géologique	Induit une multiplication des transports entre les sites de production, les futures usines du cycle, les nouveaux réacteurs et les futurs stockages	Limite au maximum les transports (si les forages profonds sont implantés sur les sites nucléaires d'entreposage des déchets HA)	Nécessite des transports des colis de déchets depuis leurs entreposages actuels vers l'entreposage centralisé Nécessite ultérieurement de désentreposer et de transporter les colis de déchets vers la filière suivante de gestion
Impact potentiel sur la santé humaine et l'environnement en cas d'accident pendant le fonctionnement	Induit un impact modéré sur la santé et le territoire en cas d'accident affectant l'installation de stockage	Induit un impact très fort sur la santé et le territoire en cas d'accident affectant un réacteur de transmutation	Induit un impact modéré sur la santé et le territoire en cas d'accident affectant les forages de stockage	Induit un impact fort sur la santé et le territoire en cas d'accident : • les colis sont en grand nombre proches de la surface • l'entreposage est plus sensible aux agressions externes qu'une installation profonde. Les agressions sont plus probables
Risques à long terme	Induit un risque très faible sur la santé et le territoire en raison de la sûreté passive après fermeture, y compris en cas d'intrusion involontaire	Dépend de la mise en œuvre de la filière suivante Induit des risques très importants en cas : • de non mise en œuvre de la filière suivante • de perte du contrôle institutionnel (non garanti au-delà de plusieurs siècles)	Induit un risque très faible sur la santé et le territoire en raison de la sûreté passive après fermeture, y compris en cas d'intrusion involontaire	Dépend de la mise en œuvre de la filière suivante Induit des risques très importants en cas : • de non mise en œuvre de la filière suivante • de perte du contrôle institutionnel (non garanti au-delà de plusieurs siècles)

2.2.8.6 Tableau de synthèse comparatif simplifié des modes de gestion envisagés pour les déchets HA et MA-VL

Non significatif/très favorable | Modéré/favorable | Fort/défavorable | Très fort/très défavorable

	Stockage géologique **Création du projet de centre de stockage Cigéo**	**Transmutation** **Création d'un parc de réacteurs et de ses installations supports**	**Forages très profonds** **Création de forages sur les centres nucléaires existants**	**Entreposage de longue durée** **Création d'un entreposage centralisé enterré**
Capacité à prendre en charge tous les déchets HA de l'inventaire actuel	• Stocke tous les déchets HA de l'inventaire actuel	• Transmute uniquement certains radionucléides/Ne supprime pas tous les radionucléides à vie longue/n'est pas envisageable pour les déchets HA de l'inventaire actuel	• Stocke tous les déchets HA de l'inventaire actuel	• Prend en charge tous les déchets tous les déchets HA de l'inventaire actuel de façon temporaire
Capacité à prendre en charge tous les déchets MA-VL de l'inventaire actuel	• Stocke tous les déchets MA-VL de l'inventaire actuel	• Ne transmute pas les déchets MA-VL • Nécessite de créer un centre de stockage géologique pour les déchets MA-VL de l'inventaire actuel	• Stocke les colis de déchets MA-VL peu volumineux • Nécessite de créer un centre de stockage géologique pour les déchets MA-VL volumineux de l'inventaire actuel	• Prend en charge tous les déchets tous les déchets MA-VL de l'inventaire actuel de façon temporaire
Production de déchets radioactifs pendant leur propre fonctionnement et démantèlement	• Produit très peu de nouveaux déchets radioactifs	• Produit des quantités importantes de nouveaux déchets (nouveaux combustibles irradiés, déchets HA et MA-VL,...)	• Produit très peu de nouveaux déchets radioactifs	• Produit très peu de nouveaux déchets radioactifs
Nécessité d'une filière suivante de gestion de déchets HA et MA-VL	• Ne nécessite pas de filière suivante de gestion des déchets	• Nécessite une filière suivante de gestion des déchets HA et MA-VL produits par le nouveau parc de transmutation et ses installations supports	• Ne nécessite pas de filière suivante de gestion des déchets	• Ne peut pas gérer les déchets de façon durable • Nécessite une filière suivante de gestion des déchets HA et MA-VL de l'inventaire actuel à l'issue de l'entreposage
Faisabilité technique par notre génération	• Faisabilité technique acquise	• Faisabilité technique non acquise	• Faisabilité non acquise	• Faisabilité technique accessible • Faisabilité de la filière suivante non acquise
Nombre d'installations nucléaires nouvelles à créer	• Une seule installation nucléaire à créer : le centre de stockage géologique lui-même	• Nombre élevé d'installations nucléaires à créer pour la transmutation/pour la gestion des déchets non transmutés de l'inventaire actuel/pour la filière suivante de gestion des nouveaux déchets de transmutation	• Deux installations nucléaires de stockage en forages et une installation de stockage géologique à créer	• Une installation nucléaire d'entreposage centralisé et toutes les installations nucléaires de la filière suivante à créer (en nombre plus ou moins élevé en fonction de la filière - stockage géologique, transmutation, forages...)
Progressivité de la construction, flexibilité et adaptabilité	• Développement progressif, flexible et adaptable du centre de stockage	• Développement progressif, flexible et adaptable des installations pour la transmutation (sous réserve de sa faisabilité technique)	• Développement progressif, flexible et adaptable des forages très profonds (sous réserve de sa faisabilité technique)	• Développement progressif, flexible et adaptable de l'entreposage centralisé
Récupérabilité des colis	• Installation réversible, conçue pour que les colis puissent en être retirés pendant toute la durée de son fonctionnement	• Sans objet pour les réacteurs et pour les installations supports	• Retrait rapidement inenvisageable des colis stockés	• Installation conçue pour garder les colis de façon temporaire, les colis peuvent en être retirés pendant toute la durée de son fonctionnement
Impact environnemental brut de la construction	• Impact brut fort (la mise en place des mesures ERC aboutit à un impact non significatif)	• Impact brut très fort pour la construction du nouveau parc de réacteurs de transmutation, des installations supports et des installations de gestion des déchets non transmutés de l'inventaire actuel	• Induit un impact brut modéré pour la construction des forages sur les sites nucléarisés et du stockage géologique des colis MA-VL volumineux de l'inventaire actuel	• Induit un impact brut fort pour la construction de l'entreposage centralisé, comparable à celui du centre de stockage Cigéo
Impact environnemental brut du fonctionnement et du démantèlement	• Impact brut modéré pour le fonctionnement, le démantèlement et la fermeture du centre de stockage géologique	• Impact brut fort pour le fonctionnement et le démantèlement du parc de réacteurs de transmutation et des installations supports • Impact brut modéré pour le fonctionnement des installations de gestion des déchets non transmutés de l'inventaire actuel	• Induit un impact brut modéré pour le fonctionnement, le démantèlement et la fermeture des forages très profonds et du centre de stockage géologique des colis MA-VL volumineux de l'inventaire actuel	• Impact brut modéré pendant le fonctionnement et pour le démantèlement de l'entreposage de longue durée
Impact environnemental brut à long terme	• Impact brut non significatif à long terme	• Impacts bruts potentiellement forts pour la construction, le fonctionnement et le démantèlement de la filière suivante	• Impact brut non significatif à long terme	• Impacts bruts potentiellement forts pour la construction, le fonctionnement et le démantèlement de la filière suivante
Impact sur les transports de colis de déchets radioactifs	• Transports des colis de déchets depuis leurs entreposages actuels vers le centre de stockage géologique	• Très nombreux transports entre les entreposages actuels, les futures usines de séparation, les nouveaux réacteurs de transmutation et les installations de la filière suivante	• Nombre réduit de transports sur la voie publique (si les forages profonds sont implantés sur les sites nucléaires d'entreposage des déchets HA)	• Transports des colis de déchets depuis leurs entreposages actuels vers l'entreposage centralisé • Transports des colis de déchets vers la filière suivante
Impact sur la santé humaine et l'environnement en cas d'accident pendant le fonctionnement	• Impact potentiel faible sur la santé et le territoire en cas d'accident	• Impact potentiel fort sur la santé et le territoire en cas d'accident affectant un réacteur de transmutation	• Impact potentiel faible sur la santé et le territoire en cas d'accident	• Impact potentiel fort sur la santé et le territoire en cas d'accident
Risques à long terme	• Risque très faible sur la santé et le territoire en raison de la sûreté passive après fermeture	• Dépend de la mise en œuvre de la filière suivante/Risques importants en cas de non mise en œuvre de la filière suivante et de perte du contrôle institutionnel (non garanti au-delà de plusieurs siècles)	• Risque très faible sur la santé et le territoire en raison de la sûreté passive après fermeture	• Dépend de la mise en œuvre de la filière suivante/Risques importants en cas de non mise en œuvre de la filière suivante et de perte du contrôle institutionnel (non garanti au-delà de plusieurs siècles))

2.2.8.7 Conclusions de la synthèse comparative des modes de gestion envisagés pour les déchets HA et MA-VL

Il ressort de l'analyse comparative des différents modes de gestions envisagés pour la gestion des déchets HA et MA-VL un avantage significatif pour le stockage géologique. Principalement en raison de sa capacité à gérer l'ensemble des déchets HA et MA-VL actuel, de sa sûreté et de son très faible impact à long terme.

Outre que sa faisabilité technique n'est pas garantie, la transmutation est une filière qui ne peut pas traiter l'ensemble de l'inventaire actuel et qui nécessite ainsi de créer des installations de gestion des déchets actuels non transmutés et des installations de gestion des nouveaux déchets créés. Dans son avis du 1er décembre 2020 (21), l'ASN rappelle que « *les perspectives de transmutation à une échelle industrielle des déchets déjà conditionnés de l'inventaire de référence de Cigéo ne sont pas crédibles* ». Elle augmente le nombre total d'installations nucléaires et les transports de substances radioactives. Elle impose un recours durable aux technologies nucléaires industrielles. Elle induit des impacts bruts très importants pour sa construction, son fonctionnement, son démantèlement. Elle est susceptible d'entraîner des conséquences radiologiques importantes en cas d'accidents pendant son fonctionnement et en cas de perte de contrôle institutionnel. Cette filière ne se comprend que dans une logique de poursuite sur très long terme de l'industrie nucléaire et en complément éventuel d'un stockage géologique s'il s'avérait nécessaire de réduire la nocivité de certains déchets.

Outre que ni sa faisabilité technique, ni sa démonstration de sûreté, ne sont acquises, le principal inconvénient du stockage dans des forages très profonds consiste en son incapacité à être réversible. Une fois que les colis y sont stockés, il devient rapidement impossible d'aller les en retirer.

L'entreposage de longue durée est une technologie accessible immédiatement. Toutefois, son principal handicap résulte du fait qu'il ne constitue pas un mode de gestion durable de déchets. Il implique la création d'une filière suivante de gestion durable dont rien n'indique qu'elle sera faisable, sûre ou économe en ressource et en impact environnemental. Elle ne réduit pas la nocivité des déchets et ne les met pas en sécurité définitive. Elle ne rend donc pas le même service collectif que les autres modes de gestion. L'entreposage de longue durée augmente le nombre de transports pour entreposer et désentreposer les colis de déchets. Son impact environnemental brut à très long terme est potentiellement important, autant que les risques qu'il fait peser sur la santé et le territoire en cas de perte de contrôle institutionnel.

2.3 Le choix français du stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien

2.3.1 Les étapes de la création du Laboratoire souterrain de recherche de l'Andra à Bure

2.3.1.1 Les départements candidats

En France, la localisation d'un laboratoire souterrain de recherche, en vue de l'étude de la faisabilité d'un centre de stockage géologique, est le résultat d'un travail initié par la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (29) dont le rapporteur fut le député Christian Bataille. Cette loi fut la première loi française relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs.

La démarche de localisation d'un laboratoire, menée par étapes successives, sous le contrôle du Parlement, a systématiquement considéré deux critères, abordés au même niveau d'importance :

- la compatibilité technique du sous-sol avec les exigences d'un stockage géologique et avec les objectifs de protection de l'homme et de l'environnement contre la dangerosité des déchets. Ce critère de compatibilité technique était évalué à partir des connaissances géologiques préexistantes.
- l'acceptation du projet par le territoire d'accueil. Seuls les départements ayant répondu à un appel au volontariat pour accueillir un laboratoire souterrain de recherche ont été retenus.

L'Andra a apporté des éléments complémentaires sur le processus de choix du stockage dans l'argile dans le mémoire en réponse à l'avis 2020-79 de l'Autorité environnementale, annexe 1 de la pièce 8 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo (réponse de l'Andra à la recommandation R15).

Ces critères et cette démarche par étapes tirait les leçons d'échecs antérieurs à 1991, imputables à la prise en compte du seul critère géologique.

» LES RECHERCHES DE SITES POUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE AVANT 1991

Le CEA a mené des études et recherches sur le stockage géologique depuis la fin des années 1970. L'Andra a été créée au sein du CEA en 1979, en premier lieu pour reprendre la gestion du Centre de stockage de la Manche. En 1982, le CEA a ainsi entrepris de collaborer avec des pays qui étudiaient déjà les qualités de diverses roches en vue d'un stockage souterrain (l'argile à Mol en Belgique, le sel à Asse, en Allemagne, le granite au Grimsel en Suisse).

En 1987, avec l'appui scientifique du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), quatre sites ont été sélectionnés pour leur géologie *a priori* favorable pour y installer des laboratoires souterrains et y étudier la faisabilité d'un stockage profond :

- dans les Deux Sèvres (granite) ;
- dans le Maine et Loire (schistes) ;
- dans l'Ain (sel) ;
- dans l'Aisne (argile).

Cette sélection s'est effectuée sur la base de critères géologiques, sans concertation préalable avec les territoires concernés. Des investigations géologiques de terrain depuis la surface ont été lancées dès que les sites sélectionnés ont été rendus publics le 18 mars 1987 (campagnes géophysiques entre 1987 et 1990, forage exploratoire).

Au bout de trois ans, les protestations apparues sur certains territoires ont amené le Premier ministre, Michel Rocard, à décréter un moratoire d'un an sur l'ensemble des sites.

Dans le cadre d'une mission de médiation confiée par l'État à Monsieur Bataille (39), trois zones, favorables géologiquement et situées dans des départements volontaires, ont été sélectionnées en 1993. Elles sont situées sur quatre départements :

- le Gard, la Haute-Marne et la Meuse pour des sites argileux (la Haute-Marne et la Meuse appartiennent à la même zone) ;
- la Vienne pour un site granitique[60].

Ces trois zones ont alors fait l'objet par l'Andra de reconnaissances géologiques préalables depuis la surface et d'une analyse des données disponibles pour mieux évaluer la compatibilité technique de leur sous-sol. Des études préliminaires d'avant-projets de laboratoires souterrains ont été engagées en vue de préparer leurs créations éventuelles.

[60] Durant la recherche de sites sous l'égide de Monsieur Christian Bataille mentionnée plus haut, aucun territoire comportant du sel gemme dans son sous-sol n'a manifesté d'intérêt pour accueillir potentiellement un laboratoire de recherche souterrain.

2.3.1.2 Le choix du gouvernement pour la Meuse/Haute-Marne

En 1996, l'Andra a déposé des demandes d'autorisation, d'installation et d'exploitation de laboratoires souterrains pour chacune des trois zones sélectionnées en 1993 (cf. Figure 2-24).



Figure 2-24 Dossier de demande d'autorisation d'installation et d'exploitation du Laboratoire de recherche souterrain de l'Est

En 1998, suite à l'instruction technique de ces demandes, les sites du Gard et de la Vienne ont été écartés par le gouvernement (40) :

- le site dans le Gard présentait une complexité technique résultant de son contexte géologique (une ancienne vallée étroite envahie par la mer dans le passé). De plus il posait certaines questions dues, d'une part à la sismicité de la zone (modérée, mais supérieure à celle de la Meuse et de la Haute-Marne), d'autre part à des incertitudes sur sa stabilité à long terme[61]. Par ailleurs, une opposition spécifique et locale au projet était apparue ;
- le site dans le granit de la Vienne laissait place à des interrogations scientifiques, notamment de la part de la Commission nationale d'évaluation (CNE), quant à ses qualités hydrogéologiques[62]. En effet, la formation granitique était située sous une couverture sédimentaire comportant des ressources en eau exploitées pour les besoins agricoles. Au final, la possibilité d'y réaliser un stockage sûr n'a pas fait l'objet d'un consensus scientifique. Une tentative de recherche d'un autre site granitique[63] a été lancée dans les années 2000. Compte tenu de l'inventaire des déchets radioactifs à stocker, la principale difficulté est de trouver, en France, un volume suffisamment important de granite sans défaut pour y implanter l'installation de stockage. Les recherches n'ont pas permis d'identifier un autre site répondant aux deux critères technique et politique (le volontariat). Les études sur le stockage dans le granite se sont néanmoins poursuivies en France jusqu'en 2005, en se fondant notamment sur les enseignements des laboratoires souterrains scandinaves (cf. Chapitre 2.2.6.5b) du présent document). L'Andra a produit en 2005, en plus du dossier de faisabilité d'un stockage dans l'argile, un dossier de faisabilité d'un stockage dans le granite (41).

L'AVIS DES SCIENTIFIQUES DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION (CNE) SUR LE GRANITE

Dans son rapport N° 2 (42), la CNE mentionne que le site de la Vienne présente des conditions hydrogéologiques tant au point de vue du granite lui-même que des aquifères sus-jacents, qui ne semblent pas favorables pour un éventuel stockage.

Dans son rapport N° 3 (43), la CNE considère qu'en l'absence de concept de stockage propre à ce site précisant notamment le rôle de la barrière géologique, les risques de circulation de fluides entre le granite et les aquifères exploités augmentent considérablement la difficulté de qualifier ce site particulier pour un éventuel stockage. De plus, elle note qu'il faudra implanter un stockage de dimension kilométrique dans un site, composé de blocs utilisables de dimension hectométrique, obligeant à des scellements étanches et pérennes au passage des failles séparant ces blocs. L'évaluation de ce site conduit à constater l'existence d'aspects négatifs paraissant aujourd'hui incontournables et qui amènent la Commission à aller au-delà des réserves qu'elle avait exprimées dans le rapport précédent.

La formation argileuse du Callovo-Oxfordien présente dans le sous-sol des départements de la Meuse et de la Haute-Marne a été retenue par le Gouvernement, en décembre 1998, pour y implanter un laboratoire souterrain en vue de l'étude de la faisabilité d'un centre de stockage géologique.

Sur le plan technique, cette couche argileuse présente de nombreuses propriétés favorables à l'implantation d'un stockage en couche géologique profonde :

- une géologie simple, régulière et continue du Bassin parisien qui facilite l'extrapolation des observations faites localement à de plus grands volumes ;
- un éloignement des grands mouvements tectoniques, notamment ceux des Alpes et des Pyrénées. La sismicité en Meuse et en Haute-Marne, comme celle du Bassin parisien en général, est très faible[64] ;
- une profondeur importante, d'environ 500 mètres, capable de protéger très durablement les déchets des perturbations de surface et des risques d'intrusion involontaire (cf. Chapitre 2.2.6.1 du présent document), tout en restant compatible avec la réalisation d'ouvrages de génie civil souterrain[65] ;
- une épaisseur d'au moins 120 mètres, qui, combinée avec son imperméabilité et ses propriétés de sorption[66] (cf. Chapitre 2.2.6.5c) du présent document), constitue une barrière particulièrement efficace à la migration des radionucléides et des substances toxiques contenus dans les déchets ;
- une structure locale continue, sans faille[67] ;
- un contexte hydrogéologique local favorable[68] ;
- une stabilité depuis son dépôt, il y a environ 160 millions d'années, permettant de bien appréhender l'évolution future du site à l'échelle du million d'années.

Sur le plan politique, la volonté des départements de la Meuse et de la Haute-Marne pour accueillir un laboratoire souterrain en vue de l'étude de la faisabilité d'un centre de stockage géologique a été confirmée. Les études ayant révélé que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien des deux départements était continue, ils ont fusionné leurs deux candidatures en une seule candidature commune, pour un laboratoire de recherche situé au sud du

61 Cette incertitude repose sur la perspective de la récurrence de la « crise de salinité messénienne » à l'échelle de quelques centaines de milliers d'années. Elle correspond à la fermeture et à l'assèchement possible de la mer Méditerranée provoquant une forte érosion du terrain par les cours d'eau de la vallée du Rhône.

62 Les fractures présentes dans ce milieu géologique et les interconnexions hydrauliques potentielles avec la couverture sédimentaire du massif laissaient redouter une migration plus rapide des radionucléides et des substances toxiques vers la biosphère.

63 Un site granitique « affleurant », c'est-à-dire sans couverture sédimentaire, était recherché.

64 Zonage sismique de la France, mai 2011, articles R. 563-1 à R. 563-8 du code de l'environnement, modifiés par le décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010 (44), et article D. 563-8-1 du code de l'environnement, créé par le décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 (45).

65 Avec la profondeur, les contraintes mécaniques (pression) augmentent. Elles rendent plus difficiles la conception, la construction et la maintenance des galeries et des ouvrages souterrains. Une profondeur de 500 m correspond à un bon équilibre entre l'éloignement de la surface et la difficulté de réalisation.

66 La sorption correspond à la rétention, souvent sélective, en surface et à l'intérieur d'un solide, des espèces présentes dans un gaz ou dans un liquide.

67 L'emplacement proposé pour la zone d'implantation du laboratoire est bloc de roche structuralement continu, non faillé, et suffisamment à l'écart de grandes structures géologiques.

68 Il n'y a pas de formations aquifères importantes au-dessus en en dessous de la couche du Callovo-Oxfordien. La différence de pression entre les formations aquifères (gradients verticaux) présentes est faible.

département de la Meuse, sur la commune de Bure, à proximité de sa frontière avec le département de la Haute-Marne.

En août 1999, l'Andra a obtenu l'autorisation de construire le Laboratoire souterrain dit de « Meuse/Haute-Marne (46) ».

Ce laboratoire souterrain de recherche n'a pas l'autorisation et n'est pas conçu pour la réception de déchets radioactifs.

La construction du Laboratoire souterrain de recherche a démarré en 2000. En 2004, le creusement des puits du Laboratoire souterrain a atteint la couche argileuse du Callovo-Oxfordien à étudier.

2.3.2 Les travaux dans le Laboratoire souterrain confirment le choix technique du Callovo-Oxfordien pour le stockage des déchets HA et MA-VL

Les études décrites dans le présent chapitre ne constituent pas l'exhaustivité des travaux réalisés, mais procurent un aperçu significatif des grands sujets d'investigation. Les recherches qui sont menées dans le Laboratoire souterrain sont complémentaires des travaux de caractérisation menés depuis la surface du site (cf. Chapitre 2.3.3 du présent document) et dans des laboratoires scientifiques classiques en surface.

2.3.2.1 La construction du Laboratoire souterrain

La construction du Laboratoire souterrain de recherche dit de « Meuse/Haute-Marne » a démarré en 2000 par les creusements successifs de deux puits verticaux. Le creusement de ces puits a permis, en complément des campagnes de reconnaissance depuis la surface (forages profonds, investigations par sismique réfraction, investigations de terrain – cf. Chapitre 2.3.3 du présent document), de vérifier que les couches géologiques traversées sont bien régulières et n'ont pas été altérées par des phénomènes naturels, par exemple des séismes ou des glaciations, ce qui confirme la qualité de la zone pour y implanter un stockage de déchets radioactifs HA et MA-VL.

Dès l'arrivée du premier puits d'accès au « toit » de la couche du Callovo-Oxfordien (sa partie supérieure), une petite galerie, dénommée la « niche », a été réalisée et l'Andra y a commencé des investigations.

» LES EXPÉRIMENTATIONS DANS LA NICHE A – 445 M DE PROFONDEUR

Les premières expérimentations mises en place, à partir de 2004, dans le Laboratoire souterrain dans la niche ont été axées sur la composition de l'eau porale contenue dans le Callovo-Oxfordien (expérimentation PAC), la perméabilité du Callovo-Oxfordien (expérimentation PEP) et les coefficients de diffusion et les porosités accessibles à la diffusion du Callovo-Oxfordien (expérimentation DIR) qui sont des données d'entrée nécessaires à l'évaluation de la migration des éléments radioactifs. Les résultats de l'ensemble de ces travaux ont démontré la capacité de confinement du Callovo-Oxfordien (très faible perméabilité, faibles coefficients de diffusion, forte capacité rétention pour l'essentiel des radionucléides).



Figure 2-25 La niche expérimentale à -445 m

Une fois le milieu de la couche du Callovo-Oxfordien atteint en 2004, un réseau de galeries a été progressivement déployé pour y mener des expérimentations au cœur de la roche. Le creusement et la réalisation des galeries, ainsi que leur suivi, peuvent constituer en tant que tel des expérimentations spécifiques, comme par exemple pour des essais de creusement par différentes techniques d'excavation (foration/tir à l'explosif, brise roche hydraulique (BRH), machine à attaque ponctuelle (MAP), tunnelier à attaque ponctuelle) associés à différents types de revêtement (revêtement souple, rigide, à boulons radiaux et béton projeté, voussoirs préfabriqués…). Le suivi de ces ouvrages dans le temps à travers notamment les expérimentations SDZ [69] ou ORS [70] permettent ainsi d'appréhender les interactions entre le terrain et les ouvrages. L'ensemble des galeries fait l'objet d'un suivi géotechnique (suivi des fronts, convergence, extensométrie). Certaines galeries font l'objet d'un suivi renforcé par des mesures dans des forages creusés à leur périphérie avant excavation et d'une caractérisation détaillée de la fracturation de la roche après excavation. En particulier, l'expérimentation OHZ [71] a permis de comparer le comportement hydromécanique et de la fracturation induite par différentes méthodes de construction. Ces galeries sont représentatives des ouvrages du centre de stockage Cigéo, notamment les alvéoles pour le stockage des déchets MA-VL (cf. Chapitre 4.3.5.5 du présent document).

Le réseau souterrain comprend aujourd'hui environ 1 800 mètres de galeries souterraines (cf. Figure 2-26), majoritairement au niveau principal du Laboratoire souterrain dans le Callovo-Oxfordien à -490 m.

[69] L'expérimentation SDZ (acronyme de Saturation/Désaturation de l'EDZ) vise à évaluer le comportement hydraulique et hydromécanique des argilites autour d'un ouvrage ventilé, plus particulièrement étudier l'effet de la désaturation sur la zone fracturée et celui de la resaturation après une phase de ventilation prolongée sur le comportement du Callovo-Oxfordien autour d'un ouvrage (effet de gonflement sur le soutènement).

[70] L'expérimentation ORS (acronyme d'Observation Revêtement Soutènement) vise à analyser l'interaction roche/structure dans le cas du creusement par méthode traditionnelle avec un décalage temporel entre la pause du soutènement et du revêtement et à étudier le comportement mécanique des différents couples soutènement/revêtement utilisés, tout en tenant compte des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés.

[71] L'expérimentation OHZ (acronyme de Observations Hydromécaniques de l'EDZ) vise à observer le comportement de la roche au pourtour immédiat des ouvrages souterrains (déformation, pression interstitielle, fracturation) et les interactions roche/soutènement dans l'ensemble du Laboratoire souterrain.

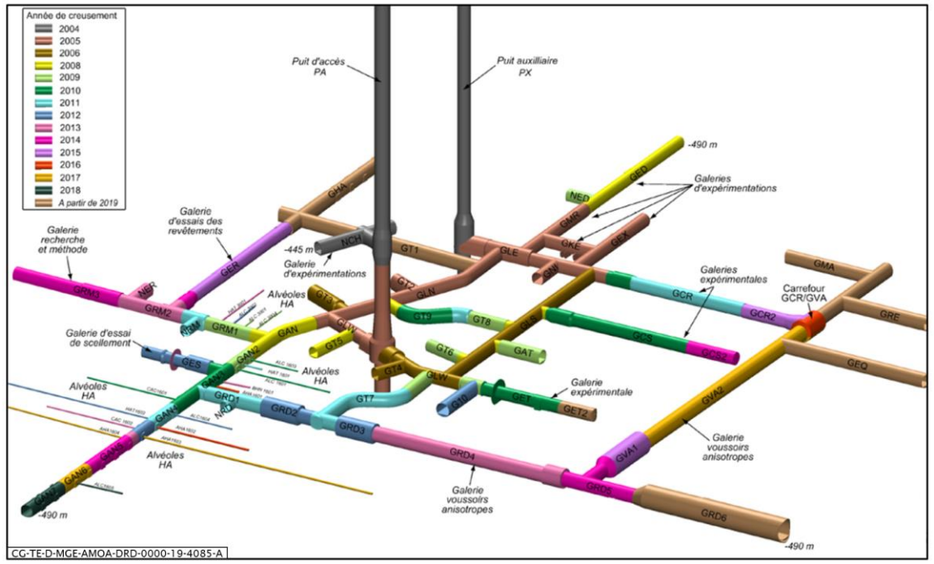


Figure 2-26 Déploiement du Laboratoire de recherche souterrain entre 2004 et 2019[72]

Le site du Laboratoire souterrain comprend également des installations en surface (locaux administratifs, ateliers, laboratoires et bâtiment d'accueil du public), sur une superficie d'environ 17 hectares.

ANALYSE DES ACCIDENTS SURVENUS DANS LE LABORATOIRE SOUTERRAIN

L'analyse approfondie des accidents survenus dans le Laboratoire souterrain est systématiquement conduite par l'Andra. Des retours d'expérience en sont tirés pour l'amélioration des chantiers actuels et capitalisés en vue des futurs chantiers de construction bien que les caractéristiques puissent être assez différentes. Dans tous les cas, les accidents/incidents survenus relèvent de problématiques de chantiers sans lien ni remise en cause des caractéristiques du milieu géologique et des fondamentaux du stockage.

Au-delà du présent mémoire, ces éléments seront dans l'étude de maîtrise des risques du dossier de demande d'autorisation de création qui conformément à l'article R. 593-19 présentera « *une analyse des retours d'expériences d'installations analogues* ».

A) Incidents et accidents survenus au sein du Laboratoire souterrain

L'analyse approfondie des accidents survenus au sein du Laboratoire souterrain est systématiquement conduite par l'Andra ou par des experts indépendants pour les accidents les plus graves.

Ainsi la première partie ci-après revient sur les conditions dans lesquelles se sont produits les accidents mortels et graves dans l'installation souterraine, depuis le début de sa construction (à savoir les deux accidents mortels de 2016 et 2002, et un accident ayant entrainé un long arrêt maladie pour un employé en 2010) et les retours d'expérience intégrés à la suite. La deuxième partie est consacrée à l'accidentologie en général, sa traçabilité et le processus d'amélioration continue associée.

- **Les accidents mortels et graves**
  - ✓ Accident mortel de 2016

    Le 26 janvier 2016, un accident de chantier s'est produit dans le niveau principal du Laboratoire souterrain, sis à 490 m de profondeur, au cours du creusement du carrefour de grand diamètre GCR2/GVA2, au front de la travée « T13 ». La galerie GVA2 n'étant pas encore creusée.

[72] Les galeries souterraines du Laboratoire sont principalement perpendiculaires entre elles, car elles sont orientées suivant les deux directions principales horizontales des contraintes mécaniques (pression) dans le Callovo-Oxfordien.

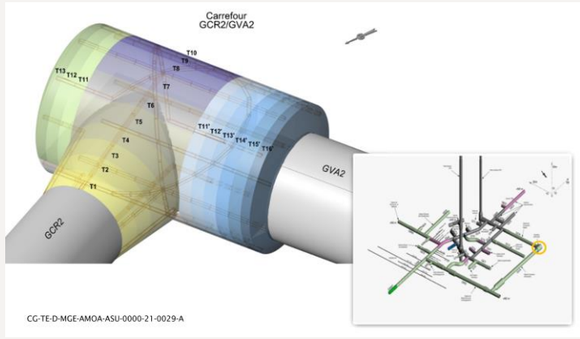


Figure 2-27 Carrefour GCR2/GVA2

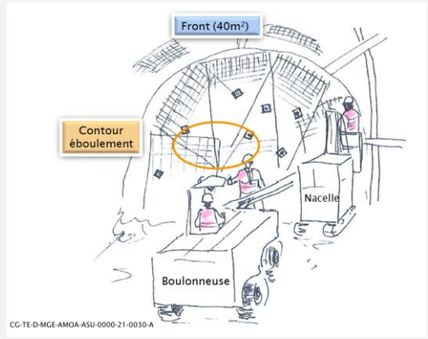


Figure 2-28 Schéma de boulonnage

Cet accident est intervenu alors que 3 employés de l'entreprise Eiffage effectuaient une opération de confortement des parois de la galerie à proximité immédiate du front de taille (T13). Cette étape du cycle de creusement/soutènement, mainte fois réalisée sans jamais causer d'incident, ni d'accident en dix ans, consiste à poser des boulons métalliques radiaux à l'aide d'une boulonneuse afin de maintenir la roche.

Environ 8 mètres cube de roche se sont soudainement décrochés du front de taille (d'une surface totale de 40 m²), pourtant sécurisé par 17 boulons de fibre de verre et du treillis soudé, et les débris de roche sont tombés sur un des intervenants. Malgré l'intervention très rapide des secours, celui-ci est décédé. Les deux autres employés ont été pris en charge et orientés vers les secours médicaux : l'un a été légèrement blessé à la main et l'autre choqué psychologiquement.

Suite à cet accident, une instruction judiciaire a été ouverte afin d'en déterminer les causes précises et les responsabilités associées. Cette procédure est toujours en cours auprès du tribunal correctionnel de Bar-Le-Duc.

L'Andra a souhaité néanmoins disposer d'une analyse technique lui permettant d'alimenter sa compréhension des causes de cet accident et d'en tirer les enseignements utiles à l'adaptation éventuelle des procédures et méthodes de réalisation des galeries et carrefours. À cet effet, son Directeur général a missionné un groupe d'experts indépendants de niveau international, ayant pour mission d'appuyer l'Andra dans la compréhension de l'accident et l'identification des mesures techniques susceptibles d'être prises. L'analyse menée par ce comité d'experts a permis de cerner une combinaison de facteurs à l'origine de l'accident :

- ✓ l'opérateur était placé à proximité du front, pas encore complètement soutenu. Il tournait le dos au front et la boulonneuse entravait la fuite de la victime ;
- ✓ une configuration de creusement inédite en L de l'intersection GCR2/GVA2, avec un enchainement des creusements dans deux directions différentes (σ_H et σ_h), générant localement une fracturation complexe au début du creusement de l'intersection GCR2/GVA et un report de charges avec ponctuellement une densité importante de fractures ;
- ✓ un soutènement du front par boulons non homogène en densité, associé à l'absence d'une couche de béton projeté pour assurer la stabilité du front durant la mise en œuvre du boulonnage radial, en regard des discontinuités à même de générer des blocs susceptibles de se désolidariser du massif d'argilite.

  Les experts en ont alors déduit des recommandations qui ont été transmises à la maîtrise d'œuvre et au prestataire de creusement. Ces derniers se sont appropriés ces recommandations et les ont déclinées dans leur propre process de maîtrise des risques, et ce, avant toute reprise du chantier :
- ✓ modification des modes opératoires :
  - la position des opérateurs et des engins a été revue, en particulier, lors du soutènement du front par boulonnage ;
  - aucun intervenant ne peut accéder à un front non complètement soutenu ;

- mise en place du béton projeté systématique et dans un délai plus rapide ;
- boulonnage radial effectué avec un front complètement soutenu ;
- mise à jour annuelle du PPSPS et actualisation des fiches de tâches.

✓ Multiplication des approches de dimensionnement par la maîtrise d'œuvre pour les calculs de stabilité

Les enseignements de ce type d'accident ont donc été tirés. Néanmoins, si un tel accident de chantier se produisait lors d'activités similaires dans le centre de stockage Cigéo (qui seront limitées de par l'utilisation privilégiée des tunneliers), cela n'aurait aucune conséquence sur les opérations de stockage des déchets radioactifs elles-mêmes. En effet, une des caractéristiques du projet est la gestion dissociée de l'activité de stockage des déchets (exploitation) et celle de creusement des alvéoles (travaux). Ces zones seront séparées physiquement et fonctionneront indépendamment afin d'assurer la sécurité du centre de stockage Cigéo.

Quant à la roche dans laquelle est située le Laboratoire (identique à celle sélectionnée pour l'implantation des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo), cette dernière a avant tout été choisie pour ses capacités de confinement des radionucléides. L'accident n'a révélé aucun comportement nouveau, ni anormal de la roche. Sa stabilité mécanique, suite à l'endommagement créé lors de son creusement, est assurée par un système de soutènement installé au fur et à mesure de l'avancement du front de creusement. Ce procédé est utilisé communément pour la réalisation des ouvrages souterrains.

- **Accident mortel de 2002**

Lors de la construction du Laboratoire, un accident mortel est survenu en mai 2002. Il était d'une nature différente : il s'est produit lors du creusement du puits principal (travaux en élévation) et non dans une galerie (travaux horizontaux). Un tube de ventilation, dont le dispositif de déploiement était consigné, a été manœuvré alors que son mode était inversé. Cela a eu pour conséquence le détachement du tube, qui est tombé sur un ouvrier qui travaillait sur le sol du puits. L'enquête a mis en cause les relations entre les opérations de creusement et la maintenance (toutes deux sous responsabilité du Groupement Fond Entreprises, dit « GFE », s'agissant d'un contrat de conception-réalisation). Le groupement a été retenu responsable judiciairement parlant et s'est vu condamné. Les autorités ont imposé la mise en place d'un plan de maintenance améliorée et la création d'une fonction (indépendante de la production) de responsable d'état machine.

En outre, pour répondre à la nécessité de sécuriser le chantier et permettre son redémarrage, l'Andra s'est dotée d'une équipe d'experts spécialisés en travaux miniers, originaire d'Afrique du Sud, dont le rôle a été précisément d'analyser, de contrôler et par là-même d'aider le groupement à assurer une meilleure prévention des risques. Là encore, les analyses ont été conduites et les retours d'expérience tirés pour améliorer la sécurité des chantiers sans lien avec les fondamentaux du stockage souterrain.

Autres accidents graves

Outre les deux accidents mortels cités ci-dessus, un seul autre accident grave, ayant entraîné un arrêt de travail de plus d'un an, s'est produit dans le Laboratoire souterrain en 20 ans.

Cet accident est survenu le 24 mars 2010 lors du creusement de la galerie GET à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle (MAP). Un bloc de roche, issu de l'excavation en cours, d'environ 1,50 x 0,20 x 0,20 m se positionne en travers du tablier de convoyage de la machine et empêche l'évacuation des déblais. Le pilote arrête l'engin et demande, comme prévu dans les procédures, l'intervention de l'opérateur de surveillance pour casser le bloc. La machine étant à l'arrêt, l'opérateur de surveillance se place devant l'engin et pose le pied sur le tablier du convoyeur afin de dégager le bloc. En parallèle, le pilote accueille au poste de pilotage un salarié en formation. Le pilote présente le pupitre de commande au pilote apprenti. Au cours de l'explication, l'apprenti pilote demande la fonction de l'un des boutons du pupitre en le montrant du doigt et appuie physiquement dessus. Le bouton active le démarrage du convoyeur. Le pied droit de l'opérateur de surveillance se retrouve coincé sur le tablier de convoyage, dans l'étoile gauche. Le pilote déclenche immédiatement l'arrêt d'urgence, néanmoins l'extrémité du pied droit de l'opérateur est gravement touchée.

Suite à cet accident, les modifications apportées ont porté sur deux axes :

✓ la machine :

- mise en place au niveau du poste de conduite d'un système vidéo avec quatre caméras ;
- mise en place d'un bouton de validation impliquant, pour le démarrage du convoyeur, d'appuyer simultanément sur ce bouton ainsi que sur le bouton de démarrage existant ;

Suite à cet accident, les modifications apportées ont porté sur deux axes :

✓ la machine :

- mise en place au niveau du poste de conduite d'un système vidéo avec quatre caméras ;
- mise en place d'un bouton de validation impliquant, pour le démarrage du convoyeur, d'appuyer simultanément sur ce bouton ainsi que sur le bouton de démarrage existant ;
- système de liaison opérateur/pilote par balises lumineuses rouge/verte : à chaque arrêt général de la machine, mise au rouge automatique de la balise. Pour repasser au vert, l'opérateur doit reconfirmer son action au boitier de commande ;

✓ la formation spécifique pour les opérateurs, pilotes, mécaniciens et chefs de poste :

- sécurités existantes et dispositifs complémentaires mis en place ;
- matériel à utiliser pour casser les blocs de marins.

B) Gestion de l'accidentologie et processus d'amélioration continu

Sur les neuf années du chantier de creusement n° 3 (2009-2018), ont été enregistrés 31 accidents sans arrêt et 16 accidents avec arrêt pour 2,3 millions d'heures travaillées par 250 entreprises différentes (dont 500 000 h pour Eiffage Génie Civil). Cela correspond à un taux de fréquence de 10. À titre de comparaison, la moyenne nationale du BTP est de 35,5 (référence 2018).

Chaque incident/accident est tracé par une fiche incident/accident. À la suite, un arbre des causes est systématiquement réalisé et découle la déclinaison d'un plan d'actions. Des ingénieurs sécurité sont chargés du bon suivi des plans d'actions. Ces fiches sont présentées à chaque réunion de direction du site (fréquence mensuelle). Une synthèse remonte également dans le tableau de bord de direction de l'agence. Enfin, les accidents et incidents sont présentés à chaque CISSCT[73] (fréquence trimestrielle) pour que l'ensemble des intervenants (entreprises extérieures comprises) bénéficie des analyses et intègre ce retour d'expérience.

Ainsi, l'enregistrement des accidents et des soins bénins permet d'établir une cartographie des risques (cf. Figure 2-29) et d'identifier les sièges principaux de lésions afin de mettre en place des actions de prévention spécifiques (cf. Figure 2-30).

[73] Collège Interentreprises de Sécurité, de Santé et des Conditions de Travail.

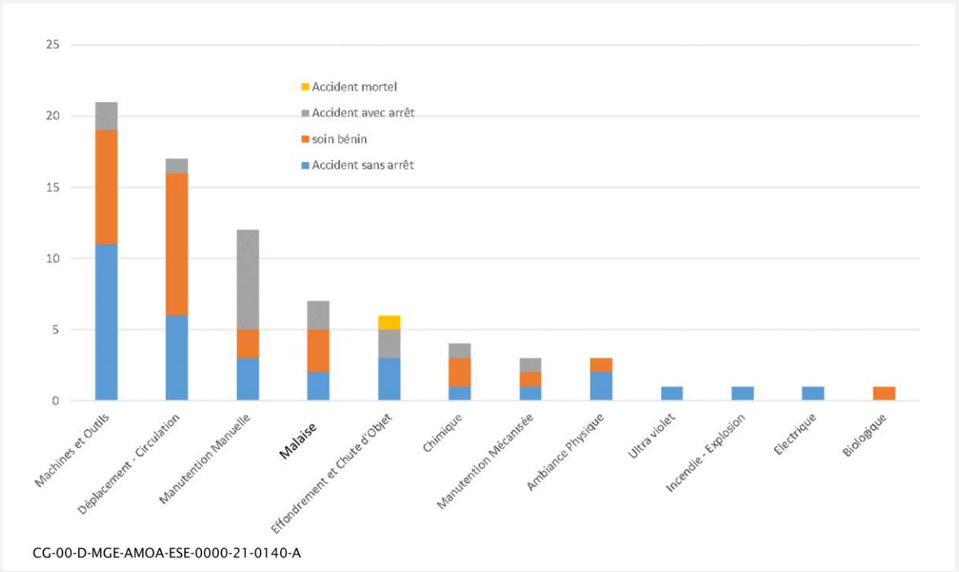


Figure 2-29 *Répartition des accidents et des soins bénins survenus sur le carreau de fonçage et le laboratoire souterrain par famille de dangers sur les neuf années du chantier 3*

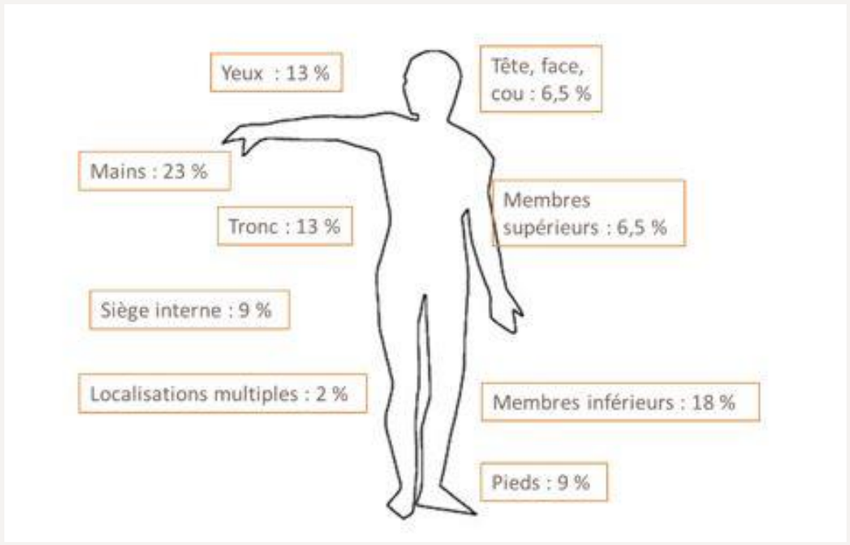


Figure 2-30 *Répartition des accidents et soins bénins survenus sur le carreau de fonçage et le laboratoire souterrain par famille de dangers sur les neuf années du chantier 3 par siège de lésions*

2.3.2.2 Les expérimentations conduites dans le Laboratoire souterrain

Les expérimentations conduites dans le Laboratoire souterrain visent à vérifier que le Callovo-Oxfordien présente bien les caractères favorables à un stockage de déchets radioactifs HA et MA-VL.

Des expérimentations dédiées à la caractérisation géologiques et hydrogéologiques telles que les expérimentations GIS[74], TER[75], TED[76], et PGZ[77] ont complété celles précédemment décrites et permettent de vérifier que les phénomènes physiques liés au stockage (dégagement de chaleur par les déchets, ventilation des galeries…) ne sont pas de nature à altérer des propriétés favorables naturelles du Callovo-Oxfordien vis-à-vis du confinement des radionucléides.

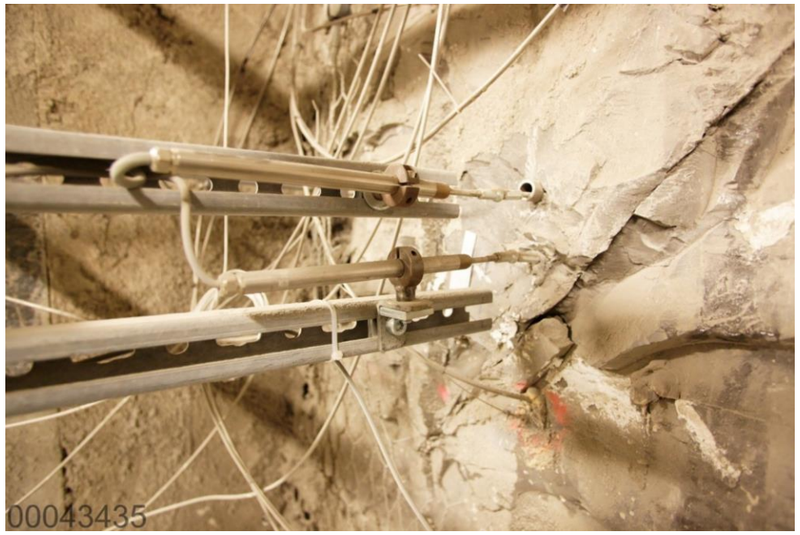


Figure 2-31 Expérimentation de mesures potentiométriques dans le Callovo-Oxfordien (expérimentation TER)

En complément des essais de creusement et de revêtement sur les galeries du Laboratoire (cf. Chapitre 2.3.2.1 du présent document), représentatif des alvéoles pour le stockage des déchets MA-VL, un important programme de démonstrateurs d'alvéoles pour le stockage des déchet HA a été développé au Laboratoire souterrain en suivant une logique progressive d'évaluation de leur faisabilité technologique. Huit alvéoles chemisées ont ainsi été réalisées successivement au Laboratoire souterrain entre 2009 et 2013 (expérimentations ALC, CAC et ERA) avec des longueurs augmentant progressivement. L'optimisation progressive de la machine de creusement a permis de démontrer dès 2012 la faisabilité d'un alvéole chemisé de 100 m de longueur (alvéole HAT1602) représentative des ouvrages prévus pour le centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 4.3.5.6 et 4.3.5.7 du présent document).

Les caractéristiques physico-chimiques du Callovo-Oxfordien ont été évaluées en particulier grâce à des tests en laboratoire de surface sur des échantillons prélevés au fond (perméabilité à l'eau, diffusion des éléments en solution, rétention des éléments chimique) et, dans le laboratoire, grâce à des essais de diffusion de solutions chimiques contenant des traceurs. Ces travaux démontrent que cette roche :

- présente une perméabilité extrêmement faible. Les circulations d'eau y sont très lentes. Une molécule d'eau n'y parcourt que quelques centimètres en 100 000 ans. les éléments radioactifs « mobiles » (cf. Chapitre 2.2.6.5c) du présent document) s'y déplacent très lentement par diffusion ;
- possède de fortes capacités de sorption[78] pour la majeure partie des éléments radioactifs, liées à la présence, en son sein, de minéraux argileux qui les fixent à leur surface, par exemple de la smectite[79] ;
- constitue un environnement chimique dans lequel la quasi-totalité des radionucléides est très peu soluble.

L'EXPÉRIMENTATION DIR - ZOOM SUR L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE TRANSFERT DE SOLUTÉS ET DE RADIONUCLÉIDES MOBILES DANS LE CALLOVO-OXFORDIEN

Afin de prédire et de modéliser le transfert des solutés et des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien, sept expérimentations de Diffusion de traceurs Inertes et Réactifs, regroupées sous l'acronyme « DIR », ont été conduites dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne à partir de 2005. Leur objectif était de vérifier, sur une distance pluricentimétrique, les comportements-types de solutés :

- de molécules d'eau tritiée (HTO), qui donne accès à la géométrie de la porosité,
- des traceurs anioniques (^{36}Cl, ^{125}I),
- des traceurs cationiques subissant l'effet de la rétention chimique (^{22}Na, ^{85}Sr, ^{134}Cs).

Les essais ont été menés à différentes profondeurs pour vérifier si les variations de la minéralogique ont un effet sur la diffusion :

- 3 essais au niveau de la galerie -445 m ;
- 3 essais au niveau de la galerie -490 m ;
- 1 essai à 542 m de profondeur dans un forage réalisé depuis la surface.

Le principe d'une expérimentation DIR consiste à mettre la roche en contact avec une eau comprenant un mélange des divers « traceurs » (à partir d'une chambre d'injection forée dans la roche et fermée par un obturateur). Après l'injection du mélange des traceurs dans la chambre, leur concentration dans la chambre est suivie sur plus de 1 000 jours. À la fin de cette phase, le volume de roche où les traceurs type ont diffusé (au maximum environ une vingtaine de centimètres) est prélevé par sur-carottage de grand diamètre et les profils de concentration des différents traceurs types dans la roche à partir de la paroi de la chambre d'injection sont alors mesurés suivant plusieurs directions en horizontale. Au total, 55 profils de concentration ont été acquis à partir des expérimentations dans le Laboratoire souterrain.

---

74 L'expérimentation GIS (acronyme de Géomécanique in situ) est une expérimentation qui vise à réduire les incertitudes sur les paramètres mécaniques mesurés sur échantillon en analysant les effets d'échelle.

75 L'expérimentation TER (acronyme de réponse de l'argilite à des sollicitations THErmiques) consiste en l'évaluation du comportement thermo-hydromécanique (THM) du Callovo-Oxfordien à partir d'un essai de chauffe réalisé avec un forage chauffant. TER est la première expérimentation thermique mise en place au Laboratoire Souterrain. Une sonde chauffante a été conçue pour imposer une température de 90 °C à la paroi d'un forage (représentatif de la température maximale attendue dans le Callovo-Oxfordien dans les conditions d'exploitation de Cigéo). Les caractéristiques thermo hydromécaniques sont déduites par analyse inverse de l'essai et comparées à celles mesurées en parallèle sur échantillons issus des forages de l'expérimentation.

76 L'expérimentation TED (acronyme d'expérimentation ThErmique Deux) consiste en l'évaluation du comportement THM du Callovo-Oxfordien à partir d'un essai de chauffe réalisé en forages (3 forages chauffants et forages périphériques pour l'instrumentation). L'expérimentation TED est la deuxième expérimentation thermique mise en place au Laboratoire souterrain (fait suite à l'expérimentation TER). Les caractéristiques thermo hydromécaniques sont déduites par analyse inverse de l'essai et comparées à celles mesurées sur échantillons prélevés dans les forages de l'expérimentation.

77 L'expérimentation PGZ (acronyme de Perturbation hydromécanique induite par les GaZ dans l'argilite saine) vise à étudier des processus de transfert de gaz dans le Callovo-Oxfordien. L'essai PGZ1 est focalisé sur l'amélioration de la compréhension des processus de transfert de gaz dans l'argilite saine, à savoir (i) déterminer les mécanismes contrôlant l'entrée du gaz et sa migration dans l'argilite saine et (ii) déterminer la pression d'entrée de gaz, les seuils de microfissuration et de fracturation dans l'argilite saine.

78 La sorption correspond à la rétention, souvent sélective, en surface et à l'intérieur d'un solide, des espèces présentes dans un gaz ou dans un liquide.

79 La smectite est une des quatre familles des argiles, les trois autres étant les kaolinites, les illites et les chlorites. La smectite possède des propriétés de gonflement et une forte capacité de rétention des radionucléides.

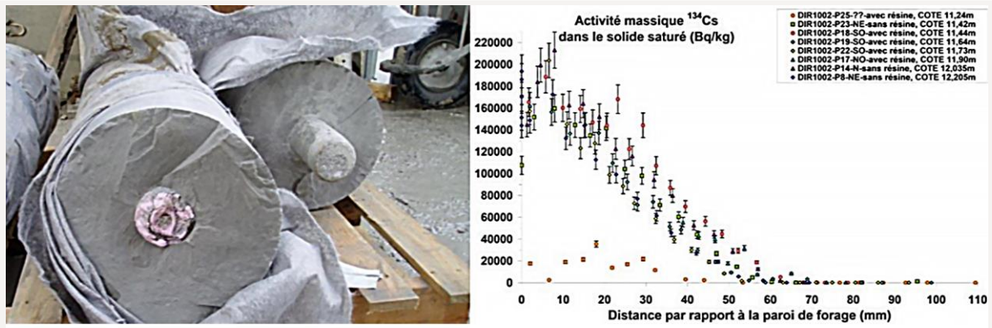


Figure 2-32 *Photographie d'une sur-carotte de roche en fin d'une expérience DIR (expérience DIR2002) et profils d'activités massiques en ^{134}Cs dans une sur-carotte de roche depuis la paroi de la chambre d'injection (expérience DIR1002)*

Les paramètres de diffusion dans le Callovo-Oxfordien sont déterminés de l'interprétation des mesures et des profils (coefficient de diffusion, porosité accessible à la diffusion, coefficients de rétention…). Les résultats des expériences DIR confirment les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien pour le confinement des radionucléides qui se traduit physiquement principalement par :

- la forte rétention des solutés cationiques ;
- les faibles valeurs de coefficients de diffusion, quelle que soit la forme ionique du soluté (anion, cations, neutre) ;
- l'absence d'anisotropie significative de la diffusion horizontale et verticale.

Des expérimentations ont été et sont encore réalisées pour étudier le comportement, au contact de la roche et dans les conditions d'un stockage, des différents matériaux utilisés pour la construction d'ouvrages souterrains ou pour le confinement de la radioactivité :

- le verre borosilicaté, utilisé comme matrice d'enrobage des résidus calcinés issus du retraitement du combustible irradié dans les colis de déchets HA a fait l'objet d'investigations pour confirmer sa performance en matière de confinement et étudier son altération dans le temps en conditions de stockage. Les différentes campagnes d'essais MVE[80] prennent en compte le couplage avec le milieu environnant (verre/fer/roche) et permettent de quantifier les vitesses d'altération des différents régimes transitoires qui se succèdent à long terme (vitesse initiale, chute de vitesse et vitesse résiduelle) en supports aux évaluations de sûreté ;
- l'acier, utilisé notamment pour les conteneurs des colis HA, a été exposé à un ensemble de conditions d'environnement physicochimiques prévisibles dans le temps[81]. Différentes campagnes d'essais (essais MCO[82]) montrent que leurs vitesses de corrosion sont faibles à très faibles (quelques microns par an) dans les conditions du stockage. Ces résultats ont permis de sélectionner les nuances d'acier et de dimensionner les épaisseurs des conteneurs des colis de déchets HA et du chemisage des alvéoles HA (cf. Chapitres 4.3.2, 4.3.5.6 et 4.3.5.7 du présent document) ;
- les bétons, largement utilisés dans un stockage, plus particulièrement pour le revêtement/soutènement des galeries et pour les conteneurs de stockage des déchets MA-VL, font l'objet d'essais pour évaluer leur durabilité. Ces essais montrent que leur dégradation chimique est très lente. Leur dégradation mécanique intervient après plusieurs centaines à milliers d'années et leur dégradation chimique après plusieurs centaines de milliers d'années. L'effet chimique du ciment sur la roche se limite à quelques décimètres au maximum.

Enfin, de nombreux tests de méthodes de creusement (cf. Figure 2-33) et de procédés de revêtements/soutènement des galeries, de dispositifs de fermeture d'un stockage (scellement) ont été menés dans le Laboratoire souterrain. L'observation du comportement mécanique des ouvrages (certains depuis 15 ans) a permis de confirmer leur bonne tenue mécanique et la faisabilité technique de leur construction, leur bonne tenue mécanique dans le temps et la capacité de fermeture d'un stockage dans le Callovo-Oxfordien.

Enfin, les travaux dans le Laboratoire souterrain ont porté sur l'étude des ouvrages de fermeture selon trois axes interdépendants : la faisabilité technologique, le comportement hydromécanique et hydraulique en grand des scellements de galeries et le comportement hydraulique-gaz des matériaux à base de bentonite in situ, en particulier aux interfaces avec la roche :

- concernant la faisabilité technologique, les premiers essais ont porté sur le concept de coupure hydraulique de la zone endommagée, en support au dossier 2005 (expérimentations KEY[83], TSS[84]), en termes à la fois de faisabilité de la saignée et de comportement. L'expérimentation SET (Essai de remplissage de saignée) réalisé en surface sur une maquette à l'échelle ½ de Cigéo a aussi permis de vérifier la capacité à remplir avec de la bentonite, de façon continue, une saignée périphérique (taillée dans le Callovo-Oxfordien et faisant office de coupure hydraulique de l'EDZ), à l'aide d'un robot télé-opéré. La faisabilité de noyau de scellement de galerie a été mené en 2012, par l'essai NSC[85] à l'échelle d'une galerie de 4 m de diamètre ; en parallèle un démonstrateur de faisabilité à l'échelle d'une galerie de 7 m de diamètre avec des hors profils a été réalisé au jour (expérimentation FSS[86]) ;
- concernant Le comportement hydromécanique et hydraulique/gaz en grand des scellements de galeries, les travaux ont reposé sur l'essai NSC et un essai de resaturation au jour à échelle métrique (REM). Enfin, différents essais en forages ont été menés afin d'évaluer le comportement hydraulique et hydraulique gaz des bentonites et de leur interface avec la roche (expérimentation PGZ2[87]).

---

80 Les expérimentations MVE (acronyme de Matériaux VErre) vise à évaluer la vitesse d'altération des déchets vitrifiés HA en présence de matériaux d'environnement. Le principe de l'expérimentation consiste en un forage descendant permettant de tester le comportement in situ de poudre de verre au contact de l'argilite.

81 Conditions chaudes et humides contenant de l'oxygène et conditions anoxiques (absence d'oxygène) saturées en eau et à la température naturelle du sous-sol.

82 L'expérimentation MCO (acronyme de Matériaux COrrosion) vise à préciser le rôle des conditions d'environnement (saturées, atmosphère humide) ainsi que des matériaux d'environnement (Callovo-Oxfordien, eau porale du Callovo-Oxfordien, matériau de remplissage) sur la corrosion. Le principe de l'expérimentation consiste en la mise en place de porte-échantillons contenant des coupons d'aciers dans des cannes extractibles qui sont ensuite disposées dans un forage vertical descendant.

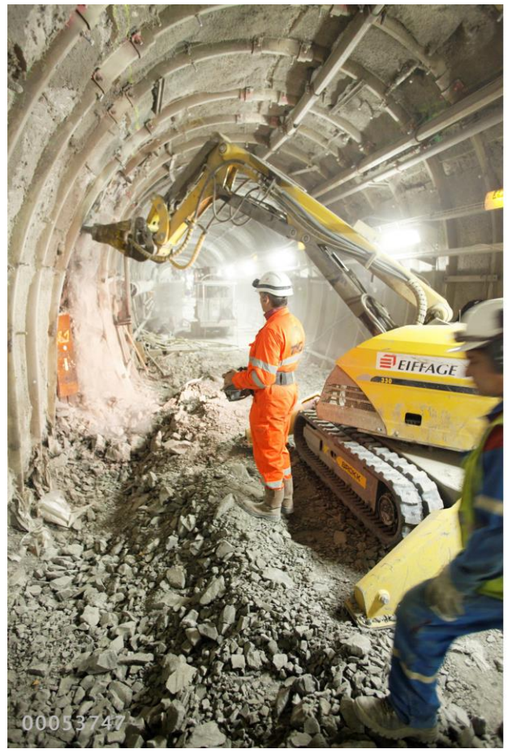
83 L'expérimentation Key (anglicisme signifiant « clé » en français et représentant un dispositif de saignée de faible épaisseur au niveau des scellements) vise à évaluer l'efficacité des saignées radiales vis-à-vis d'un court-circuit hydraulique éventuel provoqué par la connexion de fractures parallèles à la direction de la galerie d'essai et à vérifier l'efficacité hydraulique de l'application d'une pression de gonflement dans la saignée. Le principe de l'expérimentation consiste en la réalisation de saignées radiales de faible épaisseur (au radier d'une galerie) pour vérifier le fonctionnement hydromécanique des saignées.

84 L'expérimentation TSS (acronyme de Test Scellement et Saignées) vise à réaliser une saignée sur tout le pourtour d'une galerie (0,30 m d'épaisseur et 2,50 m de profondeur) in situ (dans le Callovo-Oxfordien) et suivre sa géométrie et sa stabilité pour démontrer la constructibilité de ce type d'ouvrage et étudier son évolution dans le temps. Le principe de l'expérimentation consiste à réaliser une saignée radiale de faible épaisseur (environ 30 cm) sur tout le pourtour d'une galerie et suivre son comportement hydro-mécanique au cours du temps.

85 L'expérimentation NSC (acronyme de Noyau de Scellement) vise à évaluer la performance hydraulique globale d'un scellement de galerie : cela comprend donc le scellement lui-même mais aussi la zone d'interface avec la roche et la zone endommagée en champ proche autour du scellement. Le principe de l'expérimentation NSC consiste à réaliser un scellement à l'échelle d'une galerie du Laboratoire souterrain (5 m de diamètre) avec un noyau de scellement (matériau à base d'argile gonflante) entre deux massifs d'appui en béton. Le noyau de scellement est hydraté artificiellement à l'aide de membranes d'hydratation puis une fois la saturation atteinte un test de perméabilité globale est réalisé entre l'amont et l'aval du scellement pour estimer la perméabilité équivalente (« en grand ») du scellement.

86 L'expérimentation FSS (acronyme de Full Scale Sealing – Scellement échelle 1 en français) vis à démontrer la constructibilité industrielle, à l'aide d'une maquette de taille pluri-décamétrique, d'un scellement pleine échelle représentatif d'un ouvrage de fermeture horizontal de Cigéo (constitué d'un noyau d'argile gonflante et de massifs d'appui en béton bas pH). Le principe de l'expérimentation est la construction un ouvrage (tunnel en béton) au gabarit d'une galerie représentative d'un scellement de Cigéo (environ 10 m de diamètre) et d'y installer les éléments constitutifs de l'objet à réaliser (composé d'un noyau d'argile gonflante positionné entre deux massifs d'appui en béton), en respectant le schéma conceptuel d'un ouvrage de fermeture horizontal du stockage (Figure 1). L'essai a été réalisé dans le cadre du projet européen DOPAS « Full-Scale Demonstration Of Plugs And Seals ».

87 L'expérimentation PGZ (acronyme de Perturbation HM induite par les gaz dans les noyaux de scellement) vise à Etudier des processus de transfert de gaz dans les ouvrages de fermeture. Le principe de l'expérimentation consiste à mettre en place différents noyaux de bentonite (à base d'éléments compactés ou de pellets) dans des forages de 101 mm de diamètre et de suivre leur resaturation en présence ou non de gaz, afin d'étudier l'effet du gaz sur la resaturation. Après resaturation, le noyau est soumis sur une face à une pression de gaz pour étudier le comportement au gaz du noyau et de l'interface roche/noyau. La comparaison des différents essais permet d'identifier les processus au regard du type de noyau de scellement.





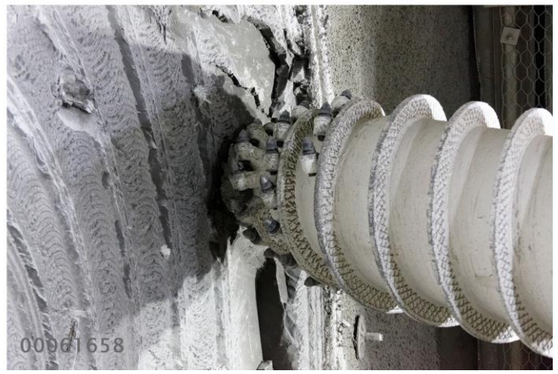


Figure 2-33 *Différentes techniques de creusement testées au Laboratoire souterrain : le brise roche hydraulique, la machine à attaque ponctuelle et le tunnelier à attaque ponctuelle*

Les études menées depuis presque 20 ans dans le Laboratoire souterrain confirment que les propriétés du Callovo-Oxfordien, associées à son épaisseur d'au moins 120 mètres, constituent un piège pour l'essentiel des substances radioactives et toxiques (confinement et transfert très lent sur plusieurs centaines de milliers d'années). Par ailleurs, les caractéristiques mécaniques de cette roche sont compatibles avec la construction et le bon fonctionnement d'un stockage en exploitation et à long terme.

2.3.2.3 Le phasage des études du Laboratoire souterrain

Suite à la création du Laboratoire souterrain en 2000, les premières années d'études menées ont visé à démontrer la faisabilité de principe d'un stockage de déchets HA et MA-VL dans le Callovo-Oxfordien.

En 2005, l'Andra a remis à l'État un dossier scientifique, dénommé « Dossier 2005 HA-VL Argile » (47), présentant les 15 ans d'investigations géologiques et de recherches menées, notamment dans le Laboratoire souterrain, en réponse à la loi de 1991 (29) (cf. Chapitres 2.3.1.1 et 2.3.2 du présent document).

Ce rapport a été expertisé par la commission nationale d'évaluation (CNE) mise en place par le Parlement et par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Il a été instruit par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et a fait l'objet d'un avis du groupe permanent d'experts en charge des déchets radioactifs.

À la demande du gouvernement, les travaux de l'Andra ont fait l'objet d'une revue par un groupe international d'experts. Ces évaluations ont confirmé les résultats de l'Andra sur la faisabilité technique et la sûreté d'un stockage profond de déchets HA et MA-VL dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien, dans une zone de 250 km² dite zone de « transposition ».

À l'issue de l'examen des travaux de l'Andra et d'un débat public relatif à la gestion des déchets mené en 2005 (cf. Chapitre 2.5 du présent document), le Gouvernement et le Parlement ont décidé par voie législative (5) de poursuivre les études et recherches sur le stockage géologique avec pour finalité la création d'un centre de stockage de ces déchets (cf. Chapitre 2.3.4 du présent document).

Depuis 2006, les expériences continuent. Au-delà de la faisabilité acquise d'un stockage, l'objectif s'est progressivement orienté vers le support à la conception d'un centre industriel de stockage géologique. Elles ont notamment visé à :

- compléter les connaissances du Callovo-Oxfordien en support à la conception, au dimensionnement des ouvrages et aux analyses de sûreté ;
- soutenir les études d'ingénierie et préparer les étapes d'autorisation à venir d'un centre de stockage, notamment la demande d'autorisation de création ;
- étudier les technologies de creusement et de revêtement des ouvrages de stockage, en se concentrant de plus en plus précisément sur les solutions industrielles. À ce titre, l'Andra teste plusieurs méthodes de creusement et de revêtement de galeries ou d'alvéoles dans le Laboratoire souterrain.

Depuis 2009, les activités scientifiques et technologiques menées au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne se déclinent autour d'un ensemble d'essais de réalisation menés à l'échelle la plus proche possible de celle des ouvrages industriels d'un centre de stockage (échelle 1) et dans des conditions de plus en plus représentatives des techniques industrielles. Elles couvrent les activités de creusement, de réalisation de génie civil (revêtement, soutènement, radier…), de surveillance (stabilité des ouvrages, vieillissement), de fermeture (scellement) ainsi que la préparation de pistes de développement technologiques pour d'éventuelles optimisations. Les expériences menées ont donc une portée progressivement de plus en plus proche de la réalité industrielle :

- de « grands ouvrages », du type des galeries et des alvéoles MA-VL (cf. Chapitre 4.3.2 et 4.3.5.5 du présent document), ont été réalisés jusqu'à atteindre des dimensions représentatives de celles du centre de stockage ;
  - ✓ l'utilisation du brise-roche hydraulique a permis de creuser des galeries d'un diamètre maximal de 5 m. La machine à attaque ponctuelle a permis de creuser des galeries jusqu'à environ 8 m de diamètre [88].
- plusieurs types de revêtement/soutènement ont été mis en œuvre et testés offrant un éventail de choix pour la construction du centre de stockage :
  - ✓ parmi les revêtements/soutènement testés, on peut citer le béton projeté, le béton coulé en place sous forme de soutènement souple composé de cales compressibles, le soutènement rigide bloquant la convergence de la roche et les voussoirs en béton du type de ceux posés par tunnelier [89] ;
- des maquettes d'alvéoles pour les colis HA (cf. Chapitres 4.3.2, 4.3.5.6 et 4.3.5.7 du présent document), représentatives de celles du centre de stockage ont été réalisées avec succès :
  - ✓ ces alvéoles HA sont des tunnels borgnes (non débouchants), légèrement en pente, de diamètre utile d'environ 60 cm et d'une longueur d'environ 80 m (dans le quartier pilote HA) ou de 150 m (dans les quartiers de stockage HA). Les essais menés ont permis de creuser des maquettes d'alvéoles représentatives, de mettre en place leur chemisage métallique et le matériau cimentaire entre la roche et ce chemisage. Leur comportement thermo-hydromécanique (chargement et déformation mécaniques) a été étudié confirmant leur bonne tenue sur une durée de fonctionnement séculaire, compatible avec la mise en place et le retrait éventuel des colis de stockage HA.
- des maquettes d'ouvrages de scellement ont été construits démontrant la possibilité de fermer un centre de stockage :
  - ✓ le creusement d'une galerie endommage la roche en créant une zone fissurée à son pourtour immédiat. Lors de la fermeture de l'installation, il faut éviter que ces fissures favorisent localement une circulation rapide de l'eau suivant une voie de migration préférentielle qui empêche les scellements et la roche de jouer leur rôle de confinement des radionucléides. Pour montrer que cela est possible industriellement, différentes solutions techniques ont été testées. Des essais dits de « coupure hydraulique » ont été menés, consistant à purger la zone fissurée et à la remplir avec de l'argile gonflante. Une expérimentation de

[88] Par exemple, le brise-roche hydraulique qui attaque la roche comme un marteau piqueur ou la machine à attaque ponctuelle qui rogne la roche en tournant (sorte de fraise munie de picots).

[89] Dans le cas d'un tunnelier, le soutènement est composé d'éléments préfabriqués en béton armé disposés en anneaux successifs, dénommés « voussoirs », mis en place au fur et à mesure du creusement de la galerie. Différents types de voussoirs ont été testés dans le laboratoire souterrain, y compris des voussoirs compressibles.

performance hydraulique et hydromécanique d'un scellement à base d'argile gonflante de dimension représentative ; sans coupure hydraulique, de 4 m de diamètre a été menée de façon concluante dans le laboratoire souterrain. En complément, un essai de scellement d'une galerie de 7 m de diamètre a été réalisé avec succès en surface.

Ce programme d'essai technologique démontre, d'une part la capacité de réalisation d'ouvrages souterrain jusqu'à des diamètres proches de ceux envisagés dans le centre de stockage Cigéo, d'autre part des comportements mécaniques similaires caractérisés par une bonne tenue mécanique des ouvrages compatible avec la durée séculaire de la période de fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

Enfin, de nombreux travaux, comme par exemple les expérimentations TSF [90] ou AHA [91], concernent le développement de l'instrumentation adaptée à la surveillance d'un stockage. Des milliers de capteurs (température, humidité, déformation, contrainte mécanique, teneur en gaz, composition chimique...) sont opérationnels dans le Laboratoire et ce depuis le début de sa construction. Ils permettent de suivre les différentes expérimentations et de développer des méthodes d'acquisition de données plus performantes. À ce jour, plus de deux milliards de données ont été collectées à l'aide d'un système informatique de gestion de données. Les capteurs et les systèmes de transmission de données (utilisant par exemple des fibres optiques) sont ainsi qualifiés et testés en termes de précision et de durabilité.

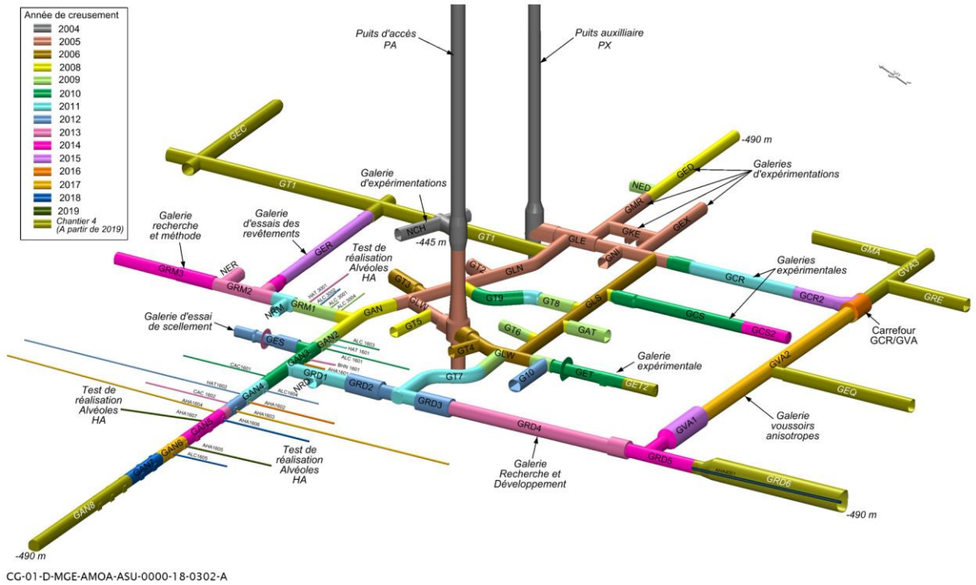


Figure 2-34 *Les expérimentations menées dans le laboratoire souterrain de recherche depuis 2004*

Des dates clés du fonctionnement du Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne sont présentées dans le tableau 2-5.

Tableau 2-5 *Le Laboratoire de recherche souterrain – des dates clés*

Le Laboratoire souterrain en quelques dates clés	
Décembre 1998	Décision du Gouvernement de retenir le site de Meuse/Haute-Marne pour accueillir un laboratoire souterrain de recherche.
Août 1999	Décret d'autorisation d'installation et d'exploitation (DAIE) du Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne
Aout 2000	Début du creusement du puits principal d'accès (PA) du Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne.
Novembre 2000	Début du creusement du puits auxiliaire (PX) du Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne.
Octobre 2004	Arrivée du puits auxiliaire (PX) à -490 mètres (centre de la couche du Callovo-Oxfordien sur le site).
Novembre 2004	Mise en service de la galerie expérimentale à -445 mètres (au toit du Callovo-Oxfordien) à partir du puits auxiliaire (PA).
Depuis février 2005	Creusement, déploiement et exploitation des galeries expérimentales à -490 m.
2009	Premier creusement test d'un d'alvéole HA (jusqu'à 20 m de longueur).
Avril 2011	Kilomètre franchi pour la longueur cumulée de galeries du Laboratoire souterrain.
Décembre 2011	Autorisation d'exploitation du Laboratoire souterrain jusqu'au 31 décembre 2030 par décret du 22 décembre 2011(48) (2e DAIE).
Novembre 2013	Creusement sur 75 m d'une 1ère galerie avec le tunnelier à machine à attaque ponctuelle sous jupe et pose d'un revêtement type voussoirs en béton armé.
Avril 2014	100 000e visiteur au Centre de Meuse/Haute-Marne.
Novembre 2016	Réalisation du premier démonstrateur d'alvéole HA : creusement, chemisage métallique (tube d'acier introduit dans l'alvéole) et injection d'un matériau de remplissage dans l'espace qui sépare la roche et l'extérieur du chemisage.
Novembre 2017	Franchissement du cap des 100 mètres de longueur avec un démonstrateur d'alvéole HA ; Réalisation sur 120 m de la seconde galerie avec un tunnelier à machine à attaque ponctuelle sous jupe et pose d'un revêtement en voussoirs en béton armé suivant différents tronçons avec différents types de voussoirs dont des voussoirs compressibles.
Décembre 2017	1 000e forages dans les galeries du Laboratoire souterrain.

L'Andra est autorisée à exploiter le Laboratoire souterrain jusqu'en 2030 (DAIE, 2011 (49)).

[90] L'expérimentation TSF (acronyme de Transmission Sans Fils) vise à Démontrer la faisabilité d'une transmission sans fil au travers la roche. Le principe de l'expérimentation consiste à réaliser le suivi de mesures des propriétés d'un bouchon de bentonite dans un forage de grand diamètre situé en galerie GEX au moyen d'un système de mesure sans fil. L'expérimentation vise à démontrer la faisabilité d'une transmission sans fil au travers de la roche (Callovo-Oxfordien et bentonite des scellements) afin de transmettre les mesures nécessaires à la surveillance des futurs alvéoles de stockage de Cigéo.

[91] L'expérimentation AHA (acronyme d'Auscultation Alvéoles HA) en autre à Vérifier la faisabilité de mise en œuvre de dispositifs de mesure envisagés pour la surveillance incluant la recette d'ouvrage.

2.3.3 Les investigations depuis la surface confirment le choix technique du Callovo-Oxfordien pour le stockage des déchets HA et MA-VL

Les investigations géologiques menées depuis la surface sur le territoire de la Meuse et de la Haute-Marne sont complémentaires à celles menées dans le Laboratoire souterrain.

Depuis 1991, des campagnes de forages menées depuis la surface ont permis :

- de prélever des échantillons de roche pour leur analyse scientifique ;
- de caractériser l'ensemble du milieu géologique, y compris les couches au-dessus et en-dessous de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien ;
- de comprendre le contexte hydrogéologique et de développer un modèle numérique des écoulements des eaux souterraines ;
- de démontrer l'absence de ressources souterraines exceptionnelles sur la zone.

Des campagnes de reconnaissances sismiques 2D puis 3D ont également été menées depuis la surface. Elles ont permis de finaliser un modèle géologique du secteur à une échelle de plusieurs centaines de km² autour du Laboratoire souterrain. Ces campagnes ont également permis de confirmer le faible pendage de la couche du Callovo-Oxfordien, sa continuité et sa régularité (absence de zone affaissée et de failles), sur toute cette zone.

Ces investigations géologiques menées depuis la surface ont progressivement permis d'identifier une zone de 250 km² environ, située autour du Laboratoire souterrain, dans laquelle les résultats obtenus dans ce dernier pouvaient être transposés. Cette zone a été dénommée « zone de transposition » (ZT). Elle est située à l'écart des zones de failles géologiques identifiées (fossé de Gondrecourt, faille de la Marne…). Ensuite, à partir de 2009, les investigations géologiques ont permis de caractériser plus finement une zone plus restreinte, dénommée « zone d'intérêt pour la recherche approfondie » (ZIRA) d'environ 30 km² (cf. Chapitre 2.6.1 du présent document). L'Andra dispose ainsi, sur une zone permettant l'implantation d'un stockage géologique, d'une représentation très fine des différents éléments constitutifs des unités géologiques, notamment en termes de géométrie, de structuration en unités géologiques et de distribution spatiale verticale et latérale des propriétés physico-chimiques.



Figure 2-35 *Forage de suivi géologique autour du Laboratoire Souterrain (Démanges aux Eaux)*

La méthode progressive de localisation d'un éventuel stockage au sein de la couche du Callovo-Oxfordien, qui résulte d'arbitrages techniques et socio-économiques, est présentée aux chapitres 2.4 à 2.6 du présent document.

La justification des grands choix d'implantation et de conception du centre de stockage sont présentés aux chapitres 2.6 et 2.7 du présent document. La description de ses installations fait l'objet de son chapitre 4.

LES ÉTUDES DU SOUS-SOL MENÉES DEPUIS LA SURFACE

Les travaux scientifiques réalisés depuis la surface depuis plus de 25 ans pour progressivement caractériser le site permettent aujourd'hui de disposer de manière justifiée d'une représentation fine de la géométrie du sous-sol (nature des différentes couches géologiques, position et épaisseur) et des données nécessaires à la modélisation des phénomènes identifiés comme importants pour la conception et l'évaluation de la sûreté d'un stockage profond de déchets radioactifs Ce programme de reconnaissance depuis la surface sur le secteur de Meuse/Haute-Marne s'organise autour de plusieurs démarches complémentaires :

- plus d'une quarantaine de forages profonds de plusieurs centaines de mètres (dont 1 de 2 000 m de profondeur) ont confirmé l'homogénéité de la formation-hôte et l'absence de faille. Les carottes qui en ont été extraites ont permis de préciser la géométrie des couches composant le sous-sol. Elles ont également permis d'approfondir les connaissances sur le comportement géomécanique du Callovo-Oxfordien et d'élaborer des modèles de comportement pour établir des prévisions d'endommagement de la roche au pourtour immédiat des ouvrages souterrains selon le type de méthode de construction de l'installation souterraine ;
- différentes campagnes sismiques 2D (200 km en 1994-1996) et 3D en 2000 (4 km²) et 2008-2010 (37 km²) sur le site ont permis de préciser la disposition des couches et les caractériser (épaisseur, profondeur, pendage…). Elles ont successivement permis d'obtenir une image en volume du site avec une résolution plus fine et confirmé que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien est régulière avec une épaisseur supérieure à 120 m et une géométrie conforme à l'histoire des dépôts qui se sont succédés au Callovo-Oxfordien. Ces campagnes permettent aussi de montrer qu'aucune faille à jeu vertical supérieur à 2 m, n'est présente ni dans la couche du Callovo-Oxfordien, ni dans les horizons sus-jacents de l'Oxfordien calcaire ;
- des études de terrains ont permis d'observer les formations à l'affleurement (tant à l'échelle du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne que du secteur), d'appréhender les grands traits de l'environnement géologique, de prélever des échantillons et d'intégrer les données dans des modèles ;
- des analyses au laboratoire souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne ont permis de tester les méthodes et les outils de caractérisation et de conforter le modèle géologique par l'apport de données sédimentologiques et microstructurales. Durant tout le creusement des puits à partir d'août 2000, les relevés continus de toutes les formations traversées ont permis d'établir une carte géologique détaillée de la paroi sur toute la hauteur des deux puits, d'évaluer la variabilité lithologique des couches à l'échelle décamétrique, d'observer leur nature selon les directions, de caractériser leur fracturation et micro-fracturation naturelle et d'en évaluer l'incidence sur les circulations de fluides. Les observations réalisées confirment les données sédimentaires et tectoniques déjà acquises par les forages et fournissent des données structurales quantifiées précises qui confortent le modèle géologique.

Ces travaux visent à acquérir une compréhension fine de l'environnement et du milieu géologique du site de Meuse/Haute-Marne pour :

- s'assurer que cet ensemble et plus particulièrement la couche argileuse du Callovo-Oxfordien, présente les propriétés attendues ;
- évaluer son comportement à long terme.

» LA RECONNAISSANCE GÉOLOGIQUE EN QUELQUES CHIFFRES

- 200 km de profils sismique 2D, 4 km ² de sismique 3D autour du LS, 37 km² de sismique 3D haute résolution sur la zone d'intérêt pour la recherche approfondie (ZIRA) ;
- un forage jusqu'à 2 000 m de profondeur en 2007/2008 (pour évaluer le potentiel géothermal du site), avec un consortium de 21 laboratoires (Universités françaises, CNRS, IFPEN, BRGM, IRD et IRSN) ;
- environ 2 km de galerie dans le Laboratoire souterrain à fin 2019 ;
- environ 80 expériences scientifiques et technologiques dans le LS menées à fin 2019 depuis 2000 ;
- plus d'une centaine de thèses et des dizaines de laboratoires de recherche académique et appliquées mobilisées ;
- deux grands programmes de recherche nationaux coordonnés par le CNRS depuis 1997 : FORPRO puis NEEDS.

» HISTORIQUE DES ÉCHANGES SCIENTIFIQUES AVEC LES INSTANCES NATIONALES ET INTERNATIONALES AU SUJET DE LA DISSIPATION DES FLUX THERMIQUES

De façon générale, l'Andra appuie ses activités relatives au stockage géologique profond sur des bases scientifiques acquises par le monde de la recherche nationale et internationale. Cet appui de l'excellence scientifique est mené suivant des modalités diverses, en particulier des groupements de recherche nationaux (ex. avec le CNRS, par le passé le GDR FORPRO sur les géosciences, le GDR MOMAS sur la simulation numérique et actuellement le défis NEEDS) et internationaux (ex. actuellement le projet DECOVALEX sur la simulation numérique du comportement thermo-hydromécanique des roches https://decovalex.org), des partenariats avec de grands organismes de recherche, ou des grands programmes de recherche européens (ex. actuellement le *joint programming* EURAD qui réunit les agences, les évaluateurs comme l'IRSN, les organismes de recherche et auquel participe la société civile). Dans ce cadre le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne est un outil de recherche important pour mener des expérimentations *in situ* dans la roche argileuse, en particulier pour évaluer son comportement face à différentes sollicitations dont par exemple la thermique, et valider les modèles de comportement de la roche utilisé pour les travaux de conception et d'évaluation de sûreté du centre de stockage Cigéo.

En regard des enjeux, les travaux scientifiques ont fait et font toujours l'objet d'une évaluation indépendante continue à différents niveaux :

En premier lieu :

- par les pairs au travers en particulier des publications dans des revues à comité de lecture, des jurys de thèses, du Conseil scientifique de l'Andra, ou de la Commission nationale d'évaluation qui rend compte chaque année à l'OPECST et publie un rapport ;
- par les évaluateurs, en particulier l'IRSN et les revues internationales mandatées notamment par l'ASN ou le Groupe permanent déchets ;

  En second lieu, par des expertises tierces, à l'initiative de parties prenantes comme le CLIS (IEER) pour le dossier 2005 et le dossier 2009 (choix d'implantation du stockage) ou par Géowatt en 2013 pour la géothermie du site d'implantation du projet Cigéo).

Ces évaluations sont accessibles à tous, notamment sur les sites web de l'Andra et des évaluateurs et pour cette raison n'ont pas été systématiquement repris dans le dossier de demande d'utilité publique.

Cette connaissance scientifique a été examinée dans le cadre de l'instruction du dossier d'options de sûreté de Cigéo, pour lequel l'ASN indiquait *« Considérant que le dossier d'options de sûreté montre notamment que l'Andra a :*

- *Acquis une connaissance détaillée du site de Meuse/Haute-Marne, qui lui permet de confirmer la pertinence de la zone retenue pour l'implantation du stockage ;*
- *Mené de nombreuses études pour caractériser les évolutions des différents composants du stockage (colis, matériaux métalliques, cimentaires et argileux) et a constitué un ensemble important de connaissances à ce sujet ;*
- *Correctement identifié et étudié les perturbations (bactériennes, organiques, salines…) qui pourront affecter la roche hôte ainsi que les phénomènes qui se produiront pendant les transitoires (thermique, hydraulique, mécanique…) qui résulteront de l'implantation du stockage. Les résultats présentés tendent à indiquer que leur extension devrait être limitée par rapport à l'épaisseur de la roche hôte ».*

Ainsi, le choix du transfert de chaleur par conduction autour des alvéoles HA est notamment fondé sur les travaux de caractérisation du transfert de la chaleur dans le Callovo-Oxfordien, sur échantillons carottés en laboratoire jour, dans le Laboratoire souterrain (expérimentation TER, TED, CRQ), sur l'analyse des profils géothermiques naturels mesurés en forages profonds réalisés depuis la surface, et sur les travaux menés par nos homologues ayant l'argile comme formation hôte (Nagra en Suisse et Ondras-Niras en Belgique), en particulier dans des laboratoires souterrains (Mont Terri en Suisse www.mont-terri.ch ; Hades en Belgique https://euridice.be). Ce choix est retenu par l'ensemble des scientifiques travaillant sur le sujet (cf. Par exemple l'exercice internationale de modélisation et simulation numérique DECOVALEX 2019, TASK E relative à l'essai thermique TED mené dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, https://decovalex.org/D-2019/overview.html, regroupant différentes équipes de recherche).

2.3.4 Le Parlement et le gouvernement confirment le choix du stockage en couche géologique profonde

2.3.4.1 La loi du 30 décembre 1991 (dite loi Bataille) relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (29)

Dès 1991, le parlement se saisit activement de la question de la gestion des déchets radioactifs en fixant notamment les grandes orientations de recherche à mener sur la gestion des déchets HA.

Trois axes de recherche sont privilégiés :

- la séparation transmutation (cf. Chapitre 2.2.3 du présent document) des radionucléides à vie longue présents dans les déchets radioactifs à haute activité vie longue dont les études sont confiées au CEA ;
- l'entreposage de longue durée en surface (cf. Chapitre 2.2.2 du présent document) dont les études sont également confiées au CEA ;
- les possibilités de stockage profond, réversibles ou irréversibles, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains, dont les études sont confiées à l'Andra.

La loi du 30 décembre 1991 (29) prévoit, qu'à l'issue de 15 ans de recherche, le Gouvernement adresse au Parlement un rapport global d'évaluation de ces recherches accompagné d'un projet de loi autorisant, le cas échéant, « *la création d'un centre de stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue* ».

C'est également cette loi qui institue l'Andra et définit ses missions. Elle crée également la Commission nationale d'évaluation qui rapporte au Parlement et le un comité local d'information et de suivi (CLIS) du Laboratoire souterrain.

Cette loi constitue le premier jalon d'un processus qui a d'abord pour objet d'examiner la faisabilité du projet de stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs.

2.3.4.2 La loi du 28 juin 2006 sur la gestion des matières et des déchets radioactifs (14)

En 2005, conformément à ce qui était demandé par la loi de 1991 (29), l'Andra a remis au Gouvernement un dossier dans lequel elle conclut à la faisabilité et à la sûreté du stockage profond dans la zone de transposition (cf. Chapitre 2.3.2.3 du présent document). Le CEA a lui aussi présenté les conclusions de ses études alternatives au stockage géologique profond (la séparation-transmutation des éléments et l'entreposage de longue durée).

Les ministres en charge de l'environnement et de l'industrie ont décidé d'organiser un débat public sur la politique de gestion des déchets radioactifs qui s'est ouvert à la fin de l'année 2005.

Organisé par la Commission nationale du débat public (CNDP), ce débat a réuni 3 000 participants lors de 13 réunions publiques pour échanger sur les différentes voies de gestion étudiées. Ce débat public s'est terminé début 2006.

Le compte rendu du débat public a fait émerger deux options et un choix éthique : « faire confiance à la société ou à la géologie ? ». La première option retient le stockage géologique comme mode de gestion de référence en tenant compte de l'exigence de réversibilité. La seconde option consiste à mettre en place un « double programme d'essais *in situ* », l'un à Bure pour le stockage géologique, l'autre sur un site, à déterminer, pour l'entreposage de longue durée ; la seconde option renvoie la décision autour de 2020.

La loi de 2006 (cf. Figure 2-36) a pour objectif de répondre au rendez-vous fixé par la loi de 1991 (29) et de préciser et d'orienter les prochaines étapes de la politique de gestion des déchets radioactifs. Le débat public de 2005, ses conclusions (50) et les contributions des différents acteurs de la recherche ont alimenté le projet de loi préparé par le Gouvernement. Il y a notamment intégré la demande d'élargir le périmètre de la loi à l'ensemble des matières et des déchets radioactifs, sans se limiter aux seuls déchets de haute activité (HA), comme le fait la loi de 1991 (29).



Figure 2-36 Loi du 28 juin 2006 sur la gestion des matières et des déchets radioactifs

Dans l'exposé des motifs du dossier législatif, le Gouvernement a décidé de retenir le stockage en couche géologique profonde comme mode de gestion de référence en considérant notamment que « *les résultats acquis après 15 années de recherche menées dans le cadre de la loi de 1991 sur le stockage souterrain en couché géologique profonde permettent en effet aujourd'hui de retenir une telle orientation et de lever le moratoire qui avait été mis en œuvre par cette même loi (14)* ».

» DOSSIER LÉGISLATIF DE LA LOI DU 28 JUIN 2006 (14)

Pour la préparation du projet de loi, le Gouvernement s'est fondé sur les résultats des recherches réalisées et sur les évaluations indépendantes qui en ont été faites par des experts français et internationaux. Elles ont donné lieu à plusieurs rapports :

- les rapports de synthèse remis le 30 juin 2005 aux ministres en charge de l'industrie et de la recherche par le CEA (51) et l'Andra (47) ;
- les travaux de la Commission nationale d'évaluation (CNE) créée par la loi du 30 décembre 1991, ses onze rapports annuels et son rapport de synthèse publié en janvier 2006 (27) ;
- les évaluations internationales menées au second semestre 2005 sous l'égide de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) (52) ;
- l'avis rendu le 1er février 2006 par la direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (DGSNR)[92] (28) ;
- le rapport établi par les députés Claude BIRRAUX (n° 3003 (53) et 3154 (54)) et Christian BATAILLE et le sénateur Henri REVOL (n° 3154 (54)), et adopté par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques en mars 2005 en conclusion de l'implication continue de l'Office pendant les quinze années de recherche ;
- la synthèse de la Commission nationale du débat public relative au débat public qui s'est tenu du 12 septembre 2005 au 13 janvier 2006 relatif à la gestion des déchets radioactifs (50).

À la demande des parlementaires, ce projet a fait l'objet de débats approfondis, notamment lors des discussions en séance publique à l'Assemblée nationale puis au Sénat, qui ont démarré le 6 avril 2006 pour s'achever le 15 juin 2006 avec l'adoption définitive du projet de loi. Les principaux apports des débats parlementaires sont :

- l'introduction de la notion de stockage réversible sur une durée longue (au moins 100 ans) qui est considérée par les parlementaires comme une véritable avancée, notamment vis-à-vis des générations futures auxquelles il faut laisser le choix[93, 94] ;
- la nécessité de poursuivre, selon leur maturité respective, les trois axes de recherche de la loi Bataille de 1991 qui ne doivent pas être considérés comme des solutions alternatives mais comme des axes de recherches complémentaires95 ;
- le renforcement du contrôle du Parlement dans le processus d'autorisation du stockage avec notamment l'introduction d'une loi ultérieure sur les conditions de réversibilité du stockage et d'une loi pour autoriser la fermeture définitive du stockage ;
- la réaffirmation du principe de responsabilité de notre génération à ne pas laisser le fardeau des déchets radioactifs aux générations futures.

À la faveur de la loi du 28 juin 2006 (14), le Parlement et le gouvernement confirment le principe du stockage géologique réversible profond comme la référence pour la gestion durable des déchets HA et MA-VL. Cette loi entérine le fait que le stockage profond réversible constitue le seul mode de gestion, à notre portée technique, capable d'assurer la sûreté à long terme des déchets radioactifs HA et MA-VL tout en limitant les charges pesant sur les générations futures. Elle renforce le contrôle par le Parlement du processus d'autorisation du centre de stockage.

92 La DGSNR était en charge de l'autorisation et du contrôle des installations nucléaires de base (INB) civiles et des transports préalablement à la création de l'ASN courant 2006.

93 « *Choisir la réversibilité, c'est laisser la porte ouverte aux générations futures-celles auxquelles nous faisons référence dans les considérants de la charte désormais constitutionnelle, de l'environnement-et leur permettre de participer à un débat auquel elles ont droit. C'est aussi relever le défi, si important en l'occurrence, de l'humilité* », intervention de Mme Nathalie Kosciusko-Morizet, Assemblée nationale Compte rendu analytique officiel 2e séance du jeudi 6 avril 2006 Présidence de M. Maurice Leroy.

2.3.4.3 La loi du 25 juillet 2016

La loi du 28 juin 2006 (14) prévoit que le dépôt de la demande d'autorisation de création d'un centre de stockage en couche géologique profonde soit précédé d'un débat public.

Ce débat public sur le centre de stockage Cigéo s'est déroulé sous l'égide de la CNDP de mai 2013 à janvier 2014. Il s'est tenu sur la base du dossier de maître d'ouvrage préparé par l'Andra à partir des études d'esquisse industrielle du centre de stockage (cf. Figure 2-37).



Figure 2-37 Débat public sur le centre de stockage Cigéo : réunion inaugurale à Bure le 23 mai 2013

À l'issue du débat public, pour tenir compte des avis et attentes exprimés pendant le débat et pour conserver l'approche par étape initiée par la loi de 1991, l'Andra décide, par délibération de son conseil d'administration de poursuivre le projet de centre de stockage Cigéo en y apportant quatre évolutions (55) :

- une phase industrielle pilote (Phipil) au démarrage de l'installation ;
- l'élaboration d'un plan directeur pour l'exploitation (PDE) concerté avec les parties prenantes ;
- la transmission à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) d'un dossier d'options de sûreté et un dossier d'options techniques de récupérabilité pour préparer la demande d'autorisation de création du centre de stockage ;
- un engagement plus fort d'implication de la société civile dans la poursuite de la concertation.

La loi du 25 juillet 2016 (12) traduit les conclusions du débat public de 2013 et vient préciser les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets HA et MA-VL. Par ailleurs, ses dispositions relatives à la réversibilité viennent répondre et compléter les dispositions de la loi de 2006 (14).

94 « *Ce qui fait l'originalité de la France c'est l'affichage de la réversibilité, qui faisait encore débat en 1991. Le choix est désormais fait, il impose des obligations quant aux outils dont nous devons être dotés et à la surveillance et au contrôle des installations* », intervention de M. Jean-Claude Lenoir, Assemblée nationale, compte rendu analytique officiel 2ème séance du jeudi 6 avril 2006, Présidence de M. Maurice Leroy

95 « *Ces trois axes de recherche sont complémentaires. Il n'y a pas lieu de les opposer. Chacun a son utilité, mais pas au même moment ni pour les mêmes déchets* », intervention de François Loos Sénat : discussion en séance publique 30 mai 2006

DOSSIER LÉGISLATIF DE LA LOI DU 25 JUILLET 2016 (12)

Pour la préparation du projet de loi, les sénateurs se sont fondés sur les résultats des recherches et des travaux de conception réalisées par l'Andra et sur les textes et rapports suivants :

- directive 2011/70/Euratom du 19 juillet 2011 (10) qui fixe l'impératif, pour les déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue, de mettre en place « *un stockage dans des installations appropriées qui serviront d'emplacement final* » ;
- bilan du débat public de la Commission nationale du débat public sur le débat public organisé en 2013 relatif au projet Cigéo ;
- rapport n° 594 de M. Michel RAISON (56) (et rapport n° 3894 de M. Christophe Bouillon (57)) (faits au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable.

Les principales évolutions apportées par la loi du 25 juillet 2016 (12) en matière de conduite du projet de centre de stockage Cigéo sont les suivantes :

- la loi fixe la définition de la réversibilité du stockage en tant que « capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion » ;
- l'exploitation du centre de stockage débute par une phase industrielle pilote permettant de conforter le caractère réversible et la démonstration de sûreté de l'installation ;
- la phase industrielle pilote aboutit à une nouvelle loi par laquelle le Parlement décide des conditions de la poursuite éventuelle du développement du centre de stockage ;
- le plan directeur de l'exploitation (PDE) se voit fixer pour objectif de garantir la participation des citoyens. Ce plan est élaboré et mis à jour par l'Andra, tous les cinq ans, en concertation avec l'ensemble des parties prenantes et le public[96].

Ainsi, la loi de 2016 encadre la mise en œuvre du projet de centre de stockage Cigéo dans des conditions garantissant à la fois la sûreté des installations et la réversibilité des choix, dans une logique de jalonnement et de rendez-vous réguliers. Ces dispositions ont été intégrées au code de l'environnement (article L. 542-10-1).

TROIS LOIS CONFIRMENT PROGRESSIVEMENT LE STOCKAGE EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE

Avec trois lois déjà proposées et votées sur les 20 dernières années et d'autres rendez-vous d'ores et déjà planifiés, le Parlement et le gouvernement ont largement confirmé le choix du stockage en couche géologique profonde pour la gestion des déchets HA et MA-VL.

Ce mode de gestion a été largement débattu par le Parlement à l'occasion de ces 3 lois votées les 30 décembre 1991 (29), 28 juin 2006 (14) et 25 juillet 2016 (12). Elle a également été débattue par les citoyens, lors du débat public sur la politique de gestion des déchets radioactifs en 2005, lors du débat public sur projet de centre de stockage Cigéo en 2013, et plus récemment, en 2019, lors du débat public sur le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR).

Le choix du stockage géologique comme mode de gestion de référence pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité et pour les déchets de moyenne activité à vie longue a été réaffirmé à l'occasion de ces divers rendez-vous législatifs.

D'autres rendez-vous législatifs sont d'ores et déjà prévus pour fixer les conditions de la poursuite éventuelle du développement du centre de stockage sur la base de l'expérience acquise lors de la phase industrielle pilote et pour sa fermeture définitive.

[96] La première proposition de plan directeur pour l'exploitation (PDE) produite par l'Andra en 2016 décrit le déroulement de référence du centre de stockage Cigéo (inventaire des déchets à stocker, principales étapes de sa construction, principales étapes de son exploitation, objectifs de la phase industrielle pilote, choix offerts par la réversibilité en matière de conduite du projet

2.3.5 Les départements volontaires pour l'accueil d'un laboratoire souterrain confirment leur engagement pour l'accueil d'un stockage en couche géologique profonde

Après s'être chacun porté volontaire pour l'accueil d'un laboratoire de recherche souterrain en vue de l'accueil d'un centre de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde, les départements de Meuse et de Haute-Marne fusionnent leur candidature en 1995. Ils ont depuis cette date régulièrement confirmé leur soutien à l'accueil du projet de stockage.

En 1997, des enquêtes publiques sont menées sur les sites des 3 candidats à l'implantation du laboratoire. En Meuse/Haute-Marne, les conseils municipaux de la zone des 10 km autour de Bure (30 votes favorables au projet, 3 opposés) et les Conseils généraux de Meuse et de Haute-Marne votent pour l'accueil du laboratoire.

En 2009, les populations et élus locaux s'expriment au travers de plusieurs réunions organisées par l'Andra, sur leurs vœux en matière d'aménagement du territoire et d'insertion locale (cf. Figure 2-38), ce qui a contribué à la définition de la zone d'intérêt pour les reconnaissances approfondies (ZIRA) (cf. Chapitre 2.6 du présent document).



Figure 2-38 *Réunion de présentation du point d'avancement du projet d'implantation de stockage géologique aux élus de la Meuse.*

En 2011, après enquête publique, l'autorisation d'exploitation du Laboratoire souterrain est prolongée jusqu'en 2030. C'est aussi l'année où, sous l'égide du préfet de la Meuse, est élaboré un schéma interdépartemental de développement du territoire (SIDT) pour préparer le territoire à l'implantation d'un centre de stockage géologique profond de déchets radioactifs.

En 2012, le Comité de haut niveau valide l'implantation interdépartementale de la zone de réception des colis de déchets radioactifs.

En 2013, de nombreux élus locaux se sont exprimés pour réaffirmer leur soutien au projet à l'occasion du débat public sur Cigéo (cf. Chapitre 2.3.4.3 du présent document) : G. Longuet, sénateur (cahier d'acteur n° 24) ; Codecom du Val d'Ornois (cahier d'acteur n° 25) ; Conseil général 52 (cahier d'acteur n° 27) ; Conseil général 55

(cahier d'acteur n° 30) ; D. Ruhland, Conseiller général de Montiers-sur-Saulx (cahier d'acteur n° 72) ; H. François, maire de Saudron (cahier d'acteur n° 72) ; B. Pancher, député (cahiers d'acteur n° 74 et n° 75) ; Codecom de Marne et Rognon (cahier d'acteur n° 82) ; Codecom de Haute-Saulx (cahier d'acteur n° 91).

Depuis 2016, les élus locaux sont mobilisés pour participer aux différentes concertations organisées l'Andra sur la liaison intersites, le cycle de l'eau (les syndicats des eaux portent le sujet de l'adduction), l'énergie et les transports (sujet la route départementale D60/960 porté par les CD 55 et 52) (cf. Chapitre 2.5 du présent document)). La Codecom Portes de Meuse et la Communauté de Communes du Bassin de Joinville en Champagne (CCBJC) travaillent sur la création de zones d'activités économiques.

Le 4 octobre 2019, le Projet de développement du territoire (PDT, anciennement dénommé SIDT), qui a pour objectif de préparer le territoire à l'arrivée de Cigéo, a été signé, à l'occasion d'un Comité de haut niveau, par la secrétaire d'État auprès de la Ministre de la transition écologique. Ce document a été cosigné notamment par les acteurs locaux : le Président de la région Grand-Est, les Présidents des départements de la Meuse et de la Haute-Marne, les Présidents des quatre communautés de communes et d'agglomérations concernées, les maires des communes de Bure, de Mandres-en-Barrois et de Saudron, les Présidents de groupements d'intérêt public de la Meuse et de la Haute-Marne et par les Présidents des chambres consulaires des deux départements (Chambres de l'agriculture, de commerce et de l'industrie, des métiers et de l'artisanat).

Synthèse

En France, la localisation d'un laboratoire souterrain de recherche, en vue de l'étude de la faisabilité d'un centre de stockage géologique, est le résultat d'un travail initié par la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 dont le rapporteur fut le député Christian Bataille. Cette loi fut la première loi française relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs.

La démarche de localisation d'un laboratoire, menée par étapes successives, sous le contrôle du Parlement, a systématiquement considéré deux critères, abordés au même niveau d'importance :

- la compatibilité technique du sous-sol avec les exigences d'un stockage géologique et avec les objectifs de protection de l'homme et de l'environnement contre la dangerosité des déchets. Ce critère de compatibilité technique était évalué à partir des connaissances géologiques préexistantes.
- l'acceptation du projet par le territoire d'accueil. Seuls les départements ayant répondu à un appel au volontariat pour accueillir un laboratoire souterrain de recherche ont été retenus.

La couche argileuse du Callovo-Oxfordien présente en Meuse et en Haute Marne a été retenue par le Gouvernement, en décembre 1998, pour y implanter un laboratoire souterrain.

En août 1999, l'Andra a obtenu l'autorisation de construire le Laboratoire souterrain dit de « Meuse/Haute-Marne » à Bure. La construction du Laboratoire souterrain de recherche a démarré en 2000. En 2004, le creusement des puits du Laboratoire souterrain a atteint la couche argileuse du Callovo-Oxfordien à étudier.

Les travaux menés dans le Laboratoire souterrain et dans les laboratoires de surface ainsi que les investigations menées depuis la surface par l'Andra ont confirmé la faisabilité d'un stockage géologique dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien.

En 2006 et en 2016, le parlement a confirmé politiquement le choix du stockage en couche géologique profond dans l'argile pour la gestion durable des déchets radioactifs HA et MA-VL. Les départements candidats et le territoire ont constamment réaffirmé leur soutien au projet de centre de stockage Cigéo.

2.4 Une installation industrielle sûre pendant son fonctionnement et à long terme après sa fermeture

2.4.1 L'importance des itérations entre sureté, conception et connaissances dans le développement progressif du centre de stockage Cigéo

2.4.1.1 Le développement progressif du centre de stockage Cigéo s'appuie systématiquement sur des itérations associant la sûreté, la conception et les connaissances scientifiques et technologiques

Le processus de développement progressif du centre de stockage Cigéo s'appuie, depuis environ 30 ans, sur des itérations périodiques entre sûreté, conception et connaissances scientifiques et technologiques.

Ces itérations mises en place dès le démarrage du programme de recherche et développement sur le stockage en 1991 par l'Andra ont intégré ainsi la sûreté dès les phases amont de conception. Elles permettent d'orienter progressivement les choix de conception de l'installation de stockage, de manière à accroitre sa robustesse en prenant en compte l'avancée progressive des connaissances scientifiques et technologiques et les objectifs de sûreté qui lui sont conférés.

L'objectif fondamental d'une installation de stockage de déchets radioactifs consiste à garantir la protection des populations et de l'environnement vis-à-vis des déchets radioactifs. Elle est étudiée en faisant l'hypothèse que diverses situations, notamment accidentelles, peuvent survenir.

Compte tenu de la longue durée durant laquelle les déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL) restent dangereux, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne peut pas reposer à long terme sur des actions de surveillance et un contrôle institutionnel, qui ne pourront pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée. Elle doit reposer, à termes, sur des dispositions passives, c'est-à-dire qu'elle ne doit pas dépendre d'actions humaines, notamment grâce au choix du milieu géologique et à la conception de l'installation. La sûreté d'une installation de stockage, et en particulier sa sûreté après sa fermeture, à long terme, est donc un sujet essentiel, dans le développement progressif du stockage.

La conception d'une installation de stockage en formation géologique profonde de déchets radioactifs HA et MA-VL doit assurer le confinement de la radioactivité sur des périodes extrêmement longues, typiquement de plusieurs centaines de milliers d'années. Ainsi, l'installation de stockage devra être telle qu'elle permette de prévenir et de limiter au mieux les relâchements de radioactivité en surface, au moins jusqu'à ce que l'activité radiologique qu'elle contient ait décru jusqu'à un niveau résiduel qui n'est plus susceptible d'évoluer significativement, et qui ne risque plus d'occasionner des conséquences inacceptables pour l'homme et pour l'environnement, sans limite de temps fixée *a priori*.

Afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stockage, deux principes orientent la conception du stockage :

- la protection des personnes et de l'environnement contre les atteintes éventuelles liées aux déchets radioactifs ;
- la limitation à un niveau aussi faible que raisonnablement possible de l'impact radiologique éventuel.

Compte tenu de la spécificité du stockage géologique profond (son caractère « unique », son caractère souterrain et le fait qu'il doit assurer la protection des personnes et l'environnement sur le long terme), le développement progressif du stockage s'appuie sur un lien très étroit entre trois piliers que sont la conception, les connaissances (scientifiques et technologiques) et la sûreté.

Ce lien étroit intègre également une spécificité du stockage qui est la mise en œuvre en parallèle et coordonnée de deux démarches de sûreté :

- l'une qui s'apparente à une démarche classique appliquée par les autres installations nucléaires en tenant compte néanmoins des spécificités de l'installation souterraine (transfert de colis depuis l'installation nucléaire de surface jusque dans des ouvrages souterrains, présence d'une grande variabilité de déchets, coactivité entre travaux et exploitation d'une zone nucléaire en souterrain, longueur des ouvrages, développement progressif, durée du fonctionnement d'une centaine d'année...).
- l'autre, propre au stockage en formation géologique profonde, destinée à l'évaluation de la sûreté à long terme une fois l'installation de stockage fermée définitivement, afin d'estimer sa robustesse vis-à-vis de l'objectif d'isolement des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue et l'objectif de limitation des transferts des radionucléides vers la surface. L'accent est porté sur l'intégration des connaissances scientifiques et technologiques et la maîtrise des incertitudes.

Chaque itération intègre ainsi l'acquisition de connaissances nouvelles et la consolidation des connaissances existantes, notamment via les résultats du programme de recherche et développement et les avancées sur la conception de l'installation de stockage en cohérence avec toutes ces connaissances et en lien avec les objectifs de sûreté.

Les enseignements de chaque itération « sureté/conception/connaissances » constituent une donnée d'entrée pour la suivante et permet d'orienter en fonction de l'objectif visé, les études en matière d'acquisition de connaissances scientifiques et technologiques complémentaires, les études de conception, et les besoins en termes d'approfondissement des études de sûreté (cf. Figure 2-39).

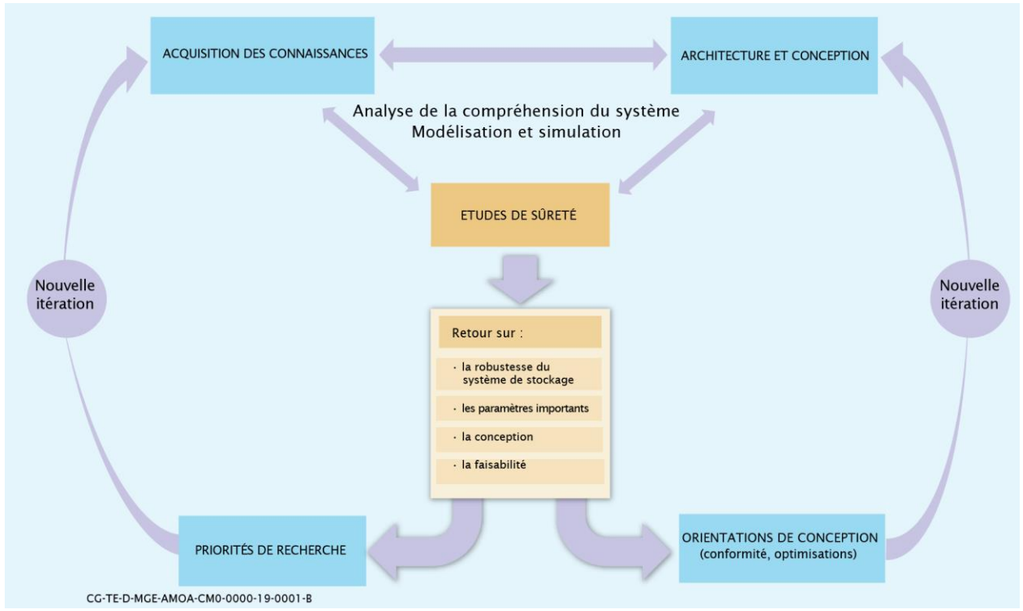


Figure 2-39 *Illustration du processus itératif reliant acquisition de connaissances, conception et sûreté*

2.4.1.2 À chaque itération, un objectif visé

Chaque itération « sureté/conception/connaissances » intermédiaire associée au jalonnement du développement du projet de centre de stockage Cigéo (dénommé HA-VL puis HA/MA-VL avant 2010) fait l'objet d'instructions par l'ASN et le cas échéant d'évaluations par les pairs.

En premier lieu, compte tenu de l'importance de la vérification du respect de l'objectif fondamental de protection de l'homme et l'environnement à long terme, l'Autorité de sûreté nucléaire a constitué un référentiel de sûreté relatif au stockage en formation géologique qui fixe les objectifs de protection et de sûreté en particulier à long terme et qui accompagne les itérations et leurs instructions :

- l'ASN a émis dès 1991 une règle fondamentale de sûreté (RFS III.2.f) relative au stockage géologique des déchets radioactifs en formation géologique profonde (58) pour définir les objectifs qui doivent être retenus afin d'assurer la sûreté à long terme du stockage. Elle précise les attentes, plus particulièrement en matière de sûreté à long terme vis-à-vis du stockage, les principes de conception, les critères de sélection du milieu géologique propice et les modalités d'études. Elle fixe également les objectifs fondamentaux qui doivent guider les travaux sur le stockage. La RFS III.2.f, dès 1991, précise que *« La protection des personnes et de l'environnement à court et long terme constitue l'objectif fondamental assigné à un centre de stockage de déchets en formation géologique profonde »*. Elle définit des objectifs de sûreté pour les phases d'études et de travaux en particulier de reconnaissance des sites ;
- en 2008, l'ASN a fait évoluer la RFS III.2 f qui a été remplacée par le guide de sûreté de l'ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (19). Cette mise à jour tient compte notamment du retour d'expérience de l'instruction par l'ASN des dossiers antérieurs de l'Andra, ainsi que des orientations désormais fixées par la loi de programme du 28 juin 2006 (14). Les principales modifications introduites dans le guide de l'ASN de 2008 sont relatives notamment à la définition des fonctions de sûreté du stockage, à la notion de réversibilité, aux objectifs de la surveillance de l'installation. Le guide de sûreté de l'ASN de 2008 permet ainsi d'intégrer les retours d'expérience des instructions antérieures, les avancées de la réflexion en particulier au niveau international (cf. « Post-closure Safety Case for Geological Repositories: Nature and Purpose, NEA No. 3679 » (59)) et ainsi de mieux cadrer le développement industriel du stockage.

En second lieu, un processus d'instruction est mis en œuvre tout au long du développement du projet. Ce processus, piloté par l'ASN, repose sur l'élaboration par l'Andra d'un dossier de sûreté à chaque itération clé du développement de la conception du centre de stockage :

- l'instruction est réalisée avec l'appui des experts sûreté de l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), saisi par l'ASN, et qui mènent une instruction technique détaillée des dossiers de l'Andra à l'issue de laquelle est produit un rapport. Pour étayer ses décisions, l'ASN s'appuie également sur des groupes permanents d'experts (GPE) relevant de leurs domaines d'expertise respectifs. Les GPE statuent sur la base de l'analyse technique conduite par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. De manière générale, les avis portent sur la sûreté des concepts proposés par l'Andra pour le stockage des déchets HA et MA-VL, et la qualité de l'ensemble des données qui sous-tendent les évaluations de sûreté.
- en complément, des revues par des experts sûreté au niveau international permettent de confronter les évaluations de sûreté menées par l'Andra aux meilleures pratiques internationales (cas des revues en 2001 pour le dossier préfigurant le dossier de faisabilité du stockage après 15 ans de recherches dans le cadre de la loi « bataille » de 1991 (29) et en 2005 sur le dossier de faisabilité) et aux normes de sûreté applicables de l'Agence internationale de l'énergie atomique (cas de la revue du dossier d'options de sûreté en 2016, en préalable à la demande d'autorisation de création de Cigéo).

Plusieurs itérations de sûreté menées par l'Andra et leurs instructions par l'ASN se sont échelonnées sur une trentaine d'années, en lien avec le jalonnement du développement de la conception du centre de stockage Cigéo et les grandes étapes à franchir.

Chaque itération, et donc chaque instruction, a été réalisée en regard d'un objectif à atteindre :

- assoir les fondamentaux nécessaires à la démonstration de sûreté d'un stockage en formation géologique profonde et en particulier à long terme après fermeture ;
- préparer la création d'implantation et d'exploitation d'un Laboratoire souterrain en évaluant les critères de choix de site et en procédant à une première évaluation de sûreté ;
- approfondir les connaissances et préparer le dossier de faisabilité ;
- présenter la faisabilité du stockage sur la base des acquis de connaissances et en appliquant la démarche de sûreté, en réponse à la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (29) ;
- préciser la zone d'implantation de recherche approfondie pour l'installation souterraine au sein de la zone où a été établie la faisabilité du stockage en 2005 et les zones d'implantation des installations de surface ;
- accompagner le développement progressif de la conception et ses évolutions en vue de la demande d'Autorisation de création ;

- soumettre les options de sûreté préalablement à la demande d'autorisation de création en accord avec la réglementation relative aux « procédures INB[97] ».

Synthèse

Sept itérations de sûreté ont été réalisées depuis 1991, chacune répondant à un objectif visé en lien avec une étape clé du développement progressif du projet de stockage : options initiales de conception, autorisation d'installation et d'exploitation du Laboratoire souterrain, préparation de la faisabilité, faisabilité, premières options de conception et de sûreté, choix de site, esquisse et options de sûreté.

Chaque itération a conduit à une évaluation de la sûreté, en fonctionnement et à long terme, en regard de l'état des connaissances scientifiques et technologiques, de la conception du stockage et de la description de son comportement dans le temps. Pour chaque itération, l'Andra s'est attachée à vérifier notamment le respect des objectifs de sûreté et de protection fixés par la RFS.III.2.f de 1991 (58) puis le guide de l'ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde de 2008 (19).

Chaque itération s'est traduite par l'élaboration d'un dossier émis par l'Andra, qui a fait l'objet d'une instruction systématique menée par l'ASN.

Trois dossiers ont également fait l'objet d'une revue par des experts au niveau international.

Les itérations de sûreté successives ont contribué à identifier très tôt et progressivement les enjeux de sûreté et à les intégrer dans la conception à chaque étape clé du développement du stockage. Le caractère itératif de la démarche de conception et d'acquisition de connaissances scientifiques et technologiques mise en œuvre par l'Andra a permis d'assurer, de manière progressive, structurée, évaluée et tracée, la faisabilité du projet puis son développement eu égards aux exigences de sûreté applicables.

L'ensemble des itérations mentionnées ci-avant peuvent être regroupées en trois grandes phases de jalonnement :

a) Première phase de jalonnement encadrée par la loi de 1991

La loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 avait prévu 15 années d'études afin que chaque axe de recherche puisse faire l'objet d'une proposition étayée scientifiquement et techniquement. Évaluer la faisabilité impose de bien comprendre les propriétés des différents composants du stockage et les évolutions de ces derniers jusqu'à des échelles de temps très longues : milieu géologique (notamment la roche hôte), déchets, composants ouvragés (colisage des déchets, barrières ouvragées, soutènements des ouvrages souterrains…), radionucléides. Cette maîtrise des connaissances permet d'assoir sur des bases scientifiques fortes un jugement sur la faisabilité du stockage au regard des objectifs notamment de sûreté qui lui sont assignés.

En 2005, en s'appuyant sur l'ensemble des recherches et des résultats des itérations entre sureté, conception et connaissances, l'Andra a produit un dossier de faisabilité dénommé « Dossier 2005 » (47) qui a fait l'objet d'une instruction par l'ASN (28) ainsi qu'une évaluation par la Commission nationale d'évaluation (CNE) (27).

Les résultats des recherches menées dans le cadre de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 sur les trois axes ont également fait l'objet d'un débat public national.

b) Seconde phase de jalonnement encadrée par la loi du 28 juin 2006 : préparer la demande d'autorisation de création

Sur la base des résultats des 15 années de recherche, l'Andra a été chargée de poursuivre les études et les recherches afin de concevoir et d'implanter un centre de stockage profond de telle sorte que sa demande d'autorisation puisse être instruite en 2015.

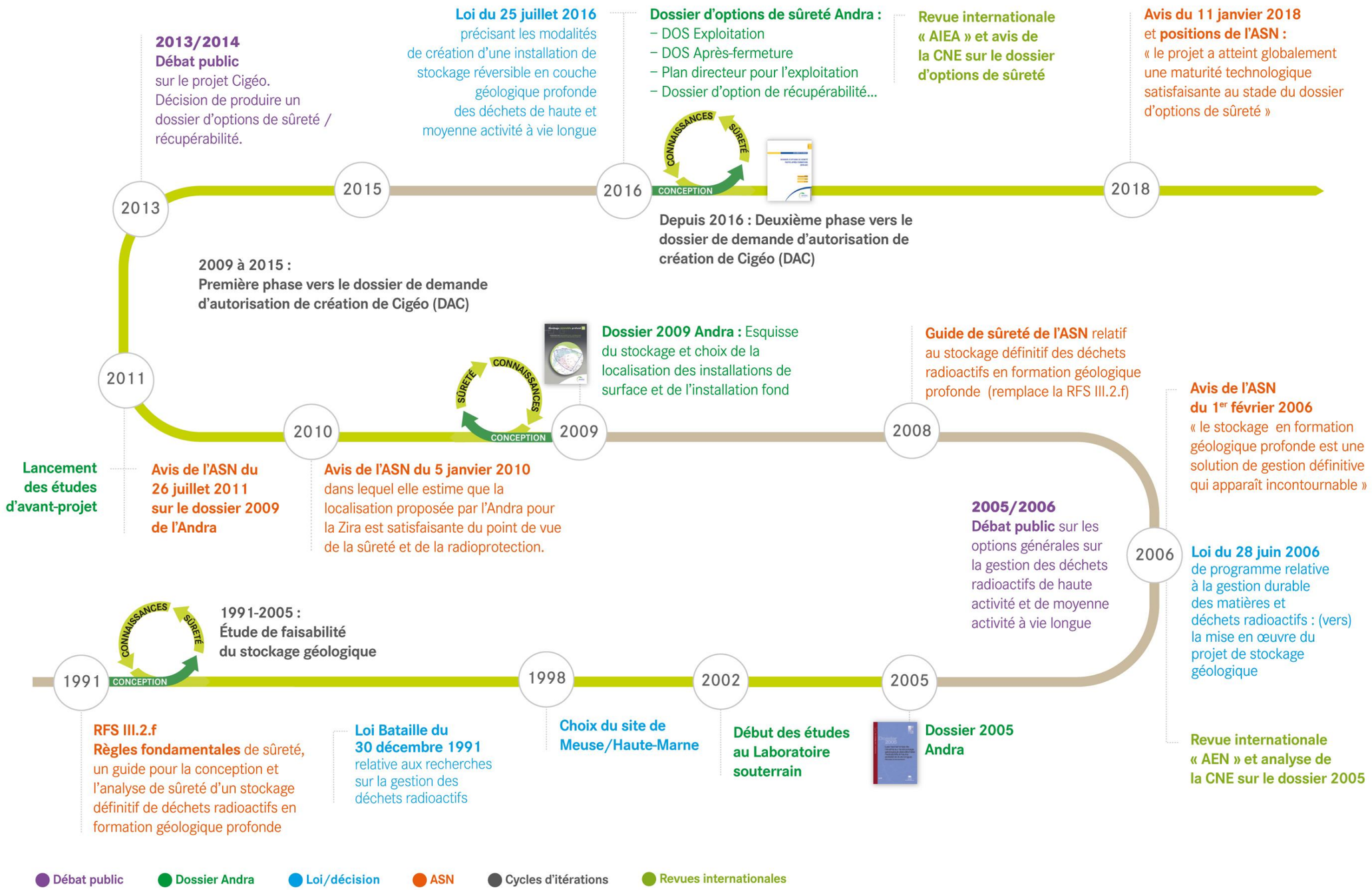
Le 5 mai 2014, à la suite du débat public et des conclusions qui en ont été rendues, le Conseil d'administration de l'Andra a indiqué par délibération (62) que « *l'Andra remettra à l'État un ensemble de documents constitué d'une proposition de plan directeur pour l'exploitation de Cigéo, du dossier d'options de sûreté et du dossier d'options techniques de récupérabilité pour préparer l'instruction de la demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo* ».

c) Troisième phase de jalonnement : vers la demande d'autorisation de création

Le 19 décembre 2014, l'ASN a formulé ses attentes vis-à-vis des options de sûreté de Cigéo (63). Il est notamment mentionné que le dossier d'options de sûreté devra « *présenter explicitement les objectifs, concepts et principes retenus afin d'assurer la sûreté de l'installation en exploitation [..]. Ces demandes sont complétées […] par une liste détaillée des éléments nécessaires pour que l'instruction du dossier d'options de sûreté puisse être valablement menée* ».

L'Andra a soumis son dossier d'options de sûreté dénommé « Dossier Cigéo 2015 » à l'ASN (64-67). Ce dossier a fait l'objet d'une instruction puis d'un avis formel de l'ASN (68) ainsi que d'une lettre de suite (69) en 2018 qui constitue la feuille de route pour la future demande d'autorisation de création. Ce dossier a fait également l'objet d'un avis de la CNE en 2016 (70). La figure 2-40 illustre les grandes étapes (i.e. itérations) de développement progressif du stockage depuis 1991 jusqu'à la demande d'autorisation de création selon ces trois grandes phases de jalonnement.

[97] En 2015, les options de sûreté ont été établies en accord avec l'article 6 du décret n° 1557 de 2007 relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives (60) qui a été abrogé par Décret n°2019-190 du 14 mars 2019 - art. 5 (61) et repris dans l'article art. R. 593-14 du code de l'environnement.



CG-00-D-MGE-AMOA-SR0-0000-20-0068-A

Figure 2-40 *Des itérations de Sûreté/Conception/Connaissances qui se sont échelonnées depuis 1991*

Ces grandes étapes, ou itérations, sont développées dans les paragraphes qui suivent, sous les titres de leurs objectifs.

2.4.1.3 Assoir les fondamentaux de la démonstration de sûreté en particulier après fermeture

Dès le début du processus de développement du projet de stockage, tenant compte en particulier de l'objectif fondamental de protection sur le long terme tel que mentionné par la RFS III.2.f (58), l'Andra a développé puis mis en œuvre une démarche de sûreté qui répond aux spécificités suivantes :

- la nécessité d'aborder la sûreté du stockage :
  - ✓ pour les phases de fonctionnement, de démantèlement et de fermeture via des analyses de risques (et des fonctions de sûreté) similaires à celles pratiquées dans les installations nucléaires de base (INB) en les adaptant pour certains aspects spécifiques au caractère souterrain de l'installation de stockage (transfert des colis de la surface vers les ouvrages souterrains, profondeur, développement progressif, co-activité travaux souterrains/exploitation nucléaire, géométrie des ouvrages souterrains, durée de fonctionnement centennale) ;
  - ✓ après la fermeture définitive du stockage, pour les phases de surveillance et post-surveillance (communément appelée phase après fermeture) où la sûreté doit être assurée sans besoin d'intervention particulière (passivité), conformément à la RFS.III.2.f, via une analyse des risques et incertitudes en lien avec l'état des connaissances notamment du comportement du stockage dans le temps et les fonctions de sûreté après fermeture qui lui sont allouées ;
- la place centrale accordée à la phase après la fermeture définitive du stockage, dès le début de la conception en s'appuyant sur quatre axes de recherche et de développement (cf. Figure 2-39) :
  - ✓ l'acquisition de connaissances (caractéristiques et comportement du milieu géologique, notamment la couche hôte, les déchets, les composants ouvragés, les radionucléides) afin de comprendre les phénomènes physiques et chimiques qui gouvernent leurs comportements et leur évolution, sur de très longues durées ;
  - ✓ la conception du stockage (conteneurs de stockage, architecture et intégration du stockage dans le site géologique, modes de réalisation et d'exploitation, gestion des colis de déchets, possibilités de fermeture du stockage) afin de proposer une architecture de stockage une fois fermée définitivement en lien avec l'état des connaissances et en réponse aux objectifs de sûreté à long terme ;
  - ✓ la description (i.e. compréhension) du comportement du stockage et de son environnement géologique (notamment les interactions entre les composants et les évolutions géodynamiques) afin d'appréhender les évolutions thermique, mécanique, chimique et hydraulique ainsi que le relâchement des radionucléides dans le temps et l'espace, au travers notamment de la modélisation et de la simulation numérique ;
  - ✓ les évaluations de sûreté pour analyser les risques et incertitudes, et évaluer les performances du stockage en matière d'isolement et de confinement; ainsi que sa robustesse vis-à-vis des incertitudes ou de perturbations.

En support à ces quatre axes, la démarche de sûreté, appliquée en particulier à la phase après fermeture, est mise en place pour intégrer les objectifs de sûreté, les éléments de conception et l'état des connaissances. En premier lieu, elle se fonde sur l'analyse du comportement du stockage tel qu'il peut être décrit au vu de l'état des connaissances scientifiques et technologiques. En second lieu, elle s'attache à identifier et évaluer les incertitudes de cette analyse et à l'issue de cela à définir un ensemble de scénarios représentant les différentes évolutions du stockage sur le long terme :

- un scénario qui vise à représenter l'évolution normale (i.e. attendue) dans le temps du stockage à long terme une fois fermé définitivement en se fondant sur l'analyse de l'état des connaissances scientifiques et technologiques, la conception retenue (notamment vis-à-vis des fonctions de sûreté) et en prenant des hypothèses conservatives le cas échéant ;
- un ensemble de scénarios qui permet de couvrir différentes déviations de cette évolution normale en prenant en compte d'éventuels aléas internes et externes au stockage (perte de fonction de composants ouvragés notamment, perte de mémoire du stockage après 500 ans entrainant la possibilité d'un forage « involontaire » dans la zone d'implantation du stockage par méconnaissance…).

Un travail important est également mené pour être en capacité de représenter et modéliser le comportement du stockage dans le temps et pour l'ensemble des scénarios retenus.

Ce travail débouche, in fine, sur des évaluations quantitatives de la performance[98] des composants ainsi que la performance globale via des indicateurs autres que la dose (évaluation de la concentration d'un radionucléide dans le temps, évaluation du ratio entre la part de radionucléides passant par les ouvrages souterrains, et ceux passant par la roche hôte, distribution de la quantité de radionucléides peu mobiles dans le stockage et la couche en fonction du temps…).

Ces évaluations portent un jugement sur la performance des composants ouvragés du stockage et de la roche hôte dans laquelle est implanté le stockage vis-à-vis des fonctions de sûreté à assurer. Elles constituent également un test de la robustesse d'ensemble du stockage (composants ouvragés du stockage, formation hôte assurant la sûreté à long terme), de son évolution, ce qui est une condition importante de la confiance dans le processus d'évaluation. Le transfert potentiel des radionucléides dans les différents compartiments du stockage est également évalué, et in fine l'impact éventuel du stockage sur l'homme et l'environnement pour les quelques radionucléides mobiles et à vie longue qui sortiraient de la formation hôte.

Cette démarche de sûreté s'inscrit complètement dans le processus itératif en mettant en perspective les différents phénomènes physiques et chimiques qui concourent à la sûreté du stockage mais qui peuvent également affecter les fonctions de sûreté. En jaugeant leur importance quantitative, cette démarche contribue à évaluer leur poids relatif et les conséquences des éventuelles incertitudes qui subsistent. Elle oriente également les recherches ultérieures en mettant en lumière les domaines où des avancées scientifiques et technologiques contribueraient le plus fortement à la sûreté.

En parallèle, et afin de conduire ses études et recherches, l'Andra a mobilisé des compétences scientifiques pluridisciplinaires, notamment dans les domaines des sciences de la terre, des matériaux, de l'environnement, des radionucléides, de la modélisation, de la simulation numérique, de la mesure, etc. L'objectif visé est :

- de disposer d'une vue complète des éléments de connaissances sur les composants du stockage : milieu géologique, matériaux ouvragés (colisage, scellements…), déchets, radionucléides ;
- d'identifier les grandes questions scientifiques relatives au stockage géologique profond de déchets radioactifs, d'évaluer les principaux enjeux, d'élaborer les programmes d'études et de recherche nécessaires en associant très largement les partenaires scientifiques compétents et en leur permettant de hiérarchiser les priorités en matière d'étude et de recherche.

Synthèse

Sur la base des premiers acquis de connaissances scientifiques et technologiques, l'Andra a franchi une étape importante en établissant une démarche de sûreté pour le stockage géologique, en accord avec les recommandations de la RFS.III.2. f.

Cette étape a également permis de fixer les éléments de connaissances restant à approfondir et les premiers concepts à étudier.

Elle constitue la première des itérations entre la sûreté, la conception et les connaissances scientifiques et technologiques.

[98] La performance s'entend au sens des fonctions de sûreté déclinant l'objectif fondamental de sûreté. Ainsi, la fonction de sûreté de la roche hôte est de limiter la migration des radionucléides qui seraient relâchés hors du stockage. La performance de la roche hôte renvoie à des indicateurs qui traduisent cette fonction de sûreté, par exemple la quantité relative de radionucléides qui traverseraient éventuellement le roche hôte dans le temps.

» CONSOLIDATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE DES RISQUES PAR LE CROISEMENT DE COMPÉTENCES ET D'EXPERTISES DE NATURES ET D'ORIGINES VARIÉES

Dans le cadre du processus itératif entre l'évaluation de sûreté, la conception et les connaissances scientifiques et technologiques, et plus particulièrement dans un objectif de maitrise des risques et incertitudes résiduelles tant en exploitation qu'en après fermeture, l'Andra fait appel à des compétences nombreuses et de nature diverses et complémentaires. Celles-ci couvrent ainsi un vaste champ de domaines qui sont au cœur de la conception, la réalisation, l'exploitation et la sûreté du stockage géologique : par exemple les géosciences (géologie, sédimentologie, structurale, géo-mécanique, géochimie, tectonique/sismicité, hydrogéologie…), l'environnement, la radiochimie, les sciences des matériaux, les sciences du climat, les travaux souterrains, le génie civil, le génie nucléaire, les mathématiques appliquées, la simulation numérique, la métrologie, la science des données, la radioprotection, la sécurité incendie…

L'Andra s'adresse ainsi à des organismes divers (centres de recherche, universités, établissements publics à caractères scientifiques et technologiques, ingénieries, grands groupes de la filière nucléaire des travaux publics ou travaux souterrains, institutions/associations professionnelles…) dont la compétence dans un domaine donné est reconnue. Cela permet à l'Andra de disposer d'une base de connaissances et d'analyse solide dans chaque domaine mobilisé. Par ailleurs, en regard du caractère pluridisciplinaire des sujets traités, l'Andra établit le croisement entre les différentes compétences et domaines afférents, afin notamment de s'assurer de la cohérence d'ensemble, notamment en termes d'analyse de risques et de sûreté.

L'Andra croise ses connaissances avec les experts au niveau international en s'impliquant fortement dans des coopérations internationales, notamment avec ses homologues étrangers, au travers de collaborations bilatérales ou multilatérales (Andra-NAGRA par exemple…) ou d'instances internationales (projet AEN Clay Club, base de données AEN FEPs et FEPCAT, MODERN 2020, projet AIEA GEOSAF…). Cela permet également aux agences de disposer en commun d'une base éprouvée de connaissances, de méthodes et d'analyses ainsi que partager les retours d'expérience.

En termes de gouvernance interne, l'Andra s'appuie sur différentes instances indépendantes et constituées d'experts reconnus dans leur domaine, en particulier un Conseil scientifique et des comités techniques spécialisés, comme le comité industriel, le comité des travaux souterrains, le comité des expérimentations dans le Laboratoire souterrain, ou le comité sûreté et environnement. Ces instances contribuent au système de revues internes dédiées à l'analyse des données, modèles et choix de sûreté à retenir pour les évaluations de sûreté (65). Ces revues permettent de valider les choix et leurs justifications.

Ainsi :

- le Conseil scientifique de l'Andra, nommé par décret par les tutelles de l'agence, est chargé d'émettre des avis et recommandations sur les priorités des recherches menées par l'Andra et d'en évaluer les résultats, notamment en regard des enjeux d'acquisition ou d'utilisation des connaissances scientifiques et technologiques pour la conception et la sûreté du système de stockage. À ce titre, le Conseil scientifique a examiné systématiquement tout ou parties des dossiers antérieurs afférents et à chaque itération de sûreté/conception/connaissances ;
- le comité de sûreté et environnement s'inscrit dans le processus de revues de conception à chaque étape clé du développement du projet de centre de stockage Cigéo (esquisse, avant-projet sommaire, avant-projet détaillé.).

Enfin, comme indiqué au chapitre 4 du volume II de l'étude d'impact, différentes revues ou équivalents externes ont été menées :

- depuis 1991, les différents dossiers afférents au développement du projet Cigéo sont soumis à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) qui a émis des avis et recommandations, notamment pour le dossier d'options de sûreté établi par l'Andra en 2016 en vue de la demande d'autorisation. Ses avis sont établis sur la base d'un travail d'évaluation mené par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté (IRSN) et soumis à des groupes permanents d'experts (maillon important de l'organisation de la sûreté nucléaire en France, un groupe permanent d'experts est une instance constituée d'experts nommés en raison de leurs compétences et de leur expérience professionnelle. Ils sont issus des milieux universitaires et associatifs mais aussi des exploitants concernés par les sujets traités et de l'IRSN). L'Autorité de sûreté effectue également des visites notamment sur le Centre de Meuse/Haute-Marne au cours desquelles elle porte une appréciation sur la qualité de travaux en cours, en particulier dans le Laboratoire souterrain ;
- instaurée par la loi du 30 décembre 1991 puis celle de 2006, la Commission Nationale d'Évaluation (CNE) a pour mission d'évaluer la qualité des travaux de l'Andra et produit un rapport annuel dans lequel elle émet un avis sur ces travaux. Ses avis et recommandations constituent des données d'entrées pour affiner les priorités du programme de recherche et de manière général les travaux de conception et d'évaluation de sûreté du projet Cigéo. La CNE rend compte à l'Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques (OPECST) ;
- des revues des grands dossiers du projet Cigéo par les pairs ont été organisées sous l'égide de l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique — anglais International Atomic Energy Agency).

Le Comité local d'information et de suivi (CLIS) du Laboratoire de Bure a aussi mandaté en propre des expertises, comme sur la géothermie, ou la revue de grands dossiers de l'Andra par des organismes indépendants, comme l'IEER (Institute for Energy and Environmental Research) (https://clis-bure.fr).

Enfin, le dossier de demande d'autorisation de création de l'INB du centre de stockage Cigéo (article R. 593-16 du code de l'environnement), comprendra une pièce dites « capacités techniques de l'exploitant » dans laquelle l'Andra indiquera « *notamment les ressources techniques dont il dispose, l'organisation mise en place dans ce domaine et l'expérience dont il peut se prévaloir dans l'exploitation d'installations nucléaires* ».

2.4.1.4 Proposer un site d'implantation d'un Laboratoire souterrain et une première évaluation de la sûreté associée

Dès 1994, l'Andra a mené un programme de reconnaissance et de caractérisation pour appréhender les grands traits de l'environnement géologique du site de Meuse/Haute-Marne et en particulier pour :

- confirmer l'intérêt de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien envisagée comme roche hôte du stockage et de son contexte géologique sur une zone de plusieurs centaines de km², située sur le sud de la Meuse et le nord de la Haute-Marne ;
- sélectionner un site pour l'implantation d'un Laboratoire de recherche souterrain dans le Callovo-Oxfordien en vue de l'implantation d'un éventuel centre de stockage profond de déchets radioactifs.

L'objectif était en particulier de faire une première caractérisation des propriétés des différentes formations géologiques, plus spécifiquement la couche du Callovo-Oxfordien, à grande maille à partir de forages carottés. Des travaux de cartographie géologique en surface ont permis de préciser les cartes géologiques existantes.

Deux forages carottés profonds respectivement à 1 100 m et 920 m de profondeur et distants de 15 km ont été réalisés. L'Andra a enregistré en continu sur toute la hauteur de ces forages, avec des outils de diagraphie développés pour l'industrie pétrolière, les paramètres des formations géologiques traversées (résistivité électrique, vitesse du son, porosité, densité…), prélevé des carottes (échantillons cylindriques de roche) pour analyses et essais en laboratoire au jour et réalisé des mesures hydrogéologiques.

Ces analyses, mesures et essais ont :

- confirmé la structure simple du milieu géologique (succession de formations géologiques argileuses et calcaires quasi planes…) ;
- permis d'avoir un premier aperçu des propriétés géomécaniques, thermiques, géochimiques et hydrogéologiques de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien ;
- confirmé sa très faible perméabilité ;
- montré que ses propriétés ne présentaient pas de caractère rédhibitoire pour l'étude de la faisabilité d'un stockage et qu'à cette maille d'investigations, elles ne variaient que très faiblement.

Ces éléments ont permis de vérifier les critères de choix de site conformément aux recommandations de la RFS.III.2.f (58).

L'ensemble de ces travaux a conduit à proposer le site pour installer le Laboratoire souterrain, l'étude préliminaire des propriétés mécaniques de la formation argileuse ayant par ailleurs montré la possibilité d'y creuser les ouvrages nécessaires à ce Laboratoire (puits et galeries).

En parallèle, l'Andra a mené des études de concepts de stockage pour répondre aux questions mises en évidence par les premières analyses de sûreté.

Synthèse

L'Andra a défini le programme expérimental à mener dans le Laboratoire souterrain et l'architecture correspondante de ce dernier. L'ensemble de ces travaux a permis à l'Andra de présenter une demande d'autorisation de création du Laboratoire souterrain.

À l'issue de son instruction, la publication en août 1999 du décret d'autorisation du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne à Bure (46) amorce une nouvelle étape du programme d'études et de recherches, en support au développement du projet de stockage géologique profond.

Le Laboratoire souterrain est un outil privilégié pour :

- confirmer in situ les caractéristiques géologiques du Callovo-Oxfordien ;
- mesurer in situ les propriétés du Callovo-Oxfordien, notamment évaluer sa capacité de confinement des radionucléides ;
- mener des expérimentations plus globales pour déterminer les possibilités de construction des ouvrages d'un stockage en intégrant les perturbations provoquées par leur réalisation ;
- aider à la définition de l'architecture du stockage.

2.4.1.5 Préparer le dossier de faisabilité du stockage à l'issue de 15 ans de recherche dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991

Suite au décret du 3 août 1999 (46), l'Andra poursuit l'approfondissement de la caractérisation du Callovo-Oxfordien sur le site de Meuse/Haute-Marne depuis la surface (campagne sismique 3D, nouveaux forages…) et débute en 2000 le creusement du puits d'accès et du puits auxiliaire du Laboratoire souterrain. En parallèle, les études de concepts de stockage sont définies pour répondre aux questions mises en évidence par les premières analyses de sûreté.

À l'issue de cette nouvelle étape d'approfondissement et d'acquisition des connaissances depuis la surface, fin 2001, l'Andra a établi un dossier intermédiaire qui fait le point sur l'état des connaissances et procède à une première évaluation de sûreté afin d'identifier les éléments de stockage et les phénomènes naturels sur lesquels porter les efforts en vue d'établir en 2005 la faisabilité du stockage géologique profond dans la formation du Callovo-Oxfordien en Meuse/Haute-Marne.

Ce dossier a fait l'objet, comme pour le dossier précédent, d'une instruction mais également, à la demande des ministères de tutelle de l'Andra, d'une revue internationale par les pairs est organisée en parallèle entre octobre 2002 et février 2003 pour évaluer le programme de l'Andra au regard des pratiques internationales. Cette revue, organisée par l'AEN, l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE était constituée d'experts internationaux issus soit d'organismes homologues de l'Andra, soit d'organismes de recherche ou d'appuis techniques d'autorités de sûreté. La revue a émis un avis général (71), notamment sur la qualité de la documentation et la manière dont le programme de recherche se situait par rapport aux standards internationaux. Elle a également émis des recommandations sur un certain nombre de points techniques particuliers.

Par ailleurs en 2004, le fonçage du puits d'accès principal atteint la formation du Callovo-Oxfordien. Le creusement de la galerie d'expérimentation à −445 m permet d'engager les 1ères caractérisation et expérimentations in situ dans le Callovo-Oxfordien[99]. Par la suite, le fonçage des puits reprend, pour atteindre en 2005 le niveau d'implantation du Laboratoire souterrain au milieu de la couche du Callovo-Oxfordien, puis engager le creusement des galeries horizontales issues des deux puits qui se rejoignent à fin 2005.

Synthèse

Les évaluations de sûreté menées en 2001 par l'Andra ont identifié les composants du stockage et les phénomènes naturels sur lesquels porter les efforts : par exemple la caractérisation renforcée du milieu géologique, l'étude des scellements des ouvrages d'accès au stockage…

Ces évaluations ont fait l'objet d'examens détaillés par les évaluateurs, notamment une revue internationale par les pairs menée sous l'égide de l'OCDE/AEN (71), qui ont conforté ou précisé les orientations pour la suite des études et recherches. Cela a conduit l'Andra à, notamment renforcer les interfaces entre, d'une part l'ingénierie et la sûreté, d'autre part la recherche et la sûreté.

Les recommandations des évaluations ont été prises en compte dans la définition des priorités du programme d'études et de recherches. Elles ont également nourri la réflexion sur l'organisation de la documentation du dossier 2005 relatif à la faisabilité du stockage géologique profond.

2.4.1.6 Soumettre le dossier de faisabilité de 2005

En 2005, au terme de quinze années de recherches réalisées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 (29), et de plusieurs itérations de sûreté ponctuées par des instructions menées par l'ASN, l'Andra a produit le « Dossier 2005 » relatif à la faisabilité de principe d'un stockage réversible des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue dans la formation du Callovo-Oxfordien étudiée au moyen du Laboratoire de recherche souterrain en Meuse/Haute-Marne (47).

L'objet du dossier 2005, dit Dossier « 2005 argile », était d'évaluer la faisabilité du stockage dans la formation géologique donnée du Callovo-Oxfordien. À ce titre, elle traite bien évidemment de la sûreté du stockage, partie intégrante de la faisabilité, en premier lieu après fermeture, objectif fondamental du stockage géologique mais aussi pendant son fonctionnement. Elle s'est appuyée sur les données recueillies sur le site du Laboratoire souterrain, mais aussi celles acquises dans d'autres formations argileuses (en Suisse dans le Laboratoire souterrain du Mont Terri et en Belgique dans le Laboratoire souterrain HADES à Mol). Ce site est celui qui a, par nature même, fait l'objet de la reconnaissance la plus détaillée. L'Andra s'est cependant assurée que les grandes caractéristiques du Callovo-Oxfordien, observées au niveau du Laboratoire souterrain, étaient extrapolables à une zone plus large, dite « zone de transposition » d'environ 250 km^2 définie autour du Laboratoire souterrain et reconnues par différents moyens comme indiqués plus avant (forages, sismique…). Cette transposabilité est le gage que les résultats obtenus ne sont pas dépendants des spécificités d'une zone de faible dimension.

Au stade du Dossier 2005, l'objectif de la démonstration de faisabilité était de montrer l'existence de solutions techniques pour la création d'un stockage réversible et sûr, avec les moyens techniques du moment, ces solutions pouvant par la suite évoluer et être optimisées, en particulier au plan de la sûreté d'exploitation et de la radioprotection. Le positionnement du stockage était fixé au sein de la zone de transposition. Le Dossier 2005 a distingué deux phases de vie du stockage et conduit deux analyses de sûreté, complémentaires : l'une relative à l'exploitation du stockage, l'autre relative à l'après fermeture liée à la spécificité de celui-ci.

Les performances du stockage dans son ensemble et par composants, ont été évaluées. Une évaluation de l'impact en terme de dose a aussi été menée pour des scénarios (cf. Chapitre 2.4 du présent volume de l'étude d'impact) montrant notamment que l'impact respectait les objectifs de protection fixés par la RFS III.2.f (58) (par exemple 0,25 mSv/an pour le scénario d'évolution normale).

[99] Ces 1ères caractérisation et expériences in situ dans le Callovo-Oxfordien ont bénéficié des acquis des Laboratoires de recherche souterrain déjà existants dans des formations argileuses (Mont Terri en Suisse et Mol en Belgique). Dans le cadre d'une coopération internationale étroite, les équipes de l'Andra ont pu se former et engager des expérimentations dans ces Laboratoires, et ainsi être très rapidement opérationnelles pour le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Ceci a permis d'apporter très rapidement les connaissances nécessaires pour le dossier de faisabilité du stockage en 2005.

Le Dossier 2005 s'est notamment attaché à évaluer les risques en exploitation, d'origine interne ou externe, les plus significatifs d'un stockage impliquant les colis de déchets radioactifs, en particulier pour l'installation souterraine. Pour cela, des études de scénarios accidentels ont permis d'évaluer le risque de dissémination de la radioactivité en cas de chute de colis, d'incendie d'un camion transportant des colis, d'explosion due au relâchement de d'hydrogène (H_2). Ces études ont été parfois complétées par des essais.

Tous ces travaux ont permis de vérifier au stade d'un dossier de faisabilité du projet de stockage, la capacité à réduire les risques en exploitation et gérer les conséquences des incertitudes sur le long terme à un niveau aussi bas que possible en l'état actuel des connaissances et techniques disponibles du moment.

Ce dossier a fait l'objet d'une instruction technique par les experts de l'IRSN à la demande de l'ASN, ainsi que d'une revue internationale d'experts menée sous l'égide de l'AEN à la demande des ministères de tutelle de l'Andra (52).

Synthèse

Le dossier de faisabilité de 2005 (47) constitue l'aboutissement d'un cycle d'itérations de sûreté s'appuyant d'une part sur les acquis de connaissances fondés sur un important programme d'études et de recherches menés depuis 1991 et des premiers acquis du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, et d'autre part sur les premiers éléments de conception et les évaluations de sûreté associées.

Les acquis de connaissances scientifiques et technologiques sur 15 ans et les différentes itérations « sûreté/connaissances/conception » au cours de des 15 ans ont permis de montrer que la formation du Callovo-Oxfordien réunit des propriétés favorables au confinement des radionucléides (forte épaisseur, faible perméabilité, faible diffusion des éléments en solution, forte capacité de rétention…), ce qui sous-tend l'objet du stockage géologique, mais aussi la construction d'ouvrages souterrains et leur tenue durant la période d'exploitation.

Ces acquis ont étayé les évaluations de sûreté qui ont notamment montré l'atteinte de l'objectif fondamental de protection de l'environnement et des personnes, et la robustesse de la sûreté à long terme. La grande majorité des radionucléides contenus dans les colis de déchets reste ainsi confinée dans le stockage ou dans le Callovo-Oxfordien en champ proche du stockage. Seuls quelques radionucléides, ceux mobiles à vie longue, l'Iode 129 et le Chlore 36, peuvent migrer au sein du Callovo-Oxfordien et atteindre ses formations sus et sous-jacentes, mais de manière très lente (plusieurs centaines de milliers d'années) et diluée dans le temps fait des propriétés du Callovo-Oxfordien.

À l'issue de l'instruction du dossier de faisabilité de 2005, l'ASN en application de la loi du 30 décembre 1991 sur la gestion des déchets radioactifs (29), a rendu son avis relatif à la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse (28). L'ASN a mentionné dans son avis que *« Ces examens mettent en évidence que des résultats majeurs relatifs à la faisabilité et à la sûreté d'un stockage ont été acquis sur le site de Bure »* et que *« les principes présentés par l'ANDRA, devrait répondre, à court et à long terme, aux objectifs radiologiques de la RFS III.2.f »*.

Ainsi, l'ASN considère que « le stockage en couche géologique est une solution de gestion définitive qui apparaît incontournable ».

L'étape de 2005 n'étant que le début du chemin à parcourir vers la mise en œuvre industrielle d'une installation de stockage, l'Andra a identifié à l'issue de cette étape de faisabilité les éléments à approfondir pour conduire à une réalisation industrielle. L'ASN, dans son avis, a également noté que l'Andra devra poursuivre les expérimentations dans le Laboratoire souterrain (i.e. comportement mécanique de la roche en lien avec les techniques de creusement) et développer la reconnaissance en vue de rechercher l'emplacement favorable à l'implantation d'une éventuelle installation de stockage dans la zone de transposition. Elle a aussi identifié le besoin de poursuivre la définition de la conception et les évaluations de sûreté notamment pendant son fonctionnement en lien avec le développement industriel du projet en vue d'une demande de création d'une installation de stockage ».

2.4.1.7 Proposer le choix du site d'implantation des futures installations et de la zone de reconnaissance approfondie de la couche de Callovo-Oxfordien

En 2009, l'Andra a proposé au Gouvernement un document relatif à la proposition d'une zone plus restreinte au sein de la zone de transposition de 250 km² qui avait été retenue au stade de la faisabilité (47), dite « zone dite d'intérêt pour la reconnaissance approfondie » (ZIRA), d'environ 30 km², pour l'implantation de l'installation souterraine, et des scénarios d'implantation des installations en surface (72).

Le choix des implantations des installations du centre de stockage Cigéo (surface et souterrain) résulte d'une démarche progressive menée depuis 2006 jusqu'à cette étape importante en 2009. Pour les définir, l'Andra a tenu compte de critères liés à la sûreté (cf. guide de sûreté de l'ASN de 2008 (19)) et à la nature de la couche géologique, mais aussi des vœux formulés par les populations et les élus locaux notamment en matière d'aménagement du territoire et d'insertion locale, en concertation notamment avec les parties prenantes de Meuse et de Haute-Marne.

La définition en 2009 de cette zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie pour l'installation fond et de scénarios d'implantation des installations en surface est une étape importante du développement de la conception du centre de stockage Cigéo.

Synthèse

Le 5 janvier 2010, l'ASN a rendu un avis au Ministre d'État, Ministre de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer et au Ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche sur le document de l'Andra concernant une proposition d'une zone pour l'implantation de l'installation souterraines et de scénarios pour l'implantation des installations de surface (72, 73). Dans son avis, l'ASN estimait que les critères retenus par l'Andra pour choisir la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) étaient pertinents et cohérents avec le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde de 2008 (19).

L'ASN a estimé que la localisation proposée par l'Andra pour la ZIRA était satisfaisante du point de vue de la sûreté et n'avait pas d'objection à la réalisation des travaux de reconnaissance prévus par l'Andra dans cette zone.

En 2010, après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et de la Commission nationale d'évaluation (CNE), le Gouvernement a validé ce choix (74). Depuis, les études et recherches se sont poursuivies et ont confirmé que la couche argileuse située dans la ZIRA est propice et répond aux critères pour l'installation du centre de stockage profond.

2.4.1.8 Accompagner le développement progressif de la conception du centre de stockage Cigéo en vue de la demande d'autorisation de création

À partir de 2006, l'Andra a poursuivi le développement de la conception, renforcé ses connaissances sur les caractéristiques et le comportement dans le temps des composants du stockage et du milieu géologique, notamment le Callovo-Oxfordien (48, 73), et mené les évaluations de sûreté associées.

Au fur et à mesure des avancées, l'ASN a également continué à rendre des avis sur les dossiers que l'Andra lui a remis.

Ainsi, en cohérence avec la proposition de la ZIRA pour l'implantation de l'installation souterraine et des scénarios d'implantation des installations de surface, dans le cadre des actions demandées par le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs qui encadre la mise en place des filières de gestion des matières et déchets radioactifs en France, l'Andra a remis un dossier dénommé « Jalon (ou Étape) 2009 » développant les premières options de conception, de réversibilité et de sûreté (75-77) et qui a fait l'objet de l'avis de l'ASN n° 2011-AV-129 du 26 juillet 2011 (78). Dans cet avis, l'ASN mentionne que l'Andra a *« développé depuis le dossier remis en 2005 (47) les principales dispositions de conception, de sûreté et de réversibilité permettant de maîtriser les risques pendant l'exploitation du stockage »*. L'ASN a par ailleurs souligné certains axes à préciser ou développer

concernant la maîtrise des risques en exploitation ou après fermeture du stockage, en vue d'une demande d'autorisation de création.

Sur la base de la validation par le gouvernement de la proposition de l'Andra pour la zone d'implantation de l'installation fond et du choix de deux zones d'implantation pour les installations de surface (74), l'un dite zone descenderie située en Haute-Marne et l'autre dite zone puits située en Meuse au droit de la zone d'implantation de l'installation souterraine, et de l'avis de l'ASN sur le dossier 2009 de l'Andra, en 2011, l'Andra a engagé la phase de conception industrielle du projet global Cigéo. Elle se déroule en plusieurs étapes clés dont une phase d'esquisse, une phase d'avant-projet-sommaire puis une phase d'avant-projet-détaillé, en vue de la future demande d'autorisation.

Entre 2011 et 2013, l'Andra a émis des dossiers intermédiaires qui ont fait l'objet d'instructions sous l'égide de l'ASN par son appui technique l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Ces dossiers portaient sur les données d'entrées et les premiers éléments de conception et de sûreté au stade de l'esquisse.

Suite à l'instruction techniques de ces dossiers, l'ASN a émis entre 2013 et 2014 des avis dans lesquels elle a pris position et formulé des demandes complémentaires à l'Andra en vue du dossier d'options de sûreté ainsi que pour la future demande d'autorisation de création (79-82).

Synthèse

Les itérations de sûreté en lien avec l'avancée du développement industriel de la conception du centre de stockage Cigéo et des études et recherches menées notamment au Laboratoire souterrain ont permis :

- de développer la conception du centre de stockage ;
- de conforter les acquis sur la couche de Callovo-oxfordien et le comportement du stockage ;
- de mener des évaluations de sûreté associées.

Et ainsi d'établir les options de sûreté constituant une étape clé vers la demande d'autorisation de création.

2.4.1.9 Soumettre le dossier d'options de sûreté -une étape clé vers la demande d'autorisation de création

Le 5 mai 2014, à la suite du débat public de 2013 sur le projet « Cigéo », le conseil d'administration de l'Andra a indiqué par délibération que *« l'Andra remettra à l'État un ensemble de documents constitué d'une proposition de plan directeur pour l'exploitation de Cigéo, du dossier d'options de sûreté et du dossier d'options techniques de récupérabilité pour préparer l'instruction de la demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo »* (62).

Le 19 décembre 2014, l'ASN a par ailleurs formulé ses attentes vis-à-vis des options de sûreté de Cigéo (63). Il est notamment mentionné que le dossier d'options de sûreté devra *« présenter explicitement les objectifs, concepts et principes retenus afin d'assurer la sûreté de l'installation en exploitation [..]. Ces demandes sont complétées […] par une liste détaillée des éléments nécessaires pour que l'instruction du dossier d'options de sûreté puisse être valablement menée. La création d'une installation nucléaire impose la réalisation d'un dossier « d'autorisation de création »* (DAC) visant à assurer la sûreté des installations au regard de l'environnement et de la santé humaine. Cette instruction s'inscrit dans le processus de conception de l'installation, de manière itérative (cf. Figure 2-41).

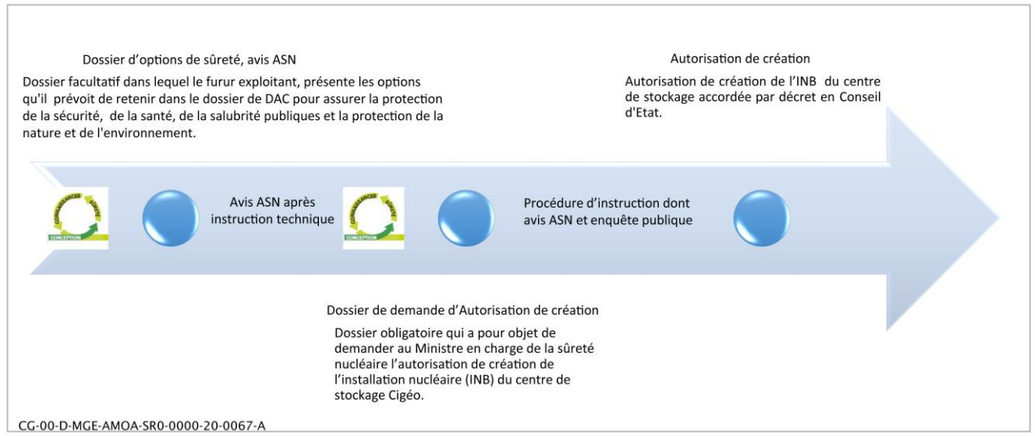


Figure 2-41 Du dossier d'options de sûreté vers l'autorisation de création de l'installation nucléaire (INB) du centre de stockage Cigéo

La réglementation n'impose pas la fourniture d'un dossier d'options de sûreté ni son contenu. Toutefois, celui-ci prépare la réalisation du « rapport préliminaire de sûreté » (RPrS), pièce réglementaire du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) exigée par l'article R. 593-18 du code de l'environnement.

L'Andra a remis en avril 2016 à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) un dossier d'options de sûreté (DOS) sur le projet de centre de stockage de déchets radioactifs pour les déchets de haute activité (HA) et moyenne activité à vie longue (MA-VL), Cigéo (64-67). L'Andra a estimé qu'il s'agissait d'une étape importante dans le développement progressif de la conception de Cigéo avant le dépôt de la demande d'autorisation de création.

La sûreté étant au cœur du projet porté par l'Andra, le DOS permet de stabiliser les grands principes, méthodes et choix de conception pour conduire la future démonstration de sûreté qui sera analysée par l'ASN dans le cadre de la demande d'autorisation de création.

Le DOS a fait l'objet d'une instruction approfondie par l'IRSN pilotée par l'ASN ainsi que d'un avis du groupe permanent d'experts pour les déchets. Il a également fait l'objet d'une revue internationale de pairs mandatée par l'ASN et pilotée par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Cette revue internationale a donné lieu à un avis au mois de novembre 2016 (83) qui souligne que *« le contenu du DOS et les discussions engagées au cours de la mission ont donné à l'équipe de revue une assurance raisonnable quant à la robustesse du concept de stockage »*.

Synthèse

L'avis définitif sur le « dossier d'options de sûreté- Cigéo » publié le 11 janvier 2018[100] (68), constitue la feuille de route de l'Andra jusqu'à la demande d'autorisation de création.

L'avis de l'ASN, qui est globalement positif, est une avancée importante pour le projet : « L'ASN estime que le projet a atteint globalement une maturité technologique satisfaisante au stade du dossier d'options de sûreté » et que « le dossier d'options de sûreté est documenté et étayé et constitue une avancée significative par rapport aux dossiers "argile 2005" (47) et jalon 2009" ». Dans son avis l'ASN a également présenté « les études et justifications complémentaires nécessaires à la demande d'autorisation de création ».

[100] Le rapport d'avis de l'ASN est disponible à l'adresse suivante https://www.asn.fr/Informer/Actualites/Avis-de-l-ASN-sur-les-options-de-surete-de-Cigeo (84).

Le dossier d'options de sûreté du centre de stockage Cigéo, le rapport de la revue internationale et l'avis de l'ASN ont été intégralement publiés par l'Andra (https://www.andra.fr/cigeo/les-documents-de-reference). Suite à l'avis 2020-79 de l'Autorité environnementale sur la présente étude d'impact, l'Andra a préparé une synthèse de ces options de sûreté du centre de stockage Cigéo dans le mémoire en réponse à l'avis de l'Autorité environnementale, annexe 1 de la pièce 8 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo.

L'ASN souligne qu'un grand nombre de sujets sont aujourd'hui maîtrisés, et en particulier indique que :

- l'Andra a acquis une connaissance détaillée du site de Meuse/Haute-Marne qui confirme la pertinence de la zone retenue pour l'implantation du stockage et constitue une base de qualité en appui de la démonstration de sûreté ;
- la qualité des études et la constitution d'un ensemble important de connaissances sur l'évolution du comportement des composants du stockage (colis et matériaux métalliques, cimentaires et argileux).

L'ASN estime également que l'inventaire des déchets susceptibles d'être stockés dans Cigéo est convenablement défini, et que le développement progressif de l'installation est un point positif.

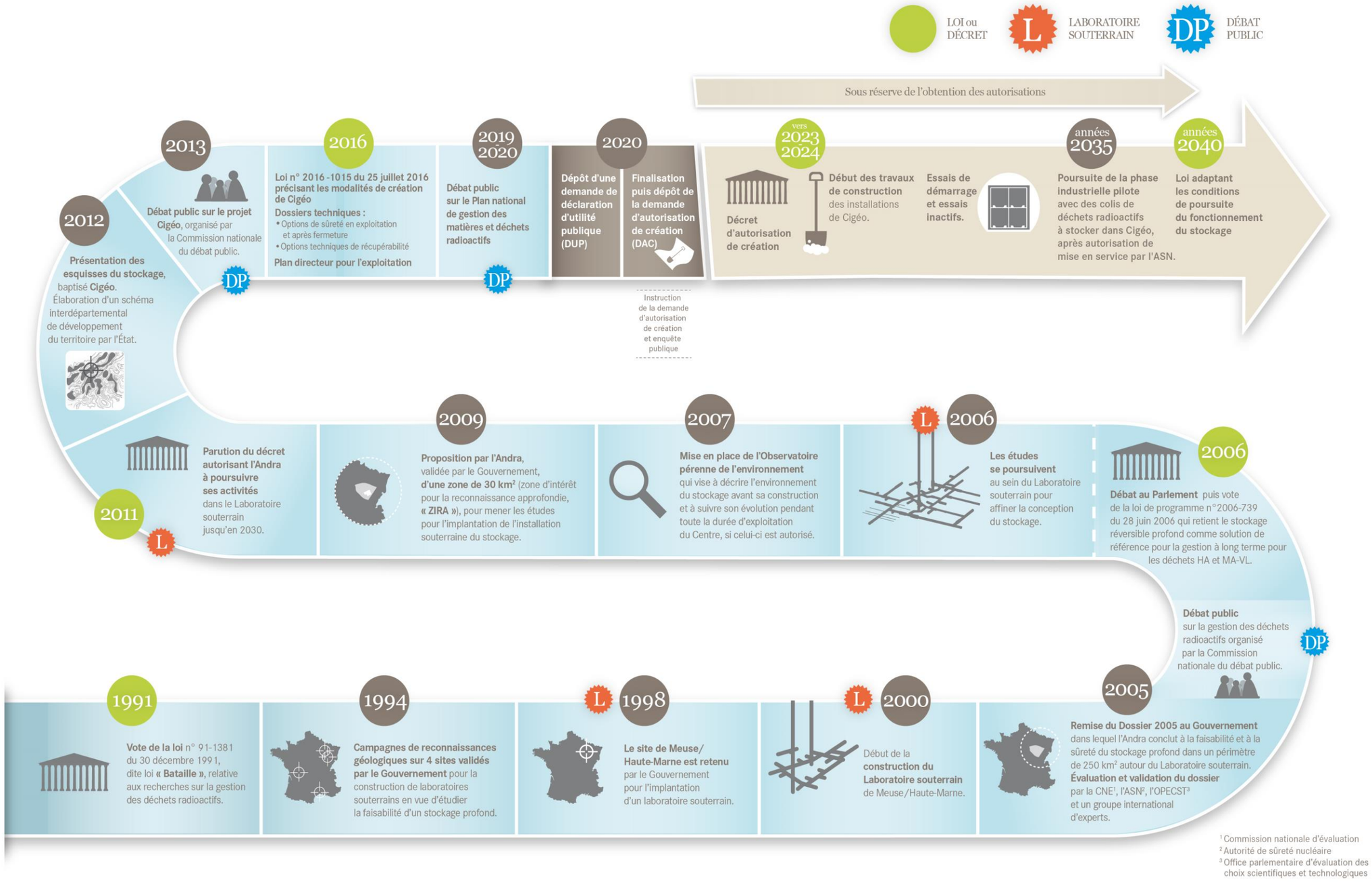
Enfin, l'ASN a identifié des sujets nécessitant une attention particulière et qui restent à approfondir et à compléter d'ici la demande d'autorisation :

- les déchets enrobés bitumés qui revêtent un caractère singulier par rapport aux autres déchets : l'ASN a demandé que des études complémentaires soient menées en vue d'une future prise de décision quant à leur gestion ;
- les éléments qui justifient les choix en matière d'architecture : à la fois les critères techniques (sûreté après fermeture et en exploitation, besoins de l'exploitation, sécurité, coût…), mais aussi les critères d'insertion territoriale ;
- la justification du dimensionnement de l'installation aux agressions notamment les différents éléments et arguments qui expliquent et justifient la manière dont les aléas ont été déterminés ;
- la surveillance de l'installation, en particulier l'approfondissement des principes de la stratégie de surveillance de l'installation ;
- la gestion des situations post-accidentelles.

Les points soulevés sont intégrés dans les études actuelles afin d'être en mesure d'y apporter les réponses nécessaires au moment de la demande d'autorisation de création.

2.4.1.10 Les itérations de sûreté à venir

La prochaine itération de sûreté constitue une étape clé dans le développement progressif du projet (cf. Figure 2-42) puisqu'elle supporte la demande d'autorisation de création.



CG-TE-D-MGE-AMOA-CM0-0000-18-0006-E

Figure 2-42 Le développement progressif du projet de centre de stockage Cigéo

La demande d'autorisation de création (DAC) s'appuiera sur tous les éléments déjà acquis lors des itérations de sûreté précédentes et s'attachera d'une part à conforter ces acquis et d'autre part à répondre aux demandes formulés dans l'avis de l'ASN de 2018 sur le DOS (68). Le rapport préliminaire de sûreté qui constitue une des pièces de la demande d'autorisation de création, reprendra les éléments des options de sûreté en répondant notamment aux demandes formulées par l'ASN dans son avis suite à l'instruction des options de sûreté. Il intègrera également les éléments de la nouvelle itération intégrant les réponses et les compléments apportés sur la conception, les connaissances acquises depuis 2015 et l'évaluation de la sûreté associée. Le niveau de détail sera en lien avec le développement progressif du centre de stockage Cigéo, notamment la mise en service progressive de son installation souterraine.

Conformément à la règlementation, en particulier au code de l'environnement (articles R. 593-22 à R. 593-26), le dossier de demande d'autorisation de création (DAC), notamment le rapport préliminaire de sûreté fera l'objet d'une instruction par l'Autorité de sûreté nucléaire.

À l'issue du processus d'instruction selon les principes érigés dans le code de l'environnement, si l'autorisation de création de l'installation est délivrée, celle-ci sera prise par décret au Conseil d'État après avis de l'ASN. Dans ce décret, des prescriptions relatives à la conception, à la construction ou à l'exploitation de l'installation pourront être édictées.

Ensuite, et préalablement à la première prise en charge et mise en stockage de colis de déchets radioactifs, l'Andra constituera un nouveau dossier comprenant les compléments apportés du point de vue de la sûreté notamment sur la base du retour d'expérience de la construction et des avancées sur la conception. Ce dossier sera soumis de nouveau à l'autorité de sûreté nucléaire afin d'obtenir l'autorisation de mise en service de l'installation.

Par ailleurs, tous les dix ans, l'Andra devra procéder au réexamen périodique de son installation, en prenant en compte les meilleures pratiques internationales. Ce réexamen, instruit par l'ASN, devra permettre d'apprécier la situation de l'installation au regard des règles qui lui sont applicables et d'actualiser l'appréciation des risques ou inconvénients que l'installation présente, en tenant compte notamment de l'état de l'installation, de l'expérience acquise au cours de l'exploitation, de l'évolution des connaissances et des règles applicables aux installations similaires.

2.4.2 Un centre de stockage sûr après sa fermeture et sur le long terme

Après la fermeture définitive de l'installation, la sûreté est assurée de façon passive. Cela signifie que les personnes et l'environnement sont protégés des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir.

Eu égard à la dangerosité des déchets HA et MA-VL sur des échelles de temps allant au-delà de plusieurs milliers d'années, la protection des personnes et de l'environnement sur ces échelles de temps constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde.

Le guide de sûreté de l'ASN de 2008 (19) stipule que :

- *« La protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Elle doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques. »* ;
- *« Après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance ou d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée. »* ;
- *« En conséquence, le milieu géologique est choisi et l'installation de stockage est conçue de telle sorte que sa sûreté après fermeture soit assurée de façon passive afin de protéger les personnes et l'environnement des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir. »* ;
- *« A cet égard, le concept retenu pour le stockage devra permettre de maintenir l'impact radiologique au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre compte tenu de la connaissance scientifique acquise, de l'état des techniques, et des facteurs économiques et sociaux ».*

La démarche de sûreté après fermeture, comme en phase d'exploitation, s'appuie sur le principe de défense en profondeur pour les installations nucléaires (cf. Chapitre 2.4.3 du présent volume de l'étude d'impact). Après la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo, ce principe se traduit par l'identification de fonctions de sûreté et la mise en place de lignes de défenses pour assurer ces fonctions.

Les fonctions de sûreté après fermeture visent la protection à long terme de l'homme et de l'environnement. Les lignes de défense sont constituées de dispositifs passifs. Il s'agit, en particulier de la couche de Callovo-Oxfordien de la zone d'implantation des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo.

La couche de Callovo-Oxfordien joue en effet un rôle central à long terme pour assurer la protection de l'homme sur des échelles de temps qui vont au-delà de centaines de milliers d'années. Les composants ouvragés comme les scellements des puits et des descenderies ainsi que l'architecture même du stockage permettent de compléter cette ligne de défense et d'assurer la robustesse du stockage. Compte tenu de la dangerosité de déchets HA et MA-VL sur des temps très longs (cf. Chapitre 1.3 du présent volume de l'étude d'impact), les risques sur le long terme sont classés en deux grandes catégories :

- le risque de mise en contact direct des déchets avec l'homme et l'environnement ;
- le risque, une fois les colis de déchets stockés, de dissémination des radionucléides et des substances chimiques toxiques relâchés par ces colis vers la surface.

La démarche de sûreté consiste donc à mettre en place d'une part des dispositions pour isoler des déchets radioactifs HA et MA-VL des phénomènes de surface et d'autre part des actions humaines sur le long terme.

Une fois les déchets stockés, l'eau est le principal facteur d'altération des colis de déchets et le principal vecteur de la migration des radionucléides et des substances chimiques toxiques vers la surface. La démarche de sûreté consiste d'autre part à rechercher des dispositions pour limiter la migration des radionucléides et substances chimiques toxiques vers la surface pour :

- s'opposer à la circulation d'eau ;
- limiter le relâchement des radionucléides et substances toxiques chimiques, et les immobiliser dans le stockage ;
- retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques qui auraient été relâchés hors des colis puis des alvéoles de stockage vers la surface.

Les dispositions assurant la sûreté du stockage après fermeture sont synthétisées ci-après.

2.4.2.1 Isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines sur le long terme

L'implantation des ouvrages souterrains de la ZIOS à une profondeur d'environ 500 m (cf. 4.3.5 du présent document) isole les déchets HA et MA-VL des aléas naturels de surface (pluie, tornade …) et plus particulièrement de l'érosion qui n'affecte, à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur de terrain inférieure à 200 m, (le guide de sûreté de l'ASN de 2008 (10) mentionne que « *l'épaisseur de la zone superficielle pouvant être ainsi perturbée est a priori de l'ordre de 200 mètres* ». La profondeur d'implantation permet également de préserver le stockage de toute activité humaine susceptible de survenir à la surface (chantiers, destruction, pillage, agressions…).

La couche de Callovo-Oxfordien est stable depuis 160 millions d'années, située dans une zone, le Bassin parisien reconnu comme très peu sismique, et localisée à une profondeur d'environ 500 m, soit bien supérieure à celle de l'érosion possible à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années (inférieure à 200 m) ; elle protège ainsi le stockage des phénomènes d'évolution géodynamique (tectonique, climat, érosion) sur le prochain million d'années et en limite les effets potentiels sur le stockage.

L'Andra développe des dispositifs qui visent un maintien de la mémoire du stockage afin d'éviter le plus longtemps possible l'oubli de l'existence du centre de stockage et ainsi limiter le risque de toute intrusion dans le stockage (cf. Figure 2-43). En complément, l'Andra travaille à développer des dispositifs pour favoriser la transmission intergénérationnelle des connaissances des déchets radioactifs et de leur lieu de stockage, considérant ces connaissances comme un patrimoine collectif et mémoriel de ce que notre civilisation a créé. Par ailleurs, compte tenu de la profondeur du stockage, même en cas d'oubli de l'existence du stockage, cette l'intrusion se limite à

des forages à grandes profondeur de diamètre limité (cf. Chapitre 18.2 du volume IV de la présente étude d'impact).

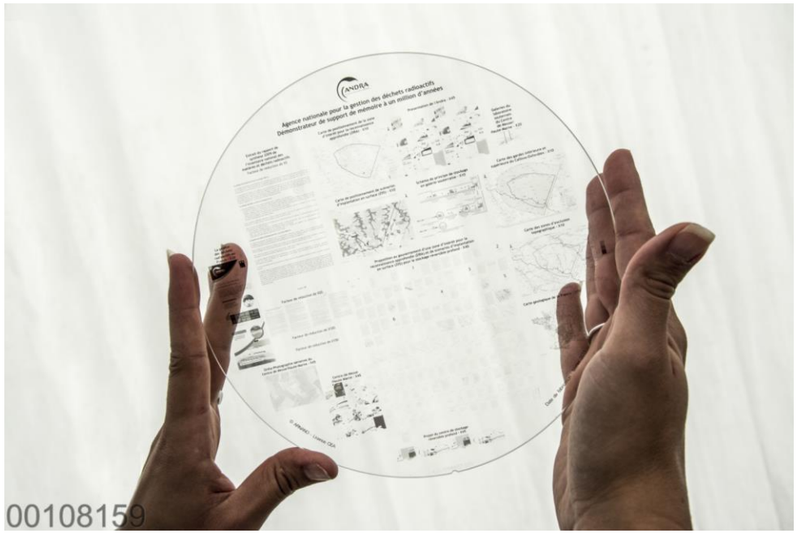


Figure 2-43 Disque saphir étudié comme support de la mémoire à long terme

2.4.2.2 S'opposer à la circulation d'eau

Le choix d'implantation des ouvrages dans une couche argileuse de perméabilité très faible à l'eau (entre quelques 10^{-14} à 10^{-13} m/s) et les faibles gradients hydrauliques verticaux de cette couche permettent de limiter fortement les flux d'eau au sein même de la couche.

Les caractéristiques hydrauliques de la couche du Callovo-Oxfordien (faible perméabilité, très peu de circulation d'eau…) où sont implantés les puits contribuent par ailleurs à limiter les éventuelles circulations d'eau au sein du stockage entre ces ouvrages.

En complément, le choix de regroupement des puits et de la base des descenderies dans une même zone d'emprise dans le Callovo-Oxfordien limite fortement les circulations d'eau au sein du stockage[101], plus particulièrement au niveau des quartiers de stockage (cf. Figure 2-44).

Enfin, chaque quartier de stockage est borgne par rapport au reste de l'installation souterraine. En effet, les accès à chaque quartier de stockage sont peu nombreux et regroupés (cf. Figure 2-44) évitant une circulation en « U ». Par ailleurs, le flux d'eau drainé vers les liaisons surface-fond dans chaque quartier se limite ainsi à celui venant de la couche du Callovo-Oxfordien ; il est de plus très faible du fait notamment de sa faible perméabilité.

[101] Circulation préférentielle en U entre les ouvrages de liaison surface-fond.

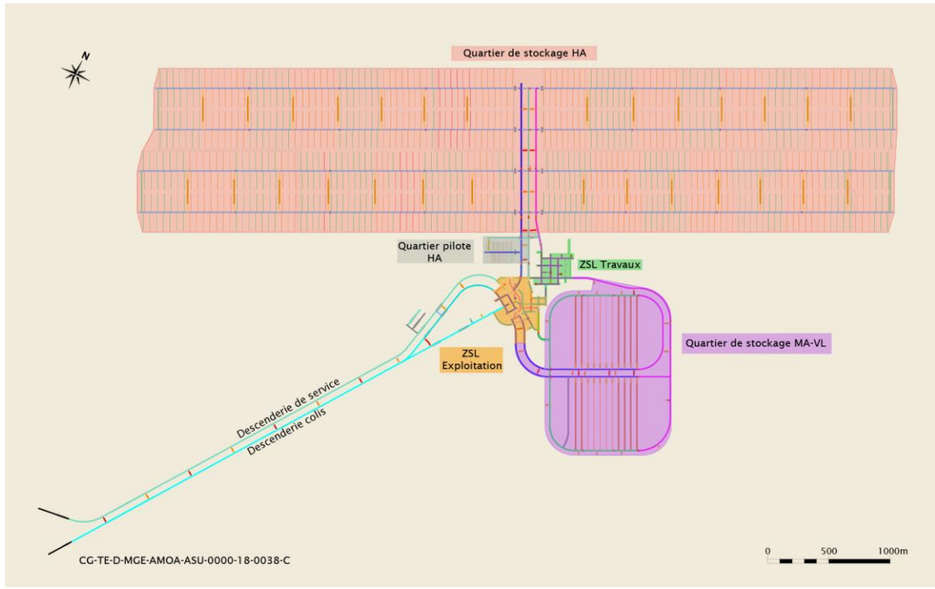


Figure 2-44 Illustration des quartiers HA et MA-VL, séparés et borgnes

Les scellements mis en place s'opposent à la circulation d'eau par les ouvrages souterrains. De par leur position spécifique en sortie du stockage, les scellements des puits et des descenderies limitent les éventuelles arrivées d'eau issues des formations encaissantes au-dessus de la couche du Callovo-Oxfordien. Ils contribuent à limiter les flux d'eau au sein du stockage en particulier vers les alvéoles de stockage des déchets HA et MA-VL. Ce rôle est conforme au guide de sûreté de l'ASN de 2008 (19) qui indique que : « *Les liaisons jour-fond et éventuellement certaines galeries et certains ouvrages de l'installation de stockage devront faire l'objet de scellements assurant une étanchéité de qualité spécifiée. Cette préoccupation doit être intégrée dès leur conception* ».

2.4.2.3 Limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, et les immobiliser dans le stockage

Le colis de stockage de déchets radioactifs puis la couche du Callovo-Oxfordien permettent de confiner les éléments radioactifs et les substances chimiques toxiques contenus dans les déchets. Dans un premier temps, ce sont les matériaux utilisés pour conditionner les déchets qui permettent d'immobiliser pendant un certain temps les éléments radioactifs dans les colis déchets. À titre illustratif, le conteneur de stockage du colis de stockage HA (cf. Figure 2-45) de par sa nature en acier empêche l'arrivée d'eau sur la matrice de déchets vitrifiés aussi longtemps qu'il conserve son étanchéité à l'eau. Puis, la limitation du relâchement des éléments radioactifs contenus dans les déchets vitrifiés HA repose sur une faible vitesse d'altération du verre nucléaire, liée à ses caractéristiques intrinsèques (cf. Chapitre 1.3 du présent volume de l'étude d'impact) et des bonnes conditions physico-chimiques d'environnement.



Figure 2-45 Illustration des composants d'un colis de stockage HA

La durée pendant laquelle le conteneur assure sa fonction, correspond à une première période après fermeture de l'ordre de quelques centaines d'années. Cette période permet notamment de mobiliser les caractéristiques de la couche du Callovo-Oxfordien et de la matrice de verre dans des conditions thermiques correspondant à une bonne connaissance du comportement des éléments radioactifs en température et à une faible dissolution de la matrice verre du fait de la présence d'eau.

Avec le temps, les colis de déchets se dégradent progressivement. Le choix des composants ouvragés du stockage et la composition chimique de l'eau de la couche du Callovo-Oxfordien contenue dans ses pores favorisent alors la précipitation de la majorité des éléments radioactifs des déchets HA et MA-VL peu solubles.

2.4.2.4 Retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques qui auraient été relâchés vers la surface

Une fois les éléments radioactifs relâchés par les colis, ils peuvent migrer vers la surface. Deux voies de migration sont possibles :

- une migration par la couche de Callovo-Oxfordien ;
- une migration par les ouvrages souterrains.

L'Andra retient des dispositions en matière d'architecture et de positionnement dans la couche du Callovo-Oxfordien pour que la migration des éléments radioactifs et des substances chimiques toxiques se fasse préférentiellement par la couche de Callovo-Oxfordien et ainsi profiter de ses caractéristiques favorables :

- l'épaisseur d'au moins 140 m de la couche de Callovo-Oxfordien au niveau de la ZIOS[102] (cf. Figure 2-46) et l'organisation des ouvrages souterrains dans cette couche, permet de disposer au-dessus et en-dessous d'épaisseurs de cette couche d'au moins 50 m ;
- cette épaisseur associée à de faibles coefficients de diffusion de l'eau dans la couche de Callovo-Oxfordien conduit à des temps de migration des éléments radioactifs supérieurs à la centaine de milliers d'années favorisant ainsi la décroissance radioactive d'une grande partie de ces éléments avant qu'ils n'atteignent la sortie de la couche (exemple du césium 137, de l'américium 241, du plutonium 239…).

[102] La couche de Callovo-Oxfordien est d'épaisseur au moins égale à 120 mètres sur la zone de transposition (environ 250 km²). Au niveau de la ZIOS, son épaisseur varie entre environ 140 et 160 mètres.

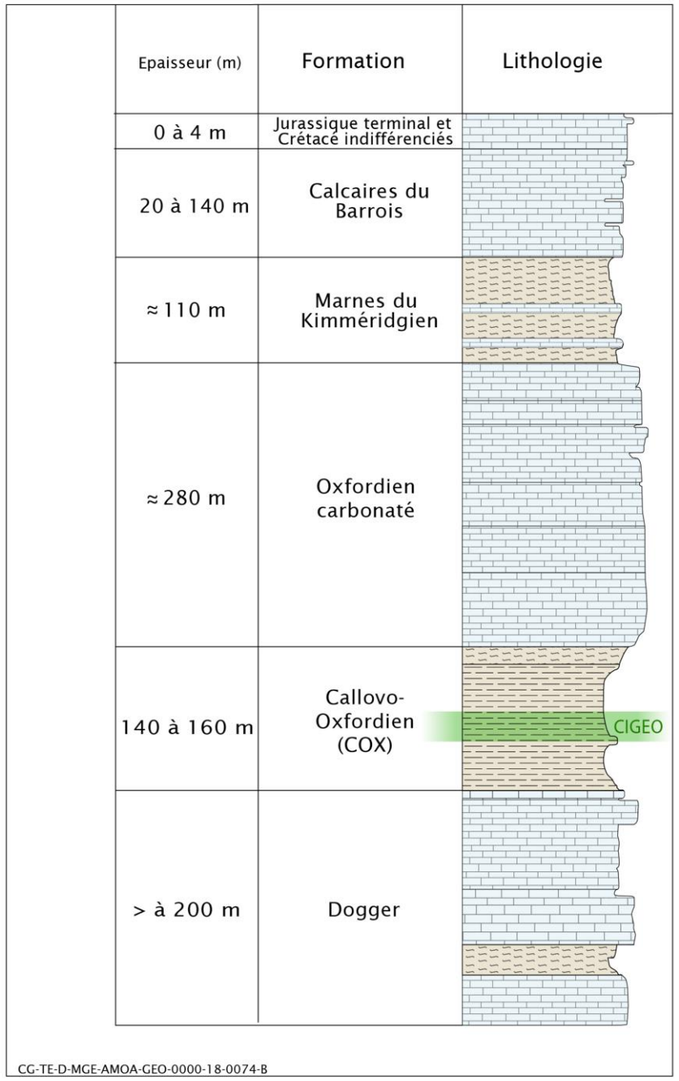


Figure 2-46 Ordre de grandeur de l'épaisseur de la couche de Callovo-Oxfordien dans la ZIOS

Les propriétés favorables de diffusion de la couche du Callovo-Oxfordien permettent d'étaler dans le temps la migration des éléments radioactifs (cf. Figure 2-47). Par ailleurs, la composition chimique de l'eau de la couche du Callovo-Oxfordien favorise la précipitation des éléments peu solubles ainsi que leur rétention (par exemple l'uranium, l'américium…).

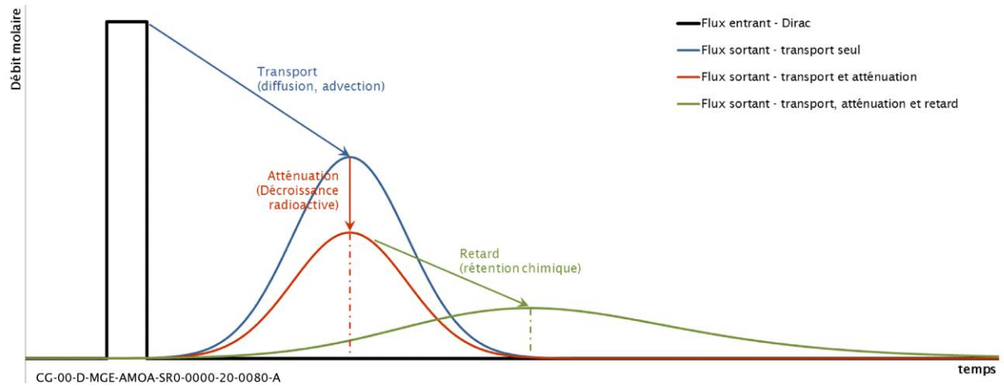


Figure 2-47 *Schéma illustrant les processus de décroissance, atténuation et retard des radionucléides vis-à-vis de leur migration dans le temps*

Les dispositions retenues pour s'opposer à la circulation de l'eau (cf. Chapitre 2.4.2.2 du présent volume de l'étude d'impact) ont également un effet positif sur la répartition de la migration des solutés entre la couche de Callovo-Oxfordien et les ouvrages souterrains. Ainsi, la couche de Callovo-Oxfordien reste la voie principale de migration des éléments radioactifs et des substances chimiques toxiques (cf. Chapitre 18.2 du volume IV de la présente étude d'impact).

À titre illustratif, pour les radionucléides mobiles à vie longue, comme l'^{129}I (cf. Figure 2-48), à un million d'années :

- (a) environ 80 % de leur inventaire initial reste dans le stockage et la couche du Callovo-Oxfordien, les 20 % restant ont atteint les extrémités de la couche du Callovo-Oxfordien de manière symétrique du fait d'une migration par diffusion (11 % vers l'Oxfordien et 11 % vers le Dogger) ;
- (b) la voie de transfert par les liaisons surface/fond est très faible avec moins de 0,1 % de l'inventaire initial transitant par ces ouvrages ;
- (c) et enfin, après transfert dans les formations sus et sous-jacentes de la couche du Callovo-Oxfordien, les quantités arrivant aux exutoires du Dogger et du Barrois représentent respectivement 9 % et moins d'1 millième de % de l'inventaire initial.

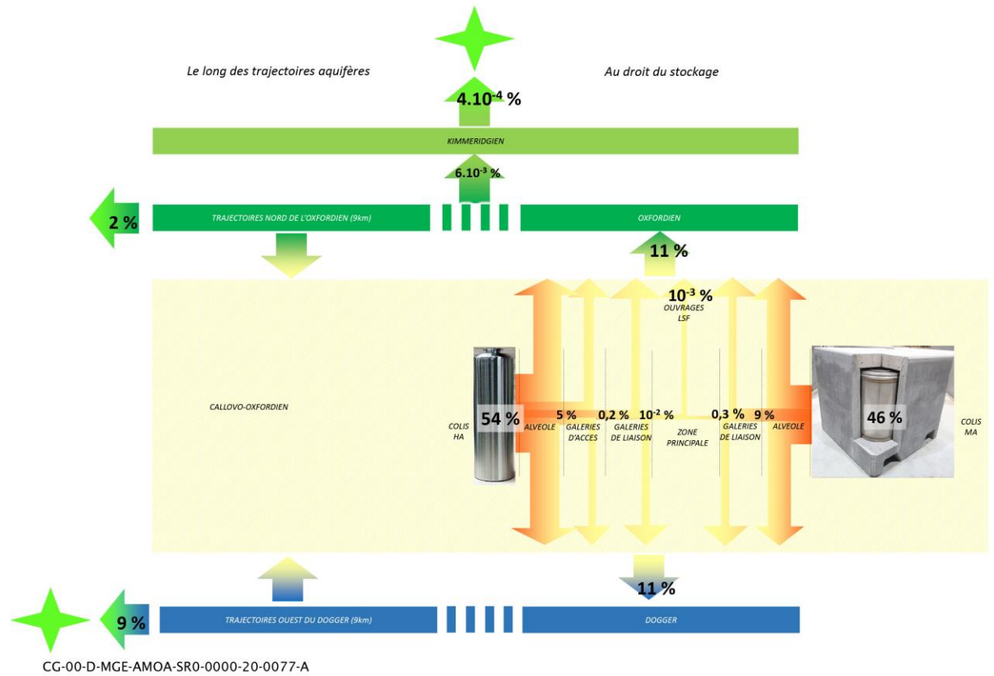


Figure 2-48 *Illustration des atténuations apportées par les différents composants du stockage et son environnement en évolution normale*

Compte tenu de la diversité des caractéristiques physico-chimiques des déchets, cela conduit à rechercher une indépendance de comportement physico-chimiques entre les quartiers de stockage et, au sein de chaque quartier, entre certains alvéoles contenant des déchets de natures différentes :

- sur l'aspect thermique :
  - ✓ pour les déchets exothermiques, la limitation des températures maximales permet de maintenir le stockage et son environnement géologique dans un domaine de température préservant les propriétés de la couche du Callovo-Oxfordien et de rester dans un domaine de température permettant de maitriser les phénomènes physiques et chimiques mis en jeu. Cela est permis par des choix de conception, notamment par une organisation des alvéoles de stockage (entraxe) visant à garantir une température maximale pour la couche du Callovo-Oxfordien inférieure à 90 °C (intégrant une marge de 10 °C vis-à-vis de la limite maximale de 100 °C) ;
  - ✓ le choix d'une zone de stockage pour les déchets HA fortement exothermiques (déchets HA1/HA2) implantée au nord de la ZIOS, d'une zone de stockage spécifique pour les déchets MA-VL, non ou faiblement exothermiques, au sud-est de la ZIOS, et d'un quartier dédié au stockage des déchets HA moyennement exothermiques (déchets HA0), limite l'interaction thermique entre ces différents à quelques degrés Celsius au maximum.
- sur l'aspect chimique :
  - ✓ la limitation des perturbations chimiques au sein d'un alvéole et entre alvéoles de stockage est gérée par des dispositions de conception restrictives en matière de co-stockage (colis de déchets sans interactions chimiques significatives placés dans un même alvéole, distances minimales entre des alvéoles contenant des types de déchets différents susceptibles d'interagir entre eux).
- sur l'aspect mécanique :
  - ✓ des distances minimales entre les ouvrages, en particulier entre les alvéoles adjacentes au sein d'une même zone de stockage (par exemple environ 50 m entre alvéoles de déchets MA-VL).

Synthèse

Après la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo, l'objectif fondamental est la protection à long terme des personnes et l'environnement contre les risques liés à la dissémination des éléments radioactifs et des substances chimiques toxiques, contenus dans les déchets HA et MA-VL.

Pour cela, les dispositions passives après la fermeture définitive du centre du stockage visent d'une part à isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines et d'autre part à limiter le transfert jusqu'à la biosphère des éléments radioactifs et des substances chimiques toxiques potentiellement relâchés par les déchets.

De par ses caractéristiques géométriques et physico-chimiques intrinsèques (profondeur, épaisseur, faible perméabilité, capacité de rétention élevée, faibles coefficients de diffusion...), la couche du Callovo-Oxfordien dans laquelle sont implantés les ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo, est une ligne de défense robuste pour assurer la sûreté passive après fermeture et à très long terme.

En termes de conception du centre de stockage, les lignes de défense complémentaires tirent parti des performances favorables de la couche du Callovo-Oxfordien :

- une architecture générale de l'installation souterraine, notamment la disposition et l'organisation des quartiers de stockage, qui limite les écoulements dans le stockage en mobilisant préférentiellement les transferts dans la couche du Callovo-Oxfordien ;
- un stockage plan qui favorise des épaisseurs importantes, au-dessus et en dessous du stockage, de la couche du Callovo-Oxfordien ;
- les scellements des puits et des descenderies qui contribuent à la robustesse du stockage.

2.4.3 Un centre de stockage Cigéo sûr en phase de fonctionnement

L'article L. 591-1 du code de l'environnement définit la sûreté nucléaire comme étant « l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base, ainsi qu'au transport des substances radioactives, prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets ».

La démarche de sûreté repose sur la mise en œuvre du principe de défense en profondeur.

» LE PRINCIPE DE DÉFENSE EN PROFONDEUR

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

L'analyse des risques conduit à définir les dispositions techniques et organisationnelles permettant d'en assurer leur maitrise (dispositions de prévention, de protection, de limitation des conséquences), selon ce principe de défense en profondeur.

Les risques associés au centre de stockage Cigéo, sont classés selon trois grandes catégories en fonction de leur nature et de leur origine :

- les risques dits « nucléaires ». Ce sont les risques d'événements liés à la présence d'éléments radioactifs au sein des colis de déchets radioactifs ;
- les risques d'agressions dites « interne ». Ce sont les risques d'événements non nucléaires liés à la construction et au fonctionnement des équipements et installations. Ce sont les risques propres aux sources de dangers présentes et aux activités réalisées (par exemple, une chute lors de la manutention ou un incendie de substances dangereuses) ;
- les risques d'agressions dites « externes ». Ce sont les risques d'événement non nucléaires, naturel ou anthropiques, survenant à l'extérieur des équipements et installations (par exemple, un séisme ou une chute d'avion).

Les risques d'actes malveillants (d'origine interne ou externe) sont également étudiés. Des dispositions sont prises pour éviter les tentatives de sabotage, de vol, de perte ou de détournement de matières radioactives, aussi bien en menace interne qu'en menace externe. Vis-à-vis de ces menaces, la protection est réalisée au travers de dispositions qui répondent également aux principes de la défense en profondeur et qui visent à :

- prévenir les actions malveillantes en soumettant le transport et les installations à une surveillance permanente avec des dispositions diversifiées dont certaines sont visibles, et d'autres à caractère confidentiel sont invisibles ;
- protéger physiquement le transport et les installations vis-à-vis des différentes menaces auxquelles ils peuvent être confrontés par des dispositions spécifiques visant à maintenir à l'extérieur des zones sensibles les agresseurs potentiels.

Sur le plan documentaire, la protection des transports, des installations et des populations contre les actes de malveillance ou leurs conséquences fait l'objet de dossiers spécifiques décrivant les dispositions prises en compte et sont soumis à l'avis des autorités compétentes. Pour ne pas nuire à l'efficacité des moyens et des dispositions, ces éléments sont classifiés ou protégés du fait des informations qu'ils contiennent et ne peuvent pas être présentés dans l'étude d'impact.

L'analyse détaillée des risques et les dispositions mises en œuvre pour les maîtriser sont présentées dans le cadre des études de sûreté. Ces études sont mises à jour à chaque étape de la conception du projet et tout au long de ses phases de vie ensuite. Une première restitution de cette étude est présentée dans le dossier d'options de sûreté du centre de stockage Cigéo (64) et sera complétée et étayée pour le dossier de demande d'autorisation de création (DAC).

2.4.3.1 Les risques dits « nucléaires », liés à la présence d'éléments radioactifs

Les éléments radioactifs présents dans les colis de déchets peuvent présenter des risques d'exposition aux rayonnement ionisants, de dispersion d'éléments radioactifs, de criticité (réactions nucléaires en chaine), d'échauffement lié au dégagement de chaleur et de formation d'atmosphère explosive liée à la production de gaz de radiolyse ou de corrosion.

Le centre de stockage Cigéo acceptera uniquement des colis respectant l'ensemble des critères permettant de s'assurer de la sûreté de leur stockage.

Au préalable, les producteurs doivent soumettre à l'Andra une demande d'acceptation pour que leurs colis de déchets puissent être réceptionnés sur le centre de stockage Cigéo. Cette demande doit comporter la démonstration que ces colis primaires respectent les critères techniques, appelés « spécifications d'acceptation ». Ces critères techniques sont définis par l'Andra en cohérence avec les exigences opérationnelles et les exigences de sûreté du stockage. Ils portent notamment sur les caractéristiques et propriétés radiologiques, physiques, mécaniques et chimiques du colis. Les spécifications d'acceptation font l'objet d'un accord préalable à leur application par l'Autorité de sûreté nucléaire (arrêté du 13 juin 2017 portant homologation de la décision n° 2017-DC-0587 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 23 mars 2017 relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage (82)).

Ainsi, les colis de déchets ne seront acceptés sur le centre de stockage qu'après un processus permettant de s'assurer du respect de ces critères. Ce processus, dit « d'acceptabilité », comprend en particulier la vérification des documents de justification apportés par le producteur sur la conformité des colis aux spécifications

d'acceptation. Par ailleurs, l'Andra exerce des actions de surveillance régulières et périodiques (audits, inspections, visites techniques…) sur les sites de production et d'entreposage des colis de déchets des producteurs. Ces actions visent notamment à conforter la confiance de l'Andra quant à la qualité des colis fabriqués et au respect des dispositions prévues par le producteur pour assurer la conformité de leurs colis aux spécifications d'acceptation. Ces actions viennent en complément des actions de surveillance propres que chaque producteur met en place pour garantir la qualité de ses colis.

Les colis primaires de déchets ne pourront donc être expédiés par les producteurs vers le centre de stockage Cigéo qu'après accord de l'Andra.

Ils feront l'objet de contrôles à leur réception sur le centre de stockage. Ces contrôles sont systématiques et sont de deux natures :

- un contrôle « documentaire » du dossier fourni par le producteur et accompagnant le colis depuis son site d'expédition et du numéro d'identification du colis ;
- un contrôle « physique » au déchargement sur le Centre de stockage Cigéo afin de vérifier le respect des critères techniques spécifiés du colis. Ces contrôles sont associés à des critères radiologiques, comme des mesures du débit de dose au contact et à 2 m, des mesures de contamination surfacique, et à des critères physiques de dimensions, de masse…

En complément, des contrôles, non systématiques mais approfondis (appelés « contrôles hors flux ») sont effectués. Ces contrôles permettent en particulier de vérifier la qualité des conteneurs et la nature des déchets contenus. Les dispositifs techniques qui seront utilisés pour ces contrôles ne sont pas encore choisis. Ils feront l'objet de développements technologiques jusqu'à la mise en service du centre de stockage et pourront continuer de progresser au-delà. À titre d'exemple, la radiographie X très haute énergie (cf. Figure 2-49) peut être utilisée pour contrôler le contenu de colis de déchets radioactifs.



Figure 2-49 Photographie d'une radiographie très haute énergie d'un colis contenant un fût de déchets technologiques placé dans un conteneur en béton

En cas d'écart constaté à un ou plusieurs critères techniques spécifiés par l'Andra, le colis ou les colis incriminés font l'objet, conformément à la réglementation, d'une analyse par l'Andra de l'assurance que les caractéristiques et les propriétés de ce/ces colis de déchets radioactifs en écart restent acceptables notamment vis-à-vis de de la démonstration de sûreté et de l'impact sur l'environnement. Selon le résultat de l'analyse, plusieurs possibilités de gestion sont envisagées : le renvoi du colis sur le site producteur pour remise en conformité, la remise en conformité du colis sur le centre de stockage Cigéo ou la mise en stockage du colis avec des précautions éventuelles en fonction du type d'écart.

a) Le risque d'exposition aux rayonnements ionisants

L'exposition aux rayonnements ionisants concerne principalement les personnes qui peuvent se trouver à proximité des colis de déchets (principalement les travailleurs).

Vis-à-vis de ce risque, des protections radiologiques sont placées entre les termes sources radiologiques (les colis de déchets radioactifs) et les personnes (les travailleurs et le public). Ces protections sont adaptées au type de rayonnement que les éléments radioactifs émettent (cf. Chapitre 1.1 du présent document).

Les emballages et moyens de transport sur la voie publique sont conçus pour respecter des critères de protection vis-à-vis des rayonnements ionisants, notamment :

- la contamination des surfaces accessibles de l'emballage de transport et du moyen de transport ne doit pas dépasser 4 $Bq.cm^{-2}$ pour les éléments radioactifs émetteurs bêta et gamma et 0,4 $Bq.cm^{-2}$ pour les éléments radioactifs émetteurs alpha ;
- l'intensité de rayonnement maximale en tout point de la surface extérieure du moyen de transport ne doit pas dépasser 2 $mSv.h^{-1}$ et elle ne doit pas dépasser 0,1 $mSv.h^{-1}$ à une distance de 2 m de l'emballage.

La conception des emballages permet de respecter ces seuils et ainsi de limiter l'exposition des travailleurs et du public, même sur une durée prolongée à proximité (cf. Figure 2-50).



Figure 2-50 Photos d'emballages de transport sur train

Les opérations de manutention réalisées directement sur les colis primaires (déchargement des emballages de transport, confection des colis de stockage…) ou sur les colis de stockage (transfert et mise en alvéole de stockage…) sont automatisées et supervisées à distance depuis une salle de conduite centralisée (cf. Figure 2-51).



Figure 2-51 Photo d'une salle de conduite centralisée

Les protections radiologiques sont intégrées au génie civil (murs des bâtiments et ouvrages) et aux équipements (emballages de transport, portes et hottes blindées, façades d'accostage des alvéoles de stockage de déchets MA-VL, bouchons de radioprotection au niveau des alvéoles de stockage des déchets HA…).

Par ailleurs, des balises et dispositifs de mesure d'ambiance (Débit De Dose et contamination dans l'air) sont présents dans l'ensemble de ces zones et couplés avec des alarmes (visuelle, sonore) permettant de prévenir le personnel d'une situation anormale et de les faire évacuer. Il est à noter que les accès aux cellules et locaux contenant des colis de déchets radioactifs ne sont pas possibles (mécaniquement maintenus fermés).

b) Le risque de dispersion d'éléments radioactifs

Afin d'éviter la dispersion d'éléments radioactifs, les colis de déchets radioactifs sont conditionnés préalablement à leur transport. Ils ne subissent aucune transformation dans les installations du centre de stockage Cigéo : ils seront uniquement sortis de l'emballage de transport puis positionnés dans un conteneur de stockage pour leur transfert vers les alvéoles de stockage. À chaque étape, ils sont contrôlés afin de vérifier l'absence de présence de contamination radioactive.

En fonctionnement normal, c'est-à-dire en l'absence d'incident, seuls les gaz issus de certains colis de déchets MA-VL ou une remise en suspension d'éléments radioactifs potentiellement présents en surface des colis (contamination surfacique labile) peuvent être à l'origine d'une dispersion. Afin de la limiter, la contamination surfacique labile des colis de déchets radioactifs est limitée au sein des installations du centre de stockage Cigéo à 4 $Bq.cm^{-2}$ en radionucléides émetteurs beta/gamma et 0,4 $Bq.cm^{-2}$ en radionucléides émetteurs alpha (application des critères adoptés par la réglementation française en matière de contamination des systèmes de transport) et contrôlée régulièrement au cours des différentes étapes de manutention.

La maîtrise du risque de dispersion des éléments radioactifs consiste à interposer différentes protections, appelées « barrières de confinement » entre l'environnement et les éléments radioactifs (conformément à l'article 3.4 de l'arrêté du 7 février 2012 (85). Ces barrières sont constituées des enveloppes des colis de déchets et des locaux ou zones dans lesquels ils peuvent être présents (emballages de transport, cellules blindées, hottes de transfert (cf. Figure 2-52), alvéoles de stockage). Une ventilation nucléaire (pour les cellules et les alvéoles de stockage), équipée de filtres à très haute efficacité (THE) permettant de retenir plus de 99 % des aérosols radioactifs, vient compléter ces barrières.

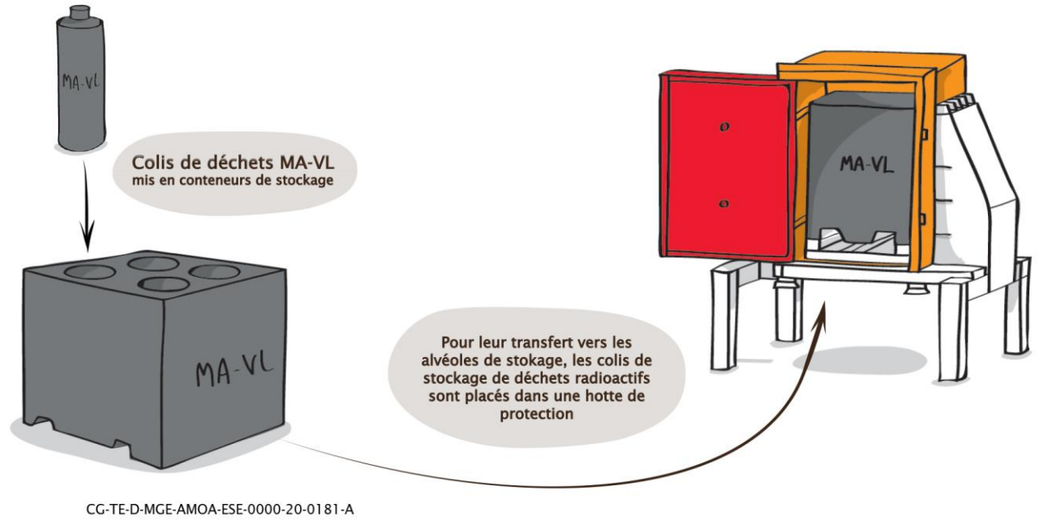


Figure 2-52 Illustration de colis de stockage déchets radioactifs MA-VL placés en hotte pour leur transfert vers les alvéoles de stockage

Une mesure de la dose ambiante dans les zones contenant des colis de déchets radioactifs est assurée en permanence par des balises atmosphériques de radioprotection couplées avec des alarmes (visuelle, sonore) permettant de prévenir le personnel d'une situation anormale.

Les gaz et les éléments radioactifs issus de la contamination surfacique labile qui peuvent passer au travers de la filtration sont canalisés, mesurés et rejetés via un émissaire, appelé « cheminée ». Ces rejets et leurs incidences sont présentés au chapitre 3 du volume VI de la présente étude d'impact. Ces incidences sont très faibles, avec une exposition humaine inférieure au µSv, soit 1 000 fois plus faible que la limite réglementaire imposée par le code de la santé publique (1 mSv sur un an) et 2 900 fois plus faible que l'exposition moyenne à la radioactivité naturelle qui est de 2,9 $mSv.an^{-1}$ (cf. Chapitre 1.1 du présent volume de l'étude d'impact).

Le risque le plus important de dispersion d'éléments radioactifs concerne les événements pouvant conduire à un endommagement du ou des colis de déchets radioactifs, soit une agression de ces derniers portant atteinte à leur confinement. Les risques d'agression des colis de déchets pouvant entrainer une perte de leur confinement sont présentés dans les chapitres 2.4.3.2 et 2.4.3.3 du présent volume de l'étude d'impact.

c) Le risque de criticité

Le risque de criticité est le risque de déclenchement intempestif d'une réaction nucléaire en chaîne. Cette réaction est liée aux propriétés physiques de certains isotopes impairs ^{235}U ou les isotopes ^{239}Pu et ^{241}Pu. Leur concentration peut générer une réaction en chaine, un noyau d'élément fissionné générant des particules (neutron)s pouvant fissionner d'autres noyaux voisins (cf. Chapitre 1.1 du présent document).

» FISSION NUCLÉAIRE

Afin de comprendre le phénomène de fission, il faut rappeler le vocabulaire atomique. Un atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des charges négatives nommées « électrons ». Le noyau est lui constitué de charges positives (protons) et neutres (neutrons).

Le phénomène de fission nucléaire, c'est l'impact d'un neutron, lancé à très grande vitesse contre le noyau, qui provoque l'éclatement ou « fission » de ce dernier. Il en résulte l'éjection de deux noyaux plus légers ainsi que de plusieurs neutrons. Ces derniers peuvent alors provoquer de nouvelles fissions d'autres noyaux, libérant de nouveaux neutrons et ainsi de suite.

Les colis primaires de déchets reçus sur le centre de stockage Cigéo sont conçus et produits afin de ne pas présenter de risque de criticité dans les conditions d'entreposage chez les producteurs et de stockage sur le centre de stockage Cigéo (gestion des matières fissiles (plutonium, uranium…) au sein du colis de déchets par la masse et/ou la géométrie).

Les matières fissiles ne peuvent pas conduire à des réactions en chaine non contrôlées dans les colis de déchets radioactifs.

d) Le risque lié au dégagement thermique des colis de déchets

Les colis de déchets HA et certains colis de déchets MA-VL contiennent des éléments radioactifs qui émettent des rayonnements conduisant à une production de chaleur (dégagement thermique). Sur le centre de stockage Cigéo, ce dégagement de chaleur doit être maîtrisé pour maintenir des conditions d'ambiance compatibles avec le fonctionnement des équipements.

Les dégagements thermiques des colis de déchets radioactifs sont maitrisés par plusieurs moyens :

- la limitation du dégagement thermique pour chaque colis : pour pouvoir être acceptés sur le centre de stockage Cigéo, les colis de déchets radioactifs ne doivent pas dépasser un certain dégagement thermique (quelques dizaines de Watts maximum pour certains colis MA-VL et quelques centaines de Watts maximum pour les colis de déchets HA), précisé dans les spécifications d'acceptation ;
- la ventilation des locaux dans les entreposages « tampons »[103] de l'installation de surface (comme dans les installations d'entreposage sur les sites des producteurs), qui permet d'évacuer la chaleur ;
- l'agencement des colis dans les alvéoles de stockage pour permettre l'évaluation de leur chaleur sans ventilation.

Le risque lié au dégagement thermique des colis est ainsi minimisé par les conditions d'acceptation des colis de déchets et les choix de conception des installations du centre de stockage.

e) Le risque lié à la présence de gaz de radiolyse et de corrosion

Lorsque de l'hydrogène est présent dans une installation, il convient de prendre en compte le risque de formation d'atmosphère explosive. Une « atmosphère explosive » est « un mélange avec l'air, dans des conditions atmosphériques, de substances inflammables, sous forme de gaz ou de poussières, dans lequel, après inflammation, la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé ». Ainsi, pour qu'une explosion se produise, six conditions doivent simultanément être réunies, conformément au schéma de « l'hexagone de l'explosion » : la présence d'un mélange comburant/combustible dans le domaine d'explosivité, des gaz ou produits en suspension, du confinement, et l'apport d'une source d'ignition qui produit l'explosion (cf. Figure 2-53).

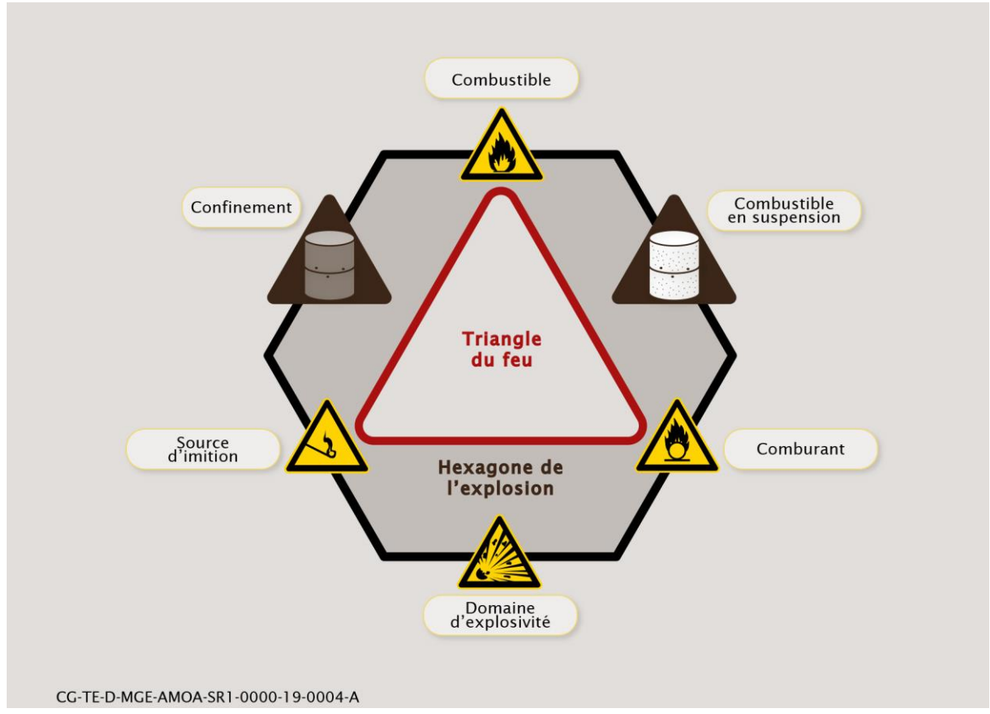


Figure 2-53 Hexagone de l'exposition : les 6 conditions qui doivent être simultanément réunies pour présenter un risque

Le domaine d'explosivité de l'hydrogène se situe entre 4 % et 75 % en volume dans l'air à pression normale et température ambiante. L'hydrogène est l'atome le plus léger du tableau périodique des éléments (beaucoup plus léger que l'air), et il diffuse très facilement, même à travers des parois métalliques.

Certains colis de déchets MA-VL contiennent des matières hydrogénées, qui sous l'effet des rayonnements ionisants peuvent produire des gaz de radiolyse. Ces gaz de radiolyse sont principalement de l'hydrogène. L'atteinte d'une atmosphère explosive liée au dégagement d'hydrogène par ces colis de déchets radioactifs dans les installations du centre de stockage Cigéo est très peu probable car, d'une part les quantités d'hydrogène produites sont très limitées (quelques litres à quelques dizaines de litres par an et par colis de stockage[104]), d'autre part la ventilation des installations, même à faible débit, assure un brassage et une évacuation de ces gaz (cf. Figure 2-54).

[103] Les entreposages « tampons » sont des aménagements du procédé (racks, emplacements dédiés, locaux…) des installations de surface du centre de stockage Cigéo qui permettent de mettre temporairement en attente des colis primaires ou des colis de stockage pour gérer les flux avant mise en stockage.

[104] À titre de comparaison, une batterie au plomb peut dégager plusieurs dizaines à centaines de litres par heure.

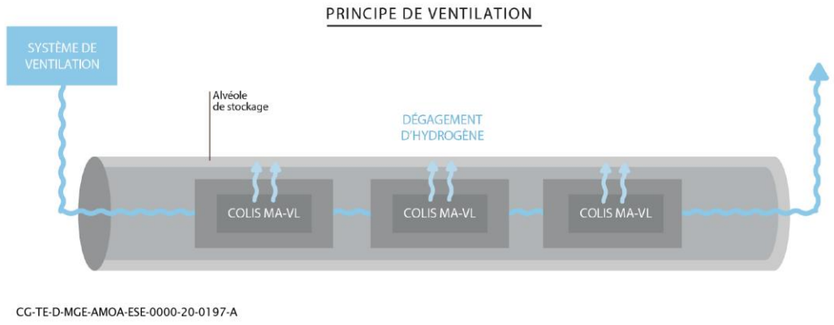


Figure 2-54 Illustration du principe de ventilation en alvéole MA-VL

En cas d'arrêt de la ventilation dans les alvéoles de stockage, là où le nombre de colis est le plus important, compte tenu des faibles quantités d'hydrogène produites par an par colis de stockage, l'exploitant dispose de plusieurs mois pour la réparer et la remettre en service avant d'atteindre une quantité significative d'hydrogène (de l'ordre de 3 %) se rapprochant de la limite inférieure d'explosivité (4 % pour hydrogène).

En outre, les installations de ventilation sont conçues pour résister à des sollicitations importantes, telles qu'un séisme, une chute d'avion (cf. Chapitre 2.4.3.3 du présent volume de l'étude d'impact) et plusieurs ventilateurs en redondance les uns des autres y sont installés afin de pallier à leur défaillance.

Pour ce qui concerne les colis de déchets HA, qui ne sont pas concernés par des dégagements de gaz de radiolyse, leur stockage dans des alvéoles non ventilés pourrait conduire à terme à une production d'hydrogène liée à la corrosion anoxique des aciers constituant le chemisage de l'alvéole et le conteneur de stockage dans lequel est placé un colis de déchets HA.

La conception des alvéoles HA prévoit la mise en place d'un matériau de remplissage à base cimentaire entre la roche et le chemisage pour limiter les cinétiques de corrosion. De plus, pendant toute la phase de fonctionnement, l'eau potentiellement présente (en quantité limitée du fait de la faible perméabilité de la roche hôte) est drainée et évacuée de l'alvéole pour limiter les phénomènes de corrosion en milieux aqueux. Ces dispositifs permettent ainsi de limiter in fine la production d'hydrogène. En outre, de par la forte diffusivité de l'hydrogène, tout ou partie de la production d'hydrogène devrait s'évacuer naturellement, notamment dans la roche hôte, contribuant à limiter plus encore la présence d'hydrogène gazeux au sein d'une alvéole.

Par ailleurs, cette alvéole HA intègre également des dispositifs passifs permettant de limiter les apports d'air à l'intérieur de l'alvéole (bride, matériau d'étanchéité). Une surveillance des gaz à l'intérieur de l'alvéole est réalisée afin de s'assurer de l'absence de risque de formation d'atmosphère explosive (cf. Figure 2-55).

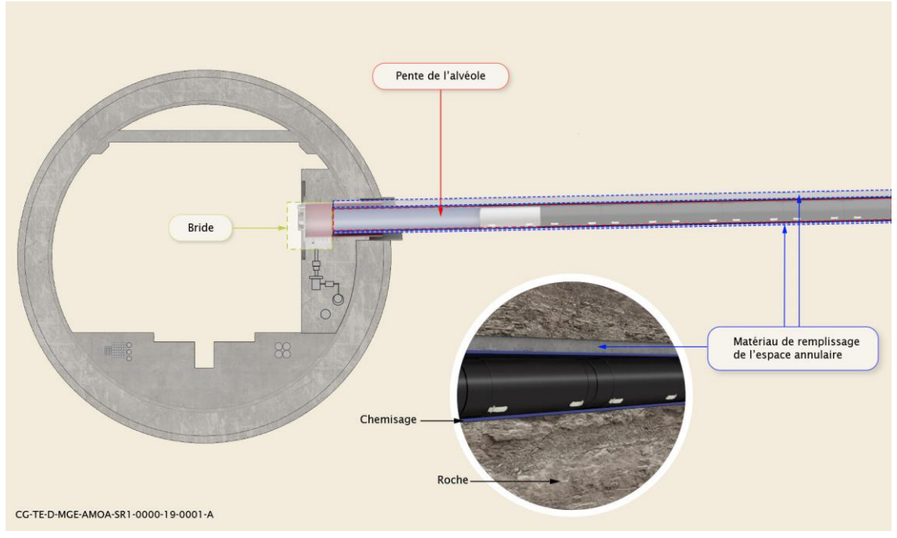


Figure 2-55 Illustration des principes de conception de l'alvéole HA

Par précaution, un système de balayage de l'atmosphère de l'alvéole est à l'étude pour être utilisé en ultime secours afin d'exclure la possibilité de survenue d'une atmosphère explosive.

2.4.3.2 Les risques engendrés par des agressions dites « internes », liés aux activités propres aux installations

Les activités de construction et d'exploitation du projet global Cigéo peuvent présenter des risques potentiellement majeurs tels que la collision ou le renversement d'engins de travaux, de moyens de transport ou de transfert à l'intérieur des installations, la chute de charges manutentionnées, mais aussi l'incendie ou l'explosion de substances dangereuses. L'ensemble des risques liés à ces activités sont analysés et font l'objet de disposition de prévention, de détection et de limitation des conséquences.

a) Le risque de collision ou de renversement d'engins

Les engins de travaux sont équipés de signal sonore en mouvement, de caméra de recul et de dispositifs de protection des réservoirs et des moteurs. Ces engins, ainsi que les voies de circulation font l'objet d'une maintenance régulière. Un plan de circulation des engins est établi (séparation des voies, limitation des vitesses sur zone, etc.) et les personnels sont formés à l'utilisation des engins et aux risques qu'ils représentent.

Les camions acheminant des matières dangereuses (comme le carburant par exemple), sont également équipés de dispositifs de protection, qui font l'objet d'une maintenance et de contrôles réguliers. Les agents des postes de garde assurent un contrôle systématique des camions citernes, et à l'intérieur du site, un cheminement spécifique, des règles de circulation, ainsi qu'une procédure sécurisée pour le déchargement (arrêt moteur, camion immobilisé, mise à la terre, supervision, etc.) sont mis en place. En cas d'événement, la circulation sera bloquée et le déchargement arrêté. Par ailleurs, l'imperméabilisation des parkings et des voieries, la mise en place systématique d'aires de dépotage étanches avec séparateurs d'hydrocarbures, la collecte et le traitement des effluents et des eaux pluviales permettent de prévenir toute infiltration dans les sols en cas de déversement accidentel. En complément, des moyens mobiles pour contenir les épandages pourraient être déployés si nécessaire (absorbant, sacs de sable, etc.). Les eaux pluviales potentiellement polluées ou les pollutions accidentelles par temps sec sont collectées et dirigées vers un bassin étanche qui a pour fonction de confiner toutes les pollutions pour leur traitement.

Les trains acheminant les colis de déchets radioactifs circulent à vitesse limitée (50 km/h sur la ligne ferroviaire 027000 et 30 km/h sur l'installation terminale embranchée). Les emballages de transport des colis de déchets radioactifs sont conçus et testés pour résister à des conditions accidentelles sévères, telles qu'une chute d'une hauteur de 9 m sur une surface indéformable. L'installation terminale embranchée est équipée de heurtoirs de fin

de voie, permettant d'absorber un éventuel choc sans conduire à un renversement ou une sortie de voie du convoi. Un dispositif de gestion de crise est prévu dans le cas où un incident ou un accident de transport de colis de déchets radioactifs surviendrait. Il vise à en limiter les conséquences et à mettre en place les mesures éventuellement nécessaires pour la protection du public. Dans ce cas, il serait coordonné par le Préfet et ferait intervenir à la fois les pouvoirs publics (pompiers, Samu, Autorité de sûreté nucléaire, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire…) et l'industriel responsable du transport.

Sur le centre de stockage Cigéo, des bornes anti-bélier sont placées sur le pourtour des voies de circulation, à proximité des installations sensibles comme l'installation nucléaire de surface du centre de stockage afin d'éviter une agression du génie civil.

À l'intérieur de l'installation nucléaire, les transferts sont réalisés à l'aide d'équipement guidés sur rails et à faible vitesse. La conception de ces équipements s'appuie sur des solutions technologiques standard et éprouvées dont le domaine de fonctionnement correspond à celui dans lequel ils vont être utilisés. Leur conception est réalisée selon les règles FEM (Fédération Européenne de Manutention) et la directive 2006/42/CE du parlement européen et du conseil du 17 mai 2006 relative aux machines (86). Ces équipements sont équipés de systèmes de freinage redondés (frein de service, frein de secours), à sécurité positive, et asservis à des dispositifs d'arrêt automatique sur détection d'anomalie (survitesse, obstacle, etc.).

» SÉCURITÉ POSITIVE

Un équipement est dit « à sécurité positive » lorsqu'une perte du fluide moteur (dont électricité) ou des utilités conduit l'équipement à se mettre en situation sécuritaire stable et maintenue dans le temps.

Tous les équipements de transferts sont équipés de dispositifs de surveillance tels que des capteurs de vitesses, des capteurs anticollision et des fins de course. Les opérations de transfert sont toutes automatisées et supervisées en salle de commande centralisée. Les équipements de transfert sont conçus pour résister aux chocs et collision qu'ils pourraient subir et sont maintenus régulièrement.

Une attention particulière a été apportée sur le transfert des colis de stockage depuis la surface vers l'installation souterraine : un transfert incliné dans la descenderie de l'installation nucléaire par funiculaire. Le funiculaire est un équipement de manutention au sol circulant en ligne droite sur des rails selon une pente de 12 % sur 4 kms. Le câble du funiculaire est entraîné de manière redondante par deux poulies motrices, chaque poulie pouvant reprendre l'intégralité de la masse du funiculaire chargée de la hotte contenant le colis de stockage). Il est équipé de systèmes anti-soulèvement empêchant son déraillement. Comme pour les autres moyens de transferts, sa vitesse est limitée.

Par ailleurs, le système de freinage du funiculaire comprend quatre systèmes, qui se déclenchent successivement en cas de défaillance du précédent :

- deux systèmes de freinage à pinces (freins de service et des freins de secours) ;
- un système de freinage à mâchoires (frein d'arrêt d'urgence) ;
- un système de freinage par affaissement (frein d'ultime secours).

Des rampes de décélération à l'approche des différentes zones d'arrêt et des butoirs de fin de voies permettre d'amortir l'arrivée du véhicule. Des zones de sécurité sont également présentes aux deux extrémités afin d'écarter tout risque de collision avec le génie civil des installations (cf. Figure 2-56).

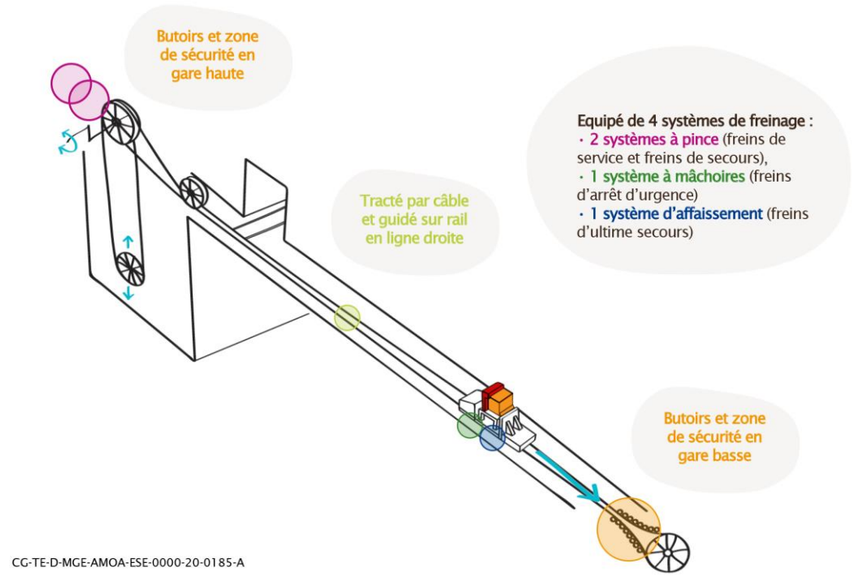


Figure 2-56 Illustration des dispositifs du transfert incliné par funiculaire

En attendant la réalisation de Cigéo et du funiculaire, la construction d'un « banc d'essai » est une étape importante (cf. Figure 2-57). À Froncles, en Haute-Marne, les travaux de mise à niveau du bâtiment qui accueillera le banc d'essai du prototype à l'échelle 1 du funiculaire de Cigéo sont achevés. Les essais qui seront réalisés sur ce prototype permettront de s'assurer que le futur funiculaire transportera en toute sécurité les colis de déchets radioactifs. De premiers essais de qualification sont prévus fin 2020.



Figure 2-57 Photographie de la construction du banc d'essai du prototype du funiculaire

b) Le risque de chute de charge

Les charges manutentionnées pouvant conduire à des incidences sur l'environnement sont les colis de déchets radioactifs réceptionnés pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo. En effet, leur endommagement pourrait conduire à la dispersion de substances radioactives.

Les colis de déchets radioactifs réceptionnés dans les emballages de transports sont tous déchargés à l'intérieur de l'installation nucléaire de surface. Les moyens de manutentions utilisés sont essentiellement des ponts et des chariots ou navettes de transfert. Les emballages de transport, les hottes de transfert et les colis de déchets radioactifs réceptionnés ou disposés dans les conteneurs de stockage disposent de résistances mécaniques spécifiques à la chute.

Les colis primaires et de stockage de déchets radioactifs, ainsi que les hottes dans lesquels ils sont placés pour leur transfert vers les alvéoles de stockage sont manutentionné à faible hauteur (cf. Figure 2-58), en dessous de leur domaine de qualification (domaine dans lequel une chute n'entraîne pas la perte du confinement des substances qu'ils contiennent), hormis dans quelques locaux où cela n'est pas possible (par exemple, la cellule de déchargement).

Les colis de déchets radioactifs et les hottes de transfert sont tous maintenus sur l'équipement de manutention ou de transfert par un système de verrouillage. Tous ces équipements sont dimensionnés avec des marges de sécurité et pour résister en situation de séisme (cf. Chapitre 2.4.3.3 du présent volume de l'étude d'impact) font l'objet d'une maintenance régulière.

Les cellules de l'installation nucléaire de surface où sont effectuées des opérations de levage, ainsi que l'ensemble du bâtiment, sont conçus pour assurer un confinement si des substances radioactives étaient malgré tout libérées par la chute ou l'écrasement d'un colis. En effet, le confinement des cellules de l'installation nucléaire de surface est assuré de manière statique par les parois, les sols, les plafonds et des portes blindées avec des joints comprimés lorsque la porte est refermée ou de portes coulissantes avec des joints gonflables. Ce confinement statique est complété par un système de ventilation nucléaire assurant le maintien d'une dépression d'air, dans les cellules blindées contenant les colis de déchets radioactifs. Ce système de ventilation est également équipé de des filtres à très haute efficacité assurant la rétention des éléments radioactifs (permet de retenir plus de 99 % des aérosols) qui pourraient être mis en suspension dans les cellules suite à une chute et une perte du confinement du colis. Ces filtres sont installés deux par deux afin de permettre leur maintenance et le remplacement d'un filtre par basculement sur le second.

Au sein des alvéoles de stockage MA-VL, les colis de déchets radioactifs sont stockés par couche à l'aide d'un pont stockeur permettant de limiter leur hauteur de levage (cf. Figure 2-58) et toujours rester dans leur domaine qualification à la chute. Les colis de déchets HA sont insérés unitairement dans l'alvéole, sans risque de chute.

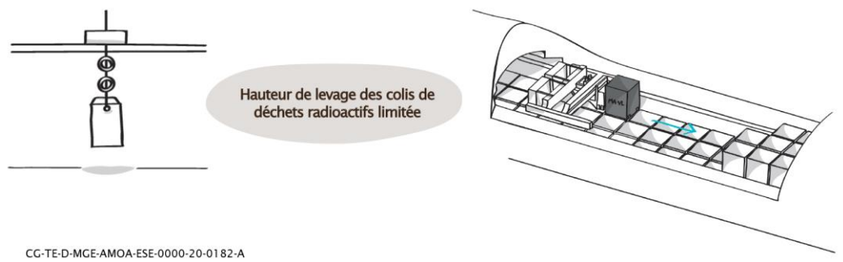


Figure 2-58 Illustration de la manutention des colis de déchets radioactifs MA-VL à faible hauteur

c) Le risque d'incendie

La maîtrise du risque d'incendie fait l'objet d'une attention particulière. Il s'agit notamment de réduire au maximum la quantité de matériaux combustibles ou inflammables, détecter au plus tôt et au plus près un potentiel départ de feu, éteindre au plus vite un incendie se développant ou le cas échant le confiner dans une zone restreinte, et gérer les fumées produites afin de limiter les conséquences d'un incendie sur l'environnement et la santé humaine.

En dehors de l'installation nucléaire du centre de stockage Cigéo, les travaux d'aménagements préalables et de construction initiale ainsi que le fonctionnement des installations nécessitent le stockage et l'utilisation de carburants et d'autres substances inflammables pour le chauffage par exemple. Les quantités acheminées et stockées sur le centre de stockage seront limitées autant que faire se peut. Les équipes d'intervention incendie et de secours sont systématiquement et rapidement sollicitées. Une caserne de pompiers est implantée sur chacune des zones du site pour intervenir rapidement et des poteaux incendie sont disposés le long de toutes les voieries et autour des ouvrages. Par ailleurs, l'implantation des ouvrages sur le site prévoit des distances de sécurité par rapport au cheminement des citernes de carburant, afin d'écarter tout risque de propagation de l'incendie. En cas de départ de feu sur un véhicule de transport des colis de déchets radioactifs, le dispositif de gestion de crise permet également d'envoyer les équipes des services d'intervention et de secours le plus rapidement possible.

Pendant la phase de fonctionnement, dans les zones en exploitation du centre de stockage, les produits combustibles ou inflammables sont limités autant que faire se peut par l'utilisation de moyens et d'équipements électriques (sans présence de carburant, contrairement aux engins thermiques), de matériaux ignifugés, etc. Aucun engin à moteur thermique n'est présent.

Les colis de stockage font l'objet d'essais pour tester leur résistance au feu (cf. Figure 2-59).



Colis de stockage avant l'essai



Colis de stockage pendant l'essai



Colis de stockage après l'essai



Manutention du colis de stockage après l'essai



Intérieur du colis de stockage après l'essai

Figure 2-59 Illustration des essais de résistance au feu des colis

Des systèmes de détection automatique incendie, avec des technologies adaptées au type de feu qui pourrait se produire sont installés dans tous les locaux et les zones sensibles (zones contenant des colis de déchets radioactifs, mais aussi contenant des systèmes supports au fonctionnement comme des armoires électriques ou de contrôle-commande, des ventilateurs…). Les installations sont également compartimentées par des parois résistantes au feu, des portes et des clapets coupe-feu asservis à la détection et équipées de systèmes d'extinction manuels ou automatiques en fonction du besoin. En cas de détection incendie dans les installations, toutes les opérations de manutention des colis de déchets seront arrêtées automatiquement (possible également manuellement à distance en cas de défaillance du déclenchement automatique) et ces derniers seront posés au sol par mesure de sécurité. Certains locaux et zones sensibles seront équipés de systèmes automatiques d'extinction incendie. Les équipes d'intervention incendie et de secours, présentes sur le centre de stockage Cigéo en permanence, seront systématiquement sollicitées afin d'être rapidement sur place quelle que soit la zone en surface ou dans l'installation souterraine.

Dans la zone travaux de l'installation souterraine, la quantité de carburant nécessaire au fonctionnement des engins de chantier est limitée (cuve de quelques m^3). Comme dans la zone en exploitation, les galeries sont équipées d'un réseau maillé de détection et d'extinction incendie, et les équipes d'intervention sont grées pour intervenir rapidement. Un compartimentage est également assuré régulièrement afin de circonscrire l'incendie et gérer les fumées. Les zones travaux et en exploitation sont séparées par des protections physiques résistantes au feu, et étanches aux fumées (cf. la gestion des risques liés à la coactivité présentée dans le présent chapitre).

d) Le cas particulier des colis de déchets bitumés

Les déchets conditionnés dans une matrice bitumée ont fait l'objet d'une attention particulière vis-à-vis du risque d'incendie. Si les études de conception initiale et de caractérisation de ces déchets ont permis de définir des conditions de stockage dans Cigéo, l'exclusion de tout risque de reprise d'une réaction exothermique n'a pu être définitivement démontrée. Cela a conduit l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) à formuler, dans son avis du 11 janvier 2018 relatif au dossier d'options de sûreté du centre de stockage Cigéo remis par l'Andra (64, 69), une réserve concernant le stockage des colis de déchets bitumés. Elle a estimé que *« la recherche de la neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitumés doit être privilégiée. En parallèle, des études visant à modifier la conception pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques doivent être conduites. En tout état de cause, la caractérisation dans les meilleurs délais de ces colis de déchets bitumés par leurs producteurs est un préalable indispensable »*.

Dans ce cadre, une expertise a été commanditée par le Ministère de la transition écologique et solidaire et l'Autorité de sûreté nucléaire en juin 2018, avec pour missions d'évaluer :

- les connaissances scientifiques relatives à la caractérisation et au comportement des déchets bitumés ;
- la pertinence des recherches en cours sur la neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitumés ;
- la pertinence des études menées par l'Andra visant à modifier la conception du centre de stockage Cigéo pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques.

Présidée par Christophe Fournier, expert indépendant des organismes concernés par ce sujet, l'équipe de revue était composée d'experts nationaux et internationaux, académiques et non académiques.

Le rapport de la revue sur la gestion des déchets bitumés a été remis aux autorités le 28 juin 2019, puis présenté aux producteurs de déchets radioactifs, à l'Andra, à l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire ainsi qu'au Groupe de travail du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) en septembre 2019. Ces conclusions apportent un regard complémentaire et ouvrent de nouvelles perspectives quant aux conditions potentielles d'acceptation des colis de déchets bitumés dans le centre de stockage Cigéo. Elles portent :

- sur la caractérisation et le comportement des déchets bitumés : *« le groupe de revue estime que des expérimentations complémentaires permettraient de conforter les conclusions des travaux antérieurs du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) quant aux températures à partir desquelles peuvent se produire des réactions énergétiques. »*.
- sur la neutralisation de la réactivité chimique des colis : *« sa faisabilité industrielle reste à démontrer. Le groupe estime improbable que la mise en service d'une telle installation puisse intervenir avant 2040, mais considère que les études doivent être poursuivies et qu'il serait utile de réexaminer l'intérêt de la dissolution chimique du bitume avant le choix définitif d'un procédé à industrialiser le cas échéant. »*.
- sur l'évolution de conception du centre de stockage Cigéo, le groupe estime que : *les études conduites par l'Andra devraient permettre d'arriver à court terme à une conception dont la sûreté pourrait être démontrée de façon convaincante. De plus, le coût de cette solution de stockage direct serait nettement inférieur à une neutralisation préalable de la réactivité des déchets. »*.

Ainsi, les études se poursuivent et les résultats seront présentés lors de l'actualisation ultérieure de l'étude d'impact.

Il est important de noter que les colis de déchets bitumés ne seront admis sur le centre de stockage Cigéo que dès lors que leur sûreté aura été pleinement garantie, soit par des dispositions de conception et de caractérisation, soit par un reconditionnement en amont. Dans tous les cas, ils ne seront pas réceptionnés dès les premières années de fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

e) Le risque lié à l'utilisation d'explosifs

Pendant la phase de construction du centre de stockage Cigéo, des tirs d'explosifs sont réalisés pour le creusement des puits du centre de stockage Cigéo.

L'acheminement des explosifs jusqu'à leur local de conservation sur la zone puits est soumis aux prescriptions de l'accord européen ADR, qui encadre le transport de matières dangereuses par voie routière. Ces préconisations portent notamment sur la signalisation des véhicules, les équipements de sécurité à bord des camions de transport, le protocole de sécurité du chargement/déchargement, etc. Cette réglementation ADR est appliquée pour le transport sur la voie publique mais aussi à l'intérieur de la zone puits. De fait, les véhicules de transport des explosifs sont dédiés et auront été au préalable autorisés au transport des explosifs (selon leur nature et la quantité transportée : véhicules de type EX I, EX II ou EX III).

Sur la zone puits, la garde des explosifs est réalisée dans un bunker conçu pour contenir les effets de surpression d'une explosion éventuelle à l'intérieur. Il est par ailleurs implanté à une distance de sécurité des autres sources de dangers (citernes de carburant, par exemple) présentes sur la zone puits.

Les travaux de creusement des puits font l'objet de diagnostics pyrotechniques, d'une habilitation et d'une sensibilisation du personnel autorisé à manipuler des charges explosives. Ces charges sont limitées en masse et utilisées de manière divisée dans le temps.

f) Le risque d'inondation interne

La présence de réseaux d'alimentation en eau, potable, industrielle et de lutte contre l'incendie, sur le site engendre un risque d'inondation notamment à l'intérieur des installations en cas de fuite. Pour y remédier, l'implantation de ces réseaux est privilégiée dans des zones protégées et éloignées des zones accueillant les colis de déchets radioactifs ou des substances dangereuses. Ces réseaux sont surveillés régulièrement et les locaux concernés sont équipés de capteurs de présence d'eau. Enfin, ils sont équipés de vannes de sectionnement et des caniveaux et des puisards (reliés à des réseaux de gestion dédiés en fonction de leur nature) permettant de récupérer les éventuelles fuites.

g) Le risque de perte d'alimentation électrique ou de ventilation

La prise en compte d'une éventuelle défaillance d'équipements assurant des fonctions supports à l'exploitation de l'installation, comme l'alimentation électrique ou la ventilation est intégrée dans la conception. Cette conception repose sur une architecture permettant différents niveaux de fiabilité en fonction de la fonction à assurer. À titre d'exemple, la conception de l'alimentation électrique des installations comprend notamment une alimentation normale fournie par le réseau RTE et composée de deux voies d'alimentation indépendantes et redondantes ainsi qu'une alimentation de secours assurée par des groupes électrogènes. De même pour la ventilation, les ventilateurs sont redondants (des ventilateurs supplémentaires sont prévus pour reprendre la fonction de ventilateurs qui pourraient être défaillants) et séparés physiquement afin que l'agression de l'un ne perturbe pas le fonctionnement ou le démarrage en relais des autres. En cas de panne sur l'un de ses systèmes, les opérations de transfert et de manutention des colis de déchets sont arrêtées et les charges sont posées automatiquement au sol (par les systèmes de secours ou manuellement si besoin).

Ainsi, en cas de défaillance sur les systèmes d'alimentation électrique et/ou de ventilation, de nombreux équipements redondants permettent de prendre le relais des fonctions à assurer et les opérations de manutention sur les colis de déchets sont arrêtées le temps de réparer. Même en cas de pertes multiples, les délais avant

l'atteinte d'une situation à risque sont suffisamment longs pour entreprendre des réparations ou un remplacement d'équipement.

h) Les risques liés au vieillissement des équipements et ouvrages

Une démarche proactive est mise en œuvre dès la conception afin de s'assurer que des mesures techniques et organisationnelles soient en place pour gérer les mécanismes de vieillissement des équipements et ouvrages, en tenant compte du retour d'expérience, de normes et de réglementations, ainsi que des recommandations des instances internationales (87).

Ainsi, les ouvrages sont dimensionnés et les équipements sont choisis et/ou conçus en prenant en compte leur durée d'utilisation et de fonctionnement, leur accessibilité et les possibilités pour assurer leur surveillance et les conditions d'ambiance dans lesquelles ils sont placés. Ces dernières sont définies et assurées afin de limiter leur vieillissement.

Un programme de maintenance préventive (contrôles et essais périodiques adaptés) est mis en place afin de vérifier les caractéristiques fonctionnelles attendues des ouvrages et équipements et de vérifier qu'il n'y a pas de dégradation dans le temps de leurs caractéristiques.

Un programme de jouvence (remplacement) est défini à des fréquences adaptées aux équipements et ouvrages afin d'anticiper leur vieillissement et/ou leur obsolescence.

» JOUVENCE

La jouvence est une phase de travaux permettant de remplacer un système ou un bâtiment dans son ensemble, parce que sa maintenance en est devenue extrêmement difficile.

Des examens décennaux sont également effectués afin de détecter tout vieillissement précoce ou risque d'obsolescence, et ainsi de programmer des actions complémentaires de rénovation ou de remplacement.

Une maintenance corrective (réparations) est effectuée en cas de détection de défauts ou de défaillance sur les ouvrages et les équipements.

Enfin, les ouvrages et les équipements non accessibles dans les alvéoles de stockage sont conçus avec des marges de dimensionnement (choix des matériaux, surépaisseurs...) permettant d'atteindre un haut degré de confiance quant à leur fiabilité sur la période de fonctionnement envisagée. Des contrôles stricts à réception de leur bon dimensionnement sont prévus. Des dispositions de surveillance directes (capteurs de suivi des déformations du génie civil, en radier et en voute) et indirectes (usure sur le pont roulant observable en cellule de manutention) sont mises en place pour détecter tout vieillissement précoce des matériaux et équipements nécessaires au bon fonctionnement des alvéoles de stockage pendant la phase de fonctionnement. En cas de dérive, des investigations complémentaires peuvent être menées en alvéole à l'aide du pont roulant instrumenté depuis la cellule de manutention (caméra, scanner pour télémétrie, etc.) à des fins d'inspection. En ultime secours, un retrait des colis de l'alvéole est possible pour les déplacer dans un autre alvéole à proximité.

i) Les risques liés à la coactivité

Dans le centre de stockage Cigéo, la réalisation simultanée d'activités d'exploitation nucléaire et de construction d'ouvrages, notamment de creusement de nouveaux alvéoles dans l'installation souterraine, présente des risques dits de co-activité. Tenant compte du retour d'expérience sur ce sujet, au niveau national et international, la conception et l'exploitation des installations sont basés sur des principes forts, illustrés sur la Figure 2-60 :

- une barrière robuste entre la zone en exploitation nucléaire et la zone en travaux dans l'installation souterraine. Cette barrière est composée de séparations physiques résistantes aux agressions (choc ou collision d'un engin, incendie de 2 heures sur un engin...), étanches aux fumées ;
- une indépendance totale entre les deux zones (zone en exploitation nucléaire et zone en travaux). C'est-à-dire que chaque zone possède des réseaux d'utilités (alimentation électrique, ventilation...), des moyens de surveillance, des moyens de secours et d'évacuation qui lui sont propres. Les travaux de creusement, de construction et d'équipement des nouveaux alvéoles sont par conséquent réalisés au sein d'un chantier dit « clos et indépendant » de l'installation nucléaire ;
- un phasage des périodes de jouvence (remise en état des installations). Les opérations de jouvence ou de maintenance lourde, prévues à certaines décennies, consistent à réaliser les opérations de réfection et de rénovation en interrompant le procédé principal de manutention et de transfert des colis de déchets radioactifs.

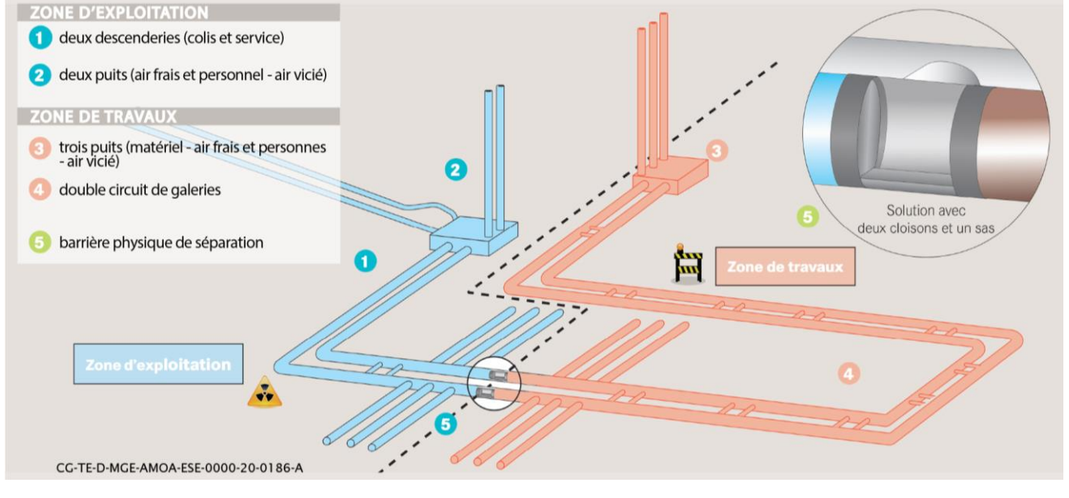


Figure 2-60 Illustration des principes de gestion de la co-activité

Ainsi, un événement survenant dans l'une des deux zones, ou sur des opérations de jouvences ou de maintenance lourde, ne pourra entraîner d'effet domino sur des installations sensibles, notamment celles contenant des colis de déchets radioactifs.

j) Les risques liés aux opérations de retrait

Le centre de stockage Cigéo est conçu pour que, sur toute la période allant de sa mise en service jusqu'à la décision de sa fermeture définitive, les colis puissent en être retirés aisément.

Les composants jouant un rôle important pour le retrait (notamment les colis, les équipements de manutention et les alvéoles) sont conçus de façon robuste et durable. Par exemple, les alvéoles dans lesquels sont stockés les colis de déchets sont revêtus d'une structure, en béton ou en acier, pour limiter leurs déformations. Sur la durée du fonctionnement du centre de stockage, les jeux fonctionnels et les conditions de fonctionnement des équipements utilisés pour le retrait des colis de déchets sont préservés.

La position précise de chaque colis stocké et son contenu sont enregistrés afin de disposer de toutes les informations permettant de préparer un éventuel retrait.

Les moyens de manutention utilisés pour stocker les colis de déchets MA-VL dans les alvéoles permettent également les en retirer. Pour les colis HA, des robots spécifiques permettant de les retirer des alvéoles sont développés. Des essais de retrait de colis sont réalisés avant et après la mise en service de l'installation nucléaire pour vérifier la performance des équipements de retrait. À ce jour, des tests à l'échelle 1 avec des colis fictifs ont d'ores et déjà été réalisés avec des prototypes.

Les alvéoles de stockage sont surveillés pour suivre l'évolution des conditions de retrait (caractéristiques de l'ambiance de l'alvéole, jeux fonctionnels, conditions de fonctionnement des équipements de retrait...).

Compte tenu des dispositions de conception des alvéoles de stockage, ils sont accessibles pendant toute la durée de la phase de fonctionnement et ne présentent pas de détérioration qui risquerait de remettre en cause leur préhension et leur transfert par les différents équipements de manutention. Compte tenu de leur conception, les colis de stockage récupérés ne présentent pas de contamination supérieure aux limites fixées pour leur mise en stockage.

Par précaution, un contrôle de la contamination est réalisé avant le retrait et si nécessaire, un système de fixation de la contamination est mis en place avant le transfert.

Ainsi, les colis peuvent être retirés pendant toute la durée du fonctionnement puis transférés jusqu'à la surface dans des conditions similaires à leur mise en stockage.

En fonction de la date de l'éventuelle opération de retrait, les moyens de manutention utilisés pourront être renouvelés (équipements éventuellement obsolètes) ou adaptés aux conditions opérationnelles. Les conditions de retrait feront l'objet de réévaluations périodiques (réexamens de sûreté, revues de réversibilité, mise à jour du plan directeur pour l'exploitation).

2.4.3.3 Les risques engendrés par des agressions dites « externes », liés aléas naturels et aux activités humaines externes

Les activités humaines externes et les aléas naturels peuvent présenter des risques d'agression des installations. L'ensemble des risques liés à ces activités et aléas sont analysés et font l'objet de disposition de prévention, de détection et de limitation des conséquences.

a) Les risques liés aux activités humaines externes

L'environnement proche des installations du centre de stockage est peu industrialisé (cf. Chapitre 12.2 du Volume III de la présente étude d'impact). Les aménagements en Meuse et Haute-Marne ne se trouvent pas à proximité d'activités qui seraient de nature à entrainer des effets, y compris en mode accidentel, sur les installations.

Les risques d'accidents majeurs sur le Laboratoire souterrain (LS) situé à côté des installations du centre de stockage qui sont un incendie sur le camion-citerne d'approvisionnement en gazole et une explosion lors de la livraison d'explosif (88), ne sont pas de nature à entraîner des conséquences sur les installations du centre de stockage. Les installations de l'Andra ne sont, en outre, situées dans aucun périmètre de plan de prévention des risques technologiques.

Les voies de communications présentes à proximité du centre de stockage sont, les routes, la voie ferrée de l'installation terminale embranchée (ITE) et les voies aériennes an altitude.

Les principaux risques associés aux voies de communication sont :

- l'incendie d'un véhicule transportant une quantité significative de produits inflammables (poids lourd de livraison de carburant notamment) circulant sur les routes à proximité ;
- la chute d'un avion sur les installations.

Les installations sensibles sont implantées à distance des voies de communication terrestres sur lesquelles peuvent circuler des poids lourds de transport de substances dangereuses et sont conçues pour résister aux effets d'un accident, et notamment un incendie au niveau de ces voies.

Le centre de stockage est situé à distance des aérodromes de la région (aérodrome de Joinville à 20 km, base aérienne militaire de Saint-Dizier à 35 km) et des couloirs de survol aérien (uniquement en haute altitude pour les vols commerciaux, et en dehors des zones de survol militaire).

Bien que peu probable, la chute d'avion est une situation accidentelle prise en compte dans la conception du centre de stockage Cigéo. En France, le dimensionnement des installations nucléaires pour faire face à ce risque s'appuie sur une Règle Fondamentales de Sûreté (RFS) édictée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). Celle-ci donne les principes de conception pour assurer le confinement des substances radioactives en cas de chutes d'aéronefs plausibles sur le site.

Ainsi, les voiles extérieurs du bâtiment nucléaire de surface constituent une coque de protection contre la perforation et la pénétration des débris en cas de chute d'avion. Il reste difficile d'exclure tout risque de fissuration des dalles et une pénétration de kérosène à l'intérieur des locaux est possible. Aussi, les locaux contenant les colis de déchets ne sont pas directement situés sous cette coque mais situés à des niveaux inférieurs, protégés d'un éventuel incendie se développant dans les locaux sous-jacents par des parois coupe-feu 2 heures.

En cas de chute d'avion sur le site, le plan d'urgence interne serait immédiatement déclenché et des moyens d'intervention incendie et de secours seraient rapidement mis en œuvre.

Le risque de chute d'un avion commercial est considéré comme hautement improbable au sens de la Règle fondamentale de sûreté (RFS). Le cas d'un écrasement volontaire d'un avion commercial est toutefois étudié dans le cadre des études de malveillance ; bien que le centre de stockage Cigéo ne soit pas construit pour résister sans dommages à un tel choc, il offre une bonne capacité de résistance grâce à des enceintes de confinement en béton armé permettant d'éviter de porter atteinte aux colis de déchets radioactifs.

b) Les risques liés aux aléas naturels

Les conditions climatiques extrêmes auxquelles peuvent être soumises les installations et qui pourraient nuire à leur bon fonctionnement sont le séisme, les fortes pluies, les vents forts ou les tornades, la neige abondante, les températures très chaudes ou très froides, ainsi que la foudre.

Les travaux et les activités sont adaptés et arrêtés si besoin en fonction des conditions météorologiques.

Les installations nucléaires du centre de stockage Cigéo, ainsi que leurs installations support (usines de ventilation par exemple) sont conçues et dimensionnées selon les recommandations de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), autant ou plus contraignantes (64).

Le séisme

Le centre de stockage Cigéo est implanté dans une zone présentant un risque sismique très faible compte tenu de la nature du sous-sol et d'une absence d'activité récente des zones de failles les plus proches (cf. Figure 2-61), et classée 1 sur l'échelle de 5 conformément à l'article D. 563-8-1 du code de l'environnement).

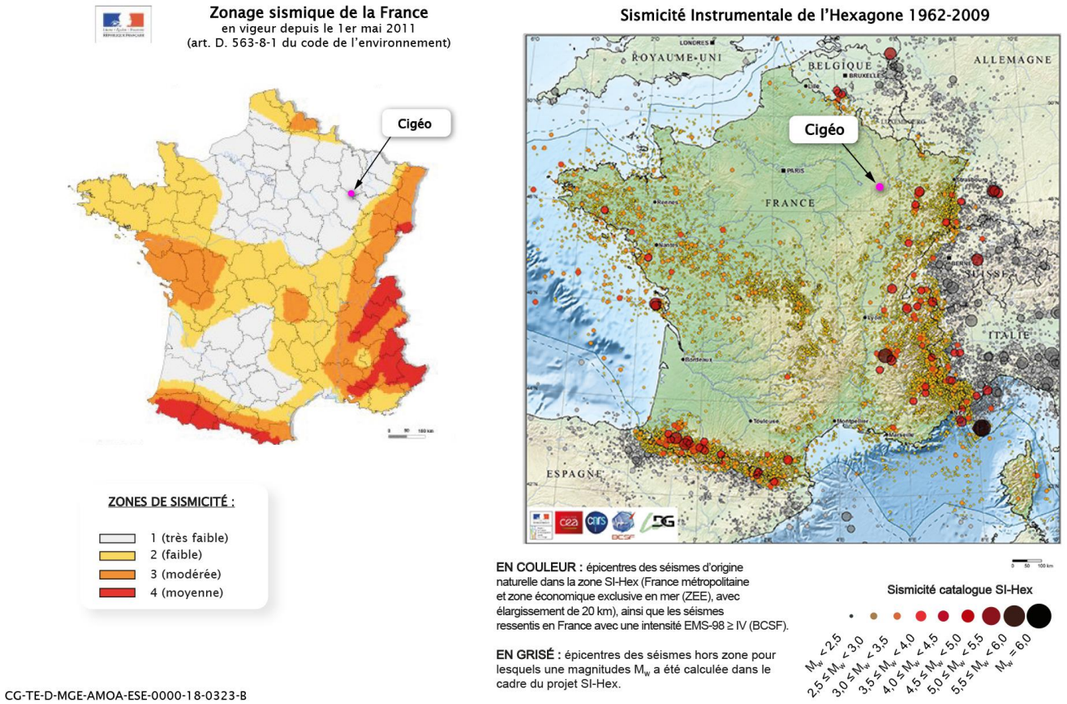


Figure 2-61 Zonage sismique en France et cartographie des séismes enregistrés entre 1962 et 2009

Toutefois, les installations nucléaires sont construites, conçues et exploitées, conformément aux règles spécifiques applicables aux installations nucléaires, pour qu'en cas de séisme, les installations soient maintenues dans un état dit « sûr » et que ce phénomène n'entraine pas de conséquence sur l'homme et l'environnement.

Des éléments complémentaires sur la faible sismicité du site d'implantation du centre de stockage Cigéo sont présentés au chapitre 4.6.2 du volume III de la présente étude d'impact.

ÉTAT SÛR DE CIGÉO

L'état sûr est un état stabilisé de l'installation nucléaire du centre de stockage Cigéo dans lequel les opérations de manutention sont arrêtées et le confinement des substances radioactives est assuré durablement.

Le caractère « durable » s'apprécie notamment au regard de l'autonomie de l'installation et des possibilités d'appui externe, ainsi que de la possibilité de réaliser des interventions, si nécessaire.

La Règle fondamentale de sûreté (RFS) édictée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) vis-à-vis du risque sismique impose que les ouvrages nucléaires soient dimensionnés sur la base d'un séisme forfaitaire. Ce niveau de séisme forfaitaire, dit « Séisme majoré de sécurité » (SMS) est établi en tenant compte d'une majoration des activités sismiques maximales ayant pu intervenir sur les 10 000 dernières années.

Sur la base du SMS, une nouvelle majoration est appliquée afin de déterminer le séisme de dimensionnement (SDD). Le SDD permet de dimensionner les ouvrages de génie civil, et les équipements des installations nucléaires lorsque leur agression est susceptible de conduire à des conséquences pour l'homme ou l'environnement, de telle sorte qu'ils puissent résister aux sollicitations mécaniques induites par les séismes, conformément aux recommandations de l'ASN. Ainsi, sur le centre de stockage Cigéo, le bâtiment nucléaire de surface, la descenderie des colis, les galeries, les alvéoles de stockage et l'ensemble des ponts de manutention des colis de déchets radioactifs sont conçus pour résister en cas de séisme exceptionnel.

Compte tenu de ces exigences de conception en cas de séisme, les colis de déchets radioactifs ne seront donc endommagés ni par les ouvrages qui les contiennent, ni par les équipements qui les manipulent. Par ailleurs, compte tenu de la robustesse du conteneur de stockage et/ou des colis de déchets, un séisme même de forte intensité ne pourrait conduire à lui seul à une dispersion de substances radioactives.

Les fortes pluies

Tous les réseaux de collecte des eaux pluviales du projet global Cigéo (zone descenderie, zone puits, Installation terminale embranchée, liaison intersites, poste électrique RTE…) sont équipés de bassins de rétention.

Pour les installations du centre de stockage, les réseaux de collecte des eaux pluviales et les bassins associés permettent de faire face à une pluviométrie exceptionnelle, c'est-à-dire qu'ils peuvent collecter et contenir un volume d'eau statistiquement atteint bien moins d'une fois tous les 100 ans. Les eaux pluviales recueillies sur les zones aménagées sont d'abord orientées vers un des deux bassins de traitement qualitatif des eaux pluviales (qui pourraient être chargées en polluants après leur passage sur les différentes surfaces imperméabilisées). Les bassins qualitatifs sont redondants afin de permettre la rétention d'une pollution accidentelle dans un bassin et de poursuivre la gestion des eaux ensuite dans l'autre bassin, sans perturber le fonctionnement du réseau, le temps de traiter la pollution. Une fois passée dans ce bassin, les eaux pluviales non polluées sont ensuite dirigées vers le bassin quantitatif étanche qui permet la régulation du débit des eaux non polluées rejetées vers le milieu naturel.

Par ailleurs, sur le terminal ferroviaire nucléaire, bien que les colis soient protégés des intempéries par leur emballage de transport, les eaux pluviales sont collectées et envoyées dans un bassin dédié afin d'être contrôlées (absence de radionucléides notamment) avant de rejoindre le réseau de gestion des eaux pluviales de la zone descenderie.

Les installations sensibles, et tout particulièrement les installations nucléaires sont situées à des altimétries qui permettent d'exclure les risques d'inondation par les cours d'eau. Ces installations sont également protégées vis-à-vis des fortes pluies et de leur conséquences directes (ruissellement) et indirecte (remontée de nappe phréatique). Une paroi étanche « ancrée » dans la couche imperméable sous les calcaires du Barrois pour éviter les venues d'eau latérales, et ainsi se protéger des variations du niveau de la nappe, est mise en place dès la phase d'aménagements préalables. Elle assure notamment la protection de l'installation nucléaire de surface, les voies du terminal ferroviaire nucléaire, et les descenderies pendant leur construction. Elle vient renforcer la protection de ces bâtiments contre le risque d'inondation par une remontée exceptionnelle de la nappe phréatique en phase de fonctionnement. À ce stade, ce dispositif est une option, parmi d'autres, dont la conception fait l'objet d'une démarche itérative en regard de l'objectif de protection des ouvrages.

L'ensemble des liaisons surface-fond (descenderies et puits) sont pourvues d'un revêtement étanche au niveau des Calcaires du Barrois. Le puits de ventilation d'extraction d'air de la zone en exploitation est quant à lui équipé de ce revêtement sur toute sa hauteur pour limiter le besoin d'y accéder (présence de très faibles quantités d'éléments radioactifs). Les liaisons surface-fond sont également équipées d'un bulbe d'étanchéité et d'injections de collage sont mis en place à l'interface entre les différentes couches géologiques traversées. Ce bulbe est composé d'un matériau bentonitique hydrogonflant mis en place entre le massif béton du puits et le terrain. En gonflant, le bulbe assure l'étanchéité du terrain dans lequel il est installé. Les injections de collage sont aussi réalisées autour du puits de manière à boucher les fissures du terrain imperméable endommagé par le creusement du puits, assurant une protection supplémentaire. Des caniveaux et des gouttières permettent de récupérer et d'acheminer de manière gravitaire les éventuelles eaux collectées dans les liaisons surface-fond vers des rétentions dédiées à chaque zone, et à l'écart des zones de stockage des colis de déchets radioactifs en zone d'exploitation nucléaire. Dans chaque zone, ces rétentions sont connectées entre elles en partie haute, afin d'assurer la fonction de trop plein. Les eaux sont remontées en surface pour analyse et traitement adapté. Tous les dispositifs sont conçus avec des marges de dimensionnement et font l'objet de surveillance et de maintenance régulière.

Les vents forts ou les tornades

Les installations sensibles du centre de stockage sont conçues pour résister à des rafales de vents violents et également à des tornades (jusqu'à plus de 230 $km.h^{-1}$). À titre d'information, la rafale maximale de vent enregistrée à la station de Saint-Dizier a atteint près de 160 $km.h^{-1}$, le 26 décembre 1999. Pour faire face à une situation de tornade, les installations sensibles sont également dimensionnées pour résister au choc lié à la projection d'un véhicule qui serait garée à proximité. Enfin, les ouvertures, comme les bouches de ventilation, sont pourvues de chicanes afin d'éviter qu'un projectile ne puisse endommager des équipements présents à l'intérieur des installations nucléaires.

La neige abondante

Les installations sensibles sont dimensionnées pour résister une accumulation importante de neige sur les toitures ainsi qu'à la formation de congères. Ce dimensionnement est défini dans le respect de règles dites « neige et vents » qui précisent les conditions dans lesquelles les charges apportées par la neige et les efforts du vent doivent être pris en compte dans la conception des structures du clos et du couvert des constructions.

Les températures très chaudes ou très froides

Les installations nucléaires sont conçues pour fonctionner sur des plages de température très larges, de -15 °C à +35 °C en continu et de -25 °C et +47 °C pendant toute une journée. Ces plages de températures permettent de couvrir les vagues de chaleur et de froid qui pourraient être de plus en plus fréquentes en lien avec le changement climatique et des températures extrêmes qui pourraient survenir moins d'une fois tous les cents ans (à titre d'information, la température la plus élevée enregistrée à Saint-Dizier sur la période de juin 1953 à juin 2020 a été de +41,4 °C ponctuellement le 25 juillet 2019 (89)).

La forte inertie des ouvrages en béton armé, dont une grande partie est enterrée, fait qu'ils sont peu sensibles à des températures extrêmes. Certains matériels électriques sont sensibles au respect d'une plage de température pour leur fonctionnement (généralement, en deçà de +40 °C pour les équipements sensibles pour éviter le risque de surchauffe ou de panne). Ces matériels, lorsqu'ils assurent une fonction importante pour la protection des colis de déchets, sont dans des locaux techniques disposant d'une ventilation conventionnelle et d'un système de refroidissement de l'air asservi à la température externe.

La foudre

Les installations sensibles sont équipées de dispositifs de capture, d'une mise à la terre de tous les équipements métalliques conducteurs, de parafoudre sur les lignes haute tension et de « para-surtenseurs » au niveau des armoires électriques. Ces équipements permettent d'éviter le déclenchement d'un incendie lié à la foudre. Le risque d'incendie sur les équipements électriques fait tout de même l'objet de dispositions de prévention, de protection et de limitation des conséquences, comme pour le reste des installations.

Le feu de forêt

Afin d'éviter la propagation d'un éventuel feu de forêt aux installations, des bandes de plusieurs dizaines de mètres sont prévues et entretenues en prairie calcicole (pelouse rase). La zone descenderie, sur laquelle est implantée l'installation nucléaire de surface située en zone agricole, et à distance de forêts. En cas de feu de forêt à proximité de la zone puits, les équipes d'intervention incendie et de secours seront rapidement sollicitées, notamment pour arroser et protéger les abords afin d'éviter tout risque de propagation aux installations.

Les incidences négatives notables sur l'environnement des risques d'accidents et de catastrophes majeurs sont restituées au chapitre 17 du volume IV de la présente étude d'impact.

Synthèse

L'article L. 591-1 du code de l'environnement définit la sûreté nucléaire comme étant « l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base, ainsi qu'au transport des substances radioactives, prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets ».

Le centre de stockage Cigéo est conçu pour assurer la protection de l'homme et de l'environnement conformément à la réglementation relative aux installations nucléaires de base (90).

La démarche de sûreté des installations nucléaires repose sur la mise en œuvre du principe de défense en profondeur. Il s'agit de mettre en place une série de lignes de défense successives, chacune pouvant intervenir après la défaillance de la précédente, aptes à prévenir l'apparition ou, le cas échéant, à limiter les conséquences de défaillances techniques, humaines ou organisationnelles susceptibles de conduire à des situations accidentelles pouvant affecter la protection de l'homme ou de l'environnement.

L'analyse de l'ensemble des risques conduit ainsi à définir les dispositions techniques et organisationnelles permettant d'en assurer leur maitrise (dispositions de prévention, de protection, de limitation des conséquences), selon ce principe de défense en profondeur :

- vis-à-vis des risques dits « nucléaires ». Ce sont les risques d'événements liés à la présence d'éléments radioactifs au sein des colis de déchets radioactifs. Le centre de stockage Cigéo acceptera uniquement des colis respectant l'ensemble des critères permettant de s'assurer de la sûreté de leur stockage. À titre d'exemple, des protections radiologiques sont placées entre les termes sources radiologiques (les colis de déchets radioactifs) et les personnes (les travailleurs et le public). Les opérations de manutention réalisées directement sur les colis primaires (déchargement des emballages de transport, confection des colis de stockage…) ou sur les colis de stockage (transfert et mise en alvéole de stockage…) sont automatisées et supervisées à distance. Plusieurs « barrières de confinement » sont interposées entre l'environnement et les éléments radioactifs ;
- vis-à-vis des risques d'agressions dites « internes ». Ce sont les risques d'événements non nucléaires liés à la construction et au fonctionnement des équipements et installations. À titre d'exemple, la conception de des équipements s'appuie sur des solutions technologiques standard et éprouvées. Le système de freinage du funiculaire comprend quatre systèmes, qui se déclenchent successivement en cas de défaillance du précédent. Les colis de déchets, ainsi que les hottes dans lesquels ils sont placés pour leur transfert vers les alvéoles de stockage sont manutentionnés à faible hauteur. Les produits combustibles ou inflammables sont limités autant que faire se peut par l'utilisation de moyens et d'équipements électriques. Les colis de stockage font l'objet d'essais pour tester leur résistance au feu. Des systèmes de détection automatique incendie sont installés dans tous les locaux et les zones sensibles. Les installations sont également compartimentées par des parois résistantes au feu, des portes et des clapets coupe-feu asservis à la détection et équipées de systèmes d'extinction manuels ou automatiques en fonction du besoin. En cas d'incendie, les équipes d'intervention incendie et de secours, présentes sur le centre de stockage Cigéo en permanence, sont systématiquement sollicitées afin d'être rapidement sur place ;
- vis-à-vis des risques d'agressions dites « externes ». Ce sont les risques d'événement non nucléaires, naturel ou anthropiques, survenant à l'extérieur des équipements et installations (par exemple, un séisme ou une chute d'avion). Le centre de stockage Cigéo est implanté dans une zone présentant un risque sismique très faible compte tenu de la nature du sous-sol et d'une absence d'activité récente des zones de failles. Les installations sont toutefois conçues pour résister à des aléas extrêmes, forte intensité (séismes, pluies, remontées de la nappe phréatique, températures chaudes ou froides, vents et tornades.). L'installation nucléaire de surface est également dimensionnée pour résister à la chute d'un avion.

Ainsi, l'analyse détaillée des risques a conduit à la mise en œuvre de nombreuses dispositions : des dispositions de prévention des anomalies de fonctionnement et des défaillances des systèmes, des dispositions de détection des défaillances et de maîtrise des anomalies de fonctionnement, des dispositions de maîtrise des accidents et des dispositions de limitation des conséquences des accidents les plus graves.

Les études de sûreté sont mises à jour à chaque étape de la conception du projet et tout au long de ses phases de vie ensuite. Une première restitution de cette étude a été présentée dans le dossier d'options de sûreté (DOS) du centre de stockage Cigéo (60) et sera complétée et étayée pour le dossier de demande d'autorisation de création (DAC).

Les situations accidentelles radiologiques et non radiologiques susceptibles d'affecter le centre de stockage Cigéo sont présentées au chapitre 17 du volume IV de la présente étude d'impact du projet global Cigéo.

Par ailleurs, suite à l'avis 2020-79 de l'Autorité environnementale (91) sur la présente étude d'impact, l'Andra a préparé une synthèse des options de sûreté du centre de stockage Cigéo dans le mémoire en réponse à l'avis de l'Autorité environnementale, annexe 1 de la pièce 8 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo.

2.5 Un projet développé en dialogue avec la société

2.5.1 L'information et le dialogue local

La mission d'information et de communication de l'Agence est inscrite dans la loi et fait partie intégrante de ses activités. Son ambition est de sensibiliser et d'impliquer la société civile d'aujourd'hui afin d'assurer la continuité avec la génération suivante. L'Andra s'efforce de fournir de l'information transparente, fréquente et régulière, et selon une approche pédagogique afin de permettre au public de comprendre les sujets en lien avec la gestion des déchets radioactifs.

L'Agence s'adresse en priorité à ceux qui sont les plus concernés par les déchets radioactifs – les riverains de ses centres et de ceux des producteurs de déchets - mais aussi à ceux qui prennent les décisions, qui représentent le public, aux relais d'information et plus largement à tout citoyen que le sujet intéresse.

Pour ce qui concerne le projet de centre de stockage Cigéo, l'Andra dispose d'une large palette d'outils de communication à destination des différents publics et notamment du grand public et des populations du territoire :

- les sites web de l'Agence s'adressent au grand public et fournissent des informations pédagogiques et illustrées ;
- le « Mag » de l'Andra, un magazine en ligne d'information regroupant des brèves et sujets de fond et proposant mensuellement un panorama complet de l'actualité de l'Andra et du Centre de Meuse/Haute-Marne (CMHM) ;
- les brochures d'information sur les différents sites, activités et projets de l'Andra ;
- le journal de l'Andra, une publication papier pour informer les riverains du CMHM de ses dernières actualités est diffusée chaque trimestre à environ 200 000 exemplaires en Meuse et en Haute-Marne ;

- tous les ans, l'Andra publie son rapport annuel d'activité ainsi que celui de chacun de ses centres et donc du CMHM. Elle diffuse également d'autres rapports spécifiques : le rapport d'activité scientifique et technique, le rapport financier, le bilan du dialogue et de la concertation… ;
- l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs est publié tous les trois ans. Toutes les données sont disponibles sur un site web dédié : inventaire.andra.fr. Depuis 2016, l'Andra met à disposition du grand public les données brutes de l'Inventaire national en Open data ;
- des documents scientifiques et techniques sont édités ponctuellement par l'Andra en lien avec l'avancée de ses travaux : des études (par exemple celles menées dans le cadre du PNGMDR), des notes (par exemple sur la réversibilité) ou encore des programmes de recherche (par exemple sur le stockage géologique) ;
- des dossiers et communiqués de presse sont diffusés régulièrement (brèves, communiqués et dossiers de presse), des conférences de presse locales et des voyages de presse sont organisés.

Un Comité local d'information et de suivi (CLIS) a été créé pour le Laboratoire souterrain sur un modèle approchant les commissions locales d'information (CLI) des installations nucléaires créées par la loi relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (92).

LE COMITÉ LOCAL D'INFORMATION ET DE SUIVI

Depuis fin 1999 (cf. Figure 2-62), il existe auprès du Laboratoire souterrain de Bure, une association dénommée « Comité local d'information et de suivi » (CLIS) chargée d'une mission générale de suivi, d'information et de concertation en matière de recherche sur la gestion des déchets radioactifs et, en particulier, sur le stockage de ces déchets en couche géologique profonde. Le CLIS a été créé par la loi de 1991 (cf. Chapitre 2.3.4.1 du présent document) (29).

Ce comité comprend des représentants de l'État et de l'agence régionale de santé, deux députés, deux sénateurs et des élus des collectivités territoriales (consultées à l'occasion de l'enquête publique ou concernées par les travaux du Laboratoire), des représentants d'associations de protection de l'environnement, de syndicats agricoles, d'organisations professionnelles, d'organisations syndicales de salariés représentatives et de professions médicales, des personnalités qualifiées ainsi que l'Andra.

Le CLIS est informé régulièrement des objectifs du programme du Laboratoire souterrain, de la nature des travaux et des résultats obtenus dans le cadre des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs. Il est consulté sur toutes questions relatives au fonctionnement du Laboratoire ayant des incidences sur l'environnement et le voisinage. L'Andra transmet régulièrement au Clis les informations et les documents relatifs à l'avancement du projet global Cigéo et répond aux questions de ses membres.

Il travaille en lien avec la Commission nationale d'évaluation (CNE) chargée d'évaluer annuellement l'état d'avancement des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs et le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN), créé par la loi du 13 juin 2006 (92), instance nationale d'information, de concertation et de débat sur les risques liés aux activités nucléaires et l'impact de ces activités sur la santé des personnes, sur l'environnement et sur la sécurité nucléaire.



Figure 2-62 Première réunion du CLIS le 15 novembre 1999

2.5.2 Des échanges pour prendre en compte les préoccupations du territoire et préparer l'intégration du projet global Cigéo

En complément des lois, des débat publics et des échanges réguliers avec le CLIS, des concertations organisées par l'Andra et les autres maîtres d'ouvrage du projet global Cigéo[105] (cf. Chapitre 4.1 du présent document) permettent de prendre en compte les préoccupations du territoire et de préparer l'intégration du projet. L'intégration du projet global Cigéo est un enjeu fort pour l'Andra et le territoire, ainsi qu'une opportunité de développement économique local.

L'Andra a été associée aux travaux conduits afin d'établir un projet de développement du territoire (PDT) piloté par la préfecture de Meuse, coordinatrice pour les deux départements, dont l'objet est de préparer l'arrivée de Cigéo tout en contribuant au développement territorial.

Les échanges permettent de coordonner les actions d'un grand nombre d'acteurs locaux : préfectures de la Meuse et de la Haute-Marne, services déconcentrés de l'État, parlementaires meusiens et haut-marnais, collectivités territoriales, intercommunalités, maires des communes avoisinantes, représentants des communautés de communes concernées par l'élaboration des documents d'urbanisme et de planification (schémas de cohérence territoriale (SCoT), PLU et PLUi…), chambres consulaires, groupements d'intérêt public (GIP).

Les actions de ce projet de développement du territoire visent à définir notamment différents aménagements (liaisons routières, développement de l'habitat, télécommunications, services à la population) et à accompagner le développement économique (mises en valeur de l'attractivité du territoire, connaissance des compétences locales…). Ces actions sont réalisées indépendamment du projet global Cigéo en tenant compte des équilibres locaux.

[105] Le projet global Cigéo, étudié dans la présente étude d'impact, recouvre le centre de stockage Cigéo et les opérations (installations, aménagements et constructions d'ouvrages) nécessaires à sa réalisation et à son fonctionnement. Il comprend des opérations sous la maîtrise d'ouvrage de l'Andra et des opérations sous maîtrises d'ouvrages tierces.

OPÉRATION D'INTÉRÊT NATIONAL (OIN)

Le Gouvernement projette de créer une OIN sur le territoire d'implantation du centre de stockage Cigéo afin de répondre aux enjeux d'aménagement du territoire. Cet outil permettra à l'Etat de prendre en compte la situation interdépartementale du projet et de veiller à développer, dans une approche globale et intégrée, un aménagement cohérent sur les différents territoires concernés.

Cette vision de l'État sur les enjeux et orientations d'aménagement du territoire sera à construire en associant les collectivités concernées.

2.5.3 La démarche de dialogue et la concertation de l'Andra

L'implication de la société et le pilotage démocratique ont toujours été au cœur du projet de développement d'un stockage en couche géologique profonde, comme le montrent les lois débattues et votées au Parlement (cf. Chapitre 2.3.4 du présent document) et les débats publics organisés par la Commission nationale du débat public en 2005 (93), 2013 (94) et 2019 (95).

La démarche de dialogue et de concertation engagée par l'Andra sur le projet de centre de stockage Cigéo est au cœur des objectifs de l'Andra. Cette démarche est volontaire. L'Andra considère qu'elle permet d'améliorer la qualité des décisions relatives à la conception du projet de centre de stockage et répond aux exigences sociétales, éthiques et territoriales de ce projet.

Le processus de concertation est itératif : les études techniques alimentent la concertation et inversement.

LES DÉBATS PUBLICS DE 2005 ET 2013

- **Le débat public de 2005**

  Le débat public sur les options générales en matière de gestion des déchets radioactifs se tient du 12 septembre 2005 au 13 janvier 2006. Il est organisé pour éclairer les décisions ou les orientations qui pourront être prises par les pouvoirs publics, notamment dans la perspective des décisions nationales prévues en 2006 (échéance fixée par la Loi dite Bataille de 1991).

  Le 22 mars 2006, les ministères de l'Économie, des finances et de l'industrie et de l'Écologie et du développement durable rendent publiques les suites qu'ils prévoient de donner à ce débat public. Ils proposent de retenir le stockage géologique comme « voie de gestion préférentielle pour les déchets de haute activité à vie longue », avec plusieurs conditions pour sa mise en œuvre :

  - ✓ l'utilisation d'installations d'entreposage pour recevoir les déchets avant leur gestion dans un centre de stockage ;
  - ✓ la réversibilité du stockage ;
  - ✓ la surveillance de ce dernier tout au long de son exploitation et durant la période de réversibilité.

  En juin 2006, sur la base du « Dossier 2005 - Argile » de l'Andra, des conclusions du débat public et de l'avis de la DGSNR (qui deviendra l'ASN), le Parlement adopte la loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs le 28 juin 2006. Le stockage profond réversible devient la solution de référence pour la gestion à long terme des déchets HA et MA-VL. L'État charge l'Andra de poursuivre ses études, afin de concevoir et d'implanter un centre de stockage dans la couche argileuse à environ 500 mètres de profondeur, au sein de la zone de 250 km² étudiée notamment au moyen du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

- **Le débat public de 2013**

  En 2013, le débat public sur le projet de centre de stockage Cigéo est organisé en application de la loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs dont l'article 12 (article L. 542-10-1 du code de l'environnement). Il se tient du 15 mai au 31 juillet 2013, et est finalement prolongé jusqu'au 15 décembre 2013.

  À l'issue du débat public, l'Andra décide le 5 mai 2014 de poursuivre le projet, en y apportant quatre évolutions :

  - ✓ l'intégration d'une phase industrielle pilote au démarrage de l'installation ;
  - ✓ la mise en place d'un plan directeur pour l'exploitation (PDE) de Cigéo élaboré en concertation avec les parties prenantes et régulièrement révisé ;
  - ✓ un aménagement du calendrier ;
  - ✓ une implication renforcée de la société civile.

  Par ailleurs, l'Andra propose des définitions pour la réversibilité et pour la récupérabilité. Enfin, l'Agence renouvelle ou prend plusieurs engagements : maîtriser les coûts et chiffrer le projet, contribuer à la planification des aménagements nécessaires aux travaux de construction du centre de stockage Cigéo puis à sa mise en service, créer un programme de recherche sur la mémoire du stockage, retenir l'option du raccordement ferroviaire pour l'acheminement des colis radioactifs jusqu'au centre de stockage.

  La décision post-débat public de l'Andra est suivie de la loi du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute activité et moyenne activité à vie longue, qui reprend les évolutions du projet.

2.5.3.1 Le principe de concertations post-débat public menée par l'Andra

Tout en s'inscrivant dans une action de long terme, le dialogue nécessite d'ouvrir de nouveaux espaces d'échange, et l'Andra a ainsi décidé d'élargir et d'approfondir le champ du dialogue, à la fois sur les thèmes à mettre en débat et sur les publics à mobiliser.

Suite au débat public de 2013 consacré au projet de centre de stockage Cigéo, l'Andra a entendu les demandes exprimées par le public et a renforcé progressivement sa démarche de dialogue en impliquant plus largement et plus étroitement la société à la conception du projet, en particulier les populations de son territoire d'accueil de Meuse et de Haute-Marne.

L'Andra a aussi accentué les démarches d'information et entrepris des premières initiatives de concertation sur des sujets ayant trait aux impacts environnementaux et territoriaux du projet.

Pour accompagner sa démarche de concertation et suite à l'engagement pris à l'issue du débat public de 2013, l'Andra a créé en 2015 un Comité éthique et société (CES). Il a notamment pour mission d'éclairer, de faire progresser, de donner des avis et d'évaluer l'Andra en matière de prise en compte des enjeux éthiques et environnementaux. Il participe aux échanges sur les conditions d'intégration du projet dans le territoire.

Cette nouvelle dynamique est formalisée dans une feuille de route de concertation post-débat public. Cette concertation est placée sous l'égide de garants nommés par la commission nationale du débat public (CNDP) suite à une demande formulée par l'Andra. Ceux-ci veillent à la cohérence et à la lisibilité des dispositifs de concertation. Ils s'assurent également de la pertinence et de l'exhaustivité des modalités de concertation mises en place, notamment pour la bonne information et la participation effective du public au projet.

Cette feuille de route (cf. Figure 2-63) présente les grandes orientations de la concertation locale et nationale et décline les deux grands enjeux du projet : l'insertion territoriale et environnementale et le développement et le déploiement du projet de centre de stockage Cigéo.

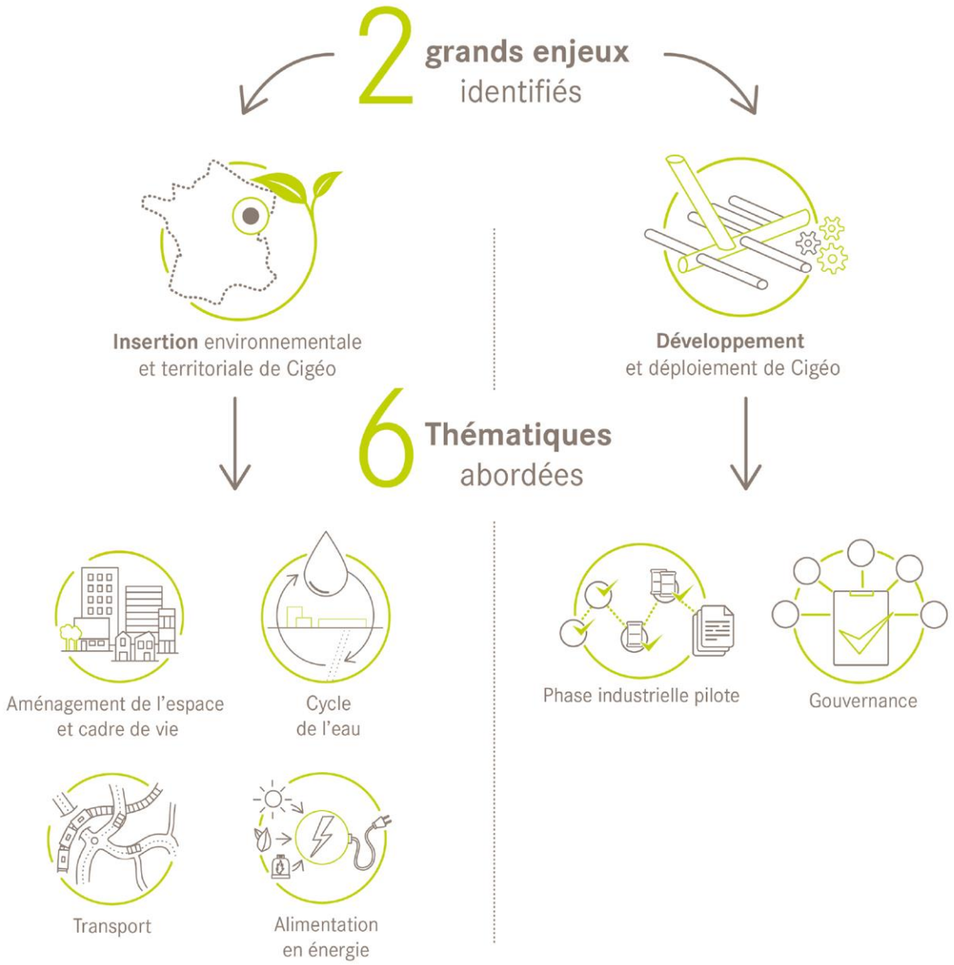
La concertation « post-débat public » (source CNDP)

La Commission nationale du débat public (CNDP), autorité administrative indépendante créée par la loi du 27 février 2002, est chargée de veiller au respect de la participation du public durant le processus d'élaboration des projets d'aménagement ou d'équipement d'intérêt national, régional ou local, ayant une incidence importante sur l'environnement ou l'aménagement du territoire.

Pour ce type de projets, le code prévoit deux procédures participatives : le débat public et la concertation. Elles visent à garantir le droit à l'information et à la participation du public et elles sont décidées et gérées par la CNDP.

Lorsqu'un débat public a été mené, la concertation avec le public ne s'arrête pas à la clôture de ce débat. Une concertation publique dite « post-débat public » peut être organisée par le maître d'ouvrage sous l'égide d'un ou plusieurs garants désignés par la CNDP. Comme toutes les concertations, elle a pour objectif de recueillir les avis des parties prenantes et/ou du grand public sur un projet, avant que les décisions structurantes du projet ne soient prises et durant sa phase de réalisation.

Cette concertation fait le plus souvent l'objet d'une feuille de route définie en lien avec le ou les garants. Elle peut donner lieu à des réunions publiques des modules de participation en ligne, des ateliers territoriaux ou thématiques qui doivent faire l'objet de comptes rendus publics. Cette concertation « post-débat public » se déroule sur un temps long, au fur et à mesure que le projet se précise et généralement jusqu'à la réception des équipements et travaux et jusqu'au démarrage du projet. Le rôle des garants consiste à veiller à ce que le public soit régulièrement informé des résultats des discussions et puisse donner son avis. Il rédige également des rapports pour rendre compte de son activité et de la manière dont se déroule la concertation « post-débat public ».



CG-01-D-MGE-AMOA-CM0-0000-20-0035-B

Figure 2-63 Feuille de route de la concertation post-débat public

Pour mener à bien ses concertations, l'Andra, s'est fixée plusieurs objectifs

- délivrer de l'information et faire de la pédagogie ;
- faire émerger des propositions et des observations du public ;
- interroger les variantes et/ou solutions techniques proposées et décider d'une solution préférentielle ;
- co-construire sur certains sujets suffisamment ouverts.

2.5.3.2 La concertation locale sur l'insertion territoriale et environnementale du projet

Le centre de stockage Cigéo nécessitera des aménagements et des infrastructures qui transformeront le territoire. Il est essentiel que les acteurs locaux et les habitants soient associés et participent aux réflexions pour répondre au mieux à leurs préoccupations et leurs attentes.

L'Andra a établi, en lien avec les garants, un programme local de conférences, de réunions et d'ateliers sur quatre thématiques (cf. Figure 2-64), pour nourrir le dossier de la déclaration d'utilité publique et son étude d'impact :

- le cycle de l'eau ;
- les transports ;
- l'énergie ;
- l'aménagement de l'espace et le cadre de vie.

En 2018, l'Andra a organisé 10 rencontres, regroupant près de 500 participants sur les thèmes « Cycle de l'Eau » et « Infrastructures de transports ».

En 2019, 2 thématiques d'échanges avec le territoire sont ouvertes par l'Andra, tout en s'assurant de la bonne coordination avec le débat public PNGMDR :

- l'alimentation en énergie de Cigéo. Les échanges se sont achevés début juin après un cycle de 4 conférences et ateliers de travail collaboratif, regroupant plus de 170 participants ;
- l'aménagement de l'espace et le cadre de vie, débutée à l'automne 2019, qui se déroulera sur plusieurs années, jusqu'à accompagner la phase de construction initiale du centre de stockage Cigéo, si celui-ci est autorisé. Dans le cadre de cette thématique, les enjeux « chantier » ont été abordés en 2020. Par la suite, pourront être abordés des thèmes tels que l'insertion paysagère, l'architecture et l'usage des bâtiments, le suivi de l'environnement.

Par ailleurs, en 2020 et 2021, ont été menées en lien avec le projet global Cigéo :

- une concertation relative à la mise en compatibilité de documents d'urbanisme portée par le ministère de la transition écologique ;
- une concertation relative au raccordement électrique du centre de stockage Cigéo portée par RTE ;
- une concertation relative à l'opération de mise à niveau de la ligne 027 000 du réseau ferré national portée par SNCF Réseau.



Figure 2-64 Ateliers de concertation autour du projet Cigéo

2.5.3.3 La concertation locale et nationale sur les enjeux de développement et de déploiement du centre de stockage Cigéo

La feuille de route de la concertation identifie une autre thématique qui est à traiter à la fois à l'échelle locale mais aussi nationale, en vue du décret d'autorisation du centre de stockage Cigéo et au-delà : le développement et le déploiement du centre de stockage Cigéo et notamment les sujets de sa gouvernance et de sa phase industrielle pilote.

a) La gouvernance du centre de stockage Cigéo

L'Andra propose que la « gouvernance du centre de stockage Cigéo » recouvre la façon dont sont préparées, prises et suivies des décisions, du ressort de l'Andra, relatives au développement et au fonctionnement du centre de stockage. Cette gouvernance doit permettre d'associer tout au long de la vie du stockage les acteurs nationaux et locaux, les parties prenantes et le public. Il paraît donc indispensable de réfléchir collectivement à la manière d'associer le public aux décisions à prendre dans le cadre du développement progressif du centre de stockage Cigéo : qui associer ? À quel moment ? De quelle façon ? Dans quelles conditions et avec quels moyens ?

Compte tenu du caractère inédit du centre de stockage Cigéo (nouveau type d'installation souterraine, échelle de temps particulièrement longue, enjeux nationaux et locaux...), son développement sera nécessairement progressif. La vie du projet sera ponctuée d'échanges et de décisions pour lesquels les citoyens seront sollicités.

Afin de garantir la participation des citoyens tout au long de la vie de l'installation de stockage en couche géologique profonde et conformément à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, l'Andra produira un Plan directeur de l'exploitation (PDE) qui sera mis à jour tous les cinq ans, en concertation avec les parties prenantes et le public.

Une première version de ce PDE a été formalisée par l'Andra en 2016 sur la base des études d'avant-projet du projet. Ce document précise l'inventaire des déchets à stocker au sein du centre de stockage Cigéo, les objectifs des différentes phases du projet et en particulier de premières propositions pour la phase industrielle pilote. Il

présente également les choix offerts par la réversibilité en matière de conduite du projet global Cigéo. La prochaine version du PDE sera produite pour la demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo. De premiers échanges ont eu lieu depuis 2016 pour recueillir l'avis de parties prenantes sur ce document (CLIS, ANCCLI, PNGMDR, DGEC, syndicats de salariés…).

L'Andra a formalisé, dans un dossier concertation publié en mai 2021, ses propositions en matière de gouvernance du centre de stockage Cigéo (https://www.andra.fr/lancement-de-la-concertation-sur-la-gouvernance-de-cigeo). La concertation actuellement en cours, et qui se poursuivra jusqu'à fin 2021, a pour objectif de présenter, clarifier et discuter notamment des propositions de l'Andra en matière de :

- rôle des parties prenantes et du public dans la gouvernance du centre de stockage ;
- modalités d'association des parties prenantes et du public à la gouvernance du centre de stockage ;
- types de décisions qui seront soumis à la gouvernance du centre de stockage ;
- leviers pour garantir le bon fonctionnement de la gouvernance du centre de stockage ;
- durée de la gouvernance du centre de stockage ;
- principes de fonctionnement et valeurs de la gouvernance du centre de stockage.

L'Andra publiera la synthèse des échanges, les enseignements qu'elle en tire et la manière dont ses apports en matière de gouvernance du centre de stockage pourront être intégrés au projet. Les apports de cette concertation et les évolutions éventuelles du projet seront retranscrits principalement dans le plan directeur de l'exploitation (PDE) de Cigéo, pièce constitutive du dossier de demande d'autorisation de création (DAC), appelée par le code de l'environnement (article L. 542-10-1).

La concertation se poursuivra avec les parties prenantes et le public pendant l'instruction technique du dossier de demande d'autorisation de création pour mieux définir la gouvernance du centre de stockage Cigéo et en préciser les modalités, ainsi qu'intégrer les prescriptions des autorités. Elle se poursuivra notamment pendant la phase industrielle pilote de Cigéo qui permettra des apprentissages en matière de pratique de la gouvernance.

Au-delà le dialogue et la participation du public au projet se poursuivront à toutes les étapes structurantes du projet, conformément aux recommandations émises par le Haut comité à la transparence et à l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN (96)).

Les modalités d'information du public entre deux mises à jour du plan directeur d'exploitation (PDE), les jalons décisionnels du projet de centre de stockage Cigéo, ainsi que la gouvernance à mettre en œuvre afin de pouvoir réinterroger les choix effectués seront fixés par le plan national de gestion de matières et déchets radioactifs (PNGMDR) (article 8 de la décision de la ministre de la transition écologique et solidaire et du Président de l'Autorité de sûreté nucléaire sur les suites à donner au débat public PNGMDR (97)).

b) La phase industrielle pilote

Les premières années du déploiement et du fonctionnement du centre de stockage Cigéo, constituent la « phase industrielle pilote » (Phipil). Retenue par l'Andra à l'issue du débat public de 2013 sur le projet de centre de stockage Cigéo, cette phase est inscrite depuis 2016 dans le code de l'environnement (article L. 542-10-1) (cf. Chapitre 5.2 du présent document).

Ces premières années joueront un rôle clé pour conforter progressivement la conception du stockage et les données utilisées pour sa démonstration de sûreté. Elles permettront de compléter et de vérifier les paramètres techniques, de réaliser des essais en conditions réelles et d'acquérir l'expérience du fonctionnement du stockage. Elles seront déterminantes pour l'association des parties prenantes et du public au projet, au travers de la mise en œuvre concrète de la gouvernance particulière du centre de stockage Cigéo.

L'Andra a formalisé, dans un dossier concertation publié en janvier 2021, ses propositions en matière de phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo (https://www.andra.fr/concertation-sur-la-phase-industrielle-pilote-de-cigeo). La concertation sur la phase industrielle pilote (Phipil), lancée en janvier 2021 lors d'un webinaire public réunissant près de 280 participants, se poursuivra jusqu'à fin 2021. Elle a pour objectif de présenter, clarifier et discuter les propositions de l'Andra et notamment :

- la Phipil telle qu'aujourd'hui proposée par l'Andra en termes de démarche de déploiement du centre de stockage ;
- les éléments de connaissances à acquérir en Phipil et à apporter au Parlement pour fonder sa décision relative aux conditions de poursuite du projet à l'horizon 2040-2050 ;
- l'organisation de la Phipil et son périmètre ;
- le déroulement de la Phipil en termes de processus décisionnel ;
- l'articulation de la Phipil avec les exercices périodiques prévus par la réglementation en lien avec l'exploitation de Cigéo (mises à jour du plan directeur de l'exploitation, revues de réversibilité, réexamens de sûreté) ;
- les rapports préparés par l'Andra pendant la Phipil.

L'Andra publiera la synthèse des échanges, les enseignements qu'elle en tire et la manière dont ses apports en matière de phase industrielle pilote. Les apports de cette concertation et les évolutions éventuelles du projet seront retranscrits principalement dans le plan directeur de l'exploitation (PDE) de Cigéo, pièce constitutive du dossier de demande d'autorisation de création (DAC), appelée par le code de l'environnement (article L. 542-10-1). La concertation en 2021 est la première étape d'une démarche durable de dialogue sur la phase industrielle pilote.

Les échanges se poursuivront au-delà du dépôt du dossier de DAC de l'installation nucléaire du centre de stockage Cigéo, pendant le temps de son instruction (entre 3 à 5 ans), et même jusqu'à la constitution du rapport qui sera transmis au Parlement en support de sa décision sur les conditions de poursuite du projet.

Au-delà le dialogue et la participation du public au projet se poursuivront à toutes les étapes structurantes du projet, conformément aux recommandations émises par le Haut comité à la transparence et à l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN (96)).

Les objectifs et les critères de réussite de la phase industrielle pilote seront fixés par le PNGMDR (article 8 de la décision de la ministre de la transition écologique et solidaire et du président de l'Autorité de sûreté nucléaire sur les suites à donner au débat public PNGMDR (97).

LE DÉBAT PUBLIC DE 2019 SUR LE PNGMDR

Le Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR), porté par la Direction générale de l'énergie et du climat ainsi que par l'Autorité de sûreté nucléaire, est pour la première fois soumis au débat public, à la suite de la modification du code de l'environnement par une ordonnance du 3 août 2016. Celle-ci prévoit que la Commission nationale du débat public soit saisie de tous les plans et programmes d'importance nationale et décide des modalités d'organisation de la participation du public.

Le PNGMDR, document programmatique, aborde tous les sujets liés à la gestion des matières et déchets radioactifs, incluant le projet de centre de stockage Cigéo. Le débat public sur le projet de Plan s'est tenu du 17 avril au 25 septembre 2019.

En amont du débat public, un exercice de clarification des controverses techniques a été organisé par la Commission particulière du débat public, afin « *d'apporter au public non spécialiste mais soucieux de disposer d'une bonne information technique les informations permettant de comprendre les différences d'argumentations exprimées par des experts ou des organismes institutionnels, sur des questions relevant de ce plan* ».

Le stockage géologique profond et ses alternatives ont été débattus lors de cet exercice de clarification unanimement salué par les participants. Il a notamment permis de montrer que les controverses ne se situaient désormais plus tant sur les aspects techniques, mais qu'elles portaient davantage sur les aspects éthiques et sociétaux ou sur des choix de société. Il s'agit là d'une véritable avancée pour l'Andra qui invite à poursuivre le travail de clarification de ces controverses, de manière ouverte et contradictoire.

Le 25 novembre, la Présidente de la Commission particulière du débat public sur le Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) a présenté les principales conclusions qu'elle tire des cinq mois d'échanges sur la 5ème édition du Plan et la Présidente de la Commission Nationale du débat public a dressé le bilan des enseignements clés du débat.

Le 21 février 2020, la Ministre chargée de l'énergie et le président de l'Autorité de sureté nucléaire ont rendu publiques les suites données au débat public sur le PNGMDR.

Le projet de centre de stockage Cigéo est concerné par l'article 8 de leur décision qui prévoit que le PNGMDR :

- précisera les conditions de mise en œuvre de la réversibilité du stockage, en particulier en matière de récupérabilité des colis, les jalons décisionnels du projet Cigéo ainsi que la gouvernance à mettre en œuvre afin de pouvoir réinterroger les choix effectués ;
- définira les objectifs et les critères de réussite de la phase industrielle pilote, les modalités d'information du public entre deux mises à jour successives du PDE et les modalités d'association du public aux étapes structurantes de développement du projet Cigéo ;
- organisera le soutien public à la recherche sur des voies de traitement.

Par ailleurs, la décision post-débat public de la DGEC et de l'ASN prévoit que la mise à jour de l'évaluation des coûts du projet Cigéo arrêtée par le ministre chargé de l'énergie conformément à l'article L. 542-12 du code de l'environnement sera rendue publique lors du processus d'autorisation de création du centre de stockage. La mise à sera rendue publique lors du processus d'autorisation de création de Cigéo.

L'Andra souhaite déployer les premiers enseignements qu'elle retire du débat public PNGMDR :

- en termes de concertation relative à la gouvernance :
  - ✓ de manière à s'assurer que les décisions prises aujourd'hui ne préemptent pas l'avenir (aspects techniques, éthiques et sociétaux) ;
  - ✓ pour définir avec les parties prenantes le jalonnement des décisions ;
- en s'engageant à ouvrir la concertation sur la conception du stockage, notamment les sujets liés à la sûreté et à l'exploitation.

De façon à garantir la transparence et la confiance, l'Andra a initié cette démarche avec le HCTISN et les garants de la CNDP pour le projet de centre de stockage Cigéo.

LA CONCERTATION POST-DÉBAT PUBLIC SUR LA 5ÈME ÉDITION DU PNGMDR

Une concertation post-débat public sur la 5ème édition du PNGMDR menée par le Ministère de la transition écologique (MTE) et sous l'égide de trois garants indépendants nommés par la Commission nationale du débat public, se tient du 11 septembre 2020 au 13 avril 2021. Son objectif est d'informer le public sur la déclinaison envisagée des grandes orientations du plan et de recueillir ses avis et contributions, avant de formaliser la nouvelle version du PNGMDR.

En parallèle de cette concertation publique et en articulation avec cette dernière, le ministère a fait le choix de mettre en place une commission pluraliste d'« orientations » du PNGMDR, présidée par M. Michel Badré, une personnalité qualifiée indépendante du ministère. Le ministère a confié à cette commission la mission de formuler des avis sur la déclinaison des orientations stratégiques proposées pour le plan et de l'accompagner dans son élaboration.

Le projet de PNGMDR a été transmis pour avis à l'Autorité environnementale. Il sera soumis à la consultation du public avant d'être finalisé et transmis au Parlement (objectif fin 2021).

2.5.3.4 Le dialogue local et national sur les enjeux techniques et transverses du projet de centre de stockage Cigéo

Des enjeux techniques et transverses du centre de stockage Cigéo à traiter à la fois à l'échelle locale mais aussi nationale sont identifiés dans la feuille de route de la concertation, conformément aux recommandations émises par le HCTISN.

Dans la droite ligne de l'avis de l'ASN (68) sur le dossier d'options de sûreté (DOS), l'Andra souhaite poursuivre le dialogue sur des questions à approfondir liées à la conception technique du centre de stockage : sûreté, surveillance et exploitation. D'autres sujets sociétaux et transverses pourront également être abordés : éthique, confiance, mémoire, santé et réversibilité.

2.5.4 La contribution de l'Andra au dispositif de santé publique

La construction du centre de stockage Cigéo va se dérouler sur plusieurs années et son exploitation durera plus d'un siècle (cf. Chapitre 5 du présent document).

Bien que ce projet ne soit pas de nature à impacter la santé des populations, les acteurs locaux, en particulier le Comité local d'information et de suivi (CLIS) du Laboratoire souterrain de Bure ont réfléchi à un renforcement du dispositif de santé publique du territoire autour de Cigéo.

Les axes de renforcement identifiés sont :

- le développement des infrastructures d'examen et de soins pour la population ;
- le suivi de l'état de santé des populations autour de Cigéo et notamment la mise en place d'un état sanitaire de référence.

L'Andra participe à ce développement en lien avec les acteurs locaux de la santé (Agence régionale de santé, observatoire régional de la santé – Grand Est). Une mutualisation des infrastructures d'examens médicaux implantées sur le centre de stockage Cigéo est envisagée. De plus, l'Andra collabore avec les équipes médicales de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale pour la mise au point de méthodologies de suivi médical de personnes dans le temps. Ces études, de type épidémiologique, permettraient une meilleure appréciation de la santé des riverains.

Les actions nécessaires au renforcement du dispositif de santé publique devront être développées et financées en impliquant les acteurs locaux (CLIS, collectivités, Préfectures, Agences régionales de santé) et nationales (Inserm, SPF, INCA, IRSN…).

2.6 Les choix d'implantation du centre de stockage Cigéo

Le projet de centre de stockage est décrit au chapitre 4.3 du présent document.

L'Andra a apporté des éléments complémentaires sur le processus ayant abouti aux choix d'implantation du centre de stockage dans le mémoire en réponse à l'avis 2020-79 de l'Autorité environnementale, annexe 1 de la pièce 8 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo (réponse de l'Andra à la recommandation R17).

2.6.1 Le choix d'implantation des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo

2.6.1.1 Les objectifs et critères fondamentaux pour l'implantation des ouvrages souterrains

Les travaux menés dans le Laboratoire souterrain et depuis la surface ont conclu en 2005 à la faisabilité d'un stockage géologique dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitres 2.3.2 et 2.3.3 du présent document).

Les travaux de reconnaissance menés depuis la surface ont également permis d'identifier une zone de 250 kilomètres carrés environ, située autour du Laboratoire souterrain, dans laquelle les résultats obtenus dans ce dernier pouvaient être transposés. Cette zone a été dénommée « zone de transposition » (ZT).

Afin d'avancer dans ses études, l'Andra s'est alors mise à la recherche, au sein de cette ZT, d'une zone plus restreinte de la couche de Callovo-Oxfordien, propice à l'implantation d'un stockage, dans laquelle des techniques d'exploration approfondies pourraient être utilisées pour acquérir des informations encore plus précises sur les caractéristiques du site.

La protection de l'homme et de l'environnement vis-à-vis des substances dangereuses contenues dans les déchets est l'enjeu déterminant qui a guidé l'Andra pour identifier la zone restreinte susceptible d'accueillir les ouvrages souterrains d'un éventuel stockage. En conséquence, les critères définis pour cette recherche visaient à privilégier, d'une part la bonne implantation de ces infrastructures dans la couche d'argile, d'autre part l'aptitude locale de la couche à répondre aux exigences de protection, en particulier à long terme.

Les critères prépondérants à cette étape étaient donc de nature géologique. Ils concernaient notamment :

- l'épaisseur de la couche, qui est favorable au confinement à très long terme des substances dangereuses contenues dans les colis de déchets car elle augmente leur temps de migration vers l'environnement ;
- sa profondeur, qui permet d'éloigner les déchets de la biosphère, d'isoler le stockage et de le protéger des phénomènes de surface naturels et humains (tempêtes, inondations, érosion, glaciations, sécheresses, chantiers, agressions…) ;
- son éloignement des grandes failles (notamment la faille de Gondrecourt-le-Château) qui garantit la stabilité à long terme de la couche et réduit les temps de transfert des substances dangereuses vers l'environnement ;
- sa faible inclinaison (pendage) qui simplifie la conception d'un stockage plan, sur un seul niveau, positionné dans la partie centrale de la couche. Une bonne épaisseur de garde peut ainsi être respectée, au-dessus et en-dessous des ouvrages de stockage, pour favoriser le confinement.

En parallèle de la définition de ces critères techniques, l'Andra a engagé des premiers échanges pour identifier les critères environnementaux et économiques liés à l'aménagement du territoire et à l'insertion locale du projet. L'objectif était de vérifier que le choix d'une zone souterraine restreinte pouvait être associé à des implantations des installations de surface respectueuses de l'environnement et des orientations formulées par les acteurs locaux.

Pour préparer ces échanges, l'Andra a transmis en 2008 une proposition de démarche d'information et de consultation à la commission nationale d'évaluation (CNE), à la Commission nationale du débat public (CNDP), au Haut-comité à la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN), à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), aux Préfets, au Comité local d'information et de suivi du Laboratoire souterrain et aux Présidents des Conseils généraux. Cette démarche a également fait l'objet d'échanges avec l'Office parlementaire des choix scientifiques et techniques (OPECST), le Conseil économique, social et environnemental (CESE) et des parlementaires et élus locaux. L'Andra a appliqué les recommandations faites en retour. Un comité d'expertise et de suivi de la démarche d'information et de consultation (COESDIC) a été créé sous l'égide du conseil scientifique de l'Agence.

Lors des échanges entrepris avec les acteurs locaux pour rechercher une zone plus restreinte de la couche du Callovo-Oxfordien pour y implanter un stockage, ceux-ci ont privilégié :

- d'éviter une implantation du stockage sous les zones urbanisées des villages ;
- de favoriser une implantation sous les forêts ;
- de privilégier une desserte par voie ferroviaire du centre de stockage.

Ces premières réflexions ont fait l'objet d'échanges avec le CLIS en 2008 et 2009. Elles ont notamment été présentées à l'assemblée générale du CLIS le 29 juin 2009 (98). Les discussions ont mis en évidence que la volonté d'éviter les zones urbanisées n'était pas motivée par des questions de sûreté, mais revêtait un caractère subjectif ; un critère d'éloignement fixé de façon conventionnelle à 500 mètres a donc été partagé et retenu par l'Andra. L'implantation sous les forêts a également fait l'objet de discussions, sans qu'un avis totalement unanime puisse être obtenu malgré les demandes formulées par des élus. La communauté de communes de Poissons en particulier avait formulé une demande de privilégier l'implantation sous la forêt de Montiers-sur-Saulx, forêt domaniale propriété de l'État (72). En tout état de cause, compte tenu des spécificités du territoire sur la zone de transposition, l'emprise nécessaire pour l'implantation d'un stockage (zone continue d'environ 30 km²) est située nécessairement pour parties à la fois sous des zones agricoles et sous des massifs boisés.

2.6.1.2 Le choix de la zone d'intérêt pour la recherche approfondie (ZIRA)

Suite à ces premiers échanges, l'Andra a proposé 4 scénarios (cf. Figure 2-65) pour la définition d'une zone restreinte, dite d'intérêt pour la recherche approfondies (ZIRA 1, ZIRA 2, ZIRA 3 et ZIRA 4) et les a soumis au dialogue avec les acteurs locaux.

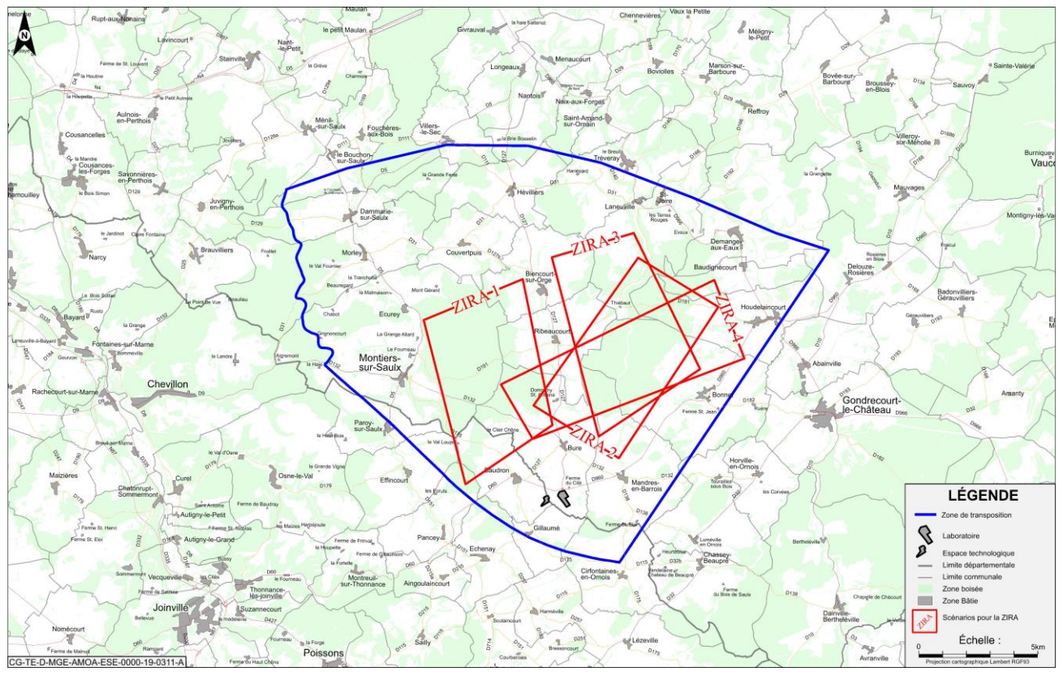


Figure 2-65 Proposition de zones souterraines d'intérêt pour une reconnaissance approfondie (2009)

Les principaux points de consensus technique exprimés par les acteurs locaux pour le choix de cette ZIRA ont confirmé le caractère déterminant de la géologie et de l'enjeu de protection de l'homme et de l'environnement. Par ailleurs, les acteurs locaux ont exprimé des demandes fortes en termes d'aménagement du territoire. L'emplacement de la ZIRA, associé aux zones d'implantation des installations de surface (cf. Chapitre 2.6.2.2 ci-après du présent document), devait favoriser le développement économique et social et réduire les nuisances pour les populations. Enfin, ils ont souhaité que le choix de la ZIRA permette d'implanter l'entrée d'une descenderie « colis » dans une zone limitrophe de la Meuse et de la Haute-Marne (cf. Chapitre 2.6.2.2 du présent document).

En parallèle à ces échanges, l'Andra a soumis les quatre zones à une analyse technique multicritères liés à la construction et à la protection de l'homme et de l'environnement. Sur la base de ces critères, le scénario d'implantation dans la position ZIRA 1 a été écarté car jugé trop proche des limites vis-à-vis de certains critères géologiques. Sa profondeur moyenne, en bonne partie supérieure à 600 m, aurait notamment compliqué les opérations de creusement des alvéoles de stockage. Cette difficulté technique aurait pu être surmontée, mais elle aurait entraîné une majoration des délais, des coûts et des consommations de matériaux.

Au vu des retours des acteurs locaux et de sa propre analyse technique approfondie, l'Andra a formulé fin 2009 une proposition affinée de ZIRA, optimisée au regard des critères de protection de l'homme et de l'environnement. Cette ZIRA (cf. Figure 2-66) inclut pour partie les ZIRA 2, 3 et 4 dans son périmètre. Située à quelques kilomètres du Laboratoire souterrain, l'épaisseur de la couche de Callovo-Oxfordien y est supérieure ou égale à 140 m. Cette épaisseur est plus importante que l'épaisseur considérée comme nécessaire pour l'implantation du stockage (120 m) et son pendage est faible (de l'ordre de 2 %). Elle présente un très faible gradient hydraulique. Son emprise, de l'ordre de 30 km^2 permet d'y implanter les infrastructures souterraines d'un stockage à une profondeur approximative de 525 m au centre de la ZIRA. De plus, elle est compatible avec l'ensemble des enjeux d'aménagement du territoire et d'insertion locale définis par les acteurs locaux. Sa définition respecte donc aussi bien les critères géologiques fondamentaux qui garantissent la protection de l'homme et de l'environnement que les volontés exprimées par le territoire. À cet égard, sa forme présente un décroché au Sud-Ouest qui permet, tel que convenu avec le territoire, d'éviter une implantation des infrastructures souterraines du stockage sous la commune de Bure.

Le comité local d'information et de suivi a informé le public sur la démarche de choix de la ZIRA. La carte a été présentée dans la presse locale en juin 2009 (Est républicain, Journal de la Haute-Marne) (99).

L'Andra a publié en 2009 un document intitulé « Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface (72) » qui fait la synthèse de la démarche suivie et présente l'ensemble des points de vue et demandes exprimées par les acteurs à cette étape.

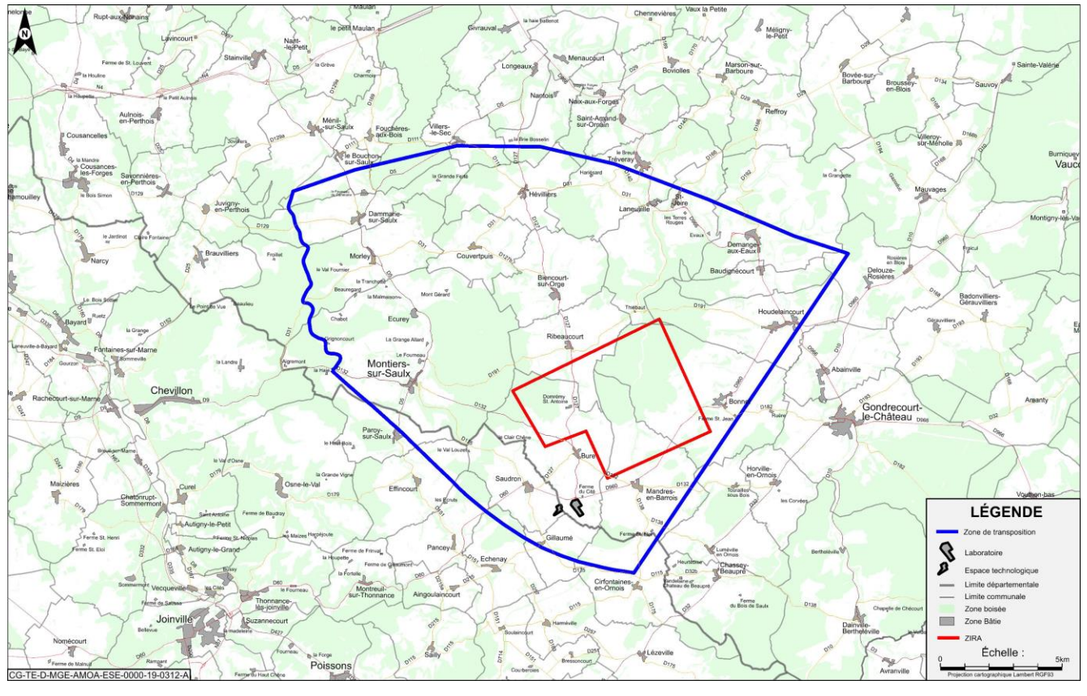


Figure 2-66 ZIRA : zone souterraine d'intérêt pour une reconnaissance approfondie

Après évaluation par la CNE, instruction technique de l'ASN (73) et consultation des élus et du Comité local d'information et de suivi du Laboratoire (CLIS), la ZIRA proposée par l'Andra a été validée par le Gouvernement en mars 2010 (100).

L'Andra a alors conduit, sur l'emprise de cette ZIRA, une campagne de reconnaissance géologique approfondie utilisant la technique de l'investigation sismique en trois dimensions (3D). Les résultats ont confirmé que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien située dans cette zone présente toutes les caractéristiques favorables à l'implantation d'un stockage profond. Cette campagne a également permis de confirmer le faible pendage de la formation du Callovo-Oxfordien et sa régularité (absence de zone affaissée et de failles).

LA CAMPAGNE DE RECONNAISSANCE COMPLÉMENTAIRE SUR LA ZIRA

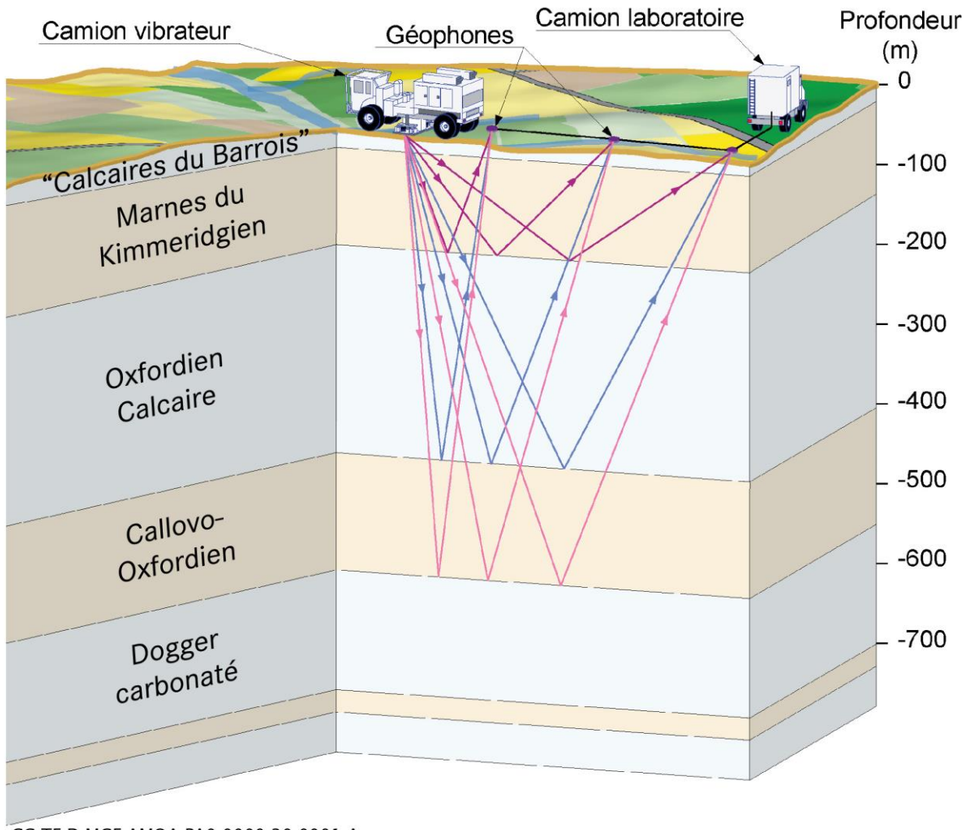
Les investigations géologiques complémentaires menées en 2010-2011 ont eu pour objectif d'ausculter plus précisément la « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie » (ZIRA) proposée par l'Andra pour accueillir le centre de stockage des déchets HA et MA-VL.

Elle a permis notamment de détailler la géométrie de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien, de contrôler la constance de ses propriétés et de vérifier l'absence de failles mineures. Elle a également permis de compléter les connaissances sur les roches situées au-dessus et en dessous de la couche d'argile.

Pour cela, les géologues ont généré une image du sous-sol en trois dimensions en utilisant le principe de l'écho (voir figure ci-contre) : une onde sismique envoyée dans le sol depuis la surface par un camion vibrant « rebondit » sur les différentes couches de roche, puis revient vers la surface où elle est enregistrée par des capteurs appelés géophones. En analysant les enregistrements des capteurs, les géologues en déduisent notamment la profondeur et l'épaisseur des différentes roches qui ont réfléchi les ondes.

Sur la ZIRA, des capteurs en nombre très important ont été disposés dans un maillage serré (1 440 récepteurs) sur une surface d'environ 3 km2 (3 x 1 km). Ils ont permis d'enregistrer simultanément les signaux réfléchis par les roches. Positionnés en lignes, ils ont été peu à peu déplacés pour couvrir progressivement l'ensemble de la zone. En complément, une vingtaine de petits forages ont été réalisés et équipés de dispositifs de mesures pour analyser les variations des vitesses des ondes sismiques.

Terminée en 2011, la campagne de mesure de terrain a ensuite donné lieu à une analyse complète de ses résultats. Les signaux enregistrés ont été traités pour construire une modélisation complète en 3 dimensions du sous-sol de la ZIRA.



CG-TE-D-MGE-AMOA-PA0-0000-20-0001-A

Figure 2-67 Principe physique des mesures sismiques



Figure 2-68 Camion vibrateur utilisé lors de la campagne de mesure sur la ZIRA

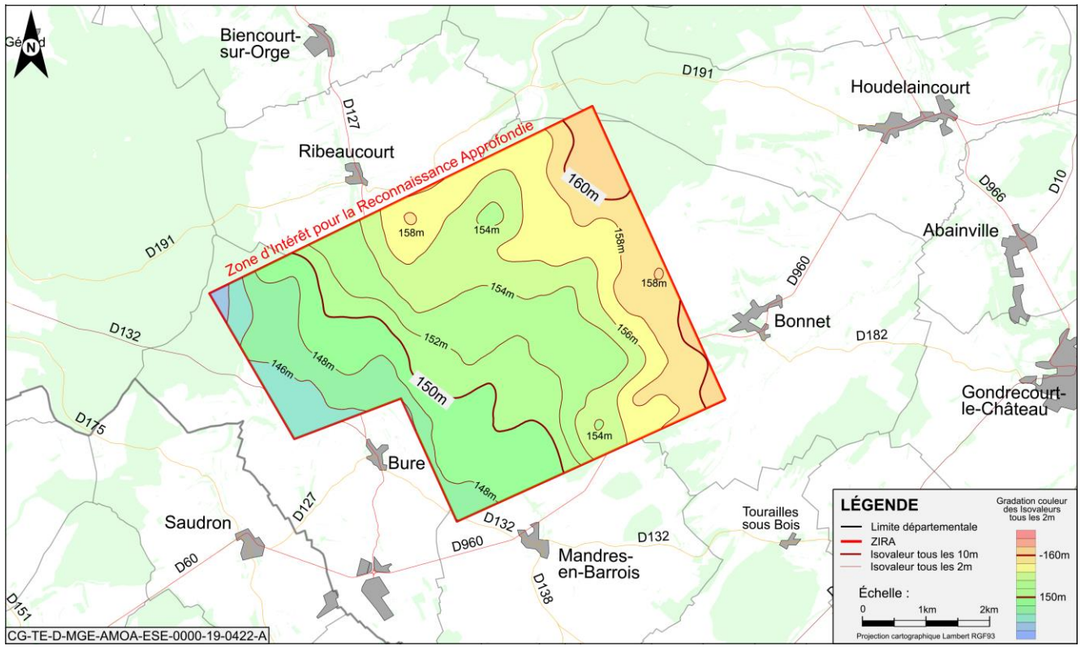


Figure 2-69 *Modélisation de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA (en m) issue de la campagne de reconnaissance géologique approfondie*

2.6.1.3 Le choix de la zone d'implantation des ouvrages souterrains de Cigéo (ZIOS)

À partir de 2011, l'Andra a lancé les études de la conception industrielle du centre de stockage Cigéo (études d'avant-projet). Une partie de ces études vise à implanter les ouvrages de stockage de façon optimale au sein de la couche de Callovo-Oxfordien de la ZIRA.

Pour ces travaux, l'Andra dispose d'une base très riche de connaissance des paramètres géologiques reposant sur l'ensemble des études menées depuis les années 1990, des investigations spécifiques effectuées depuis la surface et des expérimentations menées au Laboratoire souterrain. Compte tenu de la diversité des caractérisations géologiques menées (sédimentologie, structure, tectonique, géochimie, géomécanique, thermique, transport de soluté) et des moyens mis en œuvre pour ces caractérisations (prospection géophysique, forages, expérimentations au Laboratoire souterrain, analyses *in situ* et en laboratoires de surface), la zone de transposition (d'environ 250 km²), et la ZIRA qui y est incluse (d'environ 30 km²), font partie des sites géologiques les mieux connus du territoire français et l'excellence des travaux menés a été reconnue par les évaluateurs de l'Andra[106].

Les études de conception industrielle du centre de stockage Cigéo ont précisé progressivement l'architecture de l'installation souterraine. Ce projet a fait l'objet d'un débat public en 2013 (cf. Chapitre 2.3.4.3 du présent document), à l'issue duquel l'Andra a décidé de poursuivre ses études en y introduisant les modifications demandées, notamment relatives à son déroulement et à l'introduction d'une phase industrielle pilote.

En 2016, l'Andra a présenté ses études à un stade intermédiaire dans un ensemble de livrables comprenant notamment le dossier d'options de sûreté et le dossier d'options de récupérabilité de Cigéo, ainsi qu'une première version de son plan directeur pour l'exploitation (PDE). Ces livrables ont fait l'objet d'une revue internationale, d'une instruction technique de l'ASN et d'une évaluation par la CNE.

Les études menées depuis 2011 et chacune des étapes d'échanges et d'instruction du projet ont confirmé l'adéquation de la couche argileuse de la ZIRA à l'accueil d'un stockage de déchets HA et MA-VL. Dans son avis n° 2018-AV-0300 du 11 janvier 2018 (68), l'ASN a indiqué que l'Andra avait acquis « *une connaissance détaillée du site de Meuse/Haute-Marne, qui lui permet de confirmer la pertinence de la zone retenue pour l'implantation du stockage* ». L'Andra a donc décidé d'intégrer l'ensemble de la couche argileuse située sous la ZIRA au centre de stockage Cigéo.

La « zone d'implantation des ouvrages souterrains » (ZIOS) du centre de stockage Cigéo recouvre l'ensemble des infrastructures souterraines. Elle résulte de l'addition (cf. Figure 2-70 et Figure 2-71) :

- du bloc de Callovo-Oxfordien défini par la ZIRA ;
- de blocs cylindriques des formations géologiques supérieures dans lesquelles sont implantés les descenderies et les puits.

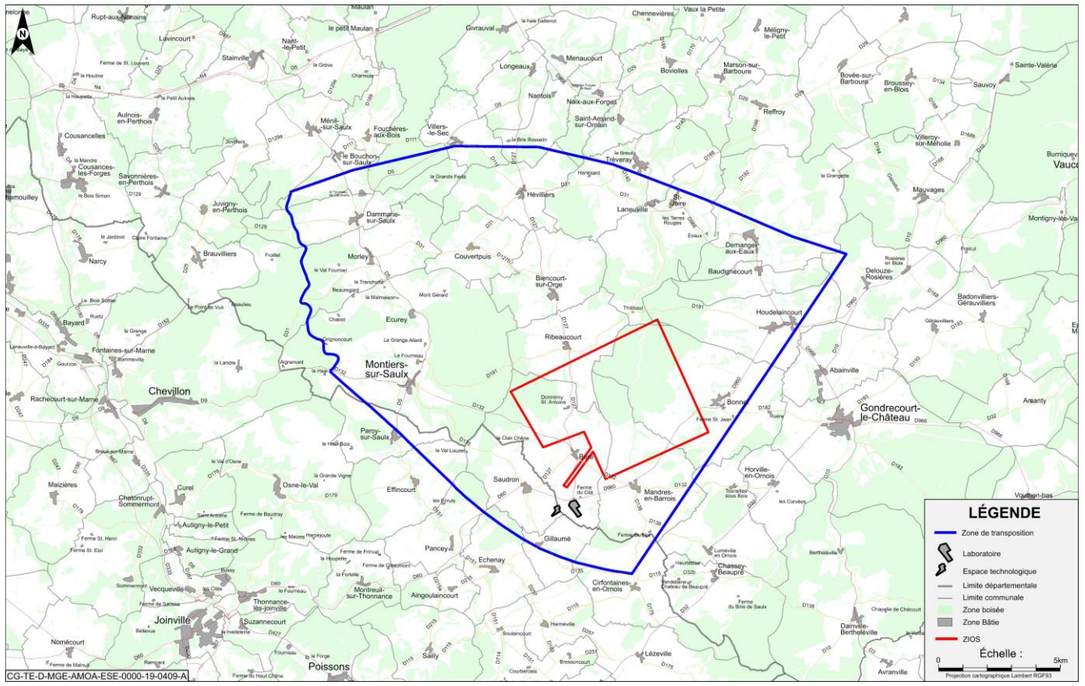


Figure 2-70 *Zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) – vue de dessus*

[106] « *L'Andra a acquis une connaissance détaillée du site de Meuse/Haute-Marne* » (ASN) Autorité de sûreté nucléaire, lettre (69), « [les moyens mis en œuvre par l'Andra] *constituent un ensemble remarquable, tant en qualité qu'en quantité, pour tout ce qui concerne les investigations menées depuis la surface. En particulier, les forages dirigés, les diagraphies et les tests de pression ont fourni plusieurs milliers de mesures et d'échantillons qui ont été étudiés de manière approfondie* » (CNE) (27)). *La commission reconnaît l'excellente qualité du dossier scientifique établi par l'Andra…* » (CNE) - Rapport n°4 – juin 2010 (101).

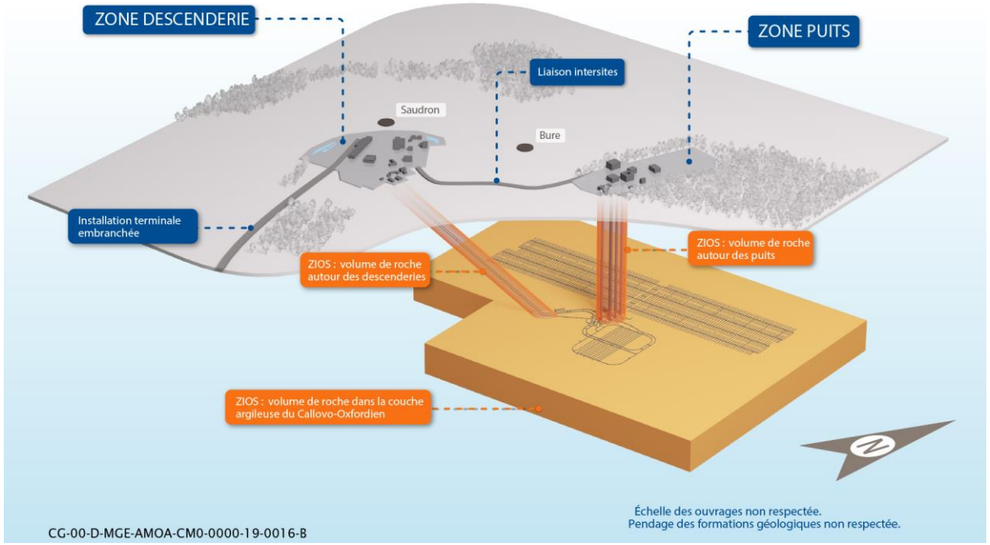


Figure 2-71 Zone d'implantation des ouvrages souterrains de Cigéo (en orange)

Sous réserve que l'Andra obtienne l'autorisation de création du centre de stockage Cigéo, elle a prévu pendant les travaux de construction des ouvrages souterrains de la ZIOS de mener un ensemble de mesures et de vérifications qui permettront de contrôler que les propriétés de la roche prises en compte pour la conception des ouvrages et pour la démonstration de sûreté sont bien celles rencontrées « *in situ* » dans l'environnement réel du futur stockage. Pour garantir la protection de l'homme et de l'environnement, l'ensemble de ces propriétés devra avoir été confirmé avant l'autorisation de mise en service de Cigéo et le stockage des premiers colis.

Synthèse des critères ayant prévalus pour le choix de la zone d'implantation des ouvrages souterrains

Les départements de la Meuse et de la Haute-Marne ont fusionné en 1995 leur candidature pour l'accueil d'un laboratoire en vue de l'accueil d'un stockage de déchets radioactifs HA et MA-VL.

Compte tenu de ses propriétés géologiques favorables, la couche argileuse du Callovo-Oxfordien présente dans le sous-sol de ses départements a été retenue par le Gouvernement, en décembre 1998, pour y implanter un laboratoire souterrain.

En août 1999, l'Andra a obtenu l'autorisation de construire le Laboratoire souterrain dit de « Meuse/Haute-Marne (36) » sur la commune de Bure, à proximité de la limite des deux départements. La construction du Laboratoire a démarré en 2000.

Les travaux menés dans le Laboratoire souterrain et depuis la surface ont conclu en 2005 à la faisabilité d'un stockage géologique dans le Callovo-Oxfordien. Les travaux de reconnaissance menés depuis la surface ont également permis d'identifier une zone de 250 kilomètres carrés environ, située autour du Laboratoire souterrain, dans laquelle les résultats obtenus dans ce dernier pouvaient être transposés. Cette zone a été dénommée « zone de transposition » (ZT).

Afin d'avancer dans ses études, l'Andra s'est alors mise à la recherche, au sein de cette ZT, d'une zone plus restreinte de la couche de Callovo-Oxfordien, propice à l'implantation d'un stockage, dans laquelle des techniques d'exploration complémentaires pourraient être utilisées pour acquérir des informations encore plus précises sur les caractéristiques du site. Cette zone plus restreinte a été dénommée « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie » (ZIRA).

Pour identifier cette zone, l'Andra a défini des critères géologiques prépondérants qui visent à protéger l'homme et l'environnement, en particulier à long terme, vis-à-vis des substances dangereuses contenues dans les déchets :

- l'épaisseur de la couche argileuse qui est favorable au confinement à long terme des substances dangereuses, car elle augmente leur temps de migration éventuelle vers la biosphère ;
- sa profondeur qui permet de protéger les hommes et l'environnement en éloignant les déchets de la biosphère tout en les mettant les déchets à l'abri des agressions potentielles liées aux phénomènes naturels de surface et aux activités humaines ;
- son éloignement des grandes failles géologiques qui garantit la stabilité à long terme du stockage et réduit les temps de transfert des substances dangereuses vers la biosphère ;
- sa faible inclinaison (pendage) qui simplifie la conception du stockage.

Pour que l'implantation des ouvrages souterrains du stockage, puisse être associée à des installations de surface respectueuses de l'environnement et implantées selon les orientations des acteurs locaux, l'Andra a défini, après échanges avec les parties prenantes et le territoire, des critères complémentaires d'ordres environnementaux et économiques liés à l'aménagement du territoire et à l'insertion locale du projet :

- éviter l'implantation du stockage sous les zones urbanisées des villages ;
- favoriser une implantation sous les forêts pour préserver les terres agricoles ;
- permettre une desserte par voie ferroviaire des installations de surface du centre de stockage pour réduire les nuisances liées aux transports routiers.

L'Andra a alors proposé 4 scénarios de positionnement de la ZIRA et les a soumis au dialogue avec les acteurs locaux et à une analyse comparative sur la base de critères techniques et environnementaux.

Au vu des retours des acteurs locaux concernant le développement du territoire et de sa propre analyse technique approfondie, l'Andra a formulé fin 2009 une proposition affinée de ZIRA qui permet de répondre aux critères techniques et environnementaux. Elle permet notamment de lui associer une zone de surface pour l'accueil des colis de déchets dans une zone limitrophe de la Meuse et de la Haute-Marne.

Après évaluation par la commission nationale d'évaluation, instruction technique de l'Autorité de sûreté nucléaire et consultation des élus et du Comité local d'information et de suivi du Laboratoire (CLIS), la ZIRA proposée par l'Andra a été validée par le Gouvernement en mars 2010.

Les investigations géologiques complémentaires menées par l'Andra en 2010-2011 sur l'emprise de cette ZIRA, notamment par investigations sismiques en trois dimensions (3D), ont confirmé la qualité de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien située dans cette zone. Sa géométrie a été précisée, la constance de ses propriétés contrôlée et l'absence de failles mineures confirmée. Les connaissances des roches situées au-dessus et en dessous de la couche argileuse ont été approfondies. Compte tenu du nombre et de la variété des études menées, le sous-sol de la ZIRA fait partie des sites géologiques les mieux connus du territoire français.

À partir de 2011, l'Andra a lancé les études de la conception industrielle du centre de stockage Cigéo (études d'avant-projet). Ces études visent notamment à implanter les ouvrages de stockage de façon optimale au sein de la couche de Callovo-Oxfordien située sous la ZIRA. Ces études de conception industrielle du centre de stockage Cigéo ont précisé progressivement l'architecture de l'installation souterraine, confirmant la possibilité d'inscrire les ouvrages de stockage des déchets HA et MA-VL dans ce volume de roche.

Le projet de centre de stockage Cigéo a fait l'objet d'un débat public en 2013, à l'issue duquel l'Andra a décidé de poursuivre ses études en y introduisant les modifications demandées.

En 2016, l'Andra a présenté ses études, à un stade intermédiaire, dans un ensemble de livrables comprenant notamment le dossier d'options de sûreté. Ces livrables ont fait l'objet d'une revue internationale, d'une instruction technique de l'ASN et d'une évaluation par la CNE. Dans son avis n° 2018-AV-0300 du 11 janvier 2018 (68), l'ASN a indiqué que l'Andra avait acquis « *une connaissance*

détaillée du site de Meuse/Haute-Marne, qui lui permet de confirmer la pertinence de la zone retenue pour l'implantation du stockage ».

L'Andra a décidé d'intégrer à la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) du centre de stockage Cigéo l'ensemble du bloc de Callovo-Oxfordien défini par la ZIRA, dans lequel se déploient les ouvrages de stockage, ainsi que le volume des roches sus-jacentes accueillant les puits et les descenderies pour l'accès depuis les installations de surface (cf. Figure 2-71 du présent document).

2.6.2 Les choix d'implantation des ouvrages de surface du centre de stockage Cigéo

2.6.2.1 Les objectifs et critères fondamentaux pour l'implantation des ouvrages de surface

L'emplacement de la meilleure zone pour l'implantation des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo se justifie principalement par des critères techniques et géologiques liés à la protection de l'homme et de l'environnement tout en respectant les volontés d'insertion locale et de développement exprimées par les acteurs locaux (cf. Chapitre 2.6.1 du présent document).

Dès le début de la recherche de cette zone d'implantation des ouvrages souterrains, l'Andra a mené en parallèle un processus progressif pour identifier les parties du territoire les mieux à même d'accueillir les ouvrages de surface du centre de stockage Cigéo.

Les objectifs fondamentaux pour cette recherche des zones d'implantation potentielles des ouvrages de surface étaient les suivants :

- protéger l'homme et l'environnement des nuisances et des risques générés par le centre de stockage ;
- réduire les risques et les aléas pour l'activité industrielle ;
- respecter les attentes en matière d'insertion locale et d'aménagement du territoire exprimées par les acteurs locaux ;
- optimiser l'activité industrielle.

Une des principales dispositions d'implantation liée à la protection de l'homme et de l'environnement est le regroupement des bâtiments de surface sur deux zones séparées physiquement de plusieurs kilomètres.

En effet, le fonctionnement et les travaux d'extension progressif d'un centre de stockage en couche géologique profonde requièrent que ses infrastructures souterraines soient reliées à la surface par des puits verticaux. Ce type d'ouvrage d'accès constitue le chemin le plus court pour ventiler efficacement l'installation et pour y transférer des hommes et des matériels au plus vite, notamment en situation d'urgence. Autour de ces puits sont logiquement regroupés certains bâtiments en support aux activités souterraines. Une telle zone, dénommée zone « puits » dans les études de conception de l'Andra, est donc nécessairement située à l'aplomb de la zone dans laquelle le stockage est implanté (c'est-à-dire à l'aplomb de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien de la ZIOS).

Pour ce qui concerne le transfert des colis de déchets depuis la surface vers les zones de stockage, le critère principal de conception n'est ni le temps, ni la distance de transfert, mais la prévention des accidents susceptibles d'affecter les colis et d'entraîner des conséquences pour l'homme et l'environnement. À cet égard, si les études de faisabilité menées jusqu'en 2005 avaient privilégié une descente des colis dans un puits vertical au moyen d'un monte-charge, l'analyse des risques a conduit à modifier la conception du projet pour rechercher un mode de transfert plus sécurisé. Un transfert par camion dans un tunnel, droit ou enroulé autour des puits, a été rejeté pour des raisons liées aux risques d'incendie. La conception s'est alors orientée vers une descente des colis dans des hottes confinantes, manutentionnées sur un plan incliné au moyen d'un funiculaire. C'est ce mode de transfert qui a été jugé le plus sûr, le plus robuste et le moins sujet aux défaillances compte tenu des charges de l'ordre de 120 tonnes à manutentionner. Ce choix de conception implique de creuser un tunnel incliné droit où transitent les hottes contenant les colis. Une inclinaison d'environ 10 % ayant été jugée favorable à la sécurisation des opérations, sa longueur est donc proche de 5 km (longueur nécessaire pour rejoindre, depuis la surface, la couche argileuse du Callovo-Oxfordien située à environ 500 m de profondeur). Autour de l'entrée de cette descenderie peuvent être regroupés les bâtiments nécessaires pour la réception, le contrôle et la préparation au stockage des colis. Une telle zone, dénommée « zone descenderie » dans les études de conception de l'Andra, peut être située dans un périmètre élargi par rapport à celui des infrastructures souterraines.

Aussi, dès les étapes initiales de recherche de la ZIRA (cf. Chapitre ci-avant), l'Andra a défini un périmètre plus large que la zone de transposition pour la recherche de l'entrée de la descenderie et des bâtiments de surface qui lui sont associés. Ce périmètre d'implantation possible de l'entrée de la descenderie est présenté sur la figure 2-72 ci-après. Il est compris dans un rayon maximal d'environ 5 kilomètres autour de la zone transposition. Il est réduit au sud et à l'est de la zone pour éviter de traverser avec la descenderie des zones de fracturation géologiques (fossé de Gondrecourt-le-Château et zone de fracturation diffuse au sud-est). Sur ce point précis, l'objectif de l'Andra était de protéger les aquifères de cette zone en évitant tout impact ou risque sur la ressource en eau et sur son exploitation.

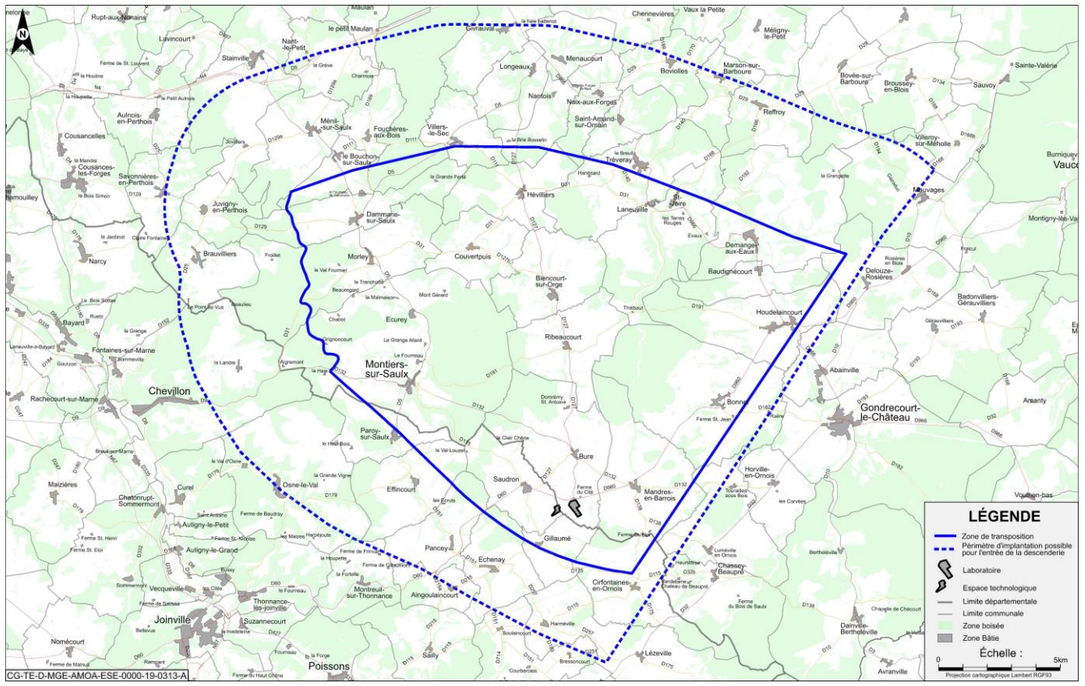


Figure 2-72 *Périmètre d'implantation possible pour l'entrée de la descenderie présenté en 2009 aux acteurs locaux*

2.6.2.2 La démarche d'identification des zones susceptibles d'accueillir les ouvrages de surface

À partir du choix de répartir les installations de surface d'un éventuel stockage sur au moins deux zones, l'une située à l'aplomb des infrastructures du stockage (zone puits) et l'autre décalée dans un rayon de 5 kilomètres (zone descenderie) (cf. Chapitre 2.6.2.1 du présent document), l'Andra s'est engagée dans un processus d'identification des parties du territoire les plus propices à l'accueil de ces deux zones.

Un certain nombre de critères ont été fixés en lien avec les objectifs fondamentaux poursuivis par l'Andra (cf. Chapitre 2.6.2.1 du présent document).

Pour protéger l'homme et l'environnement, elle a recensé les zones urbanisées, les sites de paysages remarquables, les monuments historiques inscrits et classés, les périmètres de captage des eaux et les sites à enjeu du point de vue de la biodiversité (Natura 2000, Espaces naturels sensibles, zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF) situées sur la zone élargie. Il faut noter qu'à l'époque, le bois Lejuc ne faisait pas l'objet d'un classement en ZNIEFF.

Pour réduire les risques externes sur l'installation elle-même, l'Andra a procédé à un inventaire des zones inondables, des aérodromes et des bandes situées dans l'axe de leurs pistes, des zones à fortes pentes et des installations industrielles existantes, gazoduc et parc éolien. Il faut noter que l'analyse des risques de foudroiement, de températures extrêmes, de séisme ou de feu de forêt n'a pas été jugée discriminante à l'échelle du territoire de la zone de transposition élargie.

Sur la base de cette recherche, l'Andra a produit une carte de synthèse (cf. Figure 2-73) identifiant sur le territoire les zones de contraintes et les zones à privilégier pour y implanter des installations de surface.

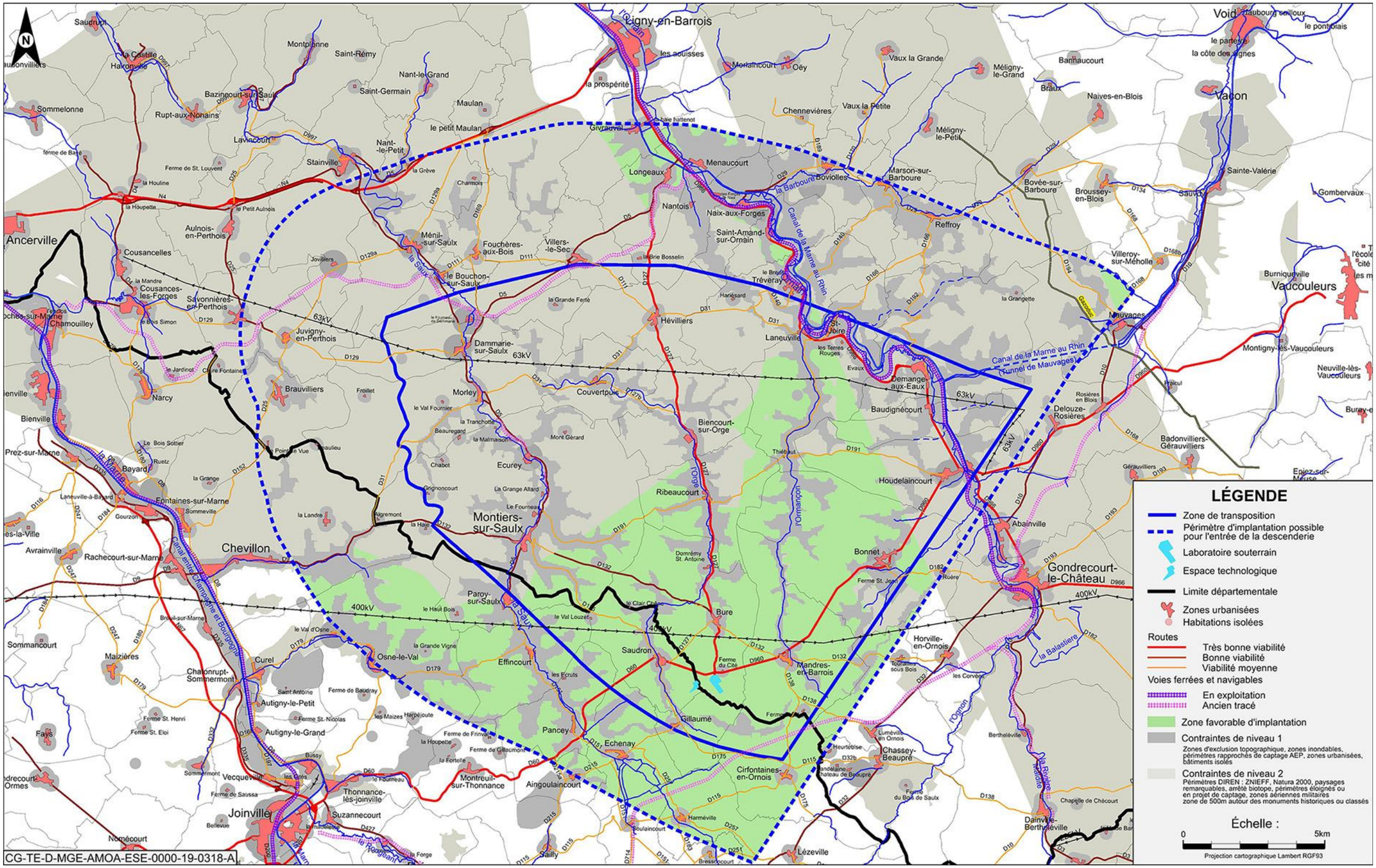


Figure 2-73 *Carte de synthèse des contraintes pour implanter les installations de surface (2009)*

Dans un second temps, en parallèle des premières propositions de scénarios de ZIRA, l'Andra a pré-identifié 12 zones potentielles d'implantation des installations de surface (ZIIS) susceptibles de recevoir, soit la zone puits, soit la zone descenderie. Ces zones, d'environ 200 hectares d'un seul tenant, étaient toutes situées hors des zones de contraintes et à une distance conventionnelle de 200 m des zones urbanisées des villages.

Ces ZIIS ont été soumises au dialogue avec les acteurs locaux en parallèle des échanges sur l'implantation de la ZIRA en 2009. Les acteurs locaux ont exprimé des demandes fortes en termes d'aménagement du territoire pour réduire les nuisances pour les populations et pour favoriser le développement économique et social. Les points ressortis de ces échanges, notamment reliés par le CLIS (98), qui impactent directement le choix du lieu d'implantation des installations de surface sont les suivants :

- valoriser le potentiel des infrastructures de transport existantes ;
- préserver le cadre de vie et veiller à l'insertion environnementale ;
- limiter les nuisances pour les populations et favoriser le développement des transports ferroviaires et fluviaux ;
- protéger les eaux de surface et souterraines ;
- veiller à l'insertion des verses (déblais de Callovo-Oxfordien produit par le creusement des infrastructures de stockage).

De plus, une demande précise s'est exprimée concernant l'implantation de la zone descenderie. Les acteurs locaux ont souhaité que l'entrée de la descenderie soit positionnée dans une zone limitrophe de la Meuse et de la Haute-Marne. Cette volonté s'explique principalement par des facteurs historiques. En effet, il faut rappeler que, dans les années 1990, les deux départements avaient initialement candidaté séparément auprès de la mission de recherche pour accueillir un laboratoire souterrain (cf. Chapitre 2.3.1.1 du présent document). Puis, ils ont fusionné leurs deux candidatures en une seule candidature commune, les études ayant notamment montré la continuité de la couche d'argileuse sur la zone. Or, la ZIRA étant positionnée uniquement en Meuse, en grande partie pour des raisons liées à la géologie, le positionnement de la zone puits s'inscrit nécessairement aussi dans ce département (cf. Chapitre 2.6.1.2 du présent document). Dans cette situation, seul le positionnement de la zone descenderie à la limite départementale était donc susceptible de s'inscrire dans la continuité de la candidature commune. Par ailleurs, la limite Nord-Ouest de la ZIRA est très proche de la Haute-Marne (moins d'un kilomètre à proximité du lieu-dit « Machère Côte »). Le choix de positionner la zone descenderie sur les deux départements garantissait donc de façon pérenne que la Haute-Marne serait associée aux décisions relatives à une installation nécessairement située à proximité immédiate. Il faut noter sur ce point la volonté exprimée en 2009 par les différentes communautés de communes de continuer d'être associées aux décisions portant sur le projet de stockage quels que seraient les choix retenus finalement pour son implantation[107]. Enfin, cette implantation assure aux deux départements un partage des revenus de la fiscalité générée par l'installation industrielle.

» EVOLUTIONS FISCALES À VENIR

Par amendement n° II-1274 rect. Bis au projet de loi de finances pour 2021, les sénateurs messieurs Longuet, Menonville et Sido ont modifié la fiscalité applicable au centre de stockage en couche géologique profonde pour les déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (https://www.senat.fr/enseance/2020-2021/137/Amdt_II-1274.html).

L'article de loi adopté nécessite que d'autres textes au niveau réglementaire et/ou législatif soient pris pour que le nouveau dispositif soit applicable et qu'un nouveau chiffrage de la fiscalité puisse être fait. Dans l'attente, le chiffrage des composantes fiscales figurant dans le présent dossier n'a pas été modifié.

Suite aux échanges, l'Andra a pris en compte les attentes du territoire dans ses études de conception industrielle du centre de stockage menées à partir de 2011. Elle a ainsi affiné progressivement la répartition des bâtiments et installations entre les zones puits et descenderie, ainsi que l'emprise et le positionnement de ces deux zones. Pour limiter les risques et les nuisances pour l'homme et l'environnement et pour des raisons d'optimisation de l'activité industrielle, l'Andra a décidé de spécialiser la zone descenderie autour des activités nucléaires et la zone puits autour des activités de soutien aux opérations souterraines. Ce choix permet de mieux contrôler les accès aux zones sensibles en vue de les protéger, d'optimiser la mise en place des dispositions de protection spécifiques de l'environnement (traitement des eaux, mesures d'évitement, réduction et compensation…), de faciliter la surveillance des différents types d'opérations et de leurs impacts, de rationaliser les activités, les métiers et les flux à l'intérieur de chaque zone et de réduire les transports entre les deux zones.

Sur la base notamment d'une analyse approfondie du territoire situé à l'aplomb de la ZIRA (fixée en mars 2010), l'Andra a identifié trois scénarios possibles pour l'implantation de la zone puits. Pour la zone descenderie, conformément aux attentes du territoire, elle a proposé un scénario d'implantation à la limite départementale de la Meuse et de la Haute-Marne. Ce scénario a été validé le 4 février 2013 par le Comité de haut niveau présidé par la ministre de l'environnement. Les possibilités d'implantation des installations de surface ont été présentées lors du débat public de 2013 sur le projet de centre de stockage Cigéo.

[107] Marie Françoise NAVELOT-GAUDNIK, présidente du Syndicat mixte du Haut-Barrois, a transmis à l'Andra la motion adoptée par le comité syndical le 8 octobre 2009. Le comité syndical estime qu'il appartient aux scientifiques de faire le choix technique de l'emplacement souterrain le plus sécuritaire possible. Le comité syndical demande que toutes les intercommunalités et toutes les communes appartenant au périmètre de la zone de transposition soient concernées par une juste répartition des retombées économiques du projet et que les représentants de ces entités de proximité soient pleinement associés sur tous les projets de développement sur leur territoire. En particulier, le développement des infrastructures de transport liées au projet de stockage doit également servir le développement des projets portés sur le territoire du Syndicat mixte. Les avis collectés en 2009 ont été publiés dans le document de l'Andra intitulé « Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface (72).

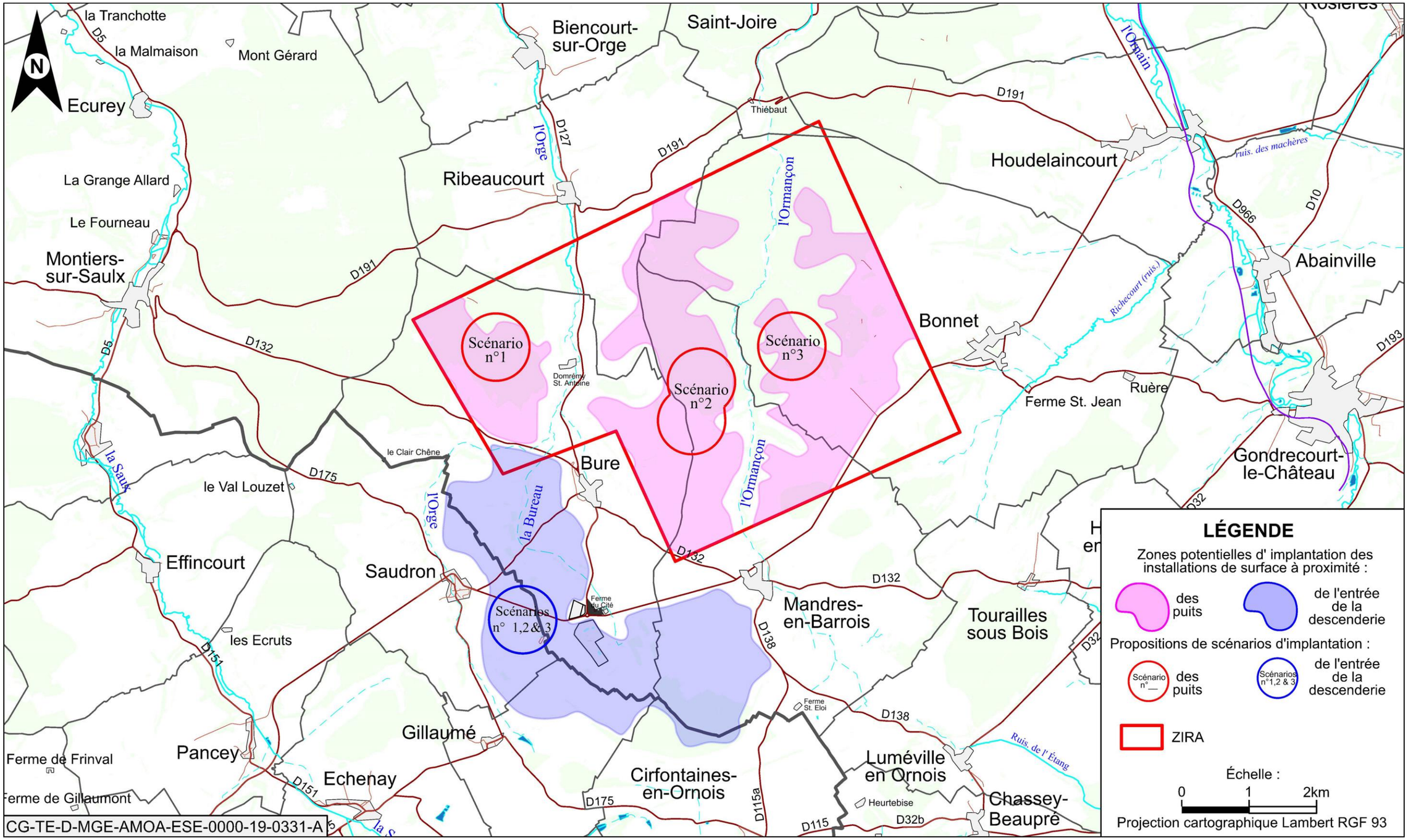


Figure 2-74 *Proposition de scénarios d'implantation pour les installations de surface (Débat public de 2013)*

À l'issue du débat public de 2013, considérant les nombreuses expressions des acteurs locaux (élus, collectivités, entreprises, syndicats, organisations professionnelles, association…) relatives au développement, à l'aménagement et à la préservation du territoire, l'Andra a réaffirmé son engagement, dans le cadre de sa politique de responsabilité sociétale et environnementale (RSE), notamment de veiller, en vue d'une bonne insertion du projet dans le territoire, à ce que la conception, la construction et l'exploitation de Cigéo, limitent les impacts sur l'homme et l'environnement et respectent la qualité de la vie locale. L'Andra a poursuivi ces études de conception dans cette optique en vue de finaliser notamment le choix des implantations des installations de surface.

Les critères ayant prévalus aux choix de la localisation des emprises de la zone descenderie, de la zone puits, de la liaison intersites et de l'installation terminale embranchée, intégrés au projet en réponse à cet engagement sont décrits dans le chapitre 2.6.2.1 du présent document et dans le présent chapitre 2.6.2.

2.6.2.3 Le choix de la localisation de la zone descenderie

L'utilisation d'une descenderie (tunnel incliné) et d'un funiculaire pour descendre des colis de déchets vers les infrastructures souterraines de stockage a été choisie pour des raisons de protection de l'homme et de l'environnement (cf. Chapitre 2.6.2.1 du présent document).

Pour limiter les risques et les nuisances et pour des raisons d'optimisation de l'activité industrielle (cf. Chapitre 2.6.2.2 du présent document), l'Andra a décidé de regrouper autour de l'entrée de cette descenderie, l'ensemble des activités et bâtiments dédiés à la réception des colis, à leur contrôle et à leur préparation pour le stockage. Cette zone, dénommée zone descenderie, regroupe toutes les activités nucléaires menées en surface sur le centre de stockage Cigéo.

Pour la recherche du meilleur site pour l'implantation de la zone descenderie, l'Andra a tenu compte des contraintes environnementales retenues pour la recherche des ZIIS (éviter les zones urbanisées, les sites de paysages remarquables, la proximité des monuments historiques, les périmètres de captage des eaux, les sites à enjeu du point de vue de la biodiversité, les zones inondables, des zones de fort trafic aérien, les zones à fortes pentes et les zones proches d'installations industrielles existantes). Elle a également recherché une zone limitrophe des départements de la Meuse et de la Haute-Marne (cf. Figure 2-74) conformément à la volonté des acteurs locaux (cf. Chapitre 2.6.2.2 du présent document).

L'Andra exploite dans cette zone le centre de Meuse/Haute-Marne (CMHM) qui accueille notamment le Laboratoire souterrain. Afin de valoriser et de mutualiser certaines fonctions déjà présentes au CMHM avec le centre de stockage Cigéo, en particulier lors des chantiers (utilités, parkings, locaux administratifs, accès…) et de réduire la consommation de nouvelles emprises, l'Andra a retenu, pour la zone descenderie du centre de stockage Cigéo, une implantation adjacente au CMHM. Compte tenu des surfaces disponibles et des capacités de desserte routière, l'Andra a utilisé cette zone pour y installer les bâtiments du centre de stockage dédiés à l'accueil du public, à la délivrance des autorisations d'accès et aux principaux services administratifs. Ces bâtiments de la zone descenderie servent pour l'ensemble du centre de stockage Cigéo, réduisant de fait l'emprise de ses autres zones, notamment de la zone puits.

L'Andra intègre à la zone descenderie l'ensemble des surfaces accueillant les bâtiments, ouvrages, équipements et, aménagements paysagers liés à son fonctionnement ou situés à sa proximité directe. Elle constitue une zone d'intervention potentielle[108] d'une surface totale de 296 ha (cf. Figure 2-75). Afin de couvrir les emprises des mesures de compensation environnementales localisées à ses abords directs, l'Andra y intègre une bande d'environ 24 hectares de milieux agricoles situés au sud-ouest.

Les partis pris d'aménagement interne et d'organisation de la zone descenderie sont présentés au chapitre 2.6.2.9 du présent document.

[108] Une zone d'intervention potentielle recouvre les surfaces sur lesquelles les travaux ou installations sont susceptibles de s'étendre en surface ou en souterrain de façon potentielle, provisoire ou définitive (périmètre prévisionnel des travaux, installations de chantier…).

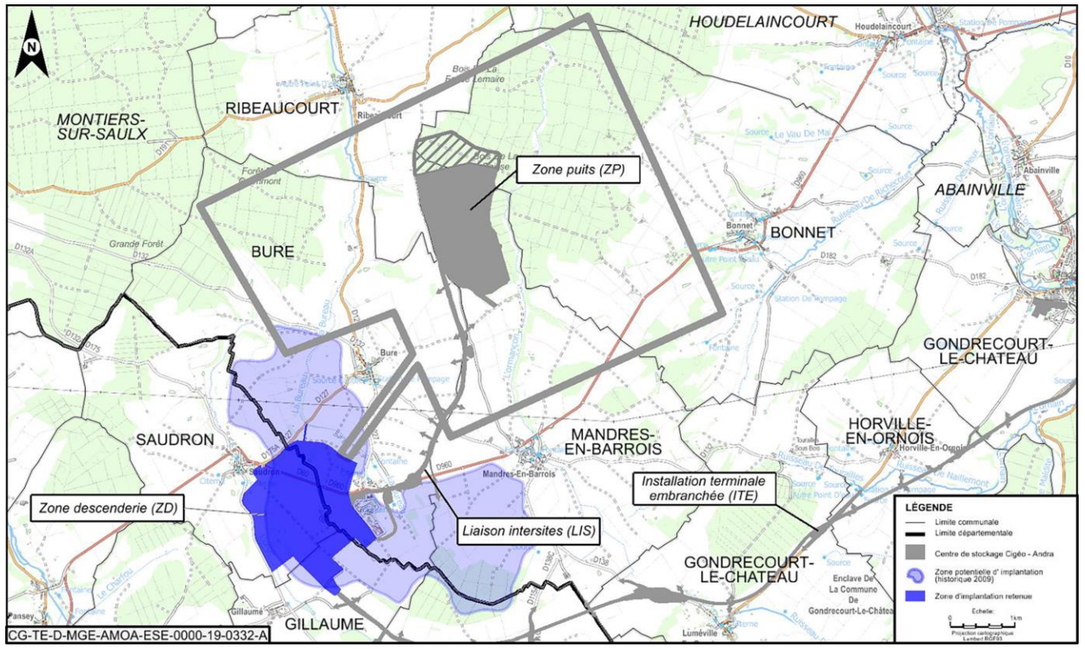


Figure 2-75 *Zone d'intervention potentielle retenue pour l'implantation de la zone descenderie*

2.6.2.4 Les zones recherchées pour l'implantation des puits

La nécessité de ventiler les infrastructures souterraines du stockage et d'y faire accéder rapidement les équipements et le personnel (ou au contraire l'évacuer) requièrent de les relier à la surface par des puits verticaux constituant le chemin le plus court pour ce type de transferts (cf. Chapitre 2.6.2.1 du présent document). La zone d'émergence de puits est donc nécessairement située à l'aplomb des infrastructures souterraines du stockage et dans l'emprise de la ZIRA.

Pour limiter les risques et les nuisances à l'homme et à l'environnement et pour des raisons d'optimisation de l'activité industrielle (cf. Chapitre 2.6.2.1 du présent document), l'Andra a décidé de regrouper autour de l'émergence de ces puits l'ensemble des activités et bâtiments dédiés au soutien aux opérations souterraines. Celles-ci consistent, d'une part en des opérations associées au stockage de colis de déchets, d'autre part en des travaux de construction progressive des infrastructures de stockage. Cette zone, dénommée zone « puits », regroupe de fait toutes les activités liées au soutien des travaux souterrains, y compris une surface dédiée au dépôt des déblais du Callovo-Oxfordien produits par les travaux de creusement (cf. Chapitre 2.7.5 du présent document).

Pour la recherche du meilleur site d'implantation des puits, l'Andra a tenu compte des contraintes environnementales retenues pour la recherche des ZIIS (éviter les zones urbanisées, les sites de paysages remarquables, la proximité des monuments historiques, les périmètres de captage des eaux, les sites à enjeu du point de vue de la biodiversité, les zones inondables, des zones de fort trafic aérien et les zones à fortes pentes).

Trois scénarios d'implantation ont été retenus pour les puits et présentés lors du débat public de 2013 sur le projet global Cigéo. Tous privilégient une implantation des puits dans un massif boisé. En effet, l'implantation en milieu forestier présente le double avantage de faciliter l'intégration paysagère des bâtiments, en particulier des têtes de puits qui sont les ouvrages les plus élancés du centre (jusqu'à une quarantaine de mètres), tout en équilibrant la consommation des terrains entre les surfaces agricoles et les surfaces boisées. L'implantation de la zone descenderie (cf. Chapitre 2.6.2.3 du présent document) prélevant déjà presque 300 ha de terres agricoles, il

était essentiel, pour l'insertion locale du projet, de réduire au mieux tout autre prélèvement, particulièrement dans le contexte du plateau de Bure où les activités agricoles occupent le rôle prépondérant dans l'économie locale. La volonté de l'Andra de préserver le cadre de vie local répond sur ce point à une demande forte exprimée par les acteurs locaux relayée notamment par le CLIS (98). De plus, à l'échelle nationale, la question de la préservation des terres agricoles constitue un enjeu de société. Enfin, la Meuse est un département fortement boisé, la forêt couvrant plus de 37 % de sa superficie. Les départements de la Haute-Marne et des Vosges, situés à proximité, sont également fortement boisés (respectivement 40 % et 50 % de leur surface) et la région Grand Est fait partie des régions les plus boisées de France (34 %). À l'échelle nationale, les surfaces boisées progressent d'environ 0,7 % par an depuis les années 80.

Parmi ces trois scénarios (cf. Figure 2-74), le premier (scénario 1) est implanté sur le territoire de la commune de Bure, dans la forêt domaniale de Montiers-sur-Saulx, conformément à la demande formulée en 2009 lors des échanges avec les acteurs locaux[109]. Lors des premières analyses des données d'inventaires écologiques, il est toutefois apparu que certaines espèces protégées d'oiseaux (Cigogne Noire et Milan Royal) et d'amphibiens (Triton Alpestre) avaient été observées dans la forêt de Montiers-sur-Saulx, mais n'avaient pas été observées sur les autres zones. Le scénario 1 était donc plus « sensible » du point de vue écologique (102). De plus, sur le plan technique, cette implantation est excentrée par rapport au cœur de la ZIRA, ce qui est techniquement contraignant pour le déploiement ultérieur de l'installation souterraine et pour son exploitation[110]. Pour des raisons environnementales et d'optimisation de l'activité industrielle, l'Andra n'a pas retenu le scénario 1 pour la poursuite de ses études.

Les scénarios 2 et 3 sont implantés en partie centrale de la ZIRA, dans des bois proches de la vallée de l'Ormançon (une implantation en limite de forêt a également été examinée dans un scénario 2bis). Le scénario 2 est situé dans le bois Lejuc sur la commune de Mandres en Barrois et le scénario 3 est situé dans la partie est du bois de la Caisse sur la commune de Bonnet. Les premières analyses des données d'inventaires écologiques ont montré qu'ils étaient équivalents sur le plan écologique (102).

En février 2013, le comité de Haut-Niveau (94) présidé par la ministre de l'environnement a demandé à l'Andra d'approfondir l'étude des scénarios 2 et 3 pour l'implantation de la zone accueillant les puits.

2.6.2.5 Les zones recherchées pour le dépôt des verses

Le Callovo-Oxfordien excavé progressivement du sous-sol par les travaux souterrains représente, à terminaison de la construction de l'installation souterraine, un volume de l'ordre de 11 millions de m^3.

Environ 40 % du volume de Callovo-Oxfordien excavé devra être réutilisé à terme pour le remblayage des galeries lors des opérations de fermeture définitive du centre de stockage Cigéo, ce qui permet de réduire l'apport de matériaux extérieurs. Cette part du Callovo-Oxfordien excavé est conservée sous forme de dépôts dénommés « verses » (les verses sont des tas de matériaux, constitués en les déposant par le haut, comme par exemple pour un terril de mine).

Les volumes de Callovo-Oxfordien excavés voués à être réutilisés pour remblayer les galeries de l'installation souterraine, à l'issue du fonctionnement du centre de stockage, sont appelés « verses vives ».

Les volumes de Callovo-Oxfordien excavés qui ne seront pas réutilisés sur le centre de stockage Cigéo sont dénommés « verses mortes » (cf. Chapitre 2.6.2.6 du présent document).

Les autres roches excavées, notamment les roches sus-jacentes excavées lors du creusement des descenderies et des puits (calcaires, marnes, argiles du Kimméridgien…), sont intégralement utilisées comme remblais lors des terrassements de surface du centre de stockage Cigéo.

Dès les premières phases de conception du projet de stockage, l'Andra a étudié les options possibles pour gérer les verses dans le respect de ses objectifs de protection de l'homme et de l'environnement (cf. Chapitre 2.6.2.2 du présent document).

Les objectifs complémentaires de l'Andra étaient :

- de disposer la zone des gestions des déblais du Callovo-Oxfordien excavé à proximité raisonnable des puits de manière à limiter les transports de matériaux et ainsi les nuisances associées à leur transport et les coûts ;
- de conserver le Callovo-Oxfordien à réutiliser dans une installation de l'Andra pour le surveiller et maîtriser sa qualité ;
- de conserver la possibilité de gérer l'ensemble du Callovo-Oxfordien excavé sur place, afin de ne pas dépendre de filières extérieures de valorisation dont les capacités pourraient varier dans le temps.

Par ailleurs, certaines contraintes environnementales, également retenues pour la recherche des ZIIS, s'appliquent également à la recherche du meilleur site d'implantation des verses (éviter les zones urbanisées, les sites de paysages remarquables, la proximité des monuments historiques, les périmètres de captage des eaux, les sites à enjeu du point de vue de la biodiversité, les zones inondables).

Certains critères liés à la protection de l'activité industrielle (éviter les zones de fort trafic aérien, les zones à fortes pentes et les zones proches d'installations industrielles existantes) sont moins sensibles pour ces dépôts de Callovo-Oxfordien que pour les autres installations du centre de stockage.

La localisation de la meilleure zone pour le dépôt des verses a fait partie intégrante de l'analyse d'implantation des installations de surface. Trois solutions techniques ont été étudiées prenant en compte les capacités d'extraction de ces matériaux par les descenderies et par les puits :

- une solution dite « équilibrée » entre la zone descenderie et la zone puits ;
- une solution de dépôt à proximité de la zone descenderie ;
- une solution à proximité de la zone accueillant les puits.

Une première cartographie recensant les espaces potentiels de stockage des verses à proximité des sites d'aménagement du centre de stockage Cigéo a été établie.

[109] Dans le courrier adressé par le président de la Communauté de communes du canton de Poissons le 27 mars 2009, le président de la communauté de communes du canton de Poissons indique « *nous voyons une opportunité, un lieu unique qui s'offre à nous: la forêt domaniale de Montiers sur Saulx d'une superficie de 1 500 hectares. Les installations de surface et les accès pourraient se situer à quelques kilomètres, sur le territoire de Saudron ou conjointement sur la frontière, dans l'environnement de Bure Saudron* ». Les avis collectés en 2009 ont été publiés dans le document de l'Andra intitulé « Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface.

[110] Le fait d'être excentré impose une direction de développement des infrastructures souterraines. Une position centrale permet de développer les installations dans plusieurs directions et réduit les distances de manutention des colis et d'intervention des secours.

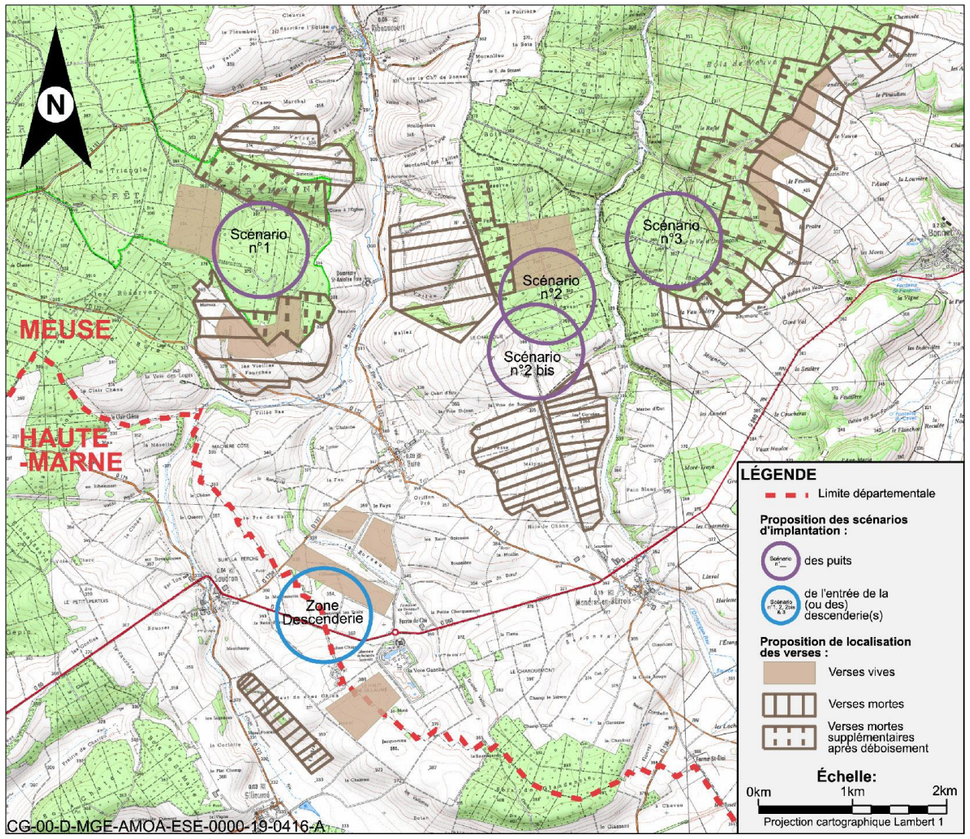


Figure 2-76 Localisations des zones potentielles de dépôt des déblais sous forme de verses étudiées en 2012

Une analyse de ces différentes implantations possibles a été conduite sur la base de critères environnementaux. Les principes poursuivis consistaient à :

- éloigner les zones de dépôt des zones naturelles d'intérêt pour réduire les incidences sur la biodiversité (zones humides, zones de protection, zones d'inventaires, zones de protection foncières, espaces naturels sensibles) ;
- éloigner les zones de dépôt des villages pour réduire les nuisances spécifiques liées à l'exploitation des verses (occupation des sols, bruits, poussières…) ;
- limiter l'étalement et le morcellement des zones de dépôt pour éviter le mitage du territoire et pour optimiser leur gestion (voiries, plateformes de travail, bassins et traitements des eaux pluviales) ;
- protéger les eaux superficielles et souterraines en limitant le nombre d'exutoires et de bassins versants affectés ;
- préserver le paysage en veillant à l'insertion paysagère des verses tel que demandé par les acteurs locaux lors des échanges sur les ZIIS.

Sur la base de cette analyse, l'Andra a recherché des zones de dépôt ayant la capacité de recevoir la totalité du Callovo-Oxfordien excavée à proximité des puits tout en respectant l'ensemble des contraintes et critères environnementaux.

La réduction maximale du nombre de zones de dépôt permet d'optimiser les verses et de limiter leur surface au sol [111]. Une surface réduite limite les mouvements de matériaux sur la zone de dépôt et les nuisances associées (poussières, bruits…). De plus, la réduction du nombre de verses évite le mitage du territoire en réduisant le nombre d'emplacements où doivent être implantées des activités industrielles. Elle réduit donc les incidences sur les activités humaines du territoire, notamment les transports ou l'agriculture.

Comme pour les puits, l'implantation des verses en milieu forestier présente le double avantage de faciliter l'intégration paysagère des zones de dépôts qui sont assez élevées (proche d'une vingtaine de mètres) tout en équilibrant la consommation des terrains entre surfaces agricoles et surfaces boisées.

L'Andra a alors proposé trois scénarios possibles d'implantation des verses, associés aux scénarios d'implantation des puits présentés lors du débat public de 2013. Pour ces scénarios, l'Andra a recherché le meilleur équilibre entre l'extension de la superficie des verses et leur hauteur. En effet, selon leur localisation, les hauteurs « acceptables » vis-à-vis de l'insertion paysagère sont de quelques mètres à une quinzaine de mètres dans le cas de la présence de talweg ou de boisements élevés.

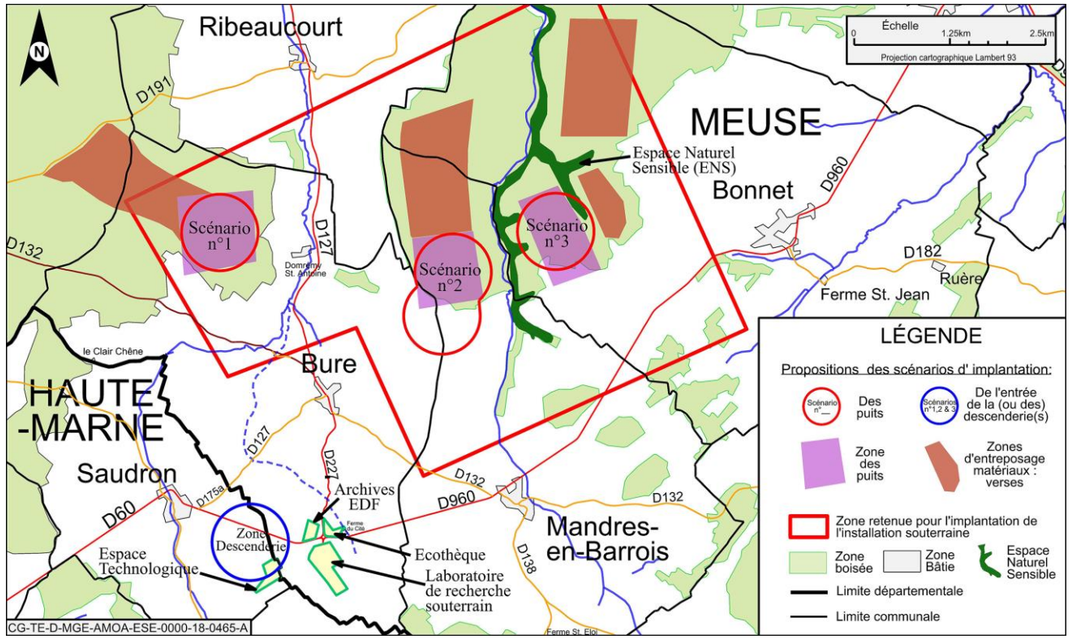


Figure 2-77 Localisations possibles de zones de verses économisant l'espace agricole

2.6.2.6 Le choix de la localisation de la zone puits

Suite à l'abandon du scénario 1 à la demande du comité de Haut-Niveau de février 2013 (cf. Chapitre 2.6.2.1 du présent document), l'Andra a poursuivi ses études de conception de la zone d'implantation des puits en approfondissant le scénario 2 situé dans le bois Lejuc sur la commune de Mandres en Barrois et le scénario 3 situé dans la partie est du bois de la Caisse sur la commune de Bonnet. En parallèle, les études programmatiques du centre de stockage Cigéo ont permis d'affiner les fonctionnalités de la zone descenderie et de la zone accueillant les puits. Conformément aux critères environnementaux retenus pour les verses (cf. Chapitre 2.6.2.5 du présent document), les études ont aussi intégré la conception d'un nombre réduit de zones de dépôt, voire d'une unique zone de dépôt ayant la capacité d'accueillir l'ensemble des déblais de creusement du Callovo-Oxfordien dans ces mêmes bois.

Afin de choisir l'emplacement optimal pour les zones d'implantation des puits et des verses, l'Andra a analysé les scénarios selon les quatre objectifs fondamentaux définis pour la recherche des zones de surface (cf. Chapitre 2.6.2.1 du présent document). Dans le cas d'une comparaison entre une implantation dans le bois Lejuc ou dans le bois de la Caisse, il s'avère que les critères de « réduction des risques et aléas portant sur l'activité industrielle » et de « respect des volontés d'insertion locale et d'aménagement du territoire » ne sont pas

[111] Compte tenu des pentes des dépôts, une verse globale consomme nécessairement moins de surface au sol que plusieurs.

véritablement discriminants, les deux implantations étant quasi-équivalentes sur ces aspects. L'Andra a donc approfondi son analyse en la faisant porter plus particulièrement sur les critères de « protection de l'homme et de l'environnement des nuisances et des risques générés par le centre de stockage » et « d'optimisation de l'activité industrielle ».

Sur la base des éléments connus en 2014, les critères portant sur la protection de l'environnement tendaient à favoriser une implantation dans le Bois Lejuc par rapport au Bois de la Caisse. En effet, l'implantation dans le Bois Lejuc permet l'éloignement maximal de la zone Natura 2000 du Bois de Demange située sur la commune de Saint-Joire tout en conservant un éloignement équivalent à l'espace naturel sensible de la vallée de l'Ormançon (environ 200 m). Son intégration dans le paysage est meilleure car elle bénéficie de la déclivité du terrain vers l'Est et peut intégrer une lisière boisée sur presque toutes ses faces. Par ailleurs, elle est plus favorable à la protection de la ressource en eau car elle est située quasi intégralement sur le seul bassin versant de l'Ormançon (le bassin de l'Orge et de la Bureau sont déjà affectés par l'implantation de la zone descenderie). Une implantation dans le bois de la Caisse aurait concerné à la fois l'Ormançon et les bassins versants de plusieurs cours d'eaux locaux affluents de l'Ornain. En outre la topographie du site permettait d'implanter aisément les bassins des eaux aux points bas des emprises ce qui favorise la collecte et le rejet des effluents liquides. Surtout, elle évite d'avoir à franchir l'Ormançon pour les transports et liaisons entre la zone descenderie et la zone puits et la construction d'un ou de plusieurs ouvrages d'art qui seraient venus perturber l'espace naturel sensible.

En termes de biodiversité, il faut souligner que, sur la base des éléments connus en 2014, il n'y avait pas de différence notable entre les deux bois. Les études approfondies menées par l'Andra sur ce point montraient une quasi-équivalence de la richesse des deux massifs boisés. À cet égard, si le nombre d'espèces de chiroptères observés dans le bois Lejuc était légèrement supérieur[112], le nombre d'individus détectés était assez nettement inférieur. En termes d'éloignement des villages, les deux bois étaient aussi assez équivalents, le bois Lejuc étant situé plus près de la commune de Bure alors que le bois de la Caisse est plus proche de la commune de Bonnet. La qualité des boisements était aussi sensiblement équivalente, le bois de la Caisse étant même considéré comme supérieur, car moins endommagé que le bois Lejuc par la tempête de 1999. Le bois Lejuc constituait initialement un bois relevant du régime forestier (affouage et abattage des arbres pour valorisation énergétique, industrielle et en bois d'œuvre).

Les critères portant sur l'optimisation industrielle favorisaient également l'implantation dans le bois Lejuc. En effet, cette implantation permet d'organiser les zones pour les puits et les verses d'un seul tenant dans sa partie Nord, ce qui limite au maximum les transports de déblais et les coûts et participe à la réduction des nuisances. Géographiquement, elle est plus proche de la zone descenderie ce qui permet de limiter la longueur de la descenderie et d'optimiser les coûts tout en restant à une valeur de pente de 12 % considérée comme favorable pour la prévention des risques et des accidents susceptibles d'entraîner des conséquences sur l'homme et l'environnement (cf. Chapitre 2.6.1 du présent document). Enfin, elle permet de positionner les puits quasiment au centre de la ZIOS ce qui favorise le développement de l'installation souterraine autour de cette zone centrale et limite le nombre et la longueur des galeries souterraines. Une implantation dans le bois de la Caisse aurait au contraire augmenté les longueurs de galerie et consécutivement les coûts, les consommations en matériaux et les déblais. Elle aurait rendu plus complexe le développement futur de l'installation et aurait entraîné des distances et des temps d'intervention plus longs au détriment de la qualité de l'exploitation et de la sûreté, en particulier en situation d'urgence.

Sur la base des objectifs de protection de l'homme et de l'environnement et d'optimisation de l'activité industrielle, l'Andra a donc choisi en 2014 d'implanter les puits et les verses dans le bois Lejuc et d'affiner les études de conception du centre de stockage Cigéo en fonction de ce choix, notamment les études de la zone commune pour les puits et les verses, dénommée zone puits.

En 2016, le bois Lejuc a fait l'objet d'un classement en zone naturelle d'intérêt écologique, floristique et faunistique (ZNIEFF), car intégré dans une nouvelle ZNIEFF, d'emprise plus large, dénommée « Forêt de la Fosse Lemaire à Mandres-en Barrois ». L'inventaire des ZNIEFF est un outil de connaissance reconnaissant l'intérêt de la biodiversité observée sur une zone du territoire. Sur le département de la Meuse sont répertoriées plus de 230 ZNIEFF.

L'intégration du bois Lejuc dans une ZNIEFF est liée notamment à la présence de chiroptères. Leur présence ne constitue toutefois pas une exception sur le territoire. Dans le cas du bois Lejuc, les inventaires réalisés par l'Andra ont contribué à mieux connaître la biodiversité du site et à justifier le classement en ZNIEFF. Comparativement aux forêts et bois du secteur, ce boisement ne recèle pas d'habitat ou d'espèces exceptionnelles et ne présente pas une richesse écologique particulière.

L'Andra a toutefois pris en compte ce classement dans ces études en cherchant à réduire au maximum les emprises de la zone puits pour réduire au maximum son impact sur la ZNIEFF. Les emprises de la zone puits ont été optimisées (bâtiments, parking silos, circulations). En parallèle, L'Andra a relancé un cycle d'analyse technique visant à évaluer l'intérêt de déplacer les puits vers le sud de la ZIOS afin qu'ils émergent hors des zones boisées. Comme en 2014, les contraintes de développement du stockage, les risques supplémentaires en exploitation générés par l'allongement des galeries et l'impact potentiel sur les activités agricoles n'ont pas justifié de modifier le choix d'implantation des puits dans le bois Lejuc.

Pour chercher à réduire encore son impact sur la ZNIEFF, l'Andra a lancé un ensemble d'études visant à valoriser hors de Cigéo le Callovo-Oxfordien excavé lors des travaux. L'objectif est d'en évacuer le maximum vers l'extérieur du centre de stockage pour limiter réduire l'emprise de la zone de dépôt. La volonté de l'Andra est de valoriser tout le volume des verses « mortes » (environ 6,5 millions de m³) hors du centre de stockage Cigéo[113].

Pour valoriser les verses « mortes », leur utilisation pour combler des carrières est envisagée. Des études techniques ont également été lancées pour étudier la faisabilité de leur utilisation comme matériau de base pour la fabrication des ciments. Des résultats prometteurs ayant été obtenus en laboratoire, l'Andra lance actuellement des essais en partenariat avec des cimenteries industrielles. D'autres pistes très prospectives pourraient aussi concerner l'utilisation des verses pour les travaux routiers, pour la fabrication de briques ou de céramiques. À ce jour, la faisabilité de ces différentes pistes de valorisation ne peut toutefois pas être considérée comme définitivement acquise. Même si elle l'était, la pérennité de ces filières industrielles ne pourrait être garantie par l'Andra sur toute la durée du fonctionnement du stockage.

Parallèlement à la poursuite des travaux de recherche sur la valorisation des verses et pour réduire son impact sur la ZNIEFF, l'Andra a toutefois pris la décision de faire évoluer son projet en restreignant au strict minimum l'emprise de la zone de dépôt du Callovo-Oxfordien sur la zone puits du centre de stockage Cigéo. Seules les verses « vives » sont conservées sur la zone de dépôt (environ 4,5 millions de m³). En effet, il ne serait pas pertinent du point de vue économique et environnemental, notamment en termes d'impact des transports, d'expédier les verses « vives » hors de Cigéo pour valorisation, en attente de réapprovisionner plus tard le centre de stockage en matériau de fermeture. Par ailleurs, le comblement complet des galeries souterraine du centre de stockage avec un matériau « exogène » poserait nécessairement des questions complexes d'impact environnemental sur le lieu d'extraction de ce matériau et de compatibilité à long terme avec le Callovo-Oxfordien du site De plus, il apparaît utile de conserver sur le centre de stockage Cigéo le matériau permettant la fermeture de son installation souterraine afin de ne pas rendre plus complexe la décision de la génération qui engagera cette opération.

Dans le projet actuel de l'Andra, toutes les verses « mortes » sont considérées comme valorisées à l'extérieur du site dans les filières précitées. Elles sont évacuées régulièrement au fur et à mesure de leur production. Seules les verses « vives » sont conservées sur une zone de dépôt optimisée. L'Andra a ainsi réduit d'environ 39 hectares (20 %) la surface de la zone puits et corrélativement son impact sur la ZNIEFF. Les emprises préservées de la ZNIEFF sont situées au Nord du bois Lejuc. Le maintien de la zone de dépôt le plus au sud possible permet ainsi d'éviter le corridor écologique répertorié dans le schéma régional de cohérence écologique (SRCE) du territoire. De plus, à long terme, la réutilisation de toutes les verses pour la fermeture permettra un retour à une situation plus proche de l'état initial dans la zone du bois Lejuc, sans dépôt définitif d'argile, puisque l'ensemble des verses, temporairement conservées sur le site, retournera dans le sous-sol.

À ce stade, l'Andra considère qu'il n'est pas possible de réduire plus encore les quantités de verses déposées sur la zone puits. La réduction de l'impact sur la ZNIEFF se fait au prix d'une plus grande complexité de gestion des matériaux des verses (tri et évacuation au juste besoin) et d'une augmentation des transports vers l'extérieur du site, *a priori* par voie ferroviaire. Si les projets avec les cimenteries aboutissent, elle pourrait toutefois se révéler bénéfique en termes d'économie circulaire et de développement durable, le centre de stockage Cigéo étant lui-même un consommateur important de ciment pour ses ouvrages.

L'Andra a donc décidé d'intégrer à la zone puits l'ensemble des puits, bâtiments équipements et ouvrages de soutien aux opérations souterraines du projet, ainsi qu'une zone pour la gestion du Callovo-Oxfordien excavé. Elle

[112] Vespertilions de Bechstein et d'Alcathoe et Sérotine commune observés uniquement sur le bois Lejuc, inversement Pipistrelle de Nathusius et petit Rhinolophe uniquement sur le bois de la Caisse.

[113] Les verses « mortes » ne sont pas destinées à être réutilisées pour la fermeture de l'installation souterraine (cf. Chapitre 2.6.2.5 du présent document).

constitue une zone d'intervention potentielle[114] d'une surface totale de 202 hectares (cf. Figure 2-78). L'Andra y intègre une vingtaine d'hectares de bandes forestières (situées aux abords directs) dans lesquelles seront mis en œuvre des mesures de renforcement de la lisière à des fins écologique et d'intégration paysagère.

Pour l'aménagement de la zone puits, l'Andra recherche un mode de déploiement graduel. Les ouvrages et bâtiments nécessaires au début de son exploitation seront réalisés lors de la phase de construction initiale (cf. Chapitre 5.3.2 du présent document). La zone de gestion du Callovo-Oxfordien excavé sera étendue progressivement, en plusieurs phases, afin de limiter les impacts des opérations de défrichement associées. Cette stratégie permettra de réinterroger périodiquement, dans le futur, les priorités et les équilibres entre les choix de consommation d'espace agricole ou d'espace forestier. Le déploiement progressif de la zone de dépôt est présenté au chapitre 2.7.5 du présent document.

Dans l'éventualité où les filières de valorisation des verses n'aboutiraient pas ou si leur pérennité venait à être remise en question pendant le fonctionnement du centre, l'Andra devrait avoir recours à une extension de la zone des verses à l'horizon 2070-2080. Cette opération nécessiterait éventuellement, sous réserve du contexte réglementaire à cette échéance, le dépôt d'une demande de DUP modificative. Afin de couvrir cette incertitude et d'évaluer l'ensemble des impacts potentiels de son projet, l'Andra étudie et présente, dans l'étude d'impact environnemental jointe au présent dossier de DUP, les incidences maximales du centre de stockage Cigéo, sans prendre en compte la réduction de 39 hectares de sa surface remaniée.

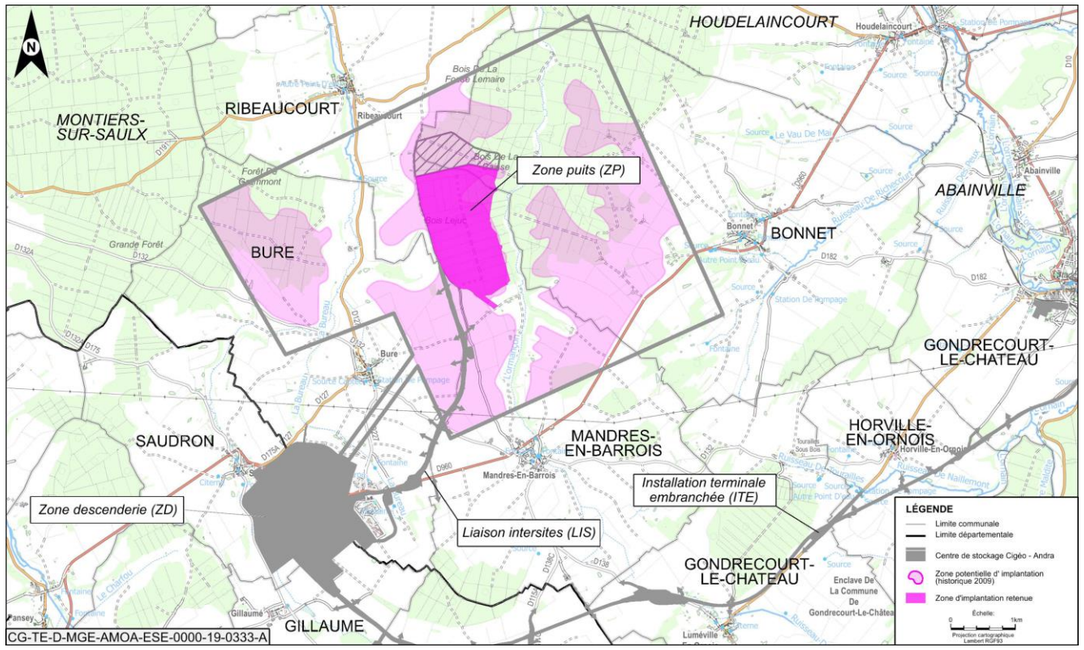


Figure 2-78 Zone d'intervention potentielle retenue pour l'implantation de la zone puits

[114] Une zone d'intervention potentielle identifie les surfaces sur lesquelles les travaux ou installations sont susceptibles de s'étendre en surface ou en souterrain de façon potentielle, provisoire ou définitive (périmètre prévisionnel des travaux, installations de chantier...).

» LA VALEUR ÉCOLOGIQUE ACTUELLE DU BOIS LEJUC

En 2014, c'est la richesse des observations disponibles dans le bois Lejuc, issues des inventaires réalisés par l'Andra, qui ont contribué à mieux connaître la biodiversité du site et à justifier le classement dans la zone naturelle d'intérêt écologique, floristique et faunistique (ZNIEFF), d'emprise plus large, dénommée « Forêt de la Fosse Lemaire à Mandres-en Barrois ». Comparativement aux forêts et bois du secteur, il ne recèle pas d'habitat ou d'espèces spécifiques et ne présente pas une richesse écologique particulière.

Dans le cas du bois Lejuc, les inventaires réalisés par l'Andra ont contribué à mieux connaître la biodiversité du site et à justifier le classement en ZNIEFF. Comparativement aux forêts et bois du secteur, ce boisement ne recèle pas d'habitat ou d'espèces exceptionnelles et ne présente pas une richesse écologique particulière.

En 2019, une étude comparative sur les capacités d'accueil des boisements pour les espèces et les habitats déterminants pour une ZNIEFF a été menée sur les massifs forestiers du Bois Lejuc, du bois de la Caisse et de la forêt de Montiers.

Il ressort que le Bois Lejuc présente actuellement des milieux boisés plus favorables pour l'avifaune et les chiroptères que le bois de la Caisse et la forêt de Montiers. Cette évolution est principalement liée au gel de la gestion sylvicole dans le bois Lejuc depuis qu'il a été désigné comme faisant partie des emprises de la zone puits du projet, alors que les autres massifs forestiers ont continué d'être exploités. En particulier, les vieilles hêtraies du bois de Montiers ont récemment fait l'objet de coupes, ce qui réduit en grande partie l'intérêt écologique comparatif de ce boisement. Si l'intérêt écologique comparatif du bois Lejuc augmente en raison du gel de l'exploitation sylvicole, il ne recèle néanmoins pas de richesse écologique particulière à l'échelle du secteur.

2.6.2.7 Le choix de la localisation de la liaison intersites (LIS)

Le regroupement des activités, ouvrages et bâtiments de surface sur Cigéo sur deux zones distinctes (cf. Chapitres 2.6.2.1 et 2.6.2.2 du présent document) implique nécessairement un certain nombre de transferts et de déplacements entre les deux zones. Le personnel d'exploitation sera amené à se déplacer et certains équipements et matériaux reçus par voie ferroviaire sur la zone descenderie devront être transportés jusqu'à la zone puits. Par ailleurs, le creusement et l'équipement des descenderies étant *a priori* plus rapide que celui des puits, les premiers déblais de Callovo-Oxfordien (environ 10 % du total) seront extraits par les descenderies avant de pouvoir être extraits par un puits. Il sera donc nécessaire de les transférer de la zone descenderie vers la zone puits pour leur dépôt sur les verses. La volonté de réduire les incidences et les risques pour l'homme et l'environnement associés à ces différents déplacements et transferts a conduit l'Andra à étudier la création d'une liaison dédiée entre la zone descenderie et la zone puits dénommée « liaison intersites » (LIS). Par ailleurs, une route d'accès à la zone puits doit être créée notamment pour son accès par les véhicules légers du personnel.

Les principaux objectifs environnementaux de l'Andra pour l'implantation de ces équipements sont :

- d'éviter les zones écologiques sensibles ;
- de limiter les nuisances sonores et la production de poussières ;
- de limiter autant que possible les impacts sur l'activité agricole ;
- de garantir une bonne insertion paysagère.

Afin de réduire les nuisances liées au transfert des matériaux de la zone descenderie vers la zone puits, l'Andra a privilégié la création d'une infrastructure de transfert spécifique, plutôt que de les transporter par camions. Un transfert aérien par câble et une bande transporteuse ont été étudiés. L'Andra a également recherché un tracé de

la liaison éloigné des habitations, à mi-chemin des villages de Bure et de Mandres en Barrois. La sécurité routière a été prise en compte par la création d'une voie privée, dédiée au trafic des poids lourds entre les deux zones.

Afin de recueillir les avis et recommandations des acteurs locaux sur la LIS, l'Andra a organisé plusieurs ateliers et échanges dans le cadre de sa concertation post-débat public. Cette concertation a permis de confirmer le choix d'une bande transporteuse semi-enterrée pour le transfert des matériaux, le transfert par câble ayant été jugé peu compatible avec une bonne intégration paysagère. Afin de limiter l'impact sur l'activité agricole, la voie pour les véhicules légers et la voie poids lourds ont été accolées autant que possible de façon adjacente à la bande transporteuse. L'altimétrie et le tracé final ont été définis pour éviter les zones écologiques sensibles et pour limiter au mieux l'impact visuel. Les voies interrompues par la LIS sont rétablies pour réduire l'impact sur les circulations locales et les activités agricoles.

L'Andra intègre à la LIS la bande transporteuse, la voie privée poids lourds, la voie publique pour l'accès des véhicules légers à la zone puits, les ouvrages de gestion des eaux et tous les rétablissements. Elle constitue une zone d'intervention potentielle d'environ 46 hectares.

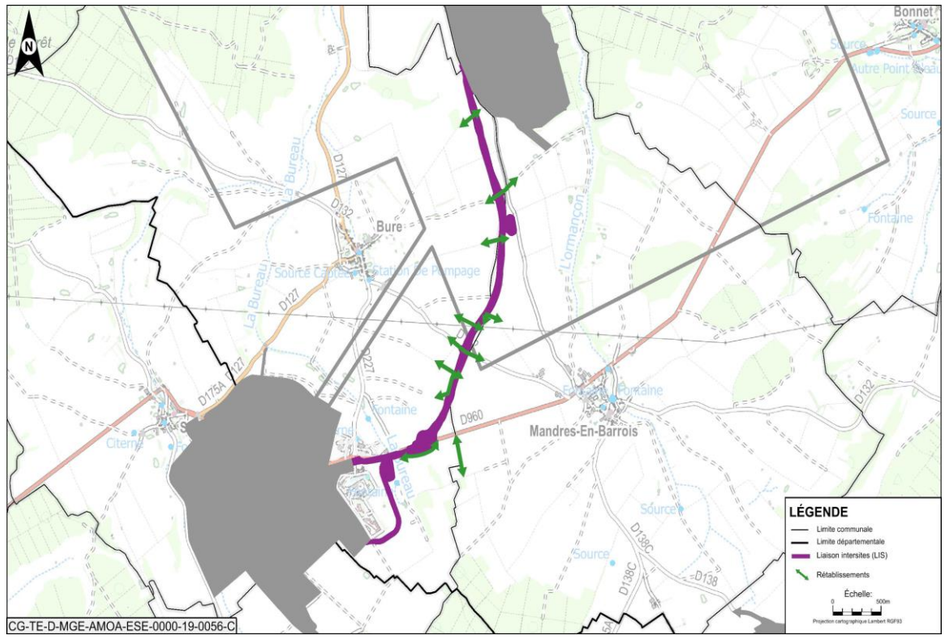


Figure 2-79 Zone d'intervention potentielle pour l'implantation de la liaison intersites (LIS)

» LES PRINCIPAUX APPORTS DE LA CONCERTATION SUR LA LIS

La concertation post-débat public sur la liaison intersites a permis de choisir la solution technique de référence, de définir les rétablissements et de discuter de l'insertion paysagère.

Les principaux apports de la concertation à la définition de la solution de référence concernent :

- le choix de la bande transporteuse semi-enterrée plutôt que le transfert par câble ;
- le choix des ouvrages d'art pour les rétablissements de la route départementale D60/960, de la RD132 et du chemin rural de Bure à Bonnet ;
- les rabattements vers la voie publique pour les autres rétablissements.

Cette solution de référence est intégrée au projet et étudiée dans la présente Étude d'impact.

2.6.2.8 Le choix de la localisation de l'installation terminale embranchée (ITE)

La volonté de réduire les nuisances à l'homme et à l'environnement générées par les transports par camion et le respect de la volonté du territoire de favoriser le recours au transport ferroviaire, notamment pour le transport et la livraison des colis de déchets radioactifs, ont conduit l'Andra à étudier la desserte ferroviaire du centre de stockage. Suite au débat public de 2013 (cf. Chapitre 2.3.4.3 du présent document), le Conseil d'administration de l'Andra a décidé « *le raccordement du site au réseau ferré national, pour permettre l'acheminement des colis de déchets par le rail jusqu'à Cigéo (62)* ».

Afin de réduire la consommation de terres agricoles et d'éviter les impacts associés à la création d'une nouvelle ligne, l'Andra a cherché à réutiliser au maximum la plateforme de l'ancienne ligne ferroviaire reliant Joinville à Gondrecourt-le-Château. La valorisation de l'ancienne ligne ferroviaire permet de se connecter avec la ligne ferroviaire 027000 gérée par SNCF Réseau à proximité de la commune de Gondrecourt-le-Château (cf. Chapitre 2.8.3 du présent document).

Les études ont permis de valoriser 10 km de plateforme existante sur 14 km de voie ferrée au total. Seuls 4 km de voie ferrée sont à créer sur la fin du parcours entre Cirfontaines-en-Ornois et la zone descenderie. Le tracé de ces derniers kilomètres est très contraint par les altimétries de l'ancienne plateforme et de la zone descenderie à desservir. Sur les 14 km, la largeur de la plateforme permet de créer une piste le long des voies pour la circulation des véhicules du personnel de maintenance. Cet équipement ferroviaire, qui permet d'embrancher le centre de stockage Cigéo au réseau ferré national est dénommé « installation terminale embranchée » (ITE).

Afin de recueillir les avis et recommandations des acteurs locaux sur la l'ITE, l'Andra a organisé plusieurs ateliers et échanges dans le cadre de sa concertation post-débat public. Cette concertation a permis de confirmer le choix du tracé, notamment des préférences claires pour le rétablissement de la RD 32 et pour la traversée de la gare de Luméville-en-Ornois. Elle a également permis de nombreuses optimisations des rétablissements routiers des voies traversées par l'ITE pour réduire l'impact sur les circulations locales et les activités agricoles.

Par ailleurs, l'Andra a acquis en 2011 une friche industrielle située sur la commune de Gondrecourt-le-Château pour les besoins du CMHM (conservation d'échantillons géologiques et stocks de matériaux divers…). Il est possible que les fonctionnalités de cette plateforme évoluent dans le futur en fonction des activités de l'Andra pour Cigéo. La plateforme pourrait notamment être utilisée pour faciliter la construction de l'ITE (accueil d'installation de chantier, d'équipements…) ou pour gérer les flux de matériaux pour la construction de Cigéo.

L'Andra intègre à l'ITE la plateforme logistique sur l'ancienne friche industrielle de Gondrecourt-le-Château, les voies ferrées de l'ITE et les équipements associés, les ouvrages de gestion des eaux pluviales, une piste de maintenance et tous les rétablissements. Elle constitue une zone d'intervention potentielle d'environ 121 hectares située à la fois en milieu urbanisé, sur le tracé de l'ancienne ligne et en milieu agricole.

LES PRINCIPAUX APPORTS DE LA CONCERTATION SUR L'ITE

La concertation post-débat public sur l'ITE a permis de choisir la solution technique de référence, de définir les rétablissements, d'adapter les dispositifs de gestion des eaux et de discuter de l'insertion paysagère.

Les principaux apports de la concertation à la définition de la solution de référence concernent :

- le rétablissement en place de la route départementale D32 ;
- la traversée de l'ancienne gare de Luméville-en-Ornois et l'évitement de la zone humide au nord de Luméville-en-Ornois ;
- l'absence de clôture le long de l'ITE et de barrières pour les passages à niveau (7 passages à niveau concernant des chemins ruraux et agricoles) ;
- le maintien de la plupart des traversées agricoles ;
- l'adaptation des dispositifs de gestion des eaux dans le secteur de Gillaumé et Cirfontaines-en-Ornois.

L'Andra prévoit de revenir vers les participants pour leur apporter des compléments d'information relatifs aux études supplémentaires qui seront menées.

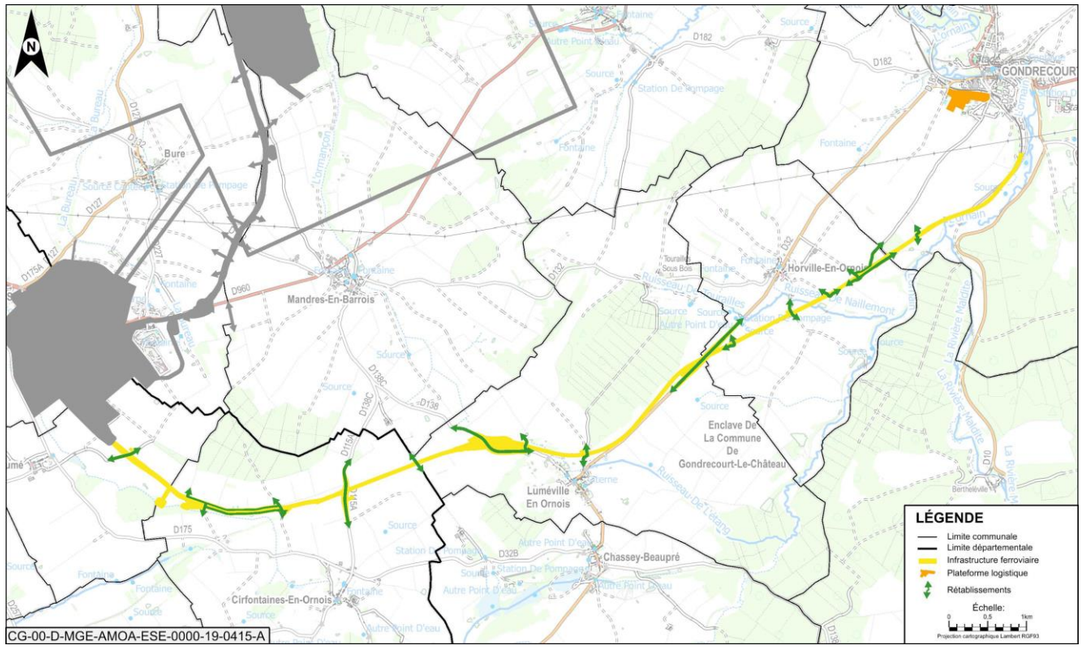


Figure 2-80 *Zone d'intervention potentielle pour l'implantation de l'installation terminale embranchée*

Synthèse des choix de localisation des installations de surface du centre de stockage Cigéo

- **Principes des choix de localisation**

  La localisation de la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) se justifie principalement par des critères techniques et géologiques liés à la protection de l'homme et de l'environnement. Dès le début de la recherche de la meilleure ZIOS, l'Andra a mené en parallèle un processus progressif pour identifier les parties du territoire les mieux à même d'accueillir les installations de surface du centre de stockage.

  L'Andra a d'abord fixé des objectifs fondamentaux pour l'implantation des ouvrages de surface :

  - ✓ protéger l'homme et l'environnement des nuisances et des risques générés par le centre de stockage ;
  - ✓ réduire les risques et les aléas pour l'activité industrielle ;
  - ✓ respecter les attentes des acteurs locaux en termes d'insertion locale et d'aménagement du territoire ;
  - ✓ optimiser l'activité industrielle.

  Pour protéger l'homme et l'environnement, les installations de surface sont groupées sur deux zones principales :

  - ✓ une zone, dénommée « zone puits », située à la verticale du bloc de Callovo-Oxfordien où sont implantés les ouvrages de stockage. En effet, les parties souterraines du centre de stockage doivent être reliées à la surface par des puits verticaux. Ce type d'ouvrage constitue le chemin le plus court et le plus efficace pour la ventilation et pour transférer vers les parties souterraines des matériels et des hommes (ou pour les évacuer), notamment en situation d'urgence. Les puits verticaux sont nécessaires à la sécurité de ce type d'installation ;
  - ✓ une zone, dénommée « zone descenderie », située à quelques kilomètres des puits, dans laquelle est implantée l'entrée d'un tunnel incliné (descenderie) servant à la descente des colis de déchets radioactifs vers les zones de stockage. En effet, c'est leur manutention par un funiculaire dans un tunnel rectiligne de pente réduite (environ 10 %) qui est le moyen le plus sûr pour cette opération. En outre, pour ne pas risquer, à long terme, de générer des circulations d'eau à travers le stockage, les points où les puits et les descenderies rejoignent la couche argileuse du Callovo-Oxfordien doivent être autant que possible rapprochés. Ces options de sûreté imposent donc d'éloigner l'entrée de la descenderie de la zone des puits.

  L'Andra a recensé les contraintes d'implantation des ouvrages de surface sur le territoire (zones urbanisées, paysages remarquables, monuments historiques, captage des eaux, sites à enjeu pour la biodiversité…). Pour protéger l'installation, l'Andra a procédé à un inventaire des risques (zones inondables, aérodromes, zones à fortes pentes…). Sur la base de cette recherche, l'Andra a produit une carte de synthèse identifiant les zones à éviter et les zones à privilégier. Puis, elle a pré-identifié 12 « zones potentielles d'implantation des installations de surface » (ZIIS), susceptibles de recevoir, soit la zone puits, soit la zone descenderie.

  Ces ZIIS ont été soumises au dialogue avec les acteurs locaux en 2009. Ils ont exprimé des demandes fortes en termes de réduction des nuisances et de favorisation du développement économique et social, notamment reliés par le comité local d'information et de suivi (CLIS) du Laboratoire souterrain, notamment :

  - ✓ valoriser le potentiel des infrastructures de transport existantes ;
  - ✓ préserver le cadre de vie et veiller à l'insertion environnementale ;
  - ✓ limiter les nuisances pour les populations et favoriser le développement des transports ferroviaires et fluviaux ;
  - ✓ protéger les eaux de surface et souterraines.

- **La localisation de la zone descenderie**

  Afin de protéger les aquifères, l'Andra a recherché, au sein des ZIIS, pour la zone descenderie, une zone située au sud et à l'ouest de la ZIOS. Cette localisation évite que la descenderie traverse

le fossé de Gondrecourt-le-Château et la zone de fracturation diffuse dans lesquels circulent des eaux souterraines. Pour des raisons de sécurité de la manutention, elle a recherché une zone située à environ 5 km des zones de stockage qui permet de concevoir une descenderie de pente d'environ 10 %.

Lors des échanges avec les acteurs locaux, ils ont exprimé leur volonté que la zone descenderie soit positionnée dans une zone limitrophe de la Meuse et de la Haute-Marne. Cette localisation symbolise le succès de la candidature commune des deux départements pour l'accueil d'un laboratoire en vue de l'accueil d'un stockage. Elle associe durablement la Haute-Marne aux décisions relative au centre de stockage (la ZIOS étant située exclusivement en Meuse). L'Andra a pris en compte les attentes du territoire dans ses études de conception industrielle. Elle a proposé un scénario d'implantation de la zone descenderie sur la limite départementale, validé le 4 février 2013 par le comité de Haut-Niveau présidé par la ministre de l'environnement. Ce scénario a été présenté lors du débat public de 2013 sur le projet de centre de stockage Cigéo.

Pour limiter les risques, réduire les nuisances et optimiser l'activité industrielle de la zone descenderie, l'Andra y a regroupé toutes les activités nucléaires. Ce choix permet notamment de mieux contrôler les accès, de mieux protéger les activités sensibles, d'optimiser les dispositions de protection de l'environnement et d'éviter les transferts de substances radioactives entre les zones. Pour réduire les surfaces globales, l'Andra a également regroupé sur la zone descenderie les bâtiments dédiés à l'accueil du public, à la mémoire, à la délivrance des autorisations d'accès et aux principaux services administratifs pour l'ensemble du centre de stockage Cigéo. Au final, l'Andra a retenu une zone d'implantation d'une surface totale de 296 ha, suffisamment éloignée du village de Saudron pour réduire les nuisances de la construction et du fonctionnement et les risques en cas d'accident. Située en secteur agricole, elle évite les zones écologiques sensibles situées au bord de l'Orge et permet de mettre en œuvre des mesures de réduction des impacts, notamment paysagers, et des mesures de compensation environnementales. Jouxtant les installations existantes du centre de Meuse/Haute-Marne de l'Andra, elle permet de mutualiser des infrastructures et des dessertes routières pour réduire l'impact global du projet.

- **La localisation de la zone puits**

  Sur la base d'une analyse du territoire, l'Andra a identifié, au sein des ZIIS, trois scénarios pour l'implantation de la zone puits. Tous sont positionnés dans un massif boisé (forêt domaniale de Montiers-sur-Saulx, bois Lejuc, bois de la Caisse). Ce choix facilite l'intégration paysagère des puits et équilibre la consommation des terrains entre surfaces agricoles et surfaces boisées. En effet, la zone descenderie prélevant presque 300 ha de terres agricoles, il était essentiel de réduire les autres prélèvements dans un territoire où l'agriculture occupe le rôle prépondérant dans l'économie locale. Cette démarche répond à la demande de préservation du cadre de vie.

  En parallèle, l'Andra a recherché, au sein des ZIIS, les parties du territoire propices au dépôt des déblais du Callovo-Oxfordien extraite lors des creusements (environ 11 millions de m^3). Près de 40 % de leur volume sera réutilisé pour la fermeture de l'installation souterraine à la fin du fonctionnement du centre de stockage. Leur réutilisation réduit l'apport de matériaux extérieurs. Des objectifs environnementaux complémentaires ont été associés spécifiquement à la recherche des zones de dépôt de ces déblais dénommées « verses ». Il s'agissait notamment :

  - ✓ de disposer les verses à proximité raisonnable des puits par lesquels le Callovo-Oxfordien est extrait pour réduire les nuisances associées au transport et les coûts ;
  - ✓ de conserver l'argile à réutiliser dans une installation de l'Andra pour le surveiller et maîtriser sa qualité ;
  - ✓ d'éloigner les verses des villages pour réduire les nuisances de leur exploitation (bruits, poussières…) ;
  - ✓ limiter l'étalement et le morcellement des verses pour éviter le mitage du territoire et pour optimiser leur gestion (voiries, ouvrages de traitement des eaux pluviales…) ;
  - ✓ protéger les eaux superficielles et souterraines en limitant le nombre des exutoires et des bassins versants affectés ;
  - ✓ préserver le paysage en veillant à l'insertion paysagère des verses.

  Sur la base de cette analyse, l'Andra a recherché les zones de dépôt ayant la capacité de recevoir la totalité des déblais à proximité des puits tout en respectant l'ensemble des contraintes. Comme pour les puits, l'implantation des zones de dépôts en milieu forestier présente le double avantage de faciliter leur intégration paysagère et d'équilibrer la consommation des terrains entre surfaces agricoles et surfaces boisées.

  L'Andra a associé des zones d'implantation des verses à chacun des trois scénarios d'implantation des puits. Ensuite, elle a approfondi ses études de conception. Pour limiter les risques et les nuisances à l'homme et à l'environnement et pour des raisons d'optimisation de l'activité industrielle, l'Andra a décidé de regrouper autour de l'émergence de ces puits l'ensemble des activités et bâtiments dédiés au soutien aux opérations souterraines. Cela permet principalement d'optimiser les moyens et de réduire les distances de trajet pour l'accès aux puits.

  Parmi les trois scénarios d'implantation des puits, la forêt domaniale de Montiers-sur-Saulx a été écartée pour des raisons environnementales et techniques. En effet, elle s'est révélé être plus sensible écologiquement lors des inventaires faunistiques et son caractère excentré sur la ZIOS contraint le déploiement et l'exploitation de l'installation souterraine. Le 4 février 2013, le comité de Haut-Niveau a demandé à l'Andra d'approfondir l'étude des scénarios situés dans le bois Lejuc et dans le bois de la Caisse. Les trois scénarios d'implantation des puits et leurs verses associées ont toutefois été exposés lors du débat public de 2013 sur le projet global Cigéo.

  L'Andra a poursuivi les études de conception du centre de stockage dans le bois Lejuc et dans le bois de la Caisse. Pour des critères portant sur la protection de l'environnement, elle a retenu en 2014 une implantation des puits et de la zone de dépôt dans le Bois Lejuc. Ce choix permet notamment un éloignement maximal de la zone Natura 2000 du Bois de Demange et une meilleure intégration paysagère bénéficiant de la déclivité du terrain vers l'Est. Surtout, elle évite d'avoir à franchir l'Ormançon, espace naturel sensible, pour les transports et liaisons entre la zone descenderie et la zone puits. En termes de biodiversité, il n'y avait pas, en 2014, de différence notable de richesse entre les deux massifs boisés. Les études approfondies menées par l'Andra sur ce point montraient une quasi-équivalence, notamment pour ce qui concerne les chiroptères. La qualité des boisements du bois Lejuc était considérée comme inférieure, car il avait été fortement endommagé par la tempête de 1999.

  Les critères d'optimisation industrielle favorisent également l'implantation dans le bois Lejuc. Elle permet d'organiser la zone des puits et la zone des verses d'un seul tenant et réduit la longueur de la descenderie ce qui réduit les impacts et optimise les coûts. Enfin, située quasiment au centre de la ZIOS, elle favorise le développement de l'installation souterraine à partir d'une zone centrale, limite le nombre et la longueur des galeries souterraines et réduit donc les temps d'intervention, en particulier en situation d'urgence.

  En 2016, le bois Lejuc a fait l'objet d'un classement en zone naturelle d'intérêt écologique, floristique et faunistique (ZNIEFF), car intégré dans une nouvelle ZNIEFF, d'emprise plus large, dénommée « Forêt de la Fosse Lemaire à Mandres-en Barrois ». L'intégration du bois Lejuc dans une ZNIEFF est liée notamment à la présence de chiroptères. Elle ne constitue toutefois pas une exception sur le territoire. Dans le cas du bois Lejuc, c'est la richesse des observations disponibles, issues des inventaires réalisés par l'Andra, qui a entraîné l'intégration à la ZNIEFF. Par rapport aux autres forêts et bois du secteur, il n'abrite pas de richesse écologique exceptionnelle.

  L'Andra a toutefois tenu compte de ce classement en réduisant au mieux la surface de la zone puits (optimisation globale des bâtiments, parking silos…). Elle a relancé un cycle d'analyses techniques visant à réévaluer l'intérêt de déplacer les puits hors des zones boisées. Comme en 2014, les contraintes de développement de l'installation souterraine, les risques supplémentaires générés par l'allongement des galeries et l'impact sur les activités agricoles ont confirmé le choix d'implantation dans le bois Lejuc.

  Pour réduire encore son impact sur la ZNIEFF, l'Andra a lancé des études pour valoriser hors de Cigéo l'argile excavé. Son utilisation est étudiée par exemple pour combler des carrières ou comme matériau de base pour la fabrication des ciments. À ce jour, la faisabilité et la pérennité des pistes de valorisation industrielle envisagées ne peut toutefois pas encore être considérée comme acquise. L'Andra a toutefois pris la décision de faire évoluer son projet en restreignant la zone de dépôt pour la seule conservation de l'argile qui sera réutilisé pour la fermeture de l'installation souterraine (environ 4,5 millions de m^3). En effet, du point de vue économique, environnemental et pour la sûreté à long terme, il n'est pas pertinent de valoriser ce matériau hors de Cigéo pour réapprovisionner plus tard le centre de stockage en matériau de fermeture exogène. (environ 6,5 millions de m^3), Cette mesure réduit la surface remaniée d'environ 39 hÀ

ce stade, l'Andra considère qu'il n'est pas possible de réduire encore les quantités de verses sur la zone puits. La réduction de l'impact sur la ZNIEFF se fait au prix d'une plus grande complexité de gestion des déblais du Callovo-Oxfordien (tri, évacuation au juste besoin…) et d'une augmentation des transports vers l'extérieur du site. Au final, l'Andra a retenu une zone d'implantation d'une surface totale de 202 hectares située dans la partie sud du bois Lejuc lui permettant d'implanter sur une même zone optimisée les puits, les installations supports aux activités souterraines et la zone de gestion du Callovo-Oxfordien excavé.

- **La localisation de la liaison intersites (LIS)**

  Le regroupement des activités, ouvrages et bâtiments de surface du centre de stockage Cigéo sur la zone descenderie et sur la zone puits implique nécessairement des transferts et des déplacements entre ces deux zones. Pour réduire les incidences et les risques pour l'homme et l'environnement associés à ces opérations, l'Andra a étudié la création d'une liaison dédiée, dénommée « liaison intersites » (LIS). Par ailleurs, une route d'accès à la zone puits doit être créée pour son accès par les véhicules légers du personnel.

  Afin de réduire les nuisances liées au transfert des matériaux entre les zones, l'Andra a privilégié la création d'une infrastructure spécifique (bande transporteuse semi-enterrée), plutôt que d'utiliser des camions. Pour cette infrastructure, un tracé éloigné des habitations a été recherché, à mi-chemin des villages de Bure et de Mandres en Barrois. La sécurité routière a été prise en compte en créant une voie privée dédiée au trafic des poids lourds entre les deux zones, parallèle à la bande transporteuse. L'altimétrie et le tracé final ont été définis pour éviter les zones écologiques sensibles et limiter au mieux l'impact visuel. Les voies interrompues sont rétablies pour réduire l'impact sur les circulations locales et les activités agricoles. Afin de recueillir les avis et recommandations des acteurs locaux, l'Andra a organisé plusieurs ateliers et échanges dans le cadre de sa concertation post-débat public. Au final, l'Andra a retenu une surface d'environ 46 hectares pour l'implantation de la bande transporteuse, de la voie privée poids lourds et de la route pour l'accès des véhicules légers à la zone puits.

- **La localisation de l'installation terminale embranchée (ITE)**

  La volonté de réduire les nuisances à l'homme et à l'environnement générées par les transports par camion et le respect de la volonté du territoire de favoriser le recours au transport ferroviaire ont conduit l'Andra à étudier la desserte ferroviaire du centre de stockage, notamment pour le transport et la livraison des colis de déchets radioactifs. Cet équipement ferroviaire, qui permet d'embrancher le centre de stockage Cigéo au réseau ferré national est dénommé « installation terminale embranchée » (ITE).

  Afin de réduire la consommation de terres agricoles et d'éviter les impacts associés à la création d'une nouvelle ligne, l'Andra a cherché à réutiliser au maximum la plateforme de l'ancienne ligne ferroviaire reliant Joinville à Gondrecourt-le-Château. Elle permet de se connecter au niveau de Gondrecourt-le-Château à la ligne ferroviaire 027000 gérée par SNCF Réseau. Les études ont permis de valoriser 10 km de l'ancienne plateforme. Seuls 4 km de voie ferrée nouvelle sont à créer sur la fin du parcours. Le tracé de ces derniers kilomètres est très contraint par les altimétries de l'ancienne plateforme et de la zone descenderie à desservir.

  Afin de recueillir les avis et recommandations des acteurs locaux sur la l'ITE, l'Andra a organisé plusieurs ateliers et échanges dans le cadre de sa concertation post-débat public. Ils ont permis de confirmer le choix du tracé et d'exprimer des préférences claires en matière de rétablissement routiers. Au final, l'Andra a retenu une implantation sur une surface de 121 hectares située sur le tracé de l'ancienne ligne et en milieu ouvert agricole. Elle inclut également une plateforme logistique appartenant à l'Andra valorisant une ancienne friche industrielle de Gondrecourt-le-Château.

2.6.2.9 Partis pris d'aménagement pour la zone descenderie

La zone descenderie est dédiée principalement aux opérations de réception, de contrôle et de préparation des colis de déchets radioactifs avant leur transfert pour stockage dans l'installation souterraine. Elle accueille également la majorité des bâtiments administratifs et des fonctions support du centre de stockage Cigéo.

Le choix de sa localisation, à proximité des communes de Bure, Saudron et Gillaumé, sur une zone limitrophe des départements de la Meuse et de la Haute-Marne, répond aux critères et enjeux présentés aux chapitres 2.6.2.1, 2.6.2.2 et 2.6.2.3 du présent document : sensibilités et enjeux environnementaux, éloignement des zones urbanisées, positionnement de l'entrée de la descenderie en zone limitrophe Meuse et Haute-Marne, prise en compte des risques externes…

L'aménagement de la zone descenderie repose en premier lieu sur des principes environnementaux et urbanistiques.

Du point de vue environnemental, il s'agit principalement de :

- limiter les modifications de la topographie naturelle du site tout en recherchant un équilibre déblais/remblais :
  - ✓ ce principe a pour objectif de réduire les impacts environnementaux, notamment en maintenant les bassins versants actuels, en réduisant les volumes de terrassement et en évitant les transports de matériaux vers et depuis l'extérieur de la zone descenderie ;
- éviter les constructions en contrebas de la vallée de l'Orge compte tenu de ses enjeux écologiques (espèces et habitats d'intérêt) :
  - ✓ la préservation de la vallée de l'Orge bloque le développement de la zone descenderie vers le sud ;
- réduire l'impact paysager de la zone descenderie, en particulier depuis les villages les plus proches (Saudron et Gillaumé) par un éloignement physique des bâtiments et par la création d'une bande boisée périphérique et de merlons paysagers au sud-est de la zone.

Du point de vue urbanistique, il s'agit principalement de :

- tenir compte des installations et des bâtiments existants à proximité de la zone descenderie (Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, Écothèque et Espace technologique de l'Andra, bâtiment d'archives EDF, hôtel-restaurant Le Bindeuil, commerce) et des interfaces possibles de la zone descenderie avec ses installations et bâtiments ;
- définir des axes structurants comme base du développement spatial de la zone descenderie :
  - ✓ les axes structurants apportent de la flexibilité et de la lisibilité pour le développement progressif d'une zone industrielle ou urbaine sur une longue durée. À des fins d'optimisation des voieries existantes, le tracé de la route départementale D60/960 actuelle est conservé comme axe principal de distribution des installations de la zone descenderie ;
- positionner et organiser les plateformes d'implantation des ouvrages (bâtiments, utilités, bassins…) en fonction des courbes topographiques et des voiries ;
  - ✓ les plateformes sont disposées pour faciliter l'exploitation des ouvrages (positionnement des utilités en bordure de la zone, bassins aux points bas, bâtiments pour l'exploitation en bordure des axes…) ;
- structurer la zone par un traitement paysager adapté ;
  - ✓ des espaces pleins et des vides sont créés pour dissimuler ou valoriser certains éléments et zones ainsi que pour rythmer la perception des aménagements ;
  - ✓ les limites des zones remaniées et les abords, notamment ceux maintenus en l'état, évitent les transitions marquées (comme des murs, des talus abrupts…).

Sur la zone descenderie, qui accueille notamment les futurs bâtiments nucléaires du centre de stockage Cigéo, l'Andra a défini des règles de positionnement des ouvrages les uns par rapport aux autres. Ces règles de positionnement des ouvrages au sein de la zone visent à les protéger, y compris des risques qu'ils pourraient générer les uns pour les autres. Elles visent également à permettre des travaux de maintenance et de rénovation de ces ouvrages. Les principales règles suivies pour positionner les ouvrages au sein de la zone descenderie sont les suivantes :

- les bâtiments nucléaires et les ouvrages sensibles sont positionnés, autant que possible, au centre de la zone descenderie pour bénéficier du plus haut niveau de protection vis-à-vis des agressions potentielles depuis l'extérieur ;
- les bâtiments nucléaires et les ouvrages sensibles sont éloignés d'au moins 200 m des installations conventionnelles ;
  - ✓ cette disposition évite des risques de propagation d'incendie, des perturbations par d'éventuelles fumées ou tout autre effet « domino » en cas d'accident. Elle facilite également des futurs travaux (maintenance, rénovation…) ;
- les clôtures sont positionnées en fonction de la topographie et de la disposition des ouvrages et des voiries :
  - ✓ les clôtures sont disposées principalement pour des impératifs de sécurité (distances, hauteurs, surplombs, angles de vision…) ;
  - ✓ des espaces d'éloignement, variables en fonction de la sensibilité des fonctions à protéger, doivent être conservés entre les clôtures et les ouvrages et bâtiments.

L'Andra a également défini des règles de positionnement des ouvrages de la zone descenderie pour protéger le public, à l'extérieur de la zone, des conséquences d'un éventuel accident affectant un bâtiment à l'intérieur de la zone. Afin de maintenir un éloignement physique par rapport aux villages de Saudron et de Gillaumé les plus proches, les installations industrielles de la zone descenderie ont été positionnées à plus de 500 m des bâtiments de ces villages.

C'est dans le bâtiment EP1 de la zone descenderie (cf. Chapitres 4.3.3 du présent document) que sont effectuées les opérations nucléaires de contrôle et de préparation des colis de déchets radioactifs HA0 et MA-VL (cf. Chapitres 1.3, 2.1.4 et 4.3.3.2 du présent document) avant leur transfert pour stockage dans l'installation souterraine. De par sa taille et la fonction qu'il occupe, le bâtiment EP1 est donc l'élément central de l'aménagement de la zone. Son implantation, son fonctionnement et les perspectives de son éventuel développement conditionnent l'organisation des bâtiments et la composition spatiale autour de lui. De plus, à titre conservatoire, des espaces libres sont préservés à sa proximité pour permettre la construction éventuelle d'extensions qui pourrait être décidée, le cas échéant, dans le cadre de la mise en œuvre de la réversibilité (nouvel atelier d'expédition de colis, entreposages « tampons » de gestion des flux, nouvelles fonctionnalités).

La concertation sur l'aménagement et le cadre de vie prévue par l'Andra fin 2020 abordera certains de certains de ces aspects, notamment paysagers.



Figure 2-81 Localisation des emprises réservées pour d'éventuelles extension du bâtiment EP1 pour la réversibilité

Un dernier critère très déterminant de l'aménagement de la zone descenderie est la préservation de l'espace et de la flexibilité nécessaire à la construction ultérieure de certains bâtiments, non nécessaires au démarrage du centre de stockage, par exemple le bâtiment EP2 (cf. Chapitres 4.3.3 et 5.3.3 du présent document). Le bâtiment EP2, dont la construction est envisagée à l'horizon 2070-2080, est utilisé pour le contrôle et la préparation à la mise en stockage des colis HA (cf. Chapitres 2.1.4 et 2.7.7 du présent document). À cette échéance, le bâtiment EP1, utilisé pour la réception des colis HA0 et MA-VL, sera encore en fonctionnement. Les opérations de descente des colis HA vers les zones de stockage sont effectuées de façon similaire à celle des colis MA-VL, avec le même funiculaire et dans la même descenderie. Le bâtiment EP2 doit donc être relié à cette descenderie colis, perpendiculairement à l'axe de la descenderie pour s'adapter au procédé et donc nécessairement à l'opposé du bâtiment EP1 par rapport à l'émergence de la descenderie colis, c'est-à-dire au Sud-Est de la zone descenderie.

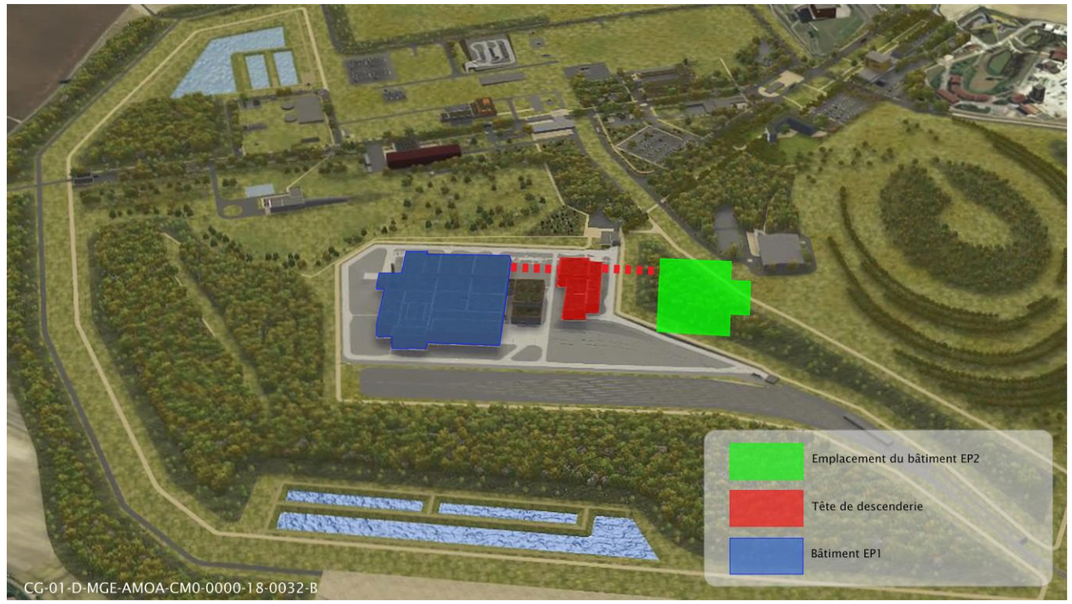


Figure 2-82 Localisation de l'emprise réservée pour le bâtiment EP2 à l'Est de la tête de descenderie

Cette contrainte d'implantation du futur bâtiment EP2 impacte le positionnement des autres installations et notamment celle de la zone des utilités. Celle-ci ne peut être installée au Sud d'EP1 et des terminaux ferroviaires de la zone descenderie en raison de la présence des zones humides au bord de l'Orge. Il n'est pas non plus possible de l'implanter à l'Ouest car elle serait dans ce cas trop proche de Saudron. L'Est est contraint par la présence des bâtiments du Laboratoire souterrain, de l'hôtel-restaurant du Bindeuil, de l'OPE et d'EDF. Il est nécessaire de l'implanter au Nord de la zone, à proximité des installations, ce qui ne permet pas de maintenir le tracé actuel de la route départementale D60/960, qui doit donc être dévoyée.

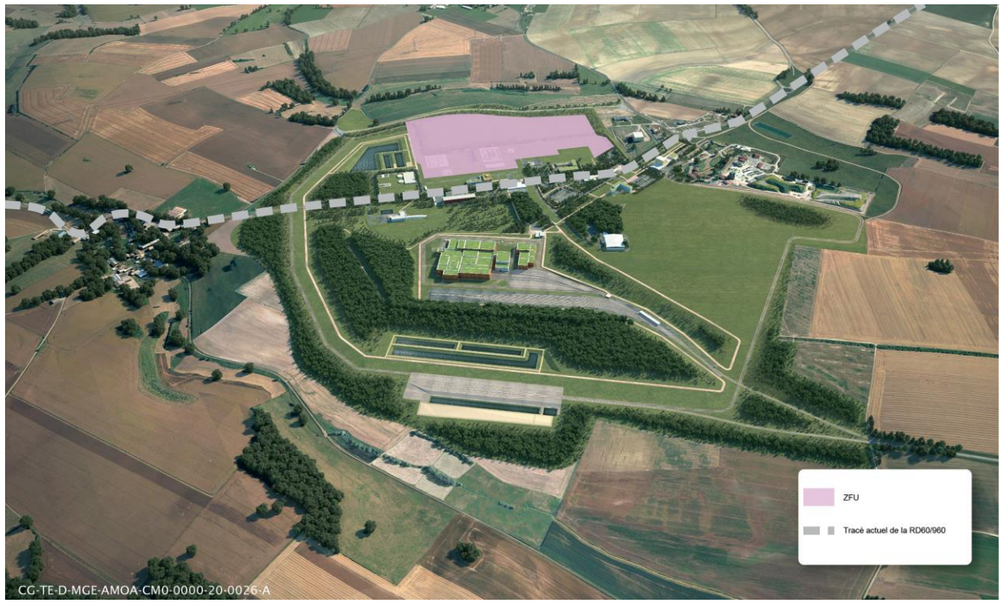


Figure 2-83 Localisation de la zone fluide et utilité au nord du tracé actuel de la route départementale D69/960

2.6.2.10 Partis pris d'aménagement pour la zone puits

La zone puits est dédiée principalement aux installations de soutien aux activités souterraines de stockage et de travaux (déploiement progressif des zones de stockage).

Le choix de sa localisation, dans la partie Sud du bois Lejuc, sur un terrain naturellement incliné vers l'Est, vers la vallée de l'Ormançon, répond aux critères et enjeux décrits aux chapitres 2.6.2.1, 2.6.2.2 et 2.6.2.6 du présent document.

L'aménagement de la zone puits repose sur les mêmes types de principes environnementaux et urbanistiques que ceux exposés pour la zone descenderie (cf. Chapitre 2.6.2.10 du présent document).

Du point de vue environnemental, il s'agit principalement de :

- limiter les modifications de la topographie naturelle du site en recherchant un équilibre déblais/remblais :
  - ✓ ce principe a pour objectif de réduire les impacts environnementaux, notamment en réduisant les volumes de terrassement et en évitant les transports de matériaux vers et depuis l'extérieur de la zone puits ;
- Réduire l'impact sur les milieux environnants compte tenu de leurs enjeux écologiques :
  - ✓ la vallée de l'Ormançon, en maintenant une distance minimale de 200 m entre les ouvrages de la zone puits et le cours d'eau (à l'exception des ouvrages de rejets par diffusion des eaux approchant jusqu'à 150 m pour bénéficier de la topologie des talwegs existants) ;
  - ✓ les lisières du bois Lejuc, à l'est et à l'ouest de la zone puits, en préservant des bandes boisées d'une largeur de 100 m :
    - ces bandes boisées participent également à l'intégration paysagère de la zone puits ;
  - ✓ préserver une partie de la chênaie-charmaie existante au sud de la zone puits ;
  - ✓ éviter le corridor écologique terrestre du SRCE situé au nord de la zone puits (cf. Chapitre 2.6.2.6 du présent document) lors du déploiement des verses (zones de gestion du Callovo-Oxfordien excavé Z1 et Z2) (cf. Chapitre 2.7.5 du présent document).

Du point de vue urbanistique, il s'agit principalement de :

- définir des axes structurants comme base du développement spatial de la zone puits :
  - ✓ les axes structurants apportent de la flexibilité et de la lisibilité pour le développement progressif d'une zone industrielle ou urbaine sur une longue durée. Un axe de développement du Sud vers le Nord est recherché sur la zone puits en lien avec l'exploitation et le développement de la zone de gestion du Callovo-Oxfordien excavé ;
- positionner et organiser les plateformes d'implantation des ouvrages (bâtiments, utilités, bassins…) en fonction des courbes topographiques et des voiries.
- structurer la zone par un traitement paysager adapté.
  - ✓ des espaces pleins et des vides sont créés pour dissimuler ou valoriser certains éléments et zones ainsi que pour rythmer la perception des aménagements ;
  - ✓ les limites des zones remaniées et les abords, notamment maintenus en l'état, évitent les transitions marquées (comme des murs, des talus abrupts…).

La zone puits n'accueille pas de bâtiments nucléaires. Par ailleurs, elle est plus éloignée des villages que la zone descenderie (environ 1,5 km). Elle respecte donc les mêmes règles de positionnement des bâtiments entre eux et vis-à-vis de l'extérieur sans que cela présente une contraient importante d'aménagement.

L'organisation des clôtures de la zone puits répond aux mêmes règles et contraintes que celles de la zone descenderie. Elles sont positionnées en fonction de la topographie et de la disposition des ouvrages et des voiries principalement pour des impératifs de sécurité (distances, hauteurs, surplombs, angles de vision…) et pour conserver des espaces d'éloignement entre les clôtures et les ouvrages et bâtiments à protéger.

S'agissant de la zone de verses, afin d'optimiser sa capacité d'accueil du Callovo-Oxfordien excavé, une digue est installée sur sa périphérie sud, ouest et nord. Cette digue permet de réduire leur surface tout en assurant leur insertion paysagère et la gestion des eaux pluviales. L'optimisation réalisée permet de réduire la consommation de l'espace boisé. Les déblais du Callovo-Oxfordien excavé sont acheminés vers leur zone de dépôt au moyen de bandes transporteuses. Ce moyen de manutention est adapté au transport de grandes quantités de matériaux pondéreux. Du point de vue environnemental, il permet d'éviter des transports par camion et les nuisances et risques associés. La hauteur maximale envisagée pour les verses est d'environ 20 mètres pour des raisons notamment de stabilité mécanique. Pour leur protection vis-à-vis des intempéries, elles sont progressivement recouvertes d'une couverture végétale réutilisant les terres de la zone puits. Cette mesure permet également leur intégration paysagère et la réduction de leurs impacts, notamment sur l'air (poussières), la qualité des eaux et la biodiversité. En dernier lieu, la zone de verses est développée progressivement en plusieurs phases afin de réduire les impacts des opérations de défrichement associées (cf. au chapitre 2.7.5 du présent document).

La concertation sur l'aménagement et le cadre de vie prévue par l'Andra fin 2020 abordera certains de certains de ces aspects, notamment paysagers.

2.6.2.11 Partis pris d'aménagement de la liaison intersites (LIS)

La liaison intersites permet d'assurer les échanges entre la zone descenderie et la zone puits. Elle est constituée de deux infrastructures privatives, une piste routière et une bande transporteuse semi-enterrée, ainsi que d'une route ouverte au public. Le choix de sa localisation répond aux critères et enjeux décrits au chapitre 2.6.2.1 du présent document.

L'aménagement de la liaison intersites repose sur les principes suivants :

- minimiser la coupure dans le territoire, principalement sur le plan des usages et autant que possible du point de vue du paysage ;
- assurer la continuité de la trame verte ;
- rétablir les continuités hydrauliques ;
- préserver les structures paysagères en place (unités, points de repères, boisements…) ;
- préserver les usages en place (notamment agricoles) ;
- participer à la trame viaire locale ;
- minimiser les perceptions depuis les espaces vécus.

L'aménagement de la LIS privilégie autant que possible une mise à niveau des voieries avec le terrain naturel. Les voieries en déblai seront limitées à des usages ponctuels et les voiries en remblai de grandes hauteurs seront exclues. Le traitement paysager sera adapté aux reliefs et aux points de vue de la liaison intersites depuis le territoire.

Le convoyeur à bande transporteuse semi-enterré est implanté dans un caisson en béton armé, composé de deux murets recouverts par des dalles. Ce convoyeur présente les avantages d'être peu visible dans le paysage, de réduire les nuisances sonores et d'assurer une bonne sécurité (notamment au risque de chute) vis-à-vis des riverains et de la faune.

L'Andra rétablit les voies de circulation interceptées de sorte qu'aucune parcelle ne reste isolée.

La LIS n'est pas clôturée pour éviter d'impacter les mouvements de la faune et pour réduire son impact paysager.

La concertation sur l'aménagement et le cadre de vie prévue par l'Andra fin 2020 abordera certains de certains de ces aspects, notamment paysagers.

2.6.2.12 Partis pris d'aménagement de l'installation terminale embranchée (ITE)

L'installation terminale embranchée (ITE) du centre de stockage Cigéo est une infrastructure ferroviaire privée destinée à raccorder le Réseau Ferré National (RFN) à la zone descenderie du centre de stockage Cigéo. Le choix de sa localisation répond aux critères et enjeux décrits au chapitre 2.6.2.1 du présent document.

L'aménagement de l'installation terminale embranchée repose sur les principes suivants :

- limiter la perception visuelle de l'installation ;
- réduire au mieux les impacts sur l'agriculture.

L'aménagement de l'installation terminale embranchée se base sur le tracé, l'altimétrie et le traitement paysager de la plateforme existante de l'ancienne ligne ferroviaire Gondrecourt-le-Château/Joinville sur ses dix premiers kilomètres (cf. Chapitre 2.6.2.8 du présent document). Ce tracé réduit au mieux la consommation des terres agricoles.

Pour les quatre derniers kilomètres à créer, le tracé est très contraint par les altimétries à respecter entre l'ancienne plateforme et la zone descenderie à desservir. Les mesures paysagères à mettre en œuvre, selon les points de vues, s'appuient et réemploient les compositions paysagères existantes.

L'Andra rétablit les voies de circulation interceptées de sorte qu'aucune parcelle ne reste isolée.

L'ITE n'est pas clôturée pour éviter d'impacter les mouvements de la faune et pour réduire son impact paysager.

La concertation sur l'aménagement et le cadre de vie prévue par l'Andra fin 2020 abordera certains de certains de ces aspects, notamment paysagers.

2.7 Les choix pour la conception du centre de stockage Cigéo

2.7.1 La démarche de développement durable

Les études de conception du centre de stockage Cigéo font l'objet d'une démarche de développement durable. Le croisement des enjeux de développement Durable avec des orientations – contextuelles – de projet a permis de structurer la démarche en six grandes stratégies :

- valoriser l'identité du site et ses relations avec son environnement proche ;
- mettre en œuvre une approche globale « énergie-carbone » ;
- optimiser le cycle de l'eau ;
- intensifier la biodiversité et le paysage ;
- créer des ambiances amènes ;
- penser le temps long du projet.

Ces stratégies sont déclinées de façon globale d'abord à l'échelle de l'organisation globale du centre de stockage, de l'aménagement de ses zones descenderie et puits et de la zone d'implantation des ouvrages souterrains, de la liaison intersites et de l'installation terminale embranchée, et enfin à l'échelle des ouvrages et bâtiments individuels.

Par son ampleur et le tissu dans lequel il s'insère, la valorisation de l'identité du site et les relations avec l'environnement proche du centre de stockage appelle principalement à ;

- optimiser la ressource foncière pour réduire la consommation d'espaces ;
- traiter la perception du centre de stockage à distance et à proximité ;
- limiter les nuisances pendant les différentes phases de déploiement ;
- encourager les mobilités douces.

L'énergie doit être pensée dans sa globalité, à l'échelle spatiale et thématique. Des synergies avec le territoire et les programmes voisins sont recherchées, ainsi que des partages énergétiques entre activités complémentaires du centre de stockage. L'ensemble des dépenses énergétiques est pris en compte, notamment celles nécessaires à la construction, au fonctionnement et à la fermeture. Pour cela les objectifs généraux de l'approche globale « énergie-carbone » sont principalement de :

- limiter les émissions de gaz à effet de serre du projet tout au long du cycle de vie par une approche bas carbone globale (efficacité énergétique, béton bas carbone, cycle court des matériaux…) ;
- concevoir des aménagements et bâtiments dont les besoins en énergie sont évalués et limités sans porter préjudice à la qualité d'usage et au confort ;
- rechercher des solutions énergétiques qui profitent des ressources locales, limitent les émissions de gaz à effet de serre, créent des filières locales ;
- penser la performance dans une logique d'efficacité et de mutualisation des sources de production.

Dans le contexte local, notamment la sensibilité du contexte hydrologique, le cycle de l'eau est un enjeu essentiel. Il doit principalement permettre de :

- minimiser les besoins d'adduction en eau ;
- optimiser la récupération des eaux avec traitement qualitatif différencié ;
- maîtriser la qualité des rejets au milieu naturel ;
- de gérer les eaux pluviales au plus proche du cycle naturel de l'eau.

En matière de biodiversité et de paysage, il s'agit principalement de :

- préserver et renforcer la biodiversité locale en respectant le contexte écologique, en encourageant la continuité des milieux et en veillant à l'entretien et l'utilisation des espaces paysagers (adapter le parti paysager, choix des essences végétales…) ;
- développer l'aménagement paysager dans une démarche de qualification des espaces extérieurs communs, en accompagnement des constructions.

Pour le territoire comme pour le personnel, le cadre de vie et de travail que constitue le centre de stockage présente un enjeu particulier. Les ambiances au sein du site sont imaginées pour ses usagers. Les objectifs généraux correspondant sont principalement de :

- prendre en compte le contexte climatique local pour les aménagements ;
- garantir la qualité de vie par des dispositifs pérennes concourant au confort et à la qualité sanitaire des espaces et bâtiments (aménagements et vues, confort hygrothermique en hiver et en été…) ;
- penser la convivialité du projet et favoriser le lien social.

Compte tenu de sa durée séculaire de fonctionnement et de son objectif fondamental de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sur le très long terme, le centre de stockage appelle une réflexion qui dépasse les logiques

spatiales et temporelles usuelles des projets industriels. L'échelle temporelle immédiate doit être complétée et dépassée pour appréhender l'évolutivité du site et des activités qui y seront menées. Les objectifs principaux sont de :

- garantir l'évolutivité du site et de sa trame urbaine ;
- anticiper les évolutions et la mutabilité des usages (adaptabilité des infrastructures et des bâtiments) ;
- maîtriser les risques et la vulnérabilité du projet sur le long terme (durabilité, évolution climatique…).

2.7.2 L'approvisionnement en énergie

L'utilisation de l'énergie du centre de stockage Cigéo est présenté au chapitre 6.1 du présent document.

S'inscrivant dans la démarche de transition énergétique, l'Andra développe des solutions techniques basées sur un « mix » énergétique minimisant l'utilisation d'énergie fossile pour satisfaire la demande du centre de stockage Cigéo. Les différentes sources de production d'énergie prennent en compte les spécificités des phases de vie (aménagements préalables, construction initiale et fonctionnement, cf. Chapitre 5). Elles sont adaptées en fonction des enjeux de sûreté et de la nature des installations les plus consommatrices d'énergie.

2.7.2.1 Le phasage des besoins en énergie

Les aménagements préalables sont définis au chapitre 5 du présent document. Ils correspondent principalement aux premières opérations de défrichement, d'archéologie préventive, à la réalisation des terrassements, de clôtures et également à la construction des infrastructures associées à la desserte du projet et à son alimentation en énergie. Lors des premiers travaux, seule une quantité limitée d'énergie électrique est disponible *via* le réseau 20 kV local. Elle est utilisée pour l'alimentation des installations temporaires de chantier, pour l'éclairage, le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Des éclairages solaires sont dès que possible utilisés. Les engins, en particulier ceux de terrassement, sont actuellement équipés de moteurs thermiques fonctionnant au gasoil. Lors de la passation des marchés, les entreprises seront incitées à utiliser les engins et véhicules ayant recours à l'énergie la plus respectueuse de l'environnement, compte tenu des techniques disponibles.

La construction initiale correspond à la réalisation des installations de surface et des premiers ouvrages souterrains (cf. Chapitre 5 du présent document). Lors de cette phase, l'énergie électrique sera disponible sur le site *via* la ligne « Très Haute Tension » (choix de RTE de se raccorder à la ligne 400 kV) et les équipements de distribution associés. L'énergie privilégiée est l'électricité pour la majorité des équipements servant aux travaux (centrale à béton, tunneliers, grues…) et pour les bandes transporteuses qui distribuent les matériaux de construction et les matériaux excavés. Des émissions de gaz à combustion sont ainsi évitées, ainsi que les risques associés aux importantes quantités d'hydrocarbures nécessaires au fonctionnement de ce type d'équipements, s'ils devaient fonctionner avec des moteurs thermiques. Les besoins pour l'éclairage du site et les installations temporaires de chantier sont également assurés principalement à partir du réseau électrique. Des éclairages solaires sont utilisés sur les zones de travaux et les cheminements. Pendant la construction initiale, des véhicules et engins de chantier à moteurs thermiques sont encore utilisés, mais en nombre réduit par rapport aux aménagements préalables. Lors de la passation des marchés les entreprises seront incitées à utiliser les engins et véhicules ayant recours à l'énergie la plus respectueuse de l'environnement compte tenu des techniques disponibles.

Le fonctionnement correspond à la mise en service progressive de l'installation jusqu'à l'atteinte de son régime nominal de fonctionnement, puis à son fonctionnement pour le stockage des colis de déchets. Les principales installations consommatrices d'énergie sont les installations du procédé nucléaire de manutention et de transfert des colis ainsi que la ventilation. Les travaux se poursuivent pour déployer graduellement l'installation souterraine. Dans les parties en cours de creusement, comme lors de la phase de construction initiale, les engins, véhicules, installations (centrales béton, bandes convoyeuses…) utilisés pour les travaux de creusement (tunneliers, convoyeurs…) sont alimentés par l'électricité. Les engins et véhicules (maintenance, intervention) sont autant que possible électriques.

2.7.2.2 L'alimentation en énergie électrique

Dans une installation nucléaire, l'alimentation en énergie des équipements de manutention et de transfert des colis de déchets radioactifs et les moteurs des ventilateurs doit être disponible et fiable pour assurer un fonctionnement sûr. De plus, afin de réduire les risques et les conséquences d'un éventuel incendie, la quantité de combustibles dans les installations nucléaires doit être aussi faible que possible.

Compte tenu des puissances nécessaires (environ 70 MVA et 50 MVA respectivement en phase de construction initiale et de fonctionnement) et du besoin de disponibilité (5 jours consécutifs au plus d'indisponibilité quel que soit l'événement, pendant lesquels le centre de stockage est alimenté par ses moyens de secours), l'alimentation énergétique retenue est l'alimentation électrique à partir du réseau de transport d'électricité national (RTE). Les choix d'implantation des installations de RTE pour l'alimentation en électricité du centre de stockage Cigéo sont présentés au paragraphe 2.8.1 du présent document.

Comme le montre la figure 2-84, près de 30 % de l'électricité de la région Grand Est a été produite en 2018 en utilisant des énergies renouvelables.

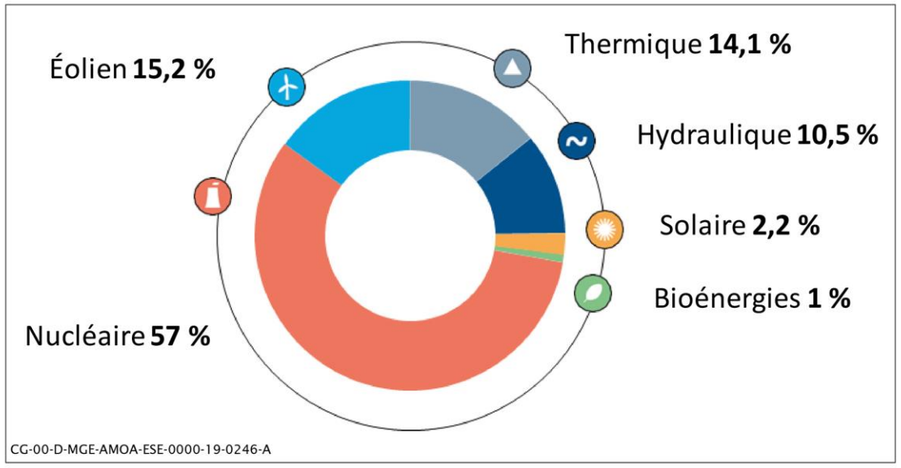


Figure 2-84 Origine de production d'électricité - Région Grand Est – 2018 [115]

Dans les bâtiments hors zones nucléaires (bâtiments tertiaires, restaurants…), les puissances nécessaires sont sans commune mesure et les équipements ne sont pas soumis aux mêmes exigences. Afin de s'inscrire dans la démarche de soutien et de développement des énergies renouvelables, des panneaux solaires sont installés sur les bâtiments tertiaires et participent à la fourniture d'électricité complémentaires pour ces bâtiments.

2.7.2.3 L'alimentation en énergie thermique

Pour garantir le bon fonctionnement des équipements et pour créer des conditions de travail satisfaisantes, la température de l'air de l'installation nucléaire de surface et des ouvrages souterrains doit être régulée. Les puissances requises sont :

- pour l'installation nucléaire de surface : 7,8 MW pour le chauffage et 7,3 MW pour le refroidissement en zone descenderie ;
- pour les installations souterraines : 16 MW pour le chauffage et 11 MW pour le refroidissement en zone puits.

L'utilisation pour le chauffage de l'air d'échangeurs électriques n'est pas réalisable. Cette solution technique présente un rendement faible et nécessite des surfaces d'échangeurs très conséquentes. Compte tenu du débit d'air à traiter (évalué à 300 $m^3.s^{-1}$), elle serait donc coûteuse et consommatrice en surface aménagée.

L'utilisation de la géothermie de faible profondeur est également écartée, compte tenu de la surface au sol qui serait nécessaire. Pour un bâtiment de surface nécessitant une puissance de chauffage de plus de 300 kW, il faudrait environ 16 km de sondes (soit 80 sondes réparties sur 5 ha) et pour 6 MW, il faudrait 300 km linéaires de

[115] Source RTE

sondes immergées (soit 1 500 sondes réparties sur une surface de 100 ha). De plus, la puissance thermique ne peut être garantie, car un phénomène de saturation du milieu risque d'apparaître.

L'utilisation de l'énergie solaire thermique nécessiterait plus de 20 000 m² de panneaux solaires thermiques (environ la surface de trois terrains de football). De plus, cette solution ne serait pas suffisante pour assurer la disponibilité, en particulier en période hivernale, de la puissance nécessaire au fonctionnement des équipements des installations industrielles. L'énergie solaire thermique, pour la production d'eau chaude sanitaire, fait néanmoins partie des solutions d'appoint à l'étude. Environ 600 m² de panneaux solaires, installés sur les bâtiments du centre de stockage Cigéo, permettent de répondre à 50 % des besoins en d'eau chaude sanitaire.

Une solution basée sur une distribution *via* un réseau de chaleur est donc recherchée pour réguler la température de l'air de l'installation nucléaire de surface et des ouvrages souterrains. Cette solution doit assurer une disponibilité importante et un fonctionnement flexible pour être compatible, d'une part avec le développement des installations du centre de stockage Cigéo et d'autre part avec les variations climatiques saisonnières sur toute la durée d'exploitation.

Compte tenu des quantités de carburant qui seraient nécessaires, des risques associés en terme d'incendie et des émissions de gaz à effet de serre qui seraient générées, la production de chaleur par chaudière au fioul n'est pas étudiée.

En concertation avec les acteurs du territoire, différentes solutions sont envisagées en cohérence avec la stratégie nationale bas-carbone (SNBC). La chaleur peut être produite par :

- des fournisseurs de chaleur externes, c'est-à-dire des industriels dont le procédé génère un excès de chaleur ou des unités de production de chaleur, extérieures aux emprises du centre de stockage Cigéo ;
- des chaudières biomasse implantées sur le centre de stockage Cigéo, alimentées par du bois, associées à des chaudières gaz alimentées par un stockage d'appoint sur site en cas de variation de consommation.

Les réflexions et études en cours en lien avec les acteurs du territoire s'orientent vers le développement d'une solution combinant ces différentes sources de production de chaleur.

LES PRINCIPAUX APPORTS DE LA CONCERTATION SUR L'ÉNERGIE RÉALISÉE EN 2019

Les échanges lors des réunions de concertation ont montré l'importance pour le territoire de développer les énergies vertes et d'intégrer aux études des solutions techniques envisageant la création d'unité de production de chaleur à l'extérieur des emprises du centre de stockage Cigéo.

Cette solution permettrait ainsi d'alimenter les collectivités proches et de faciliter l'installation d'industriels, consommateurs de chaleur, sur le territoire.

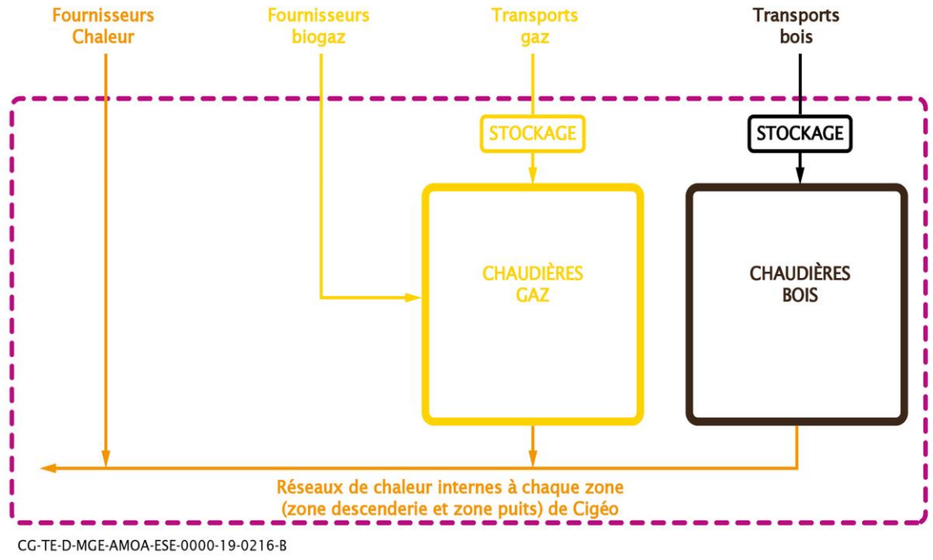


Figure 2-85 Les différentes options de production de chaleur par énergie thermique

2.7.3 L'adduction d'eau

Le centre de stockage Cigéo a des besoins en alimentation en eau potable variables en fonction du phasage du projet décrit au chapitre 6.1.2 du présent volume. Les pics de consommation d'eau potable sont estimés à environ 500 m³ **par jour pour les phases des aménagements préalables et de construction initiale et à environ 200 m³ par jour pour la phase de fonctionnement.**

Dès les études d'implantation des installations de surface du centre de stockage Cigéo, l'Andra s'est attachée à vérifier la disponibilité de la ressource en eau. Les besoins du projet ont été exposés aux différents syndicats de gestion des eaux et administrations présents sur le territoire.

Les options étudiées pour l'alimentation en eau potable du centre de stockage Cigéo sont la création de captages privés et l'utilisation de captages existants à proximité.

S'agissant de la création de captages privés, des essais ont été réalisés dans la vallée de la Marne, secteur choisi sur recommandation de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) et de l'Agence Régionale de Santé (l'ARS). Ils ont montré qu'une ressource suffisamment productive existait à Curel. Toutefois, la zone de Curel est quasiment impossible à protéger d'une pollution potentielle (proximité immédiate d'une route départementale et d'un dépôt de fioul) et elle nécessite une longue canalisation jusqu'au plateau de Bure (supérieure à 10 km). Compte tenu des risques, des incidences environnementales des travaux et de l'absence d'effet positif d'un forage dédié au centre Cigéo pour la sécurisation de l'alimentation en eau potable des communes[116], cette alternative n'a pas été retenue pour des études plus approfondies.

S'agissant de l'utilisation de captages existants, une recherche a été faite en tenant compte de leur productivité, des tracés envisageables pour raccorder le centre de stockage Cigéo et de leur statut de protection. En effet, certains captages font l'objet de déclaration d'utilité publique de protection (DUP), délivrés par le Préfet, qui interdisent ou réglementent tous travaux, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols, à proximité des captages, qui seraient de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux.

[116] L'aire d'étude éloignée pour le milieu physique est définie au § 1.1 du volume III.

Le tableau 2-6 liste les captages d'adduction d'eau situés dans les environs du centre de stockage Cigéo.

Tableau 2-6 Liste des captages d'adduction en eau potable présents dans un rayon de 10 km des points de raccordements du centre de stockage Cigéo

Captages	Masses d'eau	N° de captage dans la banque de données du sous-sol d'Infoterre	Date de la DUP pour le captage	Débits ($m^3.j^{-1}$)
Biencourt-sur-Orge (forage)	Calcaires du Barrois	02654X0015	Sans DUP Avis août 2013	300
Bonnet (forage)	Kimméridgien-Oxfordien	02661X0021	04/03/1983	90
Chassey-Beaupré (forage)	Oxfordien supérieur	02655X0001	Sans DUP	45
Échenay (forage)	Orge/Kimméridgien-Oxfordien	02657X0007	05/12/2008 Avis novembre 2016	410
Échenay (source)		02657X0030		
Gondrecourt-Le-Château (forage)	Oxfordien supérieur	02662X0028	10/07/1983	1 200
Horville-en-Ornois (source)	Kimméridgien-Oxfordien	02665X0002	Sans DUP Avis décembre 2016	-
Horville-en-Ornois (forage)	Kimméridgien-Oxfordien	02665X0031	Sans DUP Avis décembre 2016	-
Houdelaincourt (source)	Alluvions/Calcaires du Barrois	02661X0004	Sans DUP Avis mars 2008	-
Montiers-sur-Saulx (forage)	Calcaires du Barrois	02653X0004	28/07/1983	110
Osne-en-Val (source)	Calcaires du Barrois	02656X0009	09/08/1985	Non déterminé
Ribeaucourt (forage)	Calcaires du Barrois	02654X0006	Sans DUP Avis août 2013	50
Sailly (source)	Calcaires du Barrois	02657X0003	29/03/1981	-
Thonnance-Lès-Joinville (source)	Kimméridgien-Oxfordien	02656X0037	17/04/1987	400
Thonnance-Lès-Joinville (source)	Kimméridgien-Oxfordien	02656X0017	17/04/1987	200

Les captages de Thonnance-lès-Joinville, d'Échenay et de Gondrecourt-Le-Château présentent de bonnes caractéristiques en termes de productivité. Ces captages sont utilisés par les syndicats des eaux et font l'objet de déclarations d'utilité publique de protection (DUP). Ils ont donc été retenus pour l'étude des solutions d'alimentation en eau[117] en vue de couvrir les besoins des différentes phases de déploiement du centre de stockage Cigéo.

Les études des différents tracés envisageables et les différents tests de productivité des forages ont permis de confirmer la faisabilité, compte tenu de leur capacité, de l'utilisation de ces forages pour alimenter le centre de stockage Cigéo, sous réserve de la restructuration (remise en état ou optimisation) d'une partie des réseaux de distribution des syndicats des eaux. Elles montrent le besoin de sécurisation de l'alimentation en eau potable de communes justifiant l'interconnexion des différents réseaux pour assurer des ressources fiables et distinctes en termes de quantité et de qualité. Elles ont également fait émerger des opportunités d'amélioration de l'alimentation en eau pour les communes et l'intérêt de privilégier plutôt une alimentation directe depuis les sources du syndicat intercommunal d'adduction en eau potable (SIAEP) de Thonnance-lès-Joinville ou du SIVU du Haut-Ornain vers le SIAEP d'Échenay.

Les études des différentes solutions de tracé sont en cours par les syndicats des eaux. Elles permettront d'actualiser les versions ultérieures de la présente étude d'impact.

2.7.4 La gestion des eaux et les rejets

2.7.4.1 Le contexte hydrologique et hydrogéologique du centre de stockage Cigéo

Le contexte hydrologique et hydrogéologique du territoire d'implantation du centre de stockage Cigéo est marqué par une grande complexité (milieu karstique, proximité de la nappe des calcaires du Barrois…) et par des enjeux forts (risques d'inondation des villages, cours d'eau locaux présentant des débits faibles et des assecs réguliers, présence de l'espace naturel sensible de l'Ormançon, présence de captages…).

Ainsi, il n'existe pas, à proximité immédiate du centre de stockage Cigéo, de cours d'eau pérenne pouvant être le milieu récepteur des rejets de l'installation. La construction d'une canalisation de rejets de plus de 10 km jusqu'à l'Ornain ou la Marne aurait des impacts environnementaux, une complexité technique et un coût que ne justifient pas les besoins liés au centre de stockage Cigéo. Les rejets doivent donc être réalisés dans les cours d'eau locaux et pour cela, ils doivent être adaptés à la capacité de réception, à la complexité et à la sensibilité du milieu local.

Des éléments complémentaires sur le contexte hydrogéologique local sont présentés au chapitre 5.2 du volume III de la présente étude d'impact.

» RECHERCHE ET ÉTUDE DE PLUSIEURS SOLUTIONS DE REJET DES EFFLUENTS CONVENTIONNELS

Plusieurs solutions alternatives concernant le rejet des effluents conventionnels ont été étudiées techniquement par l'Andra et ont fait l'objet d'échanges avec les parties prenantes lors d'une phase de concertation en 2018. Il s'agit des 3 solutions alternatives suivantes :

- **Solution A**

Le rejet déporté au moyen de canalisation sur une longue distance vers les cours d'eau permanent les plus proches du centre de stockage Cigéo, la Marne, l'Ornain ou la Saulx.

Dans le cas de la Marne et de l'Ornain, la réalisation d'une conduite longue de plus de 15 km était nécessaire. Au regard de tous les impacts environnementaux nécessaires à sa construction (consommation de terres agricoles, impacts sur la biodiversité…) et les enjeux induits par sa conception (fonctionnement non gravitaire), son exploitation, sa protection et sa maintenance sur plus de 150 ans, cette solution n'a pas été jugée pertinente.

Dans le cas de la Saulx, cours d'eau plus proche de Cigéo, les mêmes problématiques techniques étaient rencontrées et un projet de développement touristique de sa vallée était à l'étude. La solution A a donc été abandonnée.

- **Solution B**

Le dispositif comprenait une infiltration totale ou partielle des eaux pluviales et des effluents conventionnels dans le sous-sol et une réinjection vers les aquifères des eaux de rabattement de nappe.

[117] Les captages de Biencourt-sur Orge et de Ribeaucourt, bien que disposant d'une productivité suffisante, ne disposent pas de dispositifs de protection règlementaire (arrêté de DUP). Il serait par ailleurs difficile de mettre en œuvre une telle procédure de DUP. En effet, les mesures agro-environnementales de protection sur le périmètre de protection rapprochée impliqueraient la remise en herbe de la rive droite de l'Orge.

La conception du centre de stockage Cigéo privilégie la récupération des eaux produites par ses activités, puis leur réutilisation maximale, après traitement, pour les besoins ne nécessitant pas une eau potable au sens de la consommation humaine. Ainsi, la zone puits et la zone descenderie sont chacune équipées d'une station d'épuration pour traiter les eaux usées et industrielles de surface et d'un dispositif de traitement des eaux de fond (cf. Chapitre 2.7.4.3 du présent volume) recyclant ainsi les effluents pour réutilisation interne (fabrication des bétons, nettoyage, arrosage…).

Par ailleurs, l'arrêté fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base (INB) (90) (cf. article 4.1.12) prescrit que « *les rejets dans le sol et les eaux souterraines sont interdits, à l'exception des infiltrations éventuelles d'eaux pluviales dans les conditions définies aux articles 4.1.9 et 4.1.14 et des réinjections, dans leur nappe d'origine, d'eaux pompées lors de certains travaux de génie civil.* »

En outre, les formations géologiques de surface présentes au niveau de la zone puits et de la zone descenderie ne sont pas assez homogènes et présentent dans certains cas des couches imperméables qui ne permettent pas une infiltration ou une réinjection des eaux pluviales et des effluents conventionnels (cas de la formation du Kimméridgien au droit de la partie sud de la zone de descenderie).

Enfin, le choix de cette solution technique aurait pu être un frein à une possible modification des usages des masses d'eau souterraine concernées par le centre de stockage Cigéo (implantation sous condition restrictive de futurs captages). De plus, des réinjections auraient concerné le périmètre de protection éloignée du captage d'alimentation en eau potable (AEP) de Rupt en Nonain. La solution B a donc été abandonnée.

- **Solution C**

Le rejet local des eaux pluviales et des effluents conventionnels et plus particulièrement dans la Bureau et l'Orge pour la zone descenderie et dans l'Ormançon pour la zone puits.

Le milieu naturel local présente des spécificités à prendre en compte (interface entre les masses d'eau superficielles et souterraines, période d'assec prolongé pour les 3 cours d'eau considérés), mais la définition d'un schéma de collecte, stockage, traitement et rejets des eaux pluviales et des effluents conventionnels vers ce dernier est techniquement possible tout en préservant les milieux aquatiques **à toutes les phases du projet global Cigéo.**

La solution C d'un rejet à débit et qualité contrôlé dans le milieu local a donc été retenue compte tenu de son moindre impact relatif global dès lors qu'elle est associée à des dispositifs de traitement performants (103).

Ce contexte particulier a guidé la conception du centre de stockage Cigéo pour ce qui concerne la gestion des eaux et des rejets associés. Afin de réduire au maximum les nuisances et les risques pour l'homme et l'environnement, l'Andra a conçu ces dispositifs de gestion des eaux de manière à s'assurer de :

- la non-aggravation des risques d'inondation pour les personnes et les biens ;
- la limitation au strict nécessaire des besoins en eau potable du centre de stockage Cigéo ;
- la préservation des milieux aquatiques par les rejets issus du centre de stockage Cigéo en distinguant :
  - ✓ les rejets des eaux pluviales et des effluents conventionnels ;
  - ✓ les rejets des effluents non conventionnels (contenant potentiellement des traces d'éléments radioactifs) ;
- la protection de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage et de l'environnement au regard du contexte hydrogéologique ;
- l'absence d'impact d'emprise sur les zones humides, principe de conception commun avec la préservation de la biodiversité.

Les principes de conception de la gestion des eaux et des rejets associés du centre de stockage Cigéo, décrits à la suite de ce chapitre, découlent de ces objectifs.

Pour le centre de stockage Cigéo, la conception des dispositifs, temporaires et définitifs, de gestion des eaux (collecte, stockage, traitement et rejet vers le milieu naturel) est conforme :

- à la réglementation applicable pour les installations, ouvrages, travaux et activités susceptibles d'avoir une incidence sur la ressource en eau (articles L. 214-1 et R. 214-1 et suivants du code de l'environnement) et pour les installations classées pour la protection de l'environnement (articles L. 512-1 et R. 512-1 et suivants du code de l'environnement) ;
- à la réglementation applicable et aux recommandations de l'Autorité de Sûreté Nucléaire relatives aux règles générales applicables aux installations nucléaires et notamment :
  - ✓ l'arrêté du 7 février 2012 (90) fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base ;
  - ✓ l'arrêté du 9 août 2013 (104) portant homologation de la décision n° 2013-DC-0360 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base ;
  - ✓ l'arrêté du 5 décembre 2016 (105) portant homologation de la décision n° 2016-DC-0569 (106) de l'Autorité de sûreté nucléaire du 29 septembre 2016 modifiant la décision n° 2013-DC-0360 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 16 juillet 2013 (104) relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base ;
- la réglementation locale, notamment la prise en compte des plans de prévention des risques inondation, du SDAGE du Bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands, du règlement sanitaire départemental…

Les chapitres suivants détaillent ces principes de conception de conception environnementale suivis pour le centre de stockage Cigéo en vue de réduire son impact.

2.7.4.2 La non-aggravation des risques d'inondations pour les personnes et les biens

Le principe retenu est de ne pas augmenter les débits actuels des cours d'eau concernés par les rejets d'eau pluviales du centre de stockage Cigéo (Orge, La Bureau, Ormançon).

Le rejet vers le milieu naturel est régulé par les bassins quantitatifs, mis en place au droit des secteurs imperméabilisés de la zone descenderie et de la zone puits, conçus pour ne pas augmenter le débit des cours d'eau récepteurs. Ces bassins sont dimensionnés pour retenir la pluie centennale définie pour la conception de l'INB. Les points de rejets dans le milieu naturel concernés sont :

- les rejets au moyen d'ouvrages diffusifs pour :
  - ✓ les rejets de la zone puits vers l'Ormançon ;
  - ✓ les rejets de la zone descenderie sud vers l'Orge ;
- les rejets canalisés de la zone descenderie nord vers La Bureau.

DÉFINITION DE LA PLUIE CENTENNALE UTILISÉE POUR DIMENSIONNER LES OUVRAGES DE LA ZONE DESCENDERIE ET DE LA ZONE PUITS DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO

Les événements de pluies intenses, survenant sur un site industriel comme le centre de stockage Cigéo, engendrent des ruissellements, des crues, des remontées de nappe et des risques d'inondation des bâtiments pouvant être la cause de dégâts matériels, de pollution, de pannes électriques et d'accidents ayant potentiellement des conséquences sur l'environnement. Pour prévenir tout risque de cette nature, la conception du centre de stockage vise, dans un premier temps à définir les caractéristiques théoriques d'un événement de pluie extrême affectant le centre, puis, dans un second temps, à organiser le site et à dimensionner les installations pour les protéger et réduire les risques sur l'environnement en cas de pluie. L'Andra suit en particulier les recommandations du guide de l'ASN concernant la protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes (guide n° 13) (107).

Contrairement à d'autres aléas (par exemple la vitesse du vent), les pluies extrêmes ne peuvent pas être caractérisées par un seul paramètre. Pour une fréquence d'occurrence donnée (par exemple une pluie décennale ou une pluie centennale), elles sont caractérisées notamment par une série de couples « intensité [118] / durée de la pluie ». Pour évaluer leurs effets, il faut également tenir compte des particularités locales de la zone, en particulier la taille du bassin versant et la dynamique de ruissellement.

Pour l'étude des conséquences des pluies extrêmes sur le centre de stockage Cigéo, les caractéristiques de pluies centennales ont été évaluées à partir des données météorologiques locales, enregistrées dans les stations météorologiques de Saint-Dizier et de Cirfontaines-en-Ornois (considérée comme la plus représentative des conditions du site) qui disposent d'une durée et d'une fréquence de mesures suffisantes. À partir des données locales, une pluie centennale théorique extrême, dite de « référence » ou pluie « projet » a été modélisée. Celle-ci possède une marge importante par rapport aux pluies intenses réelles mesurées dans la station météorologique. Cette marge permet de couvrir les incertitudes sur les données et sur le modèle statistique (intervalle de confiance de 95 %).

Les études de conception du site utilisent cette pluie de référence pour dimensionner les ouvrages de protection des installations du centre de stockage et de l'environnement de la zone descenderie et de la zone puits. Cette pluie sert à définir notamment la capacité des bassins de rétention des eaux pluviales et les réseaux d'évacuation. De plus, à des fins de robustesse, les études font l'hypothèse d'indisponibilité des avaloirs des réseaux. Les solutions de protection ainsi définies sont très robustes et efficaces pour protéger les bâtiments. Le dimensionnement de tous les bassins quantitatifs (bassins de rétention) du centre de stockage à la pluie de référence (pluie centennale théorique extrême) participe à l'objectif de non-aggravation des risques d'inondation pour les personnes et les biens aux alentours du centre de stockage en régulant le rejet des eaux pluviales vers les cours d'eau locaux, en particulier l'Orge, la Bureau et l'Ormançon, y compris en cas d'événements de pluies intenses.

Le rejet régulé de ces bassins quantitatifs vers le milieu naturel ne modifie pas le débit des cours d'eau grâce à un débit de fuite des bassins, dont la valeur est fonction de la pluie considérée (principe de régulation). Pour une pluie décennale, le débit de fuite maximum retenu est de 3 l/s/ha. Pour une pluie centennale, le débit de fuite maximum retenu est de 6 l/s/ha. Pour les surfaces non imperméabilisées, soient les eaux ruissellent et s'infiltrent naturellement (gestion alternative à la parcelle), soient elles sont collectées et rejoignent le réseau de collecte des eaux pluviales.

Sur le plan technique, un dispositif adapte le débit d'eau pluviale rejeté par les bassins quantitatifs, dénommé « débit de fuite des bassins », à l'intensité de la pluie considérée (principe de régulation) :

- pour une pluie décennale, le débit de fuite maximum retenu est de 3 l/s/ha ;
- pour une pluie centennale, le débit de fuite maximum retenu est de 6 l/s/ha.

[118] L'intensité de la pluie est parfois caractérisée par la « hauteur » de la pluie.

S'agissant des secteurs non imperméabilisés, soit les eaux ruissellent et s'infiltrent naturellement (gestion alternative à la parcelle), soit elles sont collectées et rejoignent le réseau de collecte des eaux pluviales.

Pour la liaison intersites et l'installation terminale embranchée, le même principe de non-aggravation des risques d'inondation est appliqué avec la mise en place de bassins quantitatifs régulant le débit rejeté :

- 2 bassins quantitatifs dimensionnés pour la pluie décennale pour la liaison intersites :
  - ✓ rejet sud canalisé vers La Bureau ;
  - ✓ rejet nord au moyen d'un ouvrage diffusif vers l'Ormançon ;
- 2 bassins quantitatifs dimensionnés pour la pluie décennale pour l'installation terminale embranchée et implantés en dehors du périmètre de protection du captage d'eau potable d'Échenay (département Haute-Marne).

Sur l'installation terminale embranchée (ITE) et la liaison intersites (LIS), les ouvrages de gestion des eaux sont dimensionnés à la pluie décennale conformément aux règles de l'art des ouvrages linéaires. Des emprises conservatoires sont néanmoins réservées pour le cas où les études, les échanges avec le territoire ou les autorisations de travaux exigeraient à l'avenir un redimensionnement des ouvrages.

Tous ces dispositifs de gestion des eaux pluviales sont conçus pour participer à la non-aggravation des risques d'inondations pour les personnes et les biens. Conformément au SDAGE Seine-Normandie 2010-2015, la conception du dispositif de rejet des bassins quantitatifs du projet de centre de stockage Cigéo est réalisée à partir des données du milieu naturel. Le débit de fuite des ouvrages de rétention est inférieur au débit spécifique du bassin versant collecté à l'état naturel.

L'analyse détaillée des incidences du centre de stockage sur le débit des cours d'eau figure dans le volume IV de la présente étude d'impact.

LA NON AGGRAVATION DES RISQUES D'INONDATION

Le débit d'un cours d'eau est le volume d'eau qui s'y écoule par unité de temps (l/s).

Le débit spécifique d'un cours d'eau en un point est son débit par unité de superficie du bassin versant situé en amont de ce point (l/s/ha). Il permet de comparer des cours d'eau situés sur des bassins versants différents et les capacités d'infiltration des eaux de ces bassins versants.

L'imperméabilisation des sols entraîne une diminution de la quantité d'eau pluviale infiltrée et donc une augmentation du débit spécifique.

Sur le centre de stockage Cigéo, l'eau pluviale sur les surfaces imperméabilisées est collectée et transférée vers des bassins qualitatifs pour traitement, puis vers des bassins quantitatifs qui régulent le débit de rejet.

Le débit régulé des eaux pluviales rejetées par le centre de stockage Cigéo est inférieur au débit spécifique naturel du bassin versant correspondant, c'est-à-dire au débit spécifique sans le centre de stockage (sans imperméabilisation de la zone).

Ce principe permet de ne pas aggraver le risque d'inondation à l'aval du point de rejet.

Le calcul des débits spécifiques et des débuts régulés en sortie des bassins quantitatifs sont décrits au volume 7 de la présente étude d'impact.

Des éléments complémentaires sur le dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux pluviales sont présentés au chapitre 5.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

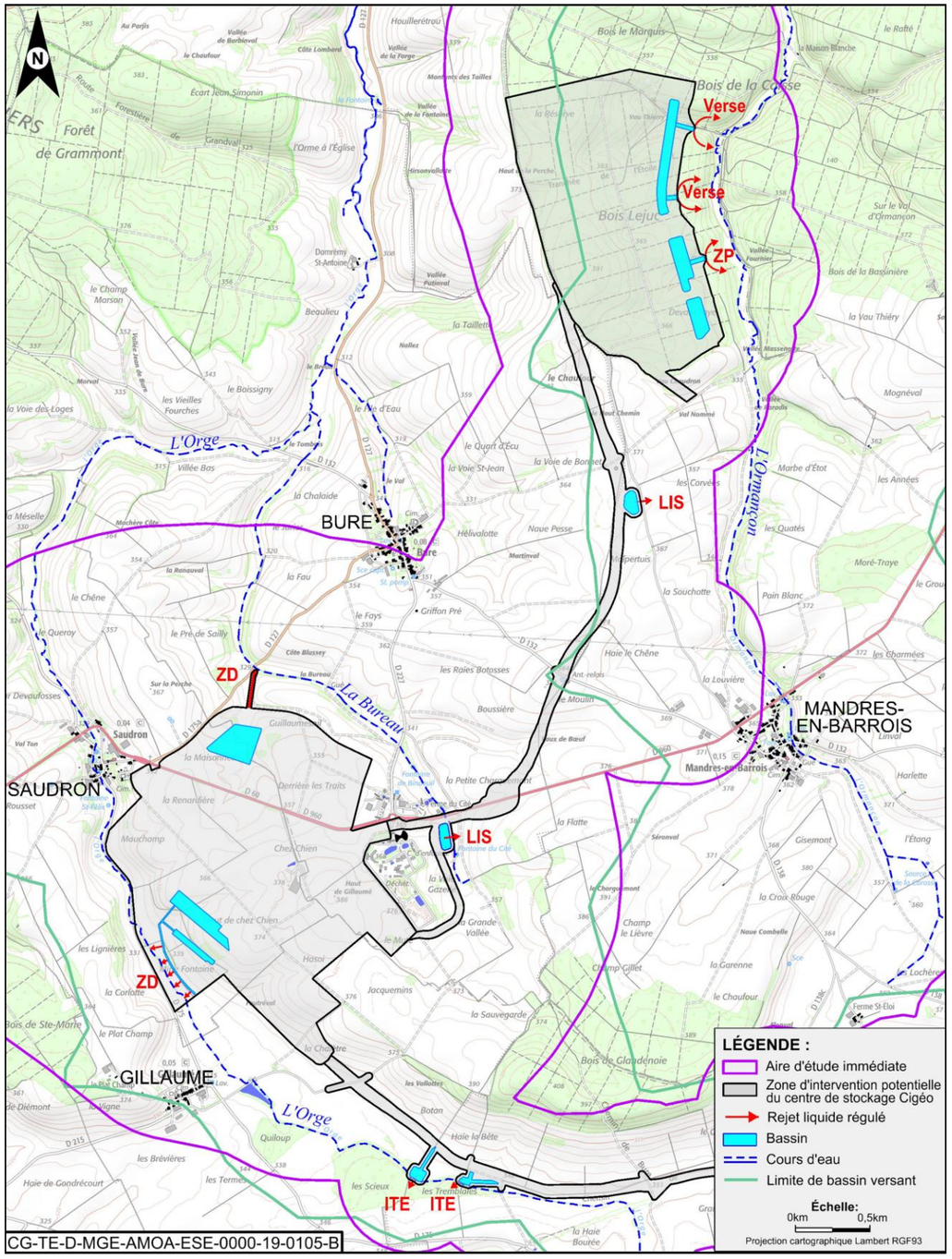


Figure 2-86 Carte de localisation des points de rejets liquide du centre de stockage Cigéo

2.7.4.3 La préservation des milieux aquatiques vis-à-vis des rejets d'eaux pluviales et d'effluents conventionnels issus du centre de stockage Cigéo

Pendant toutes les grandes phases du projet global Cigéo, les effluents dits « conventionnels » du centre de stockage Cigéo sont produits par des activités classiques, dans des locaux qui ne contiennent pas de colis de déchets radioactifs et par des activités qui ne mettent pas en œuvre de substances radioactives.

Les rejets dits conventionnels comprennent :

- les eaux pluviales dont le principe de stockage et de régulation a été précisé dans le principe de non-aggravation des risques d'inondations pour les personnes et les biens (cf. Chapitre 2.7.4.2 du présent document) ;
- les effluents conventionnels dont les principes de gestion *via* des stations d'épuration et des dispositifs de traitement sont explicités dans le présent chapitre.

Les effluents conventionnels recouvrent les eaux usées (effluents issus des sanitaires, des lavabos, des douches et des réfectoires), les effluents industriels provenant des installations de surface (eaux issues d'activités industrielles conventionnelles, aires de lavage…) et les effluents issus des installations souterraines (eaux d'exhaure, eaux ruisselant sur les zones imperméabilisées au fond et eaux de test incendie).

Les eaux pluviales et les effluents conventionnels du centre de stockage Cigéo font l'objet de différents traitements selon leur nature et leur date de production parmi les grandes phases du projet global Cigéo (cf. Chapitre 5 du présent document).

En phase d'aménagements préalables, des dispositifs provisoires et évolutifs d'assainissement des eaux pluviales des plateformes et de toutes les zones de chantier, dimensionnés pour la pluie décennale, sont mis en place (capacité de stockage). Adaptés à un chantier, ils comprennent des systèmes de traitement de la qualité des eaux de type filtres à fines, séparateurs à hydrocarbures ou dispositifs similaires. L'objectif de ces dispositifs est l'absence de rejet polluant (hydrocarbures, matières en suspension…) vers le milieu local tout en assurant une régulation des débits rejetés dans ce milieu. Des dispositifs d'assainissement non collectif sont installés pour le traitement des eaux usées produites par les bases vie des chantiers (zones descenderie et puits/plates-formes de chantier au droit des zones de rétablissement routiers avec l'installation terminale embranchée). Ils sont dimensionnés selon les exigences des règlements sanitaires départementaux ou les prescriptions techniques précisés dans les documents d'urbanismes concernés.

En phase de construction initiale, dès la fin de la phase d'aménagements préalables, les dispositifs qualitatifs et quantitatifs définitifs de traitement des eaux pluviales et des effluents conventionnels sont fonctionnels et dimensionnés pour la pluie de référence du projet. L'Andra a pour objectif de traiter l'ensemble des eaux pluviales et des effluents conventionnels selon les meilleures techniques possibles.

En phase de fonctionnement, les dispositifs de collecte, de stockage, de traitement et de rejet développés en phase de construction initiale pour les eaux pluviales et les effluents conventionnels sont maintenus et utilisés. Sur la durée de fonctionnement d'ordre séculaire du centre de stockage Cigéo, ils pourront naturellement être adaptés suite à la prise en compte des retours d'expérience, de développements technologiques ou à d'éventuelles modifications des installations.

» PRINCIPES DE TRAITEMENT DES EAUX PLUVIALES ET DES EFFLUENTS CONVENTIONNELS

Eaux pluviales

En zones descenderie et puits (en dehors de la zone de gestion des verses), des dispositifs de traitement et d'abattement de la pollution des eaux pluviales sont mis en place. Ils sont dimensionnés pour traiter la charge polluante issue du lessivage des voiries par un évènement pluvieux de 11 mm dans des bassins dénommés « qualitatifs ».

À l'issue du traitement, les eaux transitent dans un filtre à sable avant de rejoindre des bassins quantitatifs dimensionnés pour une pluie centennale. Le débit de fuite de ces bassins respecte le principe de non-aggravation des risques d'inondation décrit précédemment (cf. Chapitre 2.7.4.2 du présent document). Les bassins qualitatifs comprennent aussi un dispositif pour assurer le confinement d'une éventuelle pollution accidentelle avant son traitement.

Les eaux pluviales ruisselant sur les verses de la zone puits sont collectées au sein de bassins qualitatifs. Elles transitent ensuite vers un bâtiment technique pour un traitement spécifique, puis sont transférées vers des bassins quantitatifs dimensionnés pour la pluie centennale avant leur rejet par des ouvrages de diffusion vers l'Ormançon.

Les eaux pluviales ruisselant sur la liaison intersites sont gérées qualitativement et quantitativement au moyen de 2 bassins de collecte multifonction dimensionnés pour la pluie décennale. Le rejet vers le milieu naturel se fait à débit régulé selon le même principe que ceux des zones descenderie et puits (cf. Chapitre 2.7.4.2 du présent document).

Les eaux pluviales ruisselant sur la plateforme ferroviaire de l'installation terminale embranchée sont gérées grâce à 2 bassins de collecte multifonction dimensionnés pour la pluie décennale, conformément aux règles de l'art. Le rejet vers le milieu naturel se fait à débit régulé selon le même principe que ceux des zones descenderie et puits. Une réhabilitation du dispositif actuel de gestion des eaux pluviales est prévue pour la plateforme logistique de Gondrecourt-le-Château (en attente de la définition technique des futures installations/activités implantés sur la plateforme logistique).

Effluents conventionnels issus des installations en surface

En zones descenderie et puits, les stations d'épuration mises en fonctionnement traitent les effluents conventionnels (eaux usées, eaux industrielles de surface). Le procédé technique de traitement de ces eaux est adapté à la fois à la qualité des eaux collectées et à la compatibilité des rejets du centre de stockage Cigéo avec les critères de bon état écologique et chimique des eaux superficielles (cf. Chapitre 2.7.4.5 du présent document). La description technique des principes retenus pour le traitement au sein des stations d'épuration figure dans le volume IV de la présente étude d'impact. Au final, les stations d'épuration correspondent à une chaîne de traitement pour environ 1 700 équivalent habitants pour la zone descenderie et environ 700 pour la zone puits, soit l'équivalent des stations d'épuration pour des communes française de taille moyenne.

Effluents conventionnels issus des installations en fond

En zone descenderie et en zone puits, des dispositifs traitent les effluents conventionnels récupérées au niveau des ouvrages souterrains (eaux d'exhaure, eaux ruisselant sur les zones imperméabilisées en fond et eaux de test incendie). Le procédé technique des dispositifs de traitement de ces eaux est adapté à la fois à la qualité des eaux collectées et à la compatibilité des rejets du centre de stockage Cigéo avec les critères de bon état écologique et chimique des eaux superficielles (cf. Chapitre 2.7.4.5 du présent volume). La description technique des principes retenus pour le traitement au sein des dispositifs de traitement figure dans le volume IV de la présente étude d'impact.

Eaux usées (uniquement pour la plateforme logistique de Gondrecourt)

La plateforme logistique de Gondrecourt-le-Château comprend actuellement un dispositif d'assainissement des eaux usées (fosse de 6 m³ régulièrement vidangée qui est conservé en l'état, mais pourra être adaptée au cours du temps en fonction des besoins.

Des éléments complémentaires sur le traitement des eaux sont présentés au chapitre 5.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

2.7.4.4 La préservation des milieux aquatiques vis-à-vis des effluents non conventionnels issus du centre de stockage Cigéo

En phase de fonctionnement, des effluents « non conventionnels », c'est-à-dire contenant des traces de contamination radioactives apportées par les activités du centre, pourraient être produits dans certaines zones de l'installation nucléaire dites « zones à production possible de déchets nucléaires » (108). Il s'agit uniquement des zones dans lesquelles les colis de déchets sont manipulés ou de zones dans lesquelles des opérations sont susceptibles de générer une contamination radioactive des équipements. Cette contamination peut alors être transmise à d'éventuels effluents de condensation ou de ruissellement.

Dans le centre de stockage Cigéo, des effluents non conventionnels peuvent être produits dans les alvéoles HA (eaux de ruissellement) et en pied des cheminées de ventilation nucléaire (condensats). Leur quantité est faible. Les études de l'Andra l'estime à environ 0,15 m³/j au maximum au cours des premières décennies de fonctionnement. Leur activité sera très faible, de l'ordre de quelques Becquerels par litres (Bq/L), voire au maximum de l'ordre de la dizaine de Bq/L. Pour mémoire, l'activité volumique de l'eau de mer est de l'ordre de 40 Bq/L. Celle de l'eau de pluie d'environ 0,5 Bq/L.

Afin de préserver la qualité des milieux aquatiques concernés par les rejets issus du centre de stockage Cigéo, l'Andra retient le principe de ne rejeter aucun effluent non conventionnel dans le milieu naturel local.

Les effluents non conventionnels sont gérés de façon spécifique, totalement séparée des effluents conventionnels. Ils sont collectés et contrôlés radiologiquement et le cas échéant traités *via* une unité mobile (technologie existante et éprouvée).

Tous les effluents non conventionnels, traités ou non, sont transférés sous forme de déchets liquides vers une autre installation agréée pour leur élimination. La production de ces effluents n'intervenant qu'après la mise en service du centre de stockage Cigéo, l'installation agrée avec laquelle l'Andra signera une convention pour le transfert de ces effluents non conventionnels n'a encore pu être identifiée[119].

La radioactivité totale des effluents non conventionnels produits par le centre de stockage Cigéo sera inférieure au million de Becquerel par an (1MBq). Pour l'installation agrée vers laquelle ils seront expédiés, la radioactivité ajoutée par ces effluents ne représentera qu'une faible part des rejets autorisés. En effet, les autorisations de rejets des installations nucléaires de base (INB) sont classiquement de plusieurs ordres de grandeurs supérieurs. Par exemple :

- la centrale de Paluel est autorisée à rejeter par an respectivement 160 000 et 20 milliards de Becquerels (GBq) en tritium et en produits de fission ou d'activation émetteurs béta gamma (109) ;
- le centre de stockage de l'Aube (CSA) exploité par l'Andra est autorisé à rejeté 100 millions de Becquerels (0,1 GBq) en émetteurs béta gamma par an (110).

En réalité, ces installations ne rejettent qu'une part réduite de la radioactivité qu'elles sont autorisées à rejeter annuellement. L'ajout des effluents de Cigéo, même s'il est non significatif par rapport au rejet total de l'installation agrées, fera l'objet d'une évaluation d'impact détaillée et d'une instruction par l'autorité de sûreté nucléaire (ASN) avant son éventuelle autorisation.

En fonction des évolutions technologiques à l'horizon du début de fonctionnement du centre de stockage Cigéo et d'une possible évolution des volumes concernés, d'autres pistes de traitement sont en cours d'étude, par exemple la production de colis de déchets de très faible activité. Elles feront le cas échéant l'objet de demandes d'autorisation spécifique et seront détaillées dans les versions ultérieures de la présente étude d'impact.

[119] Tout transfert d'effluents liquides ou d'eau prélevée dans l'environnement à une autre installation, nucléaire de base ou non, dépendant d'un autre exploitant, fait préalablement l'objet d'une convention passée entre l'exploitant de l'installation nucléaire de base et l'exploitant de l'autre installation. Cette convention fixe les caractéristiques et les quantités des effluents ou des eaux transférés (90).

2.7.4.5 Limitation au strict nécessaire des besoins en eau potable du centre de stockage

Le centre de stockage Cigéo a des besoins différents en alimentation en eau potable selon les phases du projet global Cigéo.

Sa conception vise à préserver les ressources locales utilisées pour l'alimentation en eau potable en privilégiant le recyclage des eaux consommées, puis leur utilisation maximale pour ses propres activités ne nécessitant pas une eau potable au sens de la consommation humaine.

Comme précisé au chapitre 2.7.4.3 du présent document, deux systèmes distincts de gestion des effluents conventionnels sont prévus sur chaque installation de surface (zone puits, zone descenderie) :

- une station d'épuration pour traiter :
  - ✓ les eaux usées ;
  - ✓ Les effluents industriels des installations de surface ;
- un dispositif de traitement pour les effluents issus des installations souterraines.

La gestion des eaux et des effluents et les dispositifs de traitement visent à la compatibilité des rejets avec les critères de bon état écologique et chimique des eaux superficielles. Cette qualité des eaux issues des traitements est compatible avec leur réutilisation sur le centre de stockage Cigéo pour différents usages n'impliquant pas une consommation humaine (production de béton, fonctionnement des tunneliers, lavage des engins, arrosage des espaces verts...). Les principes de dimensionnement des procédés de traitement sont décrits au chapitre 5.2.7 du volume VII de la présente étude d'impact.

La réutilisation des eaux traitées nécessite la mise en place de réservoirs de stockage des eaux dites « recyclées » pendant 3 jours. Les eaux recyclées peuvent être utilisées pendant ce laps de temps pour un usage n'impliquant pas une consommation humaine. Passé le délai de 3 jours, les eaux sont rejetées vers le milieu naturel en respectant le principe de non-aggravation des risques d'inondation en aval hydraulique décrit au chapitre 2.7.4.2 du présent document. Le nombre de réservoirs et le volume de stockage varient en fonction de la phase de déploiement du centre de stockage Cigéo

En tenant compte de l'utilisation prioritaire des eaux recyclées pour les usages industriels décrits ci-avant, les pics de consommation d'eau potable sont estimés à environ 500 $m^3.j^{-1}$ pour la phase des aménagements préalables, 500 $m^3.j^{-1}$ pour la phase de construction initiale et 200 $m^3.j^{-1}$ pour la phase de fonctionnement du centre.

Ce principe de recyclage des eaux produites au sein du centre de stockage Cigéo s'applique dès la mise en exploitation des stations d'épuration (mise en service à la fin de la phase des aménagements préalables) et permet d'économiser au maximum 700 $m^3.j^{-1}$ d'eau potable, en pointe, en phase de construction initiale et de l'ordre de 275 $m^3.j^{-1}$ en phase en phase de fonctionnement.

LES DISPOSITIFS D'APPROVISIONNEMENT EN EAUX RECYCLÉES

Afin de garantir le dispositif d'approvisionnement en eaux recyclées pour les installations du centre de stockage Cigéo, il est prévu :

- différents réservoirs de stockage des eaux recyclées de volumes adaptés aux besoins des installations de surface ;
- en cas de défaillance dans l'approvisionnement en eaux recyclées (dysfonctionnement des filières de traitement, etc.), une autonomie du système apportée par la possibilité de prélever dans le réservoir de stockage des eaux pluviales[120] ou de recourir à un approvisionnement direct par le réseau d'adduction d'eau potable du centre de stockage Cigéo.

Tableau 2-7 Nombre et le volume des réservoirs de stockage des eaux pluviales, des effluents traités au sein des stations d'épuration et des dispositifs de traitement

Type d'eau	Phases de construction initiale et de fonctionnement	
	Zone puits	Zone descenderie
Effluents traités au niveau d'une station d'épuration (=eaux usées et eaux industrielles des installations de surface)	1 station d'épuration 1 réservoir de 200 m^3	1 station d'épuration 1 réservoir de 700 m^3
Effluents traités au niveau du dispositif de traitement (= eaux de fond)	1 dispositif de traitement 2 réservoirs de 3 100 m^3 en cumul en phase de construction initiale, ,puis 1 réservoir de 1 600 m^3 en phase de fonctionnement	1 dispositif de traitement 1 réservoir de 3 000 m^3 uniquement en phase de construction initiale
Eaux pluviales	Réservoir en amont en amont des quantitatifs : 2 500 m^3	Réservoirs en amont des bassins quantitatifs : 1 000 m^3

L'utilisation des réserves d'eaux pour les besoins en eau non potable se fait dans l'ordre suivant :

1 - Utilisation en priorité des effluents traités au niveau des stations d'épuration ;

2 - Utilisation des eaux de fond épurées au niveau des dispositifs de traitement ;

3 - En cas de défaillance momentané des systèmes de traitement, utilisation des eaux pluviales des réservoirs de stockage ;

4 - En dernier recours, appoints limités au maximum d'eau potable.

Tous les éléments techniques concernant la gestion des eaux et le recyclage des eaux traitées sont précisés dans le volume IV de la présente étude d'impact.

En synthèse, le dispositif de gestion des eaux des zones descenderie et puits est évolutif et adapté à la nature des eaux et à leur volume estimé. Ce principe permet une performance maximale des dispositifs de traitement pour atteindre une qualité d'eaux recyclées adaptée au besoin en eau non potable du centre de stockage Cigéo ainsi qu'une compatibilité des rejets avec les critères de bon état écologique et chimique des eaux superficielles. L'aménagement des installations en surface permettra au besoin de modifier ce dispositif pour garantir la non-aggravation du risque inondation en aval (aspect quantitatif) et la non-altération de la qualité des eaux (aspect qualitatif). Le dispositif de gestion des eaux pour la liaison intersites et l'installation terminale embranchée reste inchangé après leur réalisation en phase d'aménagements préalables.

Le principe actuellement retenu de la gestion des eaux sur la zone descenderie est schématisé en figure 2-87 en fin d'aménagements préalables et en phase de construction initiale, puis au droit de la figure 2-88 pour la phase de fonctionnement. Pour la zone puits, la gestion des eaux en phase de construction initiale est présentée en figure 2-89 en fin d'aménagements préalables et en phase de construction initiale et en figure 2-90 pour la phase de fonctionnement.

[120] En amont des bassins quantitatifs de la zone descenderie et de la zone puits (entre les bassins qualitatifs et les bassins quantitatifs), sont implantés des réservoirs d'eau pluviale qui font office de réserves de dernier recours, au cas où les effluents traités ne sont pas suffisants aux besoins d'eau recyclée. Le maintien du réservoir de la zone descenderie sera réinterrogé pendant la phase de fonctionnement en fonction du besoin.

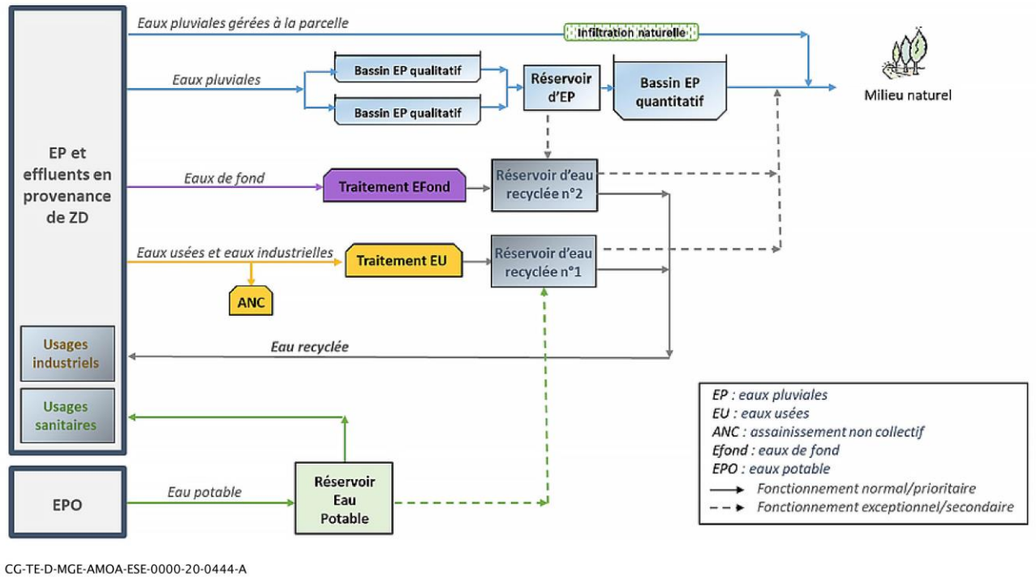


Figure 2-87 *Schéma illustratif de principe de la gestion des eaux au droit de la zone descenderie en fin d'aménagements préalables et en phase de construction initiale*

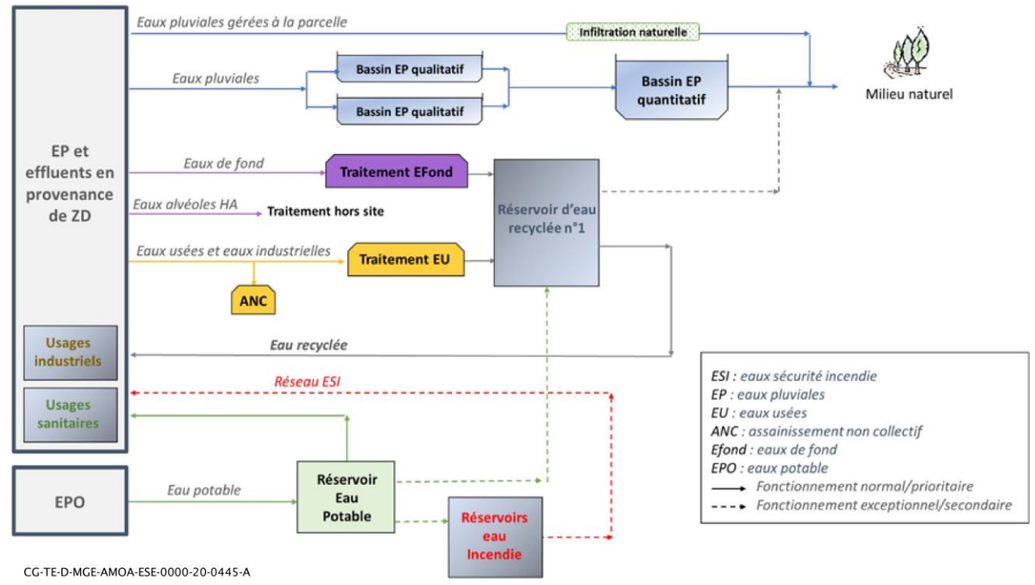


Figure 2-88 *Schéma illustratif de principe de la gestion des eaux au droit de la zone descenderie en phase de fonctionnement (les effluents non conventionnels correspondent aux eaux alvéoles HA sur ce schéma)*

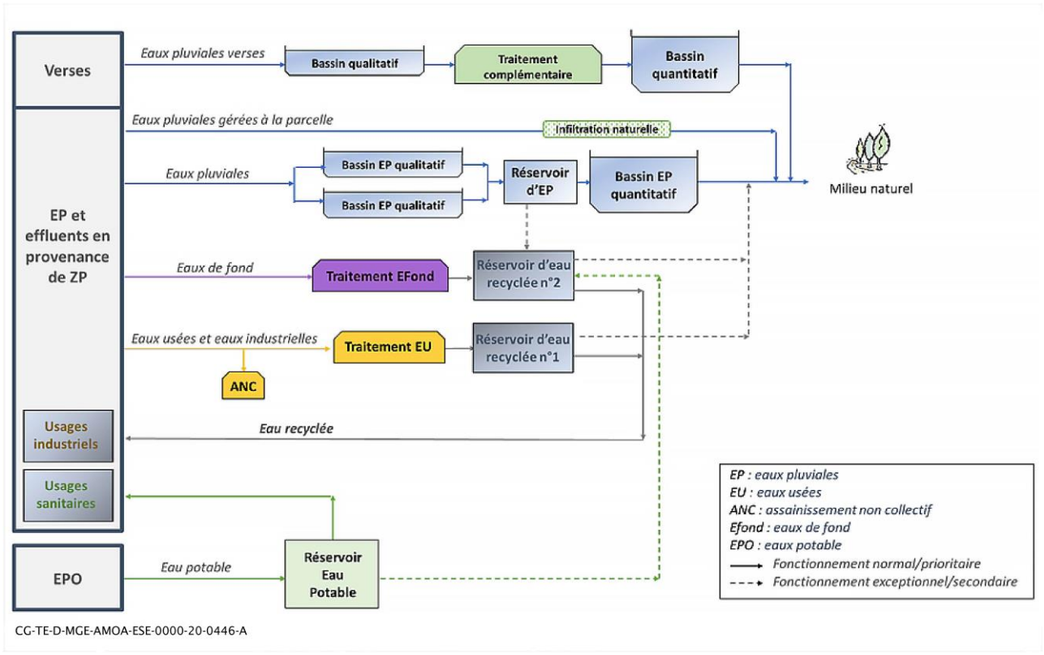


Figure 2-89 *Schéma illustratif de principe de la gestion des eaux au droit de la zone puits en fin d'aménagements préalables et en phase de construction initiale*

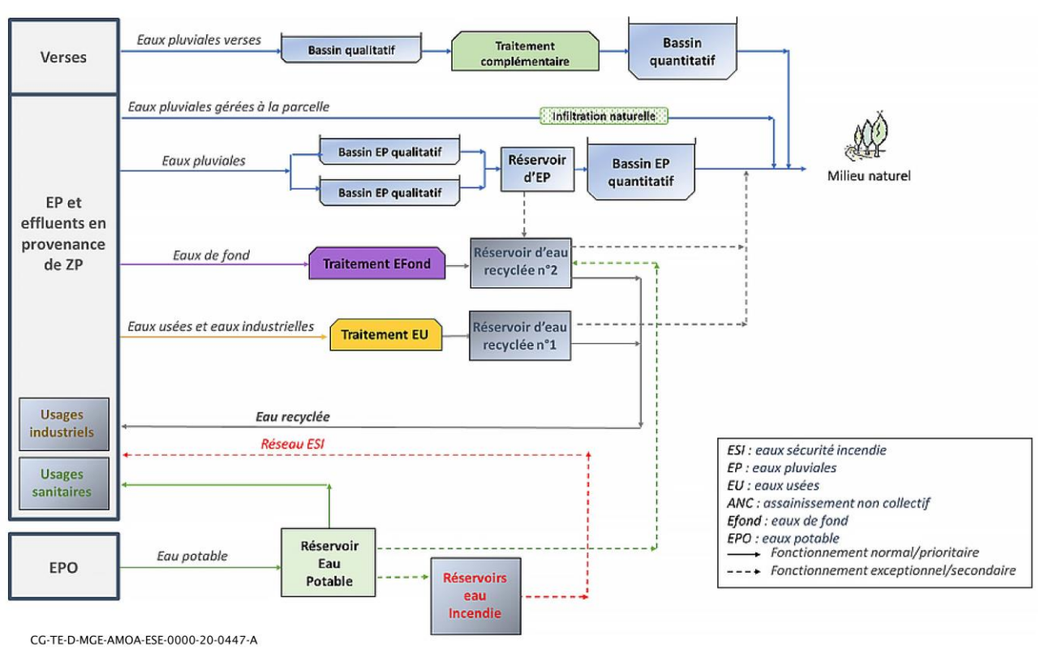


Figure 2-90 *Schéma illustratif de principe de la gestion des eaux au droit de la zone puits en phase de fonctionnement*

2.7.4.6 La protection de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo et de l'environnement au regard du contexte hydrogéologique

La conception de l'installation nucléaire de base du centre de stockage Cigéo intègre les caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'implantation, notamment la présence d'une nappe d'eau souterraine au niveau des calcaires du Barrois.

Deux types de dispositifs sont prévus et explicités ci-après :

- un dispositif d'étanchéité et de drainage au niveau de la nappe des calcaires du Barrois sur la zone descenderie constitué d'une paroi étanche « ancrée » dans la couche imperméable située sous les calcaires du Barrois. Elle est mise en place dès la phase d'aménagement préalable pour éviter des venues d'eau latérales et ainsi se protéger des variations du niveau de la nappe.

  La paroi étanche assure la protection des têtes descenderies, du bâtiment nucléaire EP1 et du terminal ferroviaire nucléaire pendant leur construction.

  Elle vient renforcer la protection de ces bâtiments contre les risques d'inondation par une remontée exceptionnelle de la nappe phréatique en phase de fonctionnement.

  La paroi présente une profondeur moyenne d'environ 18 m et délimite une surface protégée contre les fluctuations de la nappe des calcaires du Barrois d'environ 33 ha.

  Elle constitue une solution robuste, assurant plusieurs fonctionnalités au cours du temps (protéger les opérations de travaux et l'installation nucléaire de base).

  Afin de réduire le rabattement de la nappe occasionné en aval de cette paroi, des ouvrages de drainages des eaux souterraines sont associés à cette paroi pour permettre la ré-infiltration des eaux dans le milieu naturel.

  La conception de ce dispositif est approfondie, tant dans le cadre de la préparation du dossier de demande d'autorisation de création (DAC), que dans le cadre des actualisations ultérieures de l'étude d'impact, afin d'identifier des pistes d'optimisation permettant de réduire ses incidences sur l'environnement, notamment renforcer la transparence hydraulique. À ce stade, ce dispositif est une option, parmi d'autres, dont la conception fait l'objet d'une démarche itérative en regard de l'objectif de protection des ouvrages ;

- des dispositifs d'étanchéité au niveau de toutes les liaisons surface-fond (puits et descenderies) pour les isoler de la nappe des calcaires du barrois et pour éviter la mise en communication des aquifères traversés (cf. Figure 2-91).

  Un « bulbe d'étanchéité » composé d'un matériau gonflant en présence d'eau (matériau bentonitique) est mis en place à l'interface entre les différentes couches géologiques traversées. En gonflant, il assure l'étanchéité entre le massif en béton des liaisons et le terrain.

  Autour des puits et des descenderies, des injections de collage sont réalisées de manière à boucher les fissures du terrain imperméable qui peut être endommagé par la technique de creusement et pour apporter une protection complémentaire.

  Enfin, des caniveaux et des gouttières récupèrent et acheminent de manière gravitaire les éventuelles eaux collectées dans les liaisons surface-fond vers des rétentions. Ces rétentions sont situées à l'écart des zones de stockage des colis de déchets radioactifs pour éviter tout risque de contamination. Les eaux dites « eau d'exhaure » sont remontées en surface pour analyse et traitement adapté.

  Pour éviter tout risque de contamination des aquifères traversés et des terrains pendant la phase de fonctionnement, le puits assurant l'extraction de la ventilation des zones nucléaires (puits VVE) est équipé d'un tubage métallique étanche sur toute sa hauteur.

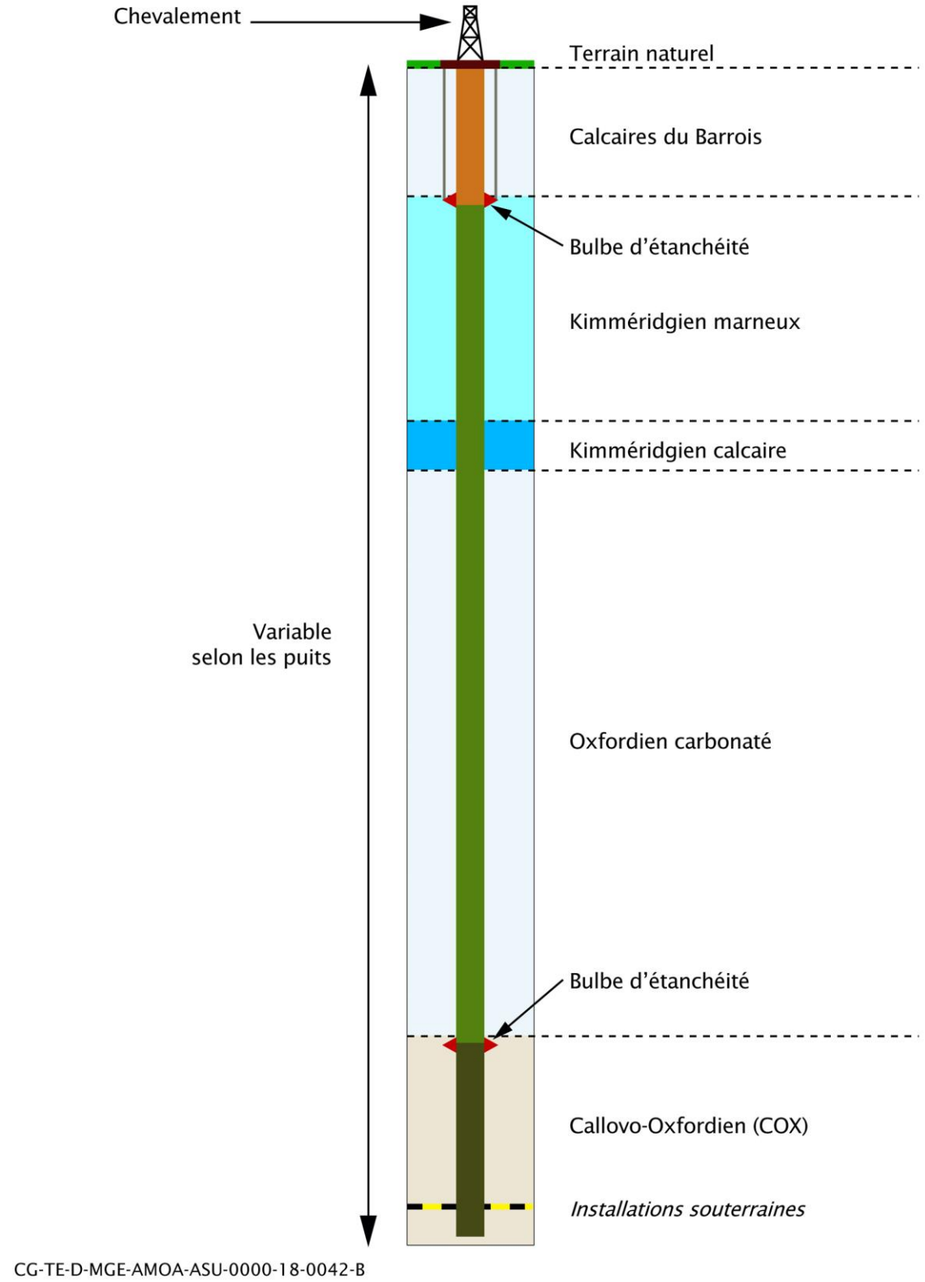


Figure 2-91 *Principe de construction des puits pour éviter la mise en communication des aquifères traversés*

2.7.4.7 Limitation des impacts sur les zones humides avérées

Les inventaires faunistiques et floristiques réalisés sur les différentes emprises concernées par les installations en surface du centre de stockage Cigéo ont permis d'étudier différentes variantes d'implantation dans l'objectif de préserver la biodiversité.

Grâce à la mise en place de mesures d'évitement, le centre de stockage Cigéo n'est implanté sur aucune zone humide.

Au niveau de la zone descenderie, une modification des débits des sources ou des écoulements de débordement des Calcaires du Barrois vers la vallée de l'Orge induits par le rabattement des nappes ou l'imperméabilisation des sols, pourrait être de nature à modifier le bilan en eau de l'Orge et de sa nappe d'accompagnement sur le tronçon compris entre Gillaumé et Saudron. Toutefois, les incidences résiduelles sur les perturbations du régime hydraulique des cours d'eau à l'échelle du projet global sont considérées, après mesures d'évitement et de réduction, comme peu probables quelles que soient les phases du projet. Des études et des modélisations viendront compléter l'analyse des incidences du projet sur les débits de l'Orge et sur les fonctionnalités de la zone humide. Les résultats de ces études permettront également d'asseoir le niveau de transparence hydraulique des installations. L'avancement et les conclusions de ces démarches seront détaillées et intégrées dans les mises à jour à venir de l'étude d'impact.

Au niveau de la zone puits, les zones humides se situent au niveau de l'Ormançon, en dehors de la zone d'intervention potentielle du centre de stockage Cigéo. Les rejets vers l'Ormançon sont assurés par des ouvrages de diffusion qui permettent d'éviter les incidences sur les zones humides en aval. Quelles que soient les phases du projet, les incidences résiduelles sur les zones humides sont donc considérées comme faibles au vu des habitats présents (prairies) et des sondages pédologiques réalisés sur la zone d'intervention potentielle.

Pour l'installation terminale embranchée, la mesure d'évitement consistant à réutiliser la plateforme ferroviaire désaffectée sur 10 km permet d'éviter les zones humides présentes le long du tracé. En effet, les conditions d'écoulement ne sont pas modifiées et toutes les zones humides identifiées se trouvent en dehors de la plateforme qui est en remblai. Pour les quatre derniers kilomètres à créer, le tracé est éloigné des zones humides et des ouvrages hydrauliques ou fossés drainants ce qui permet de maintenir les écoulements. Suite à la concertation et aux optimisations de tracé réalisées, les aménagements pour la voie ferrée et les rétablissements routiers n'impactent aucune zone humide quelles que soient les phases du projet.

En ce qui concerne la liaison intersites, une zone humide accompagnant la Bureau a été relevée au niveau du raccordement à la route d'accès de la zone descenderie et du contournement du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Les études de conception permettent d'affirmer que les emprises potentielles définitives (infrastructures, ouvrages de gestion des eaux pluviales, et zones de travaux) se situent en dehors des emprises des zones humides et ne sont donc pas impactées quelles que soient les phases du projet.

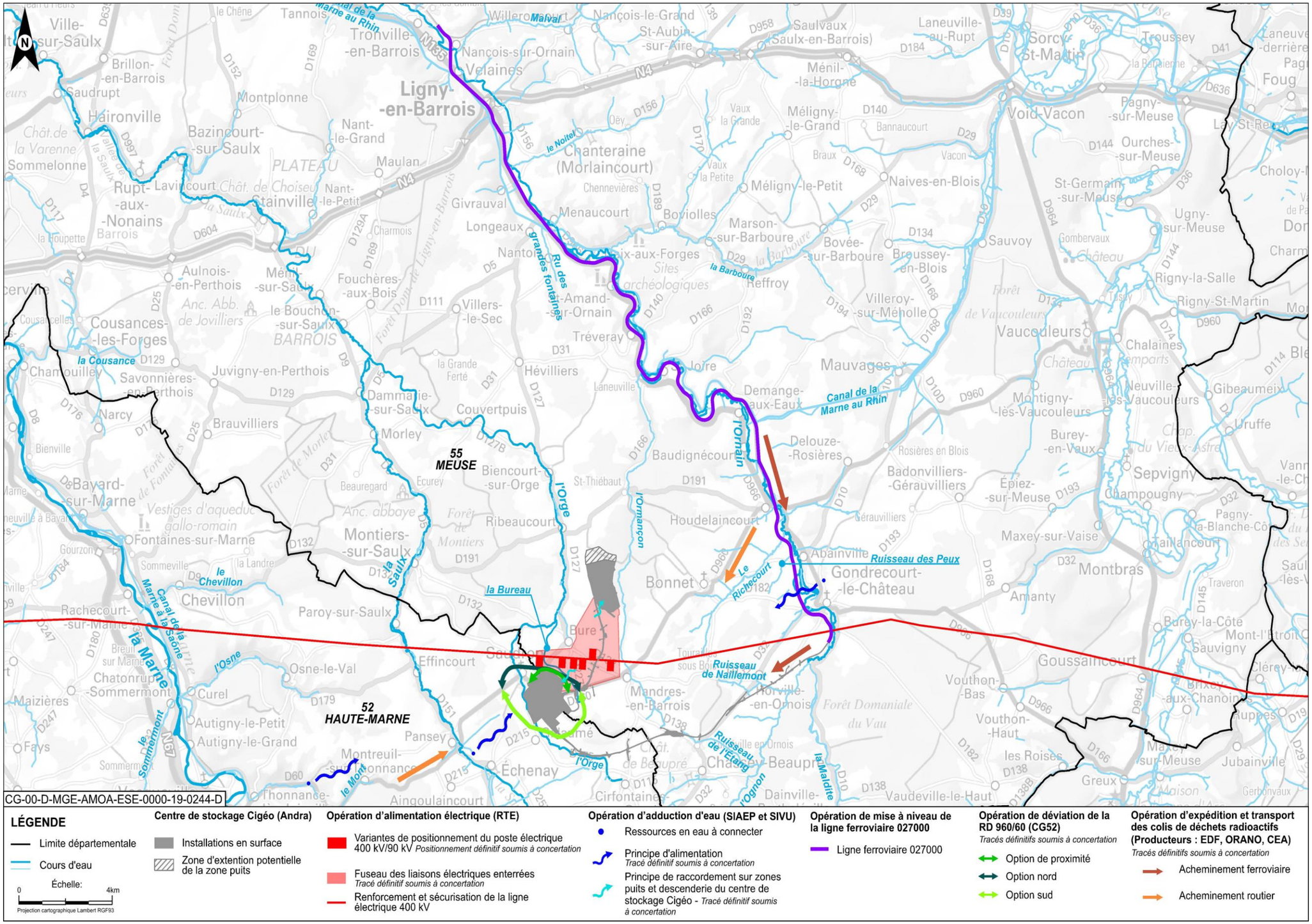


Figure 2-92 Carte de localisation du projet global Cigéo et des cours d'eaux à la proximité du centre de stockage Cigéo

LES PRINCIPAUX APPORTS DE LA CONCERTATION SUR LE CYCLE DE L'EAU MENÉE ENTRE AVRIL ET JUIN 2018

La concertation post-débat public sur le cycle de l'eau a permis de choisir la solution technique de référence.

Les principaux apports de la concertation à la définition de la solution technique de référence concernent les demandes suivantes :

- éviter les rejets déportés pour éviter la réalisation de canalisation de plusieurs kilomètres (avec les servitudes associées) demandant des stations de pompages impactant le territoire et consommant de l'énergie ;
- privilégier les rejets des effluents conventionnels dans les cours d'eau locaux (pour respecter les bassins versants et réguler les crues), si la qualité des rejets et les caractéristiques des cours d'eau le permettent ;
- veiller à la qualité des eaux rejetées et au recyclage des eaux au sein des installations du centre de stockage Cigéo afin de minimiser la consommation en eau potable et les volumes dirigés vers les cours d'eau locaux.

Le rejet local des effluents liquides susceptibles de présenter des traces de radioactivité n'est pas retenu. À ce stade, la solution privilégiée est une orientation de ces effluents vers une installation spécialisée.

L'option d'irrigation par des eaux épurées des terres agricoles à vocation alimentaire aux alentours de Cigéo n'est pas la solution retenue aujourd'hui par mesure de précaution. Cette solution pourrait évoluer sous réserve d'une étude détaillée de faisabilité et d'autorisation des services de l'État, notamment l'agence régionale de santé (ARS).

L'Andra prévoit de revenir vers les participants pour leur apporter des compléments d'information relatifs aux études supplémentaires qui seront menées.

2.7.5 Le développement progressif de la zone de verses

Le Callovo-Oxfordien excavé lors des creusements est géré au fur et à mesure des travaux de déploiement progressif de l'installation souterraine. Le choix de la localisation de l'aire de gestion du Callovo-Oxfordien excavé, au nord de la zone puits, repose sur les critères et enjeux exposés aux chapitres 2.6.2.5 et 2.6.2.6 du présent document.

Afin de réduire l'incidence du projet sur la forêt du bois Lejuc, la surface envisagée à ce stade pour les verses correspond uniquement au dépôt des déblais du Callovo-Oxfordien excavé qui seront réutilisées pour la fermeture de l'installation souterraine (dites verses « vives », représentant environ 40 % du volume total du Callovo-Oxfordien extrait). Des parties de la zone puits, adjacentes aux verses, sont aménagées pour la conservation temporaire des terres réutilisées progressivement pour le couvert végétal des verses et pour la gestion des flux de Callovo-Oxfordien qui sont évacués hors du site pour valorisation (dites verses « mortes », représentant environ 60 % du volume total du Callovo-Oxfordien extrait (cf. Chapitre 2.6.2.6 du présent document).

La surface totale des plateformes de la zone de verses et des plateformes pour la conservation temporaire des terres et la gestion des flux d'expédition, bassins de gestion des eaux compris, est d'environ 108 ha (Z1 et Z2). Le volume global de Callovo-Oxfordien déposé ou transitant sur ces plateformes correspond à environ 11 millions de m^3.

La figure 2-93 permet de visualiser les dépôts de verses au sein de la zone puits. La zone Z1 (d'environ 60 ha) est nécessaire dès le début de la construction initiale (cf. Chapitre 5.3.2 du présent document). La zone Z2 (d'environ 48 ha) sera aménagée ultérieurement, pour gérer les déblais issus du creusement de la première extension de l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 5.3.3 du présent document). La réalisation des aménagements nécessaires à la gestion des verses (digue, bassins) est étendue graduellement, au fur et à mesure du besoin, afin de réduire au juste nécessaire les premiers défrichements. Cette stratégie permettra de réinterroger périodiquement, dans le futur, les priorités et les équilibres entre les choix de consommation d'espace agricole ou d'espace forestier pour la gestion des déblais du Callovo-Oxfordien excavé.



Figure 2-93 Schéma de principe du déploiement des verses

Une troisième zone (Z3), d'environ 39 hectares, pourrait être envisagée pour les derniers travaux d'extension des ouvrages de stockage à l'horizon 2070-2080, au cas où la disponibilité des filières extérieures de valorisation serait remise en cause (cf. Chapitre 2.6.2.6 du présent document).

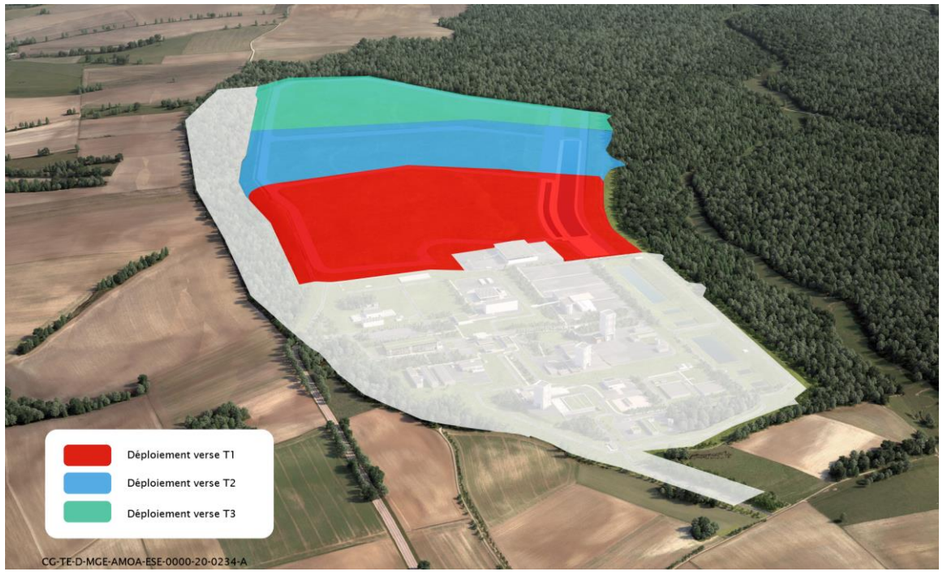


Figure 2-94 Schéma de principe du déploiement de l'éventuelle troisième tranche de verses

Une fois les verses réutilisées pour refermer l'installation (après 100 ans à 150 ans de fonctionnement en fonction des décisions prises par les générations futures), les plateformes pourront faire l'objet de travaux écologiques pour reconstituer un milieu naturel s'intégrant dans l'environnement.

2.7.6 La priorité au transport ferroviaire pour le transport des colis de déchets et des matériaux

2.7.6.1 Le transport des colis de déchets

Pour leur transport en dehors des installations nucléaires, sur la voie publique ou sur le réseau ferré, les déchets radioactifs sont, pour des raisons de sûreté, conditionnés dans des conteneurs très robustes et résistants, dénommés « emballages de transport ». Leur fonction est d'absorber la majeure partie des rayonnements émis par les colis de déchets, de les protéger de toutes les agressions susceptibles d'être rencontrées lors du trajet et d'éviter la dispersion de substance radioactive en cas d'accident.

Pour qu'ils puissent être agréés, ces emballages de transport doivent résister à des tests très sévères, par exemple des chutes (9 m sur surface indéformable), des feux (30 minutes à 800 °C) et des poinçonnements (chute de 1,2 m). Pour atteindre ces performances, ils sont constitués de grande quantité de matériaux très résistants, comme l'acier, ce qui leur confère des masses très importantes. Les emballages de transport des colis de déchets HA dépassent la centaine de tonnes.

Compte tenu de la masse des emballages de transport des déchets HA et MA-VL, leur transport par train est le moyen le plus classiquement utilisé. Il est plus adapté aux masses que représentent un convoi de plusieurs emballages. À cet égard, les colis de déchets proviennent majoritairement de sites ayant directement accès au réseau ferroviaire ou situés à proximité d'un terminal.

Les producteurs de déchets sont responsables des transports des colis de déchets vers le centre de stockage Cigéo.

Dans son dossier du maître d'ouvrage support au débat public de 2013, l'Andra, en lien avec les producteurs de déchets, a annoncé son souhait de privilégier le transport ferroviaire au plus près. Il s'agit de bénéficier des multiples atouts du transport ferroviaire en termes de sécurité, d'impact sur l'environnement et de bilan économique. De plus, cette solution de transport avait été privilégiée dès 2008 par les acteurs locaux (cf. Chapitre 2.6 du présent document).

Parmi les trois scénarios de desserte ferroviaire présentés dans le dossier du maître d'ouvrage, le territoire s'est positionné sur celui permettant une desserte ferroviaire du centre de stockage Cigéo sans rupture de charge (cf. Chapitre 2.8.3 du présent document). À l'issue du débat public de 2013, l'Andra s'est engagée à utiliser majoritairement le transport par rail pour le transport des colis de déchets.

2.7.6.2 Le transport des matériaux de construction et des équipements

Dès lors que le centre de stockage Cigéo est relié au réseau ferroviaire au moyen de l'ITE pour le transport des colis de déchets, la mise en service de la liaison ferroviaire peut être anticipée de sorte qu'elle puisse être utilisée pour l'approvisionnement des matériaux et des équipements utiles aux travaux de construction. Le recours au fret ferroviaire limite les nuisances par rapport au transport classique par voie routière (limitation du trafic routier, des nuisances et des émissions atmosphériques associées). Plusieurs carrières et cimenteries, y compris parmi celles situées dans un rayon de 150 km du centre de stockage Cigéo sont d'ailleurs directement reliées (embranchées) au réseau ferré national.

Un acheminement mixte (voie fluviale, puis acheminement routier et/ou ferroviaire) pourrait éventuellement être utilisé pour certains approvisionnements du centre de stockage Cigéo par les fournisseurs. Le secteur dispose de trois canaux : le canal de la Marne au Rhin Ouest, le canal de la Meuse et le canal entre Champagne et Bourgogne. Cette option sera appréciée au cas par cas en tenant compte des caractéristiques des installations portuaires et du nombre des ruptures de charge, c'est-à-dire des opérations de chargement/déchargement pour passer d'un mode de transport à l'autre.

2.7.7 Le choix de l'entreposage sur les sites des producteurs

L'article L. 542-1-1 du code de l'environnement définit l'entreposage de déchets radioactifs comme « l'opération consistant à placer ces substances à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée en surface ou en faible profondeur à cet effet, avec intention de les retirer ultérieurement » (cf. Chapitres 1.2.3 et 0 du présent document).

Aujourd'hui, les déchets HA et MA-VL sont principalement entreposés sur le site Orano de La Hague et sur les centres CEA de Marcoule et Cadarache. Cet entreposage est nécessaire en attente de la disponibilité du stockage en couche géologique profonde pour leur mise en sécurité définitive (cf. Chapitre 2.2.7 du présent document).

Pour autant, la création du centre de stockage Cigéo, si elle est autorisée, ne supprime pas le besoin d'entreposage. En effet, il permet de préparer, d'organiser et de réguler les flux d'expédition des colis depuis les installations des producteurs vers le centre de stockage Cigéo. Les colis ne sont expédiés que lorsqu'il a été montré qu'ils respectent les spécifications d'acceptation du centre de stockage Cigéo et uniquement lorsque l'Andra dispose de la capacité à les stocker. Cette pratique évite que les colis s'engorgent en surface sur le centre de stockage Cigéo.

Une autre raison qui justifie le besoin d'entreposage est la décroissance radioactive et thermique de plusieurs dizaines d'années des colis de déchets HA avant leur mise en stockage (cf. Chapitre 2.1.4 du présent document).

En 2009, l'Andra a établi en relation avec les producteurs de déchets, un inventaire des capacités d'entreposage existantes et un recensement des besoins à venir pour les colis en cours de production ou pour le remplacement d'installations d'entreposage devenues obsolètes. La question s'est alors posée de la localisation de ces capacités d'entreposage, soit sur ou à proximité du centre de stockage de Cigéo, soit sur les sites des producteurs de déchets.

Plusieurs avantages potentiels d'une centralisation des capacités d'entreposage sur le centre de stockage Cigéo ont été identifiés en 2009 :

- elle accroît la flexibilité de la gestion d'ensemble des colis de déchets (les expéditions vers Cigéo ne sont plus liées à la disponibilité des capacités de stockage) ;
- elle offre une activité industrielle supplémentaire qui participe au développement du territoire ;
- elle permet de disposer sur Cigéo d'installations d'entreposage pour accueillir les déchets éventuellement retirés du stockage dans le cadre de la réversibilité.

Toutefois, cette solution technique nécessite la construction d'installations nucléaires supplémentaires sur le centre de stockage Cigéo, augmente ses impacts en termes de surfaces consommées et de rejets et accroît les activités nucléaires et donc les risques sur le site. Inversement, l'entreposage sur les sites des producteurs s'inscrit dans la continuité de leur activité actuelle et bénéficie de leur savoir-faire. Les possibilités d'extension offertes sur les sites ont d'ores et déjà été identifiées et ne soulèvent pas de difficulté de réalisation particulière.

De plus, certains acteurs du territoire ont exprimé dès 2010 leur volonté de ne pas accueillir d'installation d'entreposage de décroissance thermique. L'Andra s'est engagée lors du débat public de 2013, à ne pas construire en Meuse/Haute-Marne d'entreposage pour la gestion des colis de déchets.

L'entreposage des colis de déchets en attente d'expédition pour stockage ou pour décroissance thermique se fera sur les sites des producteurs. Le centre de stockage Cigéo disposera uniquement d'une capacité logistique permettant de gérer de façon optimale les arrivées et la meilleure utilisation des volumes de stockage disponible. Aucun entreposage de gestion des colis de déchets (pour refroidissement, attente de disponibilité de filière, attente pour reconditionnement…) n'est donc prévu sur le centre de stockage Cigéo.

Synthèse

Le projet de centre de stockage Cigéo est développé en dialogue avec la société et le territoire pour prendre en compte les préoccupations de la population et pour préparer son intégration. Depuis le débat public de 2013 sur le projet, l'Andra mène une démarche de concertation sous l'égide de garants de la CNDP pour consolider son projet et nourrir son évaluation environnementale.

La localisation des installations souterraines du projet est le résultat d'un processus progressif qui a pris en compte les critères géologiques prépondérants pour la sûreté du stockage. Des critères environnementaux et économiques ont également été identifiés avec les acteurs locaux pour orienter la recherche de la bonne localisation. Plusieurs zones ont été proposées qui ont abouti fin 2009 à la définition de la Zone d'intérêt pour la recherche approfondie (ZIRA) optimisée au regard des critères de protection de l'homme et de l'environnement. Cette zone qui est de taille suffisante pour accueillir un stockage a fait l'objet d'investigations complémentaires. Elles ont confirmé sa capacité à accueillir la zone d'implantation des installations souterraines (ZIOS) du centre de stockage Cigéo.

À partir de la zone souterraine, l'Andra a recherché les meilleures implantations pour les installations de surface du centre de stockage. Les critères définis avec le territoire visaient principalement à protéger l'homme et l'environnement, à réduire les nuisances et les risques et à respecter les enjeux d'aménagement du territoire et d'efficacité de l'activité industrielle. Le choix de la zone descenderie pour l'accueil des colis et leur préparation au stockage résulte principalement du choix du funiculaire, solution technique jugée la plus sûre pour le transfert au fond des colis, et de la volonté de rechercher une zone limitrophe des départements de la Meuse et de la Haute-Marne. Le choix de la zone puits résulte de la nécessité de se situer à l'aplomb du centre de la zone d'implantation des ouvrages de stockage et sur une emprise suffisante pour y implanter à la fois les installations de support aux activités souterraines et de gestion des déblais issus du creusement. Par ailleurs, la volonté de préserver le cadre de vie principalement rural de la zone a conduit à rechercher un équilibre entre la consommation des terres agricoles et des terres boisées. L'implantation dans le bois Lejuc a été retenue suite au débat public de 2013. Compte tenu des enjeux environnementaux de ce bois, l'Andra a cherché à réduire au maximum les emprises défrichées et à préserver les lisières, les boisements d'intérêt et le corridor écologique.

L'implantation de la liaison intersites (LIS) et de l'installation terminale embranchée (ITE) répondent également à des choix d'insertion dans le territoire et à des enjeux environnementaux.

Par ailleurs, la conception environnementale du centre de stockage a abouti :

- au choix de l'électricité pour l'approvisionnement en énergie principale de fonctionnement et à la création d'un réseau de chaleur adaptable au développement des énergies vertes ;
- à l'alimentation en eau du centre depuis des captages locaux tout en permettant le renforcement des réseaux actuels des communes ;
- au recyclage maximal des eaux sur le centre de stockage ;
- au rejet dans les cours d'eaux locaux d'effluents compatibles avec les critères de bon état chimique et écologique au sens de la directive cadre sur l'eau, sans aggraver les risques d'inondations pour les personnes et les biens ;
- à valoriser les déblais du Callovo-Oxfordien qui ne seront pas réutilisés pour la fermeture ;
- à donner la priorité au transport ferroviaire pour la livraison des colis de déchets radioactifs et pour le fret ;
- au maintien des colis de déchets chez les producteurs de déchets jusqu'au moment où ils peuvent être acceptés et stockés sur le centre de stockage Cigéo et qu'il a été démontré qu'ils respectaient les spécifications d'acceptation du centre.

2.8 Les choix d'implantation des opérations du projet global Cigéo liés à la construction et au fonctionnement du centre de stockage Cigéo

Les opérations du projet global liées à la construction et au fonctionnement du centre de stockage sont décrites au chapitre 4 du présent document.

2.8.1 L'alimentation électrique

2.8.1.1 Le raccordement au réseau électrique

RTE (Réseau de transport d'électricité) est le maître d'ouvrage de l'opération d'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo au réseau électrique.

RTE a recherché des solutions techniques pour raccorder le centre de stockage Cigéo au réseau. Afin d'éviter la création de lignes aériennes supplémentaires qui impacteraient notamment le paysage, des solutions s'appuyant sur les lignes proches de la zone descenderie (Saudron) et de la zone puits (Mandres-en-Barrois) ont été étudiées. Cinq scénarios ont été comparés (cf. Figure 2-95 et figure 2-96) :

- trois scénarios de raccordement sur la ligne 225 kV Froncles-Epizon-Muremont située à environ 15 km au sud de Bure (cf. Figure 2-95) ;
  - ✓ **scénario 1** : liaison électrique enterrée 225 kV et postes de livraison 225 kV sur l'emprise des zone descenderie et zone puits ;
  - ✓ **scénario 2** : liaison électrique enterrée 225 kV jusqu'au poste de transformation 225/90 kV sur l'emprise de la zone descenderie et liaison électrique enterrée 90 kV jusqu'au poste de livraison 90 kV sur l'emprise de la zone puits ;
  - ✓ **scénario 3** : liaison électrique enterrée 90 kV depuis un poste de transformation 225 kV/90 kV au pied de la ligne 225 kV et postes de livraison 90 kV sur l'emprise des zones descenderie et zone puits ;
- deux scénarios de raccordement sur la ligne 400 kV Mery-Houdreville passant entre la zone descenderie et la zone puits (cf. Figure 2-96) ;
  - ✓ **scénario 4** : liaison électrique enterrée 225 kV depuis un poste de transformation 400/225 kV au pied de la ligne 400 kV et postes de livraison 225 kV sur l'emprise des zones descenderie et zone puits ;
  - ✓ **scénario 5** : liaison électrique enterrée 90 kV depuis un poste de transformation 400/90 kV au pied de la ligne 400 kV et postes de livraison 90 kV sur l'emprise des zone descenderie et zone puits.

Un sixième scénario de raccordement au poste de Revigny, situé à 45 kilomètres, a également été évoqué. Il n'a pas été approfondi en raison de son coût trop élevé.



CG-TE-D-MGE-AMOA-ESE-0000-18-0269-B

Figure 2-95 *Scénarios 1 à 3 (de gauche à droite) : scénarios de raccordement sur la ligne 225 kV Froncles-Épizon-Muremont (rouge 400 kV, vert 225 kV, orange 90 kV)*



CG-TE-D-MGE-AMOA-ESE-0000-18-0270-B

Figure 2-96 *Scénarios 4 (à gauche) et 5 (à droite) : scénarios de raccordement sur la ligne 400 kV Mery-Houdreville (rouge 400 kV, vert 225 kV, orange 90 kV)*

Les scénarios 1 et 2 ont été écartés pour des problématiques techniques de surtensions mises en évidence lors de l'étude de faisabilité. Le scénario 4 a également été écarté en raison de son coût plus élevé et de son absence d'avantages par rapport au scénario 5.

L'analyse des scénarios 3 et 5 a conduit à préférer le scénario 5. Bien que plus coûteux en investissement, l'utilisation du réseau 400 kV permet de minimiser les pertes d'énergie liées au transport d'électricité. De plus, la longueur des liaisons enterrées 90 kV est nettement moins importante (une dizaine de kilomètres contre une trentaine pour le scénario 3). Les impacts sur l'environnement et les nuisances lors de leur réalisation sont donc moins importants.

Les équipements associés au scénario 5, de moindre impact environnemental, permettent de répondre à l'ensemble des besoins du projet de centre de stockage et pourraient également être utilisés, à terme, pour alimenter d'autres projets industriels éventuels dans le secteur.

2.8.1.2 Localisation du poste de transformation 400/90 kV sous la maîtrise d'ouvrage RTE

Le scénario retenu pour l'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo comporte un poste de transformation au pied de la ligne 400/90 kV. Des liaisons électriques enterrées de 90 kV relient ce poste à la zone descenderie et à la zone puits.

De 2014 à 2016, plusieurs réunions de concertation ont été organisées par la préfecture de la Meuse afin de présenter le projet et de préciser l'emplacement pour le poste de transformation 400/90 kV et pour le fuseau des liaisons enterrées. Ces réunions s'inscrivaient dans le cadre d'application de la circulaire relative au développement des réseaux publics de transport et de distribution de l'électricité du 9 septembre 2002 dite « circulaire Fontaine » (111).

LA CONCERTATION DANS LE CADRE DE LA CIRCULAIRE FONTAINE

Les fondements de la concertation sur les projets d'ouvrages électriques reposent sur la circulaire relative au développement des réseaux publics de transport et de distribution de l'électricité signée, le 9 septembre 2002, par Mme Fontaine, ministre déléguée à l'Industrie.

La « concertation Fontaine » (112) concerne le développement du réseau public de transport mais également des projets d'ouvrages de réseaux publics de distribution de tension supérieure ou égale à 63 kilovolts. Réunissant les acteurs locaux sous l'égide du Préfet, elle porte sur la définition de l'aire d'étude, puis sur la localisation de l'emplacement et des fuseaux de moindre impact.

La « concertation Fontaine » menée sur les projets d'ouvrages électriques pour le raccordement du centre de stockage Cigéo, a permis de définir des localisations privilégiées pour le poste de transformation et pour le fuseau des liaisons électriques enterrées. Les acteurs associés à cette concertation étaient les élus locaux, des associations (environnementales, pêche, chasse...), les chambres d'agricultures, les architectes des bâtiments de France, les conseils départementaux, les DDT, les chambres de l'industrie et du commerce, la DREAL, RTE et les gestionnaires et concessionnaires de réseaux, la gendarmerie nationale, la préfecture de la Meuse et l'Andra.

Les contraintes techniques d'implantation du poste de transformation 400/90 kV sont les suivantes :

- le poste doit occuper un emplacement contigu de la ligne 400 kV afin de limiter les longueurs de ligne aérienne à construire. Ceci réduit l'impact sur le paysage et les investissements ;
- il occupe une surface d'environ 400 m x 300 m (avec le petit côté du terrain parallèle à la ligne 400 kV). Cette surface prend en compte les dimensions du poste (de l'ordre de 300 m x 250 m), des aménagements paysagers et l'installation des pylônes de raccordement, à l'extérieur du poste, avec un recul d'environ 50 m de la ligne 400 kV.

Une première étape a permis d'identifier vingt-quatre scénarios d'implantation pour le poste compte tenu de ces contraintes. Ils sont représentés sur la figure 2-97, numérotés d'ouest en est et indicés : « N » pour nord et « S » pour sud.

Ces 24 emplacements, identifiés sur des critères techniques, ont ensuite été analysés en prenant en compte des critères d'insertion territoriale, environnementaux et relatifs à la sécurité :

- éliminer les emplacements comportant ou très proches des habitations ;
- favoriser les emplacements permettant d'éviter ou de réduire les impacts visuels et sonores ;
- exclure les positions nécessitant une dérivation d'un cours d'eau ;
- éviter les déviations d'infrastructures routières utilisées par les véhicules légers (routes goudronnées) ;

- éviter l'emprise de la liaison intersites ;
- éviter les positions jugées défavorables pour leur protection contre la malveillance.

L'analyse des emplacements tenant compte de ces critères a été versée au dossier support à la concertation dite « circulaire Fontaine » menée par le préfet de la Meuse. Les échanges durant cette concertation ont permis de retenir l'emplacement 5S. Cette décision a été notifiée dans un courrier adressé aux différents acteurs de cette concertation (113).

L'évolution de la législation au second semestre 2016, notamment l'ordonnance n° 2016-1060 du 3 août 2016 « portant réforme des procédures destinées à assurer l'information et la participation du public à l'élaboration de certaines décisions susceptibles d'avoir une incidence sur l'environnement », a introduit la nécessité d'intégrer une concertation préalable dans le processus de ce projet. Cette concertation préalable doit permettre de recueillir l'avis du public au-delà des acteurs concernés par la concertation dite « circulaire Fontaine ».

» LA CONCERTATION « PRÉALABLE » DU PUBLIC

Une ordonnance visant à renforcer l'information et la participation du public à l'élaboration de certaines décisions susceptibles d'avoir une incidence sur l'environnement a été adoptée, le 3 août 2016 (114), postérieurement à l'achèvement de la « concertation Fontaine » » menée sur les projets d'ouvrages électriques pour le centre de stockage Cigéo,

En 2018, RTE a saisi la Commission nationale du débat public (CNDP) afin de mettre en œuvre, pour les projets d'ouvrages électriques du centre de stockage Cigéo, la nouvelle procédure de concertation préalable, créée par l'ordonnance précitée. La nouvelle concertation « préalable » s'est déroulée sous l'égide d'un garant de la CNDP du 13 janvier au 12 février 2020.

En s'appuyant sur l'analyse des scénarios produites pour la concertation dites « circulaire Fontaine » et l'évolution des autres projets, en l'occurrence celui de la liaison intersites porté par l'Andra, RTE a retenu plusieurs emplacements pour cette concertation préalable. Ces 5 emplacements (3S, 5S, 6S, 7S, 8N et 10S représentés en rouge sur la Figure 2-97) ont été choisis parmi les 24 initiaux.

Trois temps d'échanges ont été proposés au public pendant la concertation :

- le 13 janvier 2020, une réunion publique d'ouverture qui consiste en une présentation générale du projet suivie d'échanges avec le public ;
- le 28 janvier 2020, une visite sur le terrain des sites d'implantation potentielle du poste électrique ;
- le 12 février 2020, une réunion de clôture pour un premier bilan de la concertation dressé par RTE.

Un site internet spécifique à la concertation permet également de prendre connaissance des documents supports aux échanges et d'y déposer des questions ou commentaires : https://www.raccordement-cigeo-rte.fr/.

Le garant de la CNDP remet son bilan le 13 mars 2020 (115). Il y indique notamment que le choix d'implantation du site du transformateur électrique était le sujet le plus souvent évoqué par les participants et que « *la préférence pour l'implantation 3S est apparue de manière unanime chez ceux qui se sont exprimés* ». Le garant invite par ailleurs RTE à présenter au public sa décision post-concertation préalable, et à maintenir l'information du public pour toutes les phases du projet à venir.

En mai 2020, RTE précise les suites données à la concertation préalable relative au raccordement de Cigéo. RTE propose de retenir l'emplacement 3S privilégié par les participants à la concertation préalable. Ce choix devra être entériné par le Préfet ultérieurement.

RTE s'engage également à poursuivre la concertation, sur différents thèmes : la localisation technique du projet, l'intégration paysagère du poste, la définition précise du tracé au sein du fuseau, l'organisation des modalités du chantier. Outre le maintien du site internet dédié au projet, RTE propose par ailleurs deux temps de partage, en amont de l'enquête publique et en amont du chantier.

Le processus d'implantation du poste doit se poursuivre suite à cette dernière phase de concertation, la solution technique définitive devra faire l'objet d'approfondissement des études puis d'une actualisation de la présente étude d'impact.

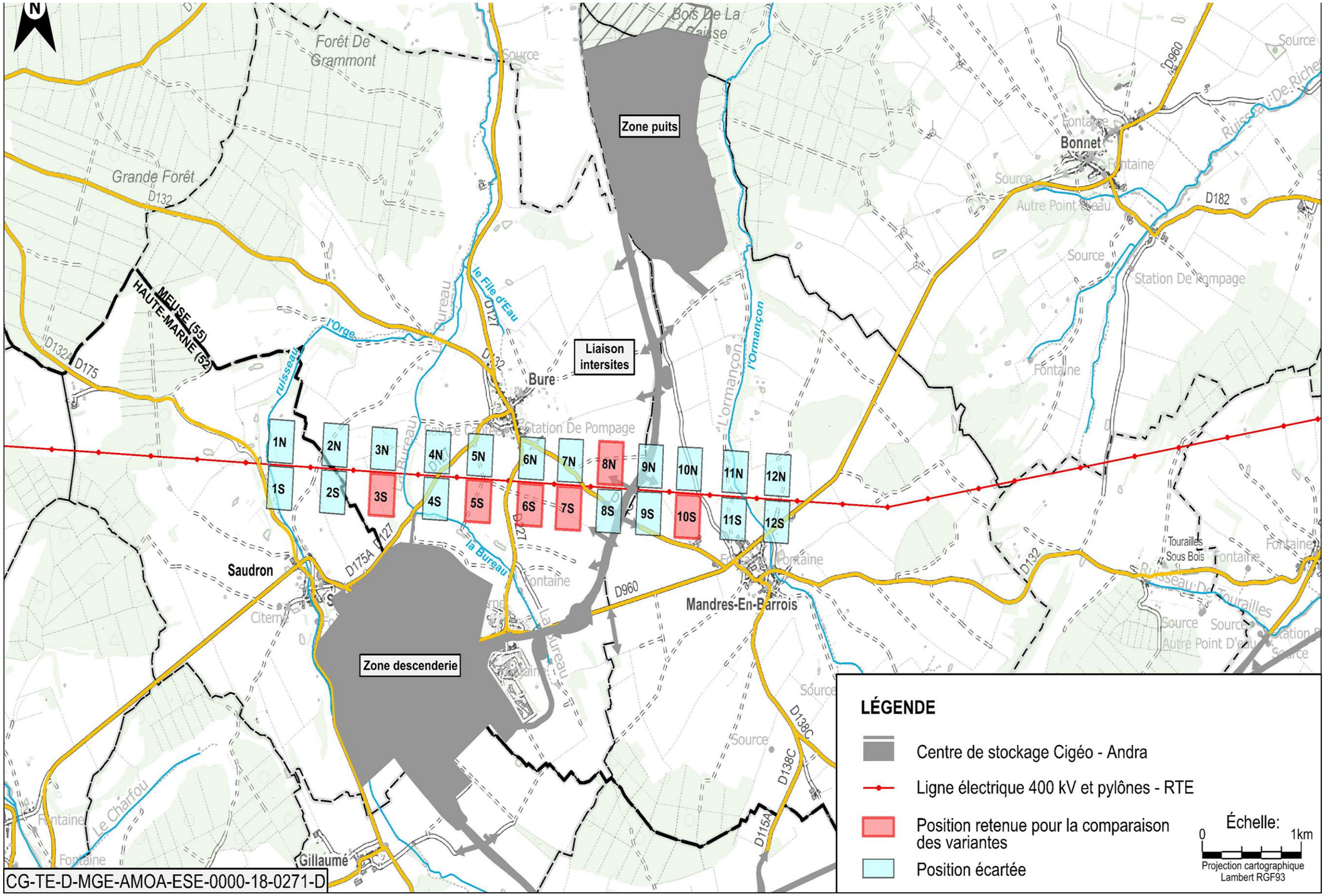


Figure 2-97 Localisation des 24 emplacements proposés par RTE pour l'implantation du poste 400/90 kV

2.8.1.3 Positionnement des liaisons électriques enterrées

Le choix de liaisons électriques enterrées 90 kV et non de lignes aériennes pour le raccordement électrique du poste de transformation 400/90 kV au centre de stockage Cigéo constitue une première mesure environnementale forte d'évitement d'impact. En effet, les liaisons enterrées évitent l'impact paysager des lignes aériennes. Seul le chantier de leur construction a un impact temporaire sur le paysage et les activités agricoles. De plus, par rapport à des lignes aériennes, elles réduisent l'impact sur le foncier et les pratiques agricoles puisqu'elles ne nécessitent pas de pylônes. L'exploitation agricole au-dessus des lignes enterrées est possible.

Afin de garantir le bon fonctionnement des installations du centre de stockage Cigéo, son approvisionnement électrique à la puissance nominale doit être garanti. En cas d'indisponibilité d'une des liaisons électriques enterrées (du poste de transformation vers la zone descenderie ou de la zone puits), il doit être possible de réalimenter la zone impactée au moyen du poste de l'autre zone. Pour cela, les liaisons électriques sont bouclées, ce qui permet une redondance des alimentations électriques. La liaison électrique redondante est implantée en parallèle des lignes principales pour réduire l'impact de ses travaux de construction et les coûts.

Un fuseau d'étude a été identifié entre les emplacements possibles des postes et les installations du centre de stockage Cigéo pour y définir le tracé des liaisons électriques enterrées. La zone d'étude d'implantation des liaisons électriques enterrées est située sur le plateau agricole (cf. Figure 2-98) et comporte peu d'enjeux environnementaux.

Les critères environnementaux à retenir pour le tracé des liaisons électriques viseront principalement à réduire les nuisances pour les riverains en phase travaux et à limiter les impacts sur le milieu naturel en évitant les milieux naturels à enjeux (boisements, prairies, abords des cours d'eau).

Le tracé des liaisons électriques fera l'objet d'une concertation menée par RTE. La solution retenue fera l'objet d'un approfondissement des études et d'une actualisation de la présente étude d'impact.

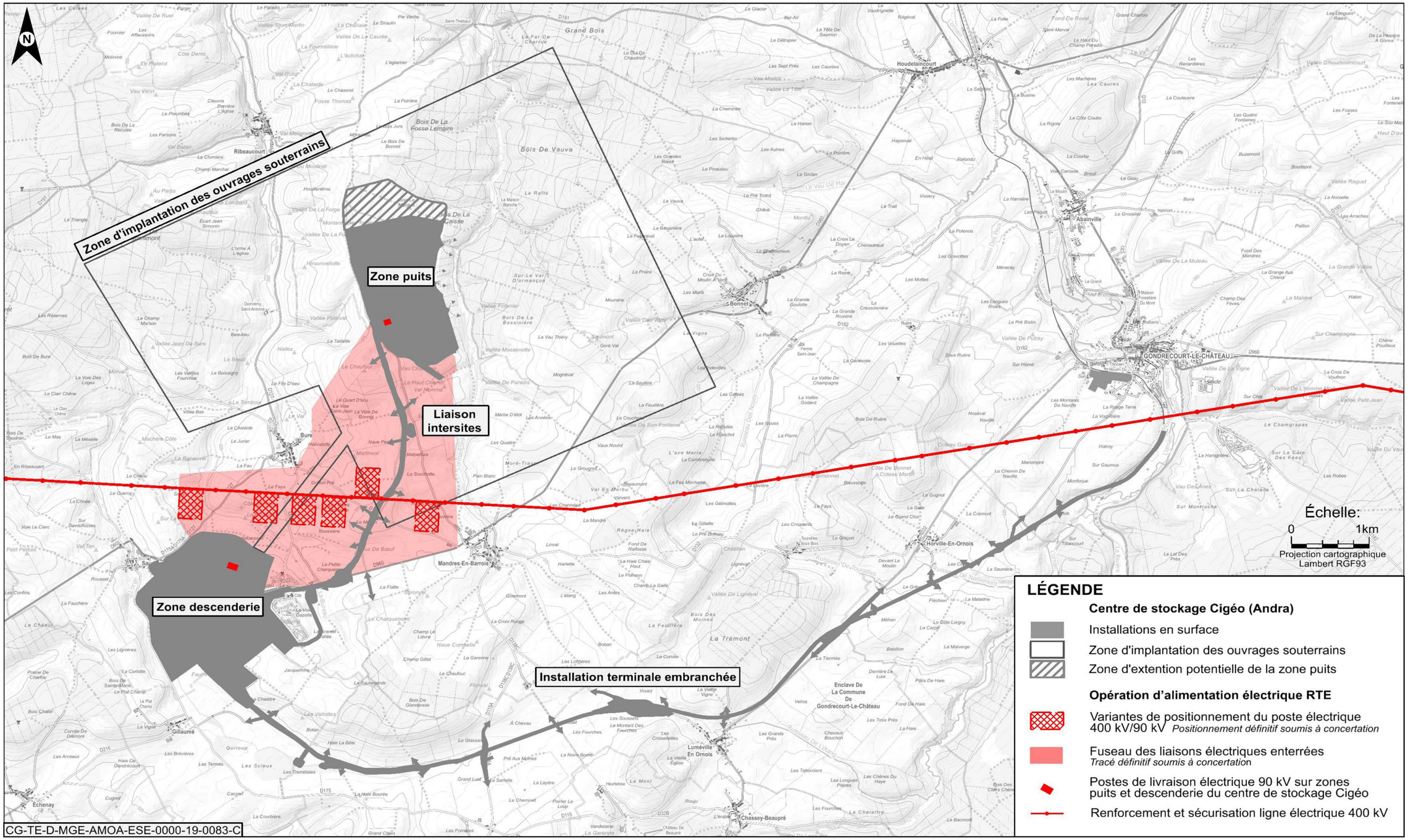


Figure 2-98 Plan de localisation des installations d'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo

2.8.2 L'adduction d'eau

Les syndicats de gestion des eaux d'Échenay et du Haut-Ornain sont les maîtres d'ouvrage de l'opération d'adduction en eau potable du centre de stockage Cigéo.

La solution technique d'adduction d'eau privilégiée est l'alimentation depuis les captages de Thonnance-les-Joinville, d'Échenay et de Gondrecourt-le-Château, compte tenu de leur productivité et de leur statut de protection (cf. 2.7.3 du présent document).

Les principales contraintes techniques, environnementales et réglementaires pour implanter les ouvrages nécessaires à l'adduction d'eau (canalisations, ouvrages de relevage, bassins…) sont les suivantes :

- éviter les espaces naturels à enjeux (zones humides, espaces boisés…) ;
- réduire les nuisances à la population liés au chantier et aux servitudes ;
- prendre en compte la topographie, les dénivelés et les cours d'eau à franchir.

Les tracés des solutions de raccordement aux captages seront déterminés après participation du public à l'élaboration du projet lors de concertations ultérieures. La solution retenue fera l'objet d'un approfondissement des études et d'une actualisation de la présente étude d'impact.

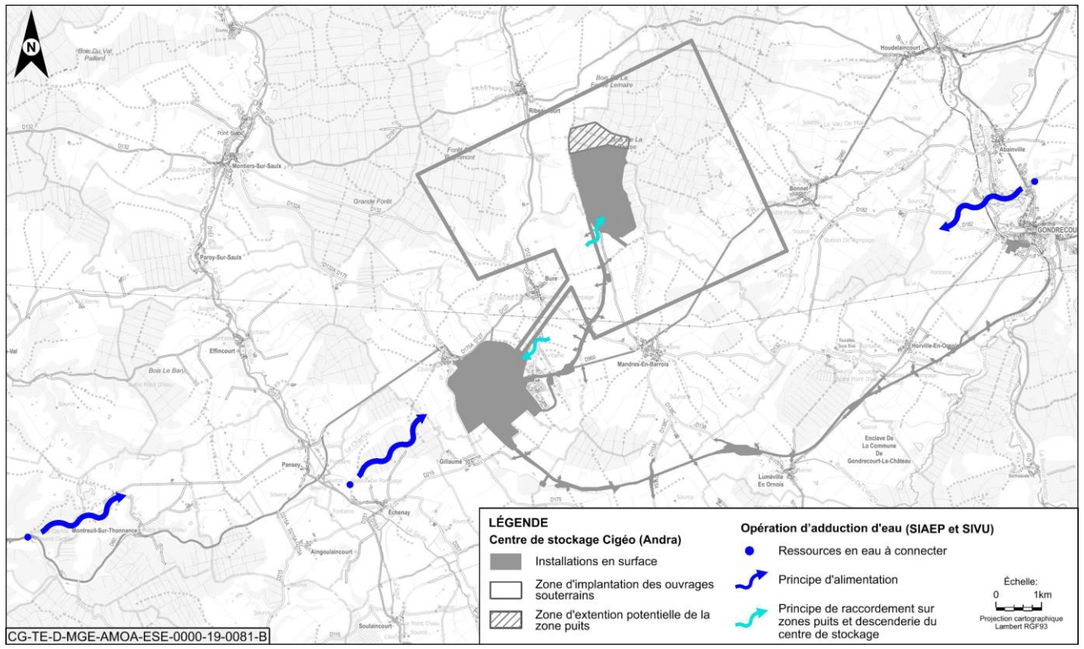


Figure 2-99 Adduction d'eau - principes de raccordement envisagés

LA CONCERTATION A VENIR SUR L'ADDUCTION D'EAU

Une concertation préalable sur l'adduction d'eau sera conduite par les syndicats publics compétents de Meuse et de Haute-Marne. Elle portera notamment sur les tracés des canalisations et les équipements nécessaires.

2.8.3 La mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000

SNCF réseau est le maître d'ouvrage de l'opération de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 du réseau ferré national reliée à l'installation terminale embranchée (ITE) du centre de stockage Cigéo.

Cette ligne ferroviaire 027000, située entre Nançois-Tronville et Gondrecourt-le-Château doit être remise en fonctionnement. Elle est fermée à la circulation ferroviaire depuis 2014.

Le tronçon situé entre Nançois-Tronville et Ligny-en-Barrois (environ 3 km) a été réhabilité *a minima* pour permettre une réouverture partielle à la circulation de convoi ferroviaire jusqu'aux silos de Ligny-en-Barrois. La poursuite de l'exploitation de ce tronçon nécessite la réalisation de nouveaux travaux de régénération de certains équipements (traverses, rails) de la ligne. Les financements nécessaires à ces travaux n'étant pas actuellement disponibles, ce tronçon est fermé depuis décembre 2019.

En amont du débat public du projet Cigéo de 2013, une étude exploratoire de la desserte ferroviaire du centre de stockage Cigéo a été réalisée sous l'égide des producteurs de déchets (2012/2013). Cette étude a identifié et analysé des scénarios pour la livraison des colis de déchets depuis les entreposages des producteurs jusqu'au centre de stockage Cigéo.

Deux types de scénarios étaient analysés, soit « tout ferroviaire », sans rupture de charge, jusqu'à un centre de stockage Cigéo embranché, soit « mixte routier/ferroviaire », avec rupture de charge, jusqu'à un centre de stockage Cigéo non embranché.

Cette étude s'est appuyée sur les lignes du réseau ferroviaire national (RFN) situées autour du projet de centre de stockage Cigéo, à savoir :

- la ligne voyageurs et fret entre Saint-Dizier (dép.52) et Chaumont (dép.52) ;
- la ligne fret entre Nançois-Tronville (dép.55) et Gondrecourt-le-Château (dép.55) ;
- la ligne voyageur et fret entre Paris (dép.75) et Strasbourg (dép.67) ;
- la ligne fret entre Neufchâteau (dép.88) et Rimaucourt (dép.52).

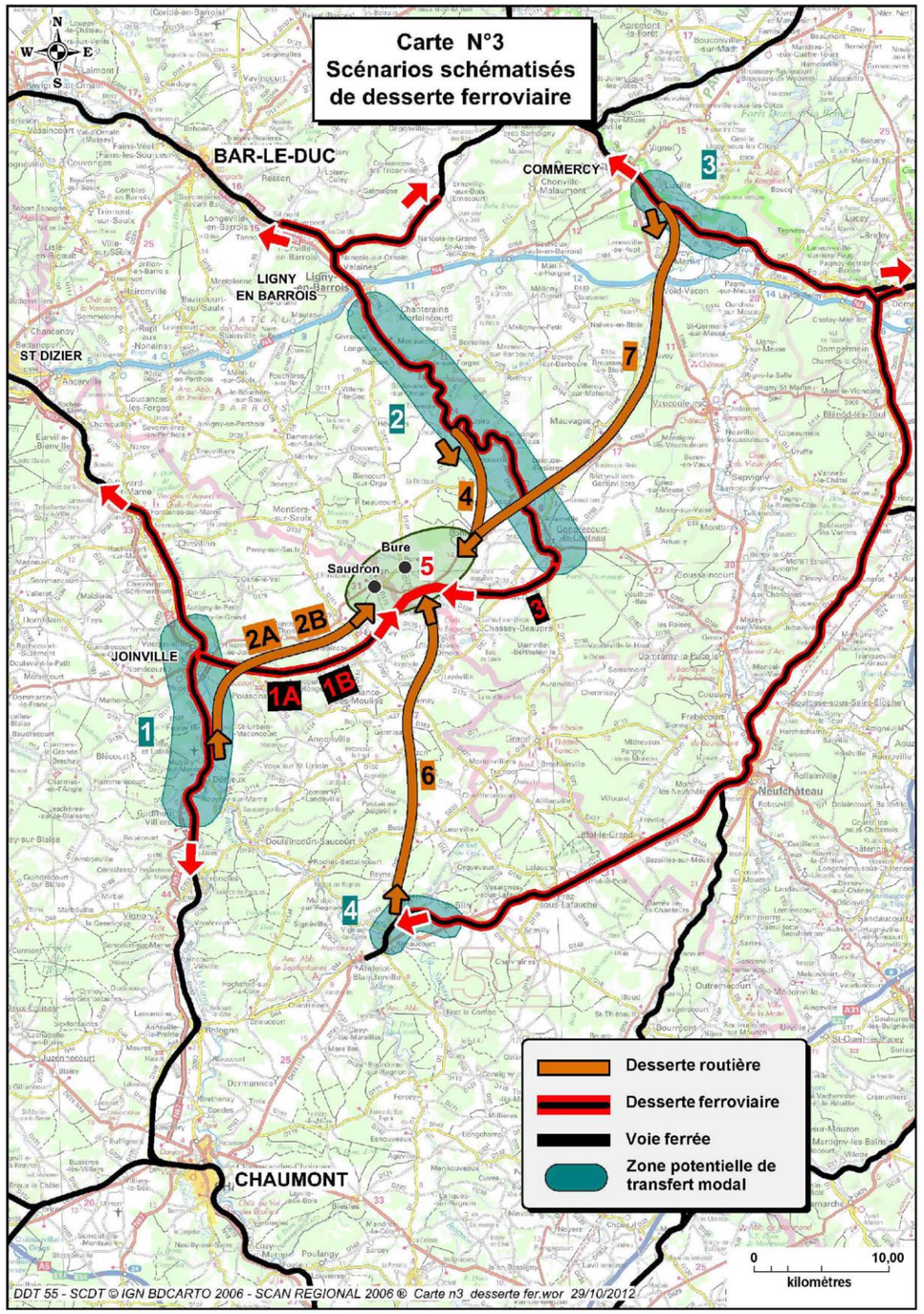
Parallèlement, le territoire a mené des réflexions sur les aménagements routiers.

À partir de ces études, sept scénarios de desserte ont été étudiés :

- trois scénarios sans rupture de charge :
  - ✓ scénario 1 : depuis la ligne Saint-Dizier/Chaumont, création d'une ITE de l'ordre de 28 km de longueur s'appuyant en grande partie sur une ancienne plateforme ferroviaire ;
  - ✓ scénario 3 : depuis la ligne Nançois-Tronville/Gondrecourt-le-Château, création d'une ITE de l'ordre de 14 km de longueur s'appuyant en grande partie sur une ancienne plateforme ferroviaire ;
  - ✓ scénario 5 : depuis les lignes Saint-Dizier/Chaumont et Nançois-Tronville/Gondrecourt-le-Château, création d'une ITE de l'ordre de 42 km s'appuyant en grande partie sur une ancienne plateforme ferroviaire
- quatre scénarios avec rupture de charge :
  - ✓ scénario 2 : depuis la ligne Saint-Dizier/Chaumont, création d'une aire de transbordement à proximité de Joinville (dép.52) impliquant une desserte routière jusqu'au centre de stockage Cigéo d'environ 25 km de distance ;
  - ✓ scénario 4 : depuis la ligne Nançois-Tronville/Gondrecourt-le-Château, création d'une aire de transbordement à proximité d'Houdelaincourt (dép.55) impliquant une desserte routière jusqu'au centre de stockage Cigéo d'environ 10 km de distance ;
  - ✓ scénario 6 : depuis la ligne Neufchâteau/Rimaucourt, création d'une aire de transbordement à proximité de Rimaucourt (dép.52) impliquant une desserte routière jusqu'au centre de stockage Cigéo d'environ 30 km de distance ;
  - ✓ scénario 7 : depuis la ligne Paris/Strasbourg, création d'une aire de transbordement à proximité de Sorcy-Saint Martin (dép.55) impliquant une desserte routière jusqu'au centre de stockage Cigéo d'environ 40 km de distance.

L'analyse de cette étude exploratoire intégrant des aspects sûreté, environnemental, foncier, coût, exploitation, impacts sur les infrastructures existantes et délai, a fait ressortir le scénario 3 comme celui étant le plus favorable. Ce scénario est d'autant plus avantageux qu'il s'appuie sur une ligne ferroviaire existante exclusivement dédiée au fret qui permet un embranchement aisé du centre de stockage Cigéo.

Parmi ces sept scénarios, les trois scénarios les plus favorables (2, 3 et 4) ont été présentées dans le Schéma interdépartemental du développement du territoire (SIDT) support au débat public de Cigéo de 2013. Le scénario 3 a été favorisé par le public qui souhaite limiter le trafic de camions sur les routes départementales.



CG-01-D-MGE-AMOA-ESE-0000-18-0272-A

Figure 2-100 Desserte du centre de stockage - Extrait du SIDT présenté au débat public « Cigéo » de 2013

APPORTS DE LA CONCERTATION

Lors du débat public de 2013, ces trois scénarios ont été présentés, ainsi que la position favorable de l'Andra pour le scénario 3 évitant les ruptures de charge.

Le public a clairement fait ressortir sa préférence pour le scénario 3.

L'Andra a donc poursuivi les études afin de permettre la mise en œuvre de ce scénario 3, à savoir :

- la réhabilitation de la ligne ferroviaire 027000 entre Nançois-Tronville et Gondrecourt-le-Château (cf. Chapitre 2.8.3 du présent document) ;
- la conception de l'installation terminale embranchée (ITE) (cf. Chapitre 4.3.7 du présent document), reliant le centre de stockage Cigéo à la ligne ferroviaire 027000.

La concertation se poursuit sur l'opération de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000. Après une amorce par une conférence sur le transport ferroviaire de déchets radioactifs, dans le cadre de la concertation post-débat public sur le centre de stockage Cigéo, ayant eu lieu à Ligny-en-Barrois en 2018, SNCF Réseau organise une concertation préalable du 3 mai au 28 juin 2021 sous l'égide des garants de la CNDP. Elle est l'occasion d'échanger avec le public sur les travaux, la sécurité ou encore les aménagements.

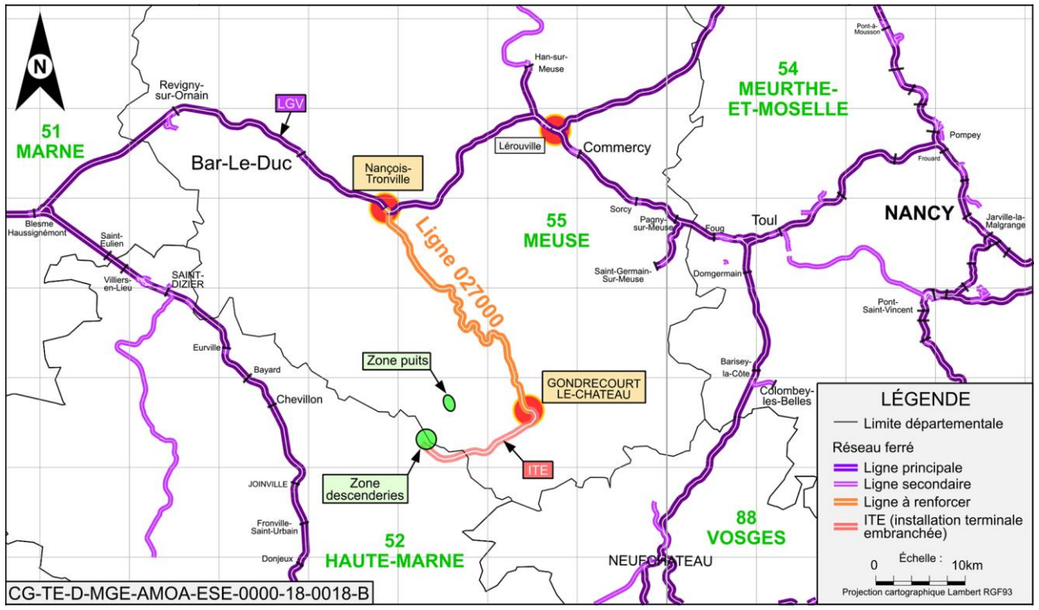


Figure 2-101 Ligne ferroviaire 027000 entre l"ITE et le réseau ferré national

2.8.4 La déviation de la route départementale D60/960

Le Conseil départemental de la Haute-Marne est le maître d'ouvrage de l'opération de déviation de la route départementale D60/960 qui contourne la zone descenderie du centre de stockage Cigéo.

Compte tenu des critères retenus pour la protection de l'environnement, du public et des installations, les études d'aménagement du centre de stockage Cigéo montrent la nécessité de dévier partiellement la route départementale D60/960 pour déployer les installations de la zone descenderie, notamment la zone des utilités au Nord du bâtiment nucléaire EP1 (cf. Chapitre 4.3.3.5 du présent document).

Trois variantes possibles de contournement sont identifiées.

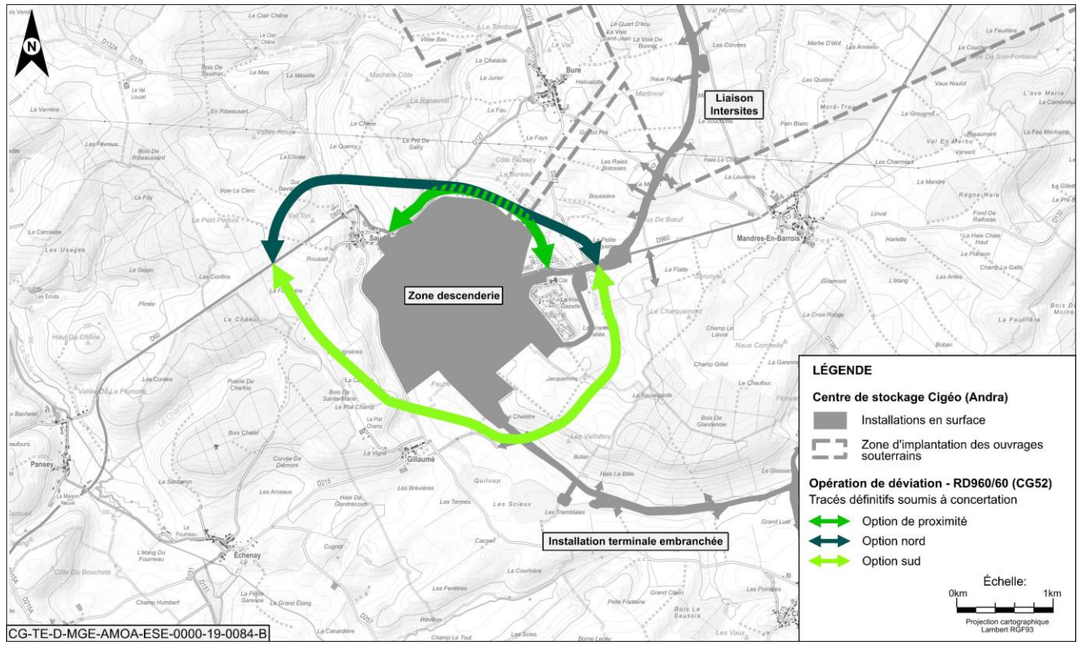


Figure 2-102 Opération de déviation de la route départementale D60/960 - solutions soumises à concertation

Les contraintes de conception de cette déviation sont les suivantes :

- maintenir un niveau de service et de sécurité équivalent à celui de la route départementale D 60/ 960 existante (maintien de la desserte de Saudron, route à grande circulation (RGC), largeur de voie, vitesse de circulation…) tout en prenant en compte les trafics générés par le projet global Cigéo ;
- limiter les impacts environnementaux en :
  - ✓ évitant les zones naturelles à enjeu écologique (zones humides, espaces boisés…) ;
  - ✓ en optimisant la longueur du tracé pour réduire les impacts sur les terres agricoles ;
  - ✓ en s'éloignant des communes pour limiter les nuisances ;
  - ✓ en respectant les périmètres de protection éloignés et rapprochés des captages et des cours d'eau ;
- réduire les longueurs de voirie pour limiter les temps de parcours et les coûts d'infrastructures.

Après participation du public à l'élaboration du projet, lors de concertations ultérieures, la solution retenue fera l'objet d'un approfondissement des études techniques et d'une actualisation de la présente étude d'impact.

LA CONCERTATION A VENIR SUR LA DÉVIATION DE LA ROUTE DÉPARTEMENTALE D60/960

Une concertation préalable sur les variantes de tracés possibles de la déviation de la route départementale D60/960 sera menée par le Conseil départemental de Haute-Marne sous l'égide des garants de la Commission nationale du débat public (CNDP). Les modalités et les dates sont en cours de définition.

2.8.5 L'expédition et transport des colis de déchets radioactifs

L'expédition et le transport des colis de déchets radioactifs des lieux de production jusqu'au centre de stockage Cigéo relève de la responsabilité des producteurs de déchets.

La règlementation relative au transport de substances radioactives est élaborée au niveau international par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). En France, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) est responsable du contrôle de la sûreté des transports de substances radioactives pour les usages civils. Le Haut Fonctionnaire de défense et de sécurité du ministère en charge de l'écologie, du développement durable et de l'énergie est responsable de la sécurité des transports sensibles (protection physique des transports).

Les colis de déchets destinés à être stockés dans Cigéo seront expédiés depuis les sites d'entreposage des producteurs. Ils peuvent être situés à plusieurs centaines de kilomètres du centre de stockage Cigéo :

- le site EDF de la centrale de Bugey (département de l'Ain) ;
- les installations d'Orano du site de La Hague (département de la Manche) ;
- les installations CEA situées sur les centres de Marcoule, de Cadarache et de Valduc (départements du Gard, des Bouches-du-Rhône et de la Côte d'Or).

Les illustrations des cheminements des colis est présenté dans la figure 2-103 ci-dessous. Pour information, les liens vers les sites internet des installations d'expédition sont présentés dans le tableau 2-8.



Figure 2-103 Illustration de l'acheminement des colis de déchets radioactifs vers Cigéo

Tableau 2-8 Liens internet présentant des informations sur les installations des sites des producteurs

Installations des producteurs	Informations générales	Rapport Transparence et Sécurité Nucléaire
Orano – La Hague	https://www.orano.group/fr https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/tour-des-implantations/recyclage-du-combustible-use/la-hague	https://www.orano.group/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications-reference/rapport-tsn-la-hague-2019.pdf?sfvrsn=662c3ab5_8
EDF – Bugey de l'opération « ICEDA	https://www.edf.fr/centrale-nucleaire-bugey https://www.ain.fr/content/uploads/2020/12/document-presentation-commission-locale-information-cli-centrale-nucleaire-bugey-cnpe-reunion-publique-7-decembre-2020.pdf (slides 41 à 61 en particulier) https://www.edf.fr/centrale-nucleaire-bugey/iceda	https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/carte-des-implantations/centrale-bugey/surete-et-environnement/20200619_bugey-rapporttsn-2019.pdf
CEA - Cadarache	https://cadarache.cea.fr/cad	https://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/institutionnel/transparence-securite-nucleaire/rapport-tsn-2019-cea-cadarache.aspx
CEA - Marcoule	https://www.cea.fr/marcoule	https://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/institutionnel/transparence-securite-nucleaire/rapport-tsn-2019-cea-marcoule.aspx
CEA - Valduc	http://www-dam.cea.fr/	Cette installation n'est pas une installation civile (INB). Elle n'est pas soumise aux exigences d'information du public des articles L 125-12 à L. 125-16-1 du code de l'environnement en matière de transparence et de sûreté nucléaire

Pour les premières années de fonctionnement de Cigéo, aucune modification des installations d'expédition existantes des producteurs n'est requise.

Dans le cadre de leurs travaux sur le schéma logistique prévu à l'article D. 542-93 du code de l'environnement, les producteurs étudient les modalités de transport des colis de déchets HA et MA-VL jusqu'au centre de stockage Cigéo. Les scénarios des producteurs prennent en compte les distances à parcourir, les infrastructures existantes, la sécurité publique, la masse des colis, le nombre de manipulations nécessaires et les risques potentiels associés. Tous les moyens de transport (rail, route, fluvial) et leurs combinaisons sont abordés, sachant que, pour l'arrivée sur le centre de stockage, les colis peuvent être reçus par la route ou par voie ferroviaire, mais que la livraison par voie ferroviaire est privilégiée pour réduire les risques, les impacts et les nuisances (cf. Chapitre 2.7.6 du présent document). La livraison par camion est possible, mais doit être justifiée et limitée.

Les producteurs ont transmis en janvier 2018 un rapport intitulé « Transport des colis de déchets HA-MA-VL depuis les sites expéditeurs vers Cigéo – PNGMDR 2016-2018 » (116) présentant l'état actuel de leurs études[121]. Les producteurs y concluent que le choix définitif des scénarios de transport de référence au départ des sites n'interviendra qu'après le résultat des études de faisabilité complémentaires en cours, le remontage global des coûts et la décision d'engager ou non les investissements pour les phases de conception et de réalisation des infrastructures et des emballages, en lien avec le planning directeur de Cigéo, conformément aux engagements et moyens des exploitants. Compte tenu de la date prévisionnelle de mise en service actif de Cigéo de 2031, de l'avancement de leurs études de transportabilité respectives et de leur retour d'expérience dans le domaine des transports, EDF, le CEA et Orano estiment qu'ils disposeront des flottes d'emballages et des moyens de transport nécessaires, en particulier pour les colis de déchets devant être expédiés durant les dix premières années de fonctionnement de Cigéo. De plus, ils considèrent que le retour d'expérience dont ils disposent, en lien avec leurs

[121] Rapport transmis en réponse à l'article 54 de l'arrêté du 23 février 2017 ((116) pris en application du décret PNGMDR (117).

partenaires habituels, démontre une maîtrise technique du transport de tous les types de colis de déchets qui sont destinés au centre de stockage Cigéo, et permettra d'apporter les garanties suffisantes pour proposer des solutions adaptées aux futurs transports.

Les études de scénarios de transport sont par ailleurs amenées à être renouvelées périodiquement sur la durée de fonctionnement séculaire du centre de stockage Cigéo. Le choix des scénarios d'acheminement prendra en compte les impacts environnementaux potentiels, y compris liés à l'aménagement ou à la création d'installation intermédiaires de transbordement pour le passage d'un mode de transport à un autre. Dans l'hypothèse où s'avèreraient nécessaire une adaptation ou une extension des installations d'expédition, ou la création d'installations de transbordement, l'étude d'impact du projet global Cigéo serait actualisée préalablement aux demandes d'autorisation de cette adaptation, extension ou création.

L'opération d'expédition et de transport des colis de déchets radioactifs est décrite au chapitre 4.4.5 du présent volume de l'étude d'impact du projet global Cigéo.

LES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSPORT ENVISAGEABLES POUR LE TRANSPORT DES COLIS DE DÉCHETS RADIOACTIFS

Le transport fluvial offre des perspectives intéressantes en raison du grand nombre de colis de déchets qui peuvent être embarqués sur un même bateau. Ce mode de transport ne permet toutefois pas l'acheminement des colis de déchets jusqu'à Cigéo et impose plusieurs opérations de chargement/déchargement qui présentent des risques et sont sources de délais et de coûts.

Le transport par la route permet une grande flexibilité logistique. Cependant, le nombre de colis transporté par camion est restreint, compte tenu du poids et des dimensions des emballages de transport. Bien que soumis à des règles spécifiques de circulation et de stationnement, le transport routier comporte des risques en raison des interactions possibles avec la circulation des autres usagers. Il n'est justifié que pour des distances relativement courtes et pour des centres d'expédition ne disposant pas d'un embranchement sur le réseau ferroviaire. Ce mode de transport sera autant que possible limité.

Le transport ferroviaire est déjà très utilisé pour le transport de colis de déchets radioactifs en particulier par Orano via le terminal ferroviaire de Valognes, près de l'usine de retraitement des combustibles de La Hague. Il est le mode de transport le plus sûr et le moins impactant pour l'environnement. Plusieurs emballages de transport peuvent être transportés par un même convoi ferroviaire. L'usage du rail est donc privilégié par rapport au transport routier dès lors que la liaison ferroviaire est disponible.

2.8.6 Les opérations de caractérisation et de surveillance environnementale

Pendant toutes les phases les phases de déploiement du centre de stockage Cigéo (aménagements préalables, construction initiale, fonctionnement, démantèlement et fermeture, surveillance – cf. Chapitre 5 du présent document), l'Andra sera amenée à réaliser des activités de caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales prescrites.

Certaines de ces activités de caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales sont menées sur les emprises du centre de stockage. Dans ce cas, elles sont incluses dans les opérations menées sur la zone descenderie, la zone puits, la zone d'implantation des ouvrages souterrains, la liaison intersites et l'installation terminale embranchée.

Certaines activités de caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales doivent être menées hors du centre de stockage Cigéo. Elles sont complémentaires des investigations et des mesures réalisées à l'intérieur du centre de stockage Cigéo. Elles font partie du projet global Cigéo. La localisation de ces activités et l'implantation des dispositifs de mesures associés ne peuvent pas encore être connues à ce stade. L'ensemble de ces activités, ouvrages et équipements associées sont regroupées et identifiées au sein du projet global en tant qu'« opérations de caractérisation et de surveillance environnementales ».

Le présent chapitre traite spécifiquement des activités de caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales réalisées hors des emprises du centre de stockage. Elles sont sous la maîtrise d'ouvrage de l'Andra (cf. 4.1 du présent document) :

- les caractérisations correspondent à des investigations qui permettent d'acquérir une meilleure connaissance de l'environnement, au sens large (géologie du site, biodiversité, milieu physique…), du centre de stockage Cigéo ;
- la surveillance environnementale correspond à la réalisation de mesures, continues ou périodiques, prescrites par les autorités pour :
  - ✓ contrôler le fonctionnement du centre de stockage Cigéo et notamment de l'installation nucléaire de base (INB) pour en détecter les éventuelles dérives, identifier leur cause et mettre en œuvre des actions correctives ;
  - ✓ vérifier le respect des obligations réglementaires qui incombe à l'Andra en matière de protection de l'environnement ;
- le suivi des mesures environnementales correspond aux actions menées pour vérifier l'efficacité des mesures d'évitement, de réduction et de compensation des impacts du centre de stockage Cigéo, prescrites à l'Andra dans les différentes autorisations administratives (dérogation d'atteinte aux espèces protégées dite « dérogation CNPN », autorisation environnementale notamment pour le défrichement, permis d'aménager, IOTA…). Des mesures du même type seront prescrites aux autres maîtres d'ouvrage du projet global.

Les activités de caractérisation, de surveillances environnementales et de suivi des mesures environnementales feront l'objet de compléments d'information et seront détaillées dans les processus d'autorisations réglementaires adaptés à leur nature, à leur positionnement (dans ou hors du périmètre de l'installation nucléaire de base) et à leurs incidences potentielles sur l'environnement.

LES CARACTERISATIONS GÉOLOGIQUES

Les caractérisations incluent des études de terrain, du type des campagnes de forages menées depuis 1994, pour caractériser et comprendre le milieu géologique et évaluer la capacité du sous-sol, et notamment de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, à accueillir un stockage de déchets radioactifs HA et MA-VL. Ces études itératives, complétées par des caractérisations depuis la surface, ont permis d'affiner la connaissance géologique du sous-sol.

L'Andra va poursuivre des campagnes de forages en Meuse/Haute-Marne, pour améliorer les connaissances scientifiques et pour les besoins de la surveillance environnementale. Les implantations des forages seront définies progressivement, en parallèle de l'avancement des études de conception.

Ces nouveaux forages, dont les caractéristiques techniques et les emplacements sont en cours de définition pour optimiser leur intérêt scientifique et minimiser leur impact environnemental, ont vocation à être implantés hors du centre de stockage Cigéo.

Synthèse

Les études de conception environnementale du projet global ont conduit à retenir :

- le raccordement du centre de stockage à la ligne très haute tension 400 kV Mery-Houdreville. Un poste de transformation 400/90 kV, des liaisons souterraines enterrées et des postes de livraisons 90 kV doivent être créés par RTE ;
- des conduites d'adduction d'eau seront construites par les syndicats de gestion locaux pour relier le centre de stockage aux captages de Thonnance-lès-Joinville, d'Échenay et de Gondrecourt-le-Château. Les travaux permettront de renforcer les réseaux de certaines communes ;
- la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 sera entreprise par SNCF réseau pour connecter le centre de stockage au réseau ferré national ;
- la route départementale D60/960 sera déviée sur une partie de son tracé pour contourner la zone descenderie du centre de stockage tout en maintenant le niveau de service actuel ;
- l'expédition et le transport des colis de déchets radioactifs seront organisés par les producteurs de déchets radioactifs. Seuls les colis de déchets ayant fait l'objet d'une acceptation préalables par l'Andra seront expédiés ;
- l'Andra mènera hors des emprises du centre de stockage des activités de caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales prescrites.

3

Les déchets destinés au centre de stockage Cigéo

3.1 Les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) 148
3.2 Les notions d'inventaire de référence et d'inventaire de réserve 148
3.3 L'inventaire de référence retenu pour la conception du centre de stockage Cigéo 149
3.4 L'inventaire de réserve pour lequel des adaptations du centre de stockage Cigéo sont étudiées 150
3.5 Les déchets d'éventuelles futures installations nucléaires 151

3.1 Les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL)

Les déchets qui sont destinés à être stockés dans le centre de stockage Cigéo sont les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL). Leur radioactivité ne permet pas de les stocker de manière sûre en surface ou à faible profondeur (cf. Chapitre 1.3 du présent document).

Les déchets HA sont essentiellement des résidus extraits des combustibles nucléaires lors de leur retraitement et vitrifiés. Au sein des déchets de haute activité, on distingue les colis de déchets « HA0 », dans lesquels le dégagement de chaleur est modéré, et les colis de déchets « HA1 » et « HA2 », dans lesquels le dégagement de chaleur est plus important (cf. Chapitre 2.1.4 du présent document).

Pour les déchets MA-VL (cf. Chapitre 1.3 du présent document), il s'agit principalement de :

- structures métalliques séparées lors du traitement des combustibles nucléaires ;
- composants métalliques ayant séjourné dans des réacteurs nucléaires ;
- déchets issus du fonctionnement des installations nucléaires (déchets de maintenance, résidus des procédés...) et de leur démantèlement[122] ;
- résidus de la décontamination des effluents d'exploitation des installations nucléaires.

Les déchets qui sont destinés à être stockés dans le centre de stockage Cigéo sont des déchets français. Le code de l'environnement interdit « *le stockage en France de déchets radioactifs en provenance de l'étranger ainsi que celui des déchets radioactifs issus du traitement de combustibles usés et de déchets radioactifs provenant de l'étranger* » (article L 542-2).

3.2 Les notions d'inventaire de référence et d'inventaire de réserve

L'article D. 542-90 du code de l'environnement précise que « l'inventaire à retenir par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs pour les études et recherches conduites en vue de concevoir le centre de stockage prévu à l'article L. 542-10-1 comprend un inventaire de référence et un inventaire de réserve. L'inventaire de réserve prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique. Le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence. ». Le code de l'environnement précise en outre que, « s'ils ne figurent pas dans l'inventaire de référence, les combustibles usés issus de l'exploitation des réacteurs électronucléaires, des réacteurs expérimentaux et de la propulsion nucléaire navale sont intégrés dans l'inventaire de réserve » (article D. 542-91 du code de l'environnement).

Aussi, conformément à ces exigences réglementaires, l'Andra conçoit le centre de stockage Cigéo :

- pour qu'il accueille les déchets de l'inventaire de référence (cf. Chapitre 3.3 du présent document) ;
- pour qu'il puisse évoluer, au fur et à mesure de sa construction, pour s'adapter à d'éventuelles évolutions en matière d'inventaire des déchets stockés. Celles-ci pourraient être liées notamment aux stratégies industrielles (par exemple un allongement de la durée de vie des réacteurs nucléaires ou au contraire leur arrêt prématuré) ou à la réorientation vers le centre de stockage Cigéo de déchets, de déchets justifiant actuellement d'un autre mode de gestion (par exemple des déchets de faible activité à vie longue) (cf. Chapitre 3.4 du présent document).

Les inventaires de référence et de réserves sont établis sur la base des scénarios de politique énergétique de l'édition 2018 de l'Inventaire national de l'Andra (118). Ces scénarios sont volontairement contrastés pour couvrir le champ des possibles des évolutions de stratégie des industriels et de la politique énergétique de la France au travers de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

Des marges sont prises pour couvrir les incertitudes sur le volume de déchets futurs à produire ou de déchets anciens devant faire l'objet d'opérations de reprise et conditionnement, sur les modalités de conditionnement et sur les caractéristiques de certains déchets.

L'ARTICULATION ENTRE L'INVENTAIRE PRIS EN COMPTE POUR LA CONCEPTION DU PROJET DE CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO ET D'UNE PART LES PRESCRIPTIONS DU PNGMDR ET D'AUTRE PART LES SCÉNARIOS DÉFINIS DANS LE CADRE DE L'INVENTAIRE NATIONAL (IN) DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

La « réduction des volumes à la source » ainsi que l'optimisation du choix des filières de gestion des déchets radioactifs sont des principes fondateurs de la gestion des déchets radioactifs en France.

À cet égard, la décision n° 2015-0508 de l'ASN du 21 avril 2015 précise les règles applicables aux installations nucléaires de base pour la gestion des déchets qu'elles produisent (108). L'exploitant d'une INB doit notamment présenter et justifier, dans une étude sur la gestion des déchets, les dispositions prises pour prévenir et réduire à la source la production et la nocivité des déchets ainsi que les moyens retenus pour réduire par un tri, un traitement et un conditionnement adaptés, la quantité et la dangerosité des déchets à gérer. L'exploitant doit présenter dans le bilan annuel une analyse des déchets produits dans l'installation au cours de l'année civile écoulée. Ce bilan vise à vérifier l'adéquation de la gestion des déchets avec les dispositions prévues par l'étude sur la gestion des déchets et à identifier les axes d'amélioration.

L'article L. 542-1 du code de l'environnement prévoit que les producteurs de déchets radioactifs, dans le cadre de la gestion de leurs déchets avant évacuation vers un exutoire définitif, doivent trier et définir les modes de traitement et de conditionnement des déchets, en fonction des technologies disponibles, dans l'objectif d'en réduire la quantité et la nocivité. À ce titre, les producteurs mettent en œuvre dans leurs installations des dispositions de tri à la source et mènent de nombreuses études relatives au traitement et au conditionnement des déchets. Compte tenu des coûts afférents à la gestion des déchets radioactifs, des mesures visant à réduire leur production à la source sont prises par tous les exploitants. Par ailleurs, les déchets HA et une grande partie des déchets MA-VL sont produits lors du retraitement du combustible nucléaire irradié, opération visant à en séparer l'uranium et le plutonium qui constituent sa part valorisable.

La loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs dispose que « *après entreposage, les déchets radioactifs ultimes*[123] *ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou à faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde* ». Elle confie à l'Andra la responsabilité « *de concevoir, d'implanter, de réaliser et d'assurer la gestion (...) des centres de stockage de déchets radioactifs* ».

Les notions d'inventaires de référence et de réserve

Le code de l'environnement prévoit dans son article D. 542-90 que « *l'inventaire à retenir par l'Andra pour les études et recherches conduites en vue de concevoir le centre de stockage prévu à l'article L. 542-10-1 de ce même code comprend un inventaire de référence et un inventaire de réserve* ;

- *l'inventaire de réserve prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique ;*
- *le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence.* »

Les inventaires de référence et de réserve retenus pour les études en phase de conception initiale du centre de stockage Cigéo se fondent sur les inventaires prospectifs de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs (IN). Ces inventaires prospectifs sont évalués sur la base de scénarios

[122] Les déchets de démantèlement sont orientés pour leur grande majorité (environ 98 % de leur volume) vers des solutions de stockage de surface.

[123] L'article L. 542-1-1 du code de l'environnement qualifie de déchets radioactifs ultimes les déchets radioactifs « qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux ».

contrastés d'évolution de la politique énergétique française à long terme répondant aux prescriptions du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) et prennent en compte les orientations de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

L'inventaire de référence correspond à la production des déchets issus du fonctionnement et du démantèlement des installations autorisées aujourd'hui dans un scénario de poursuite de la production électronucléaire avec une hypothèse de durée de fonctionnement des installations existantes de 50 ans, et de retraitement de la totalité des combustibles usés produits par ces installations dans le parc actuel et dans un parc futur. Cette hypothèse ne préjuge pas de la décision des autorités publiques d'autoriser ou non un allongement de la durée d'exploitation des réacteurs. Les déchets qui seront produits par l'exploitation des installations nucléaires en cours de construction sont également pris en compte (notamment l'EPR de Flamanville, le réacteur expérimental Jules Horowitz, l'installation de recherche ITER).

Conformément au 2e alinéa de l'article D. 542-90 du code de l'environnement susvisé et afin de tenir compte des incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou d'évolutions de la politique énergétique sur la durée de fonctionnement du centre de stockage, l'Andra étudie les adaptations du centre de stockage Cigéo qui seraient nécessaires dans l'éventualité d'un changement de stratégie en matière de politique énergétique afin d'y stocker des déchets de l'inventaire de réserve. Les évolutions de politique énergétique envisageables sont :

- une modification de la durée de fonctionnement des installations nucléaires de base produisant des déchets par rapport à celle prise en compte pour la conception du centre de stockage Cigéo ;
- le déploiement de nouveaux parcs de réacteurs électronucléaires permettant ou non de recycler l'ensemble des matières produites par le parc actuel ;
- le choix de ne pas retraiter certains combustibles usés, impliquant ainsi leur requalification en déchets ;
- la décision d'arrêter globalement le retraitement-recyclage des combustibles usés par exemple en cas de décision de ne pas renouveler la production électronucléaire se traduisant par une requalification de tout ou partie des matières impliquées en déchets.

Ainsi ces incertitudes d'évolution sont prises en compte dans l'inventaire de réserve via deux scénarios :

- l'intégration dans l'inventaire de réserve de déchets qui résulteraient d'un allongement de la durée de fonctionnement d'environ dix ans des réacteurs électronucléaires existants par rapport à celle de 50 ans prise en compte établir l'inventaire de référence ;
- l'intégration dans l'inventaire de réserve de la totalité des combustibles usés issus de l'exploitation des réacteurs électronucléaires qui n'auraient pas fait l'objet, selon le calendrier d'arrêt des réacteurs découlant des scénarios de l'Inventaire national[124], d'un retraitement dans les installations actuelles prévues à cet effet, des réacteurs expérimentaux et les combustibles usés de la propulsion nucléaire navale.

Une autre incertitude concerne la mise en place d'une installation de stockage capable de prendre en charge tout ou partie des déchets aujourd'hui affectés au stockage de déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). À ce titre, l'inventaire de réserve retenu pour le centre de stockage de Cigéo comprend les déchets FA-VL suivants : les chemises et empilements de graphite, les déchets dits « UNGG de La Hague », certaines familles de colis d'enrobés bitumineux (relevant de la catégorie FA-VL) et les déchets de petits producteurs (sources, paratonnerres et déchets de la Défense nationale). L'Andra joint à son dossier de demande d'autorisation de création de l'INB du centre de stockage Cigéo des résultats des études préliminaires de prise en compte de l'inventaire de réserve afin de vérifier que la conception du centre de stockage retenue pour l'inventaire de référence n'est pas rédhibitoire à un éventuel changement de décision. Les résultats de ces études préliminaires seront synthétisés en particulier dans la pièce « Étude de maitrise des risques[125] » du dossier support à la demande de création de l'INB.

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

Les mises à jour périodiques du plan directeur de l'exploitation, en concertation avec les parties prenantes et le public, permettent d'adapter le déroulement de référence du projet aux éventuelles évolutions du besoin. Si, au cours de l'exploitation du centre de stockage Cigéo, une décision était prise d'y stocker des déchets de l'inventaire de réserve, un dossier de demande d'autorisation spécifique serait déposé par l'Andra, sur la base en particulier des résultats de la conception détaillée du stockage faisant l'objet de la demande et la démonstration de sûreté associée ainsi que des résultats de l'étude d'impact environnementale.

En matière de gestion globale des déchets, la récupérabilité (c'est-à-dire la capacité à retirer des colis de déchets stockés dans le centre de stockage Cigéo) permettrait aux générations futures de retirer tout ou partie des colis de déchets stockés dans le centre de stockage Cigéo, jusqu'à sa fermeture définitive, si une utilisation ou une autre voie de gestion, encore non-envisagée à ce jour, venait à émerger dans le futur et à se matérialiser en une filière industrielle de gestion.

3.3 L'inventaire de référence retenu pour la conception du centre de stockage Cigéo

Le centre de stockage Cigéo est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence.

L'inventaire de référence est également utilisé comme socle à sa démonstration de sûreté (cf. Chapitre 2.4 du présent document) et à l'évaluation de ses impacts radiologiques (cf. volume 4 de la présente étude d'impact).

Cet inventaire de référence prend en compte :

- les déchets déjà produits (environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL) ;
- les déchets qui seront produits à l'avenir par les installations nucléaires existantes et par celles dont la création a été autorisée à fin 2016, jusqu'au terme prévisible de leur fonctionnement, puis de leur démantèlement.

Les hypothèses prises en comptes pour constituer cet inventaire ont été présentées lors du débat public de 2013 (119). Elles correspondent à un scénario de production d'électricité électronucléaire prenant en compte une hypothèse de durée de fonctionnement des centrales nucléaires actuelles de 50 ans en moyenne et considérant le retraitement de la totalité des combustibles usés produits par ces installations. Cette hypothèse ne préjuge pas de la décision des autorités publiques d'autoriser ou non un allongement de la durée de fonctionnement des réacteurs, de l'éventuelle création d'un nouveau parc ou d'éventuelles évolutions de stratégie en matière de retraitement. Les déchets qui seront produits par l'exploitation des installations nucléaires en cours de construction sont également pris en compte, notamment l'EPR de Flamanville (Manche), le réacteur expérimental Jules Horowitz et l'installation de recherche ITER tous deux implantés à Cadarache (Bouches-du-Rhône).

Le Conseil d'administration de l'Andra a proposé dans sa délibération du 5 mai 2014 (62) relative aux suite à donner au débat public sur le projet global Cigéo que *« le périmètre des déchets à retenir par l'Andra pour élaborer la demande d'autorisation de création de Cigéo soit fixé par l'État, notamment pour assurer l'articulation entre l'inventaire des déchets de Cigéo et les scenarios de politique énergétique ».*

Cet inventaire de référence constitue l'inventaire pour la conception du centre de stockage Cigéo. Il ne préjuge pas des déchets qui seront autorisés *in fine* dans le centre de stockage Cigéo. Toute évolution notable de cet inventaire au-delà devra faire l'objet d'un nouveau processus d'autorisation.

Les différents déchets destinés au centre de stockage Cigéo sont présentés en annexe au présent volume (cf. Annexe 1).

Le volume de déchets radioactifs concerné par l'inventaire de référence, destiné à être stocké dans Cigéo si le centre de stockage est autorisé, est de l'ordre de 83 000 m³ (cf. Figure 3-1). Il correspond à environ 225 000 colis stockés.

[125] Selon l'article R 593-16, l'étude de maitrise des risques comprendra une présentation des dispositions prévues pour assurer le caractère réversible (dont l'adaptabilité) du stockage ainsi que le prescrit l'article L. 542-10-1.

Dans son avis du 1er décembre 2020 (21), l'ASN estime que « *le programme industriel de gestion des déchets proposé par l'Andra et les producteurs pour l'exploitation du projet de stockage Cigéo couvre bien l'ensemble des familles de déchets inscrites dans l'inventaire de référence de Cigéo* ».

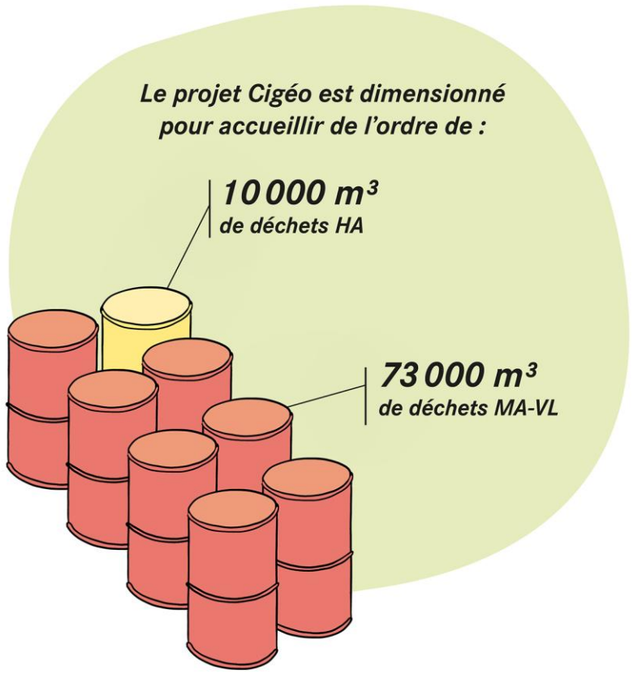


Figure 3-1 *Estimation des volumes de déchets HA et MA-VL à stocker dans Cigéo*

Le tableau 3-1 et le tableau 3-2 suivants fournissent les volumes[126] de colis primaires de déchets HA et MA-VL de l'inventaire de référence.

Tableau 3-1 *Volume des colis primaires de déchets HA destinés au centre de stockage Cigéo*

	Inventaire de Cigéo (m³)	Volume déjà produit au 31/12/2018 (m³) (données de l'Inventaire national)
Déchets vitrifiés	9 988	3 809
Autres déchets HA (sources scellées usagées, déchets technologiques…)[127]	56	47
TOTAL	**10 044**	**3 856**

Tableau 3-2 *Volume des colis primaires de déchets MA-VL destinés au centre de stockage Cigéo*

	Inventaire de Cigéo (m³)	Volume déjà produit au 31/12/2018 (m³) (données de l'Inventaire national)
Déchets de structure de combustibles usés[128]	13 585	6 581
Déchets issus du fonctionnement et du démantèlement	59 426	35 247
TOTAL	**73 011**	**41 828**

Le planning prévisionnel de livraison des colis de l'inventaire de référence est étudié en concertation avec les producteurs, en cohérence avec le déploiement des installations du centre de stockage Cigéo. Il prend en compte les contraintes liées à la gestion des entreposages des producteurs et les contraintes liées au transport depuis les sites expéditeurs. Sur la base des hypothèses retenues à ce stade, les colis qui pourraient être stockés les premières années, sont :

- des colis MA-VL livrés depuis le site Orano de La Hague ;
- des colis HA présentant un dégagement de chaleur modéré (HA0) livrés également depuis le site de la Hague (cf. Chapitre 2.1.4 du présent document).

3.4 L'inventaire de réserve pour lequel des adaptations du centre de stockage Cigéo sont étudiées

Pour tenir compte des incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou d'évolutions de la politique énergétique, l'Andra étudie les adaptations du centre de stockage Cigéo qui seraient nécessaires dans l'éventualité d'une décision d'y stocker les déchets de l'inventaire de réserve.

L'inventaire de réserve a été défini pour couvrir l'impact, en termes de quantités et de natures de déchets à stocker, d'un allongement de la durée de fonctionnement des réacteurs du parc actuel ou, au contraire, d'un non-renouvellement de la production électronucléaire par la mise à l'arrêt anticipé des réacteurs du parc actuel[129]. L'inventaire de réserve couvre également les incertitudes liées à la mise en place, ou non, d'une filière de stockage à proximité de la surface (sub-surface) pour les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). Il permet aussi de prendre en compte celles liées au retraitement des combustibles usés expérimentaux et de la propulsion navale.

[126] Les volumes indiqués correspondent au volume d'eau qui serait déplacé par immersion des colis primaires.
[127] La différence de 6 m³ est liée à une évolution de l'inventaire en déchets technologiques HA (postérieure à l'élaboration du scénario industriel des producteurs) déjà prise en compte dans les déclarations des stocks de l'Inventaire national (IN) à fin 2014.
[128] Les déchets de structure sont constitués des pièces métalliques des assemblages combustibles, séparées lors du traitement.
[129] Le scénario de non-renouvellement de la production électronucléaire retenu dans l'édition 2018 de l'IN postule un tel arrêt au bout de 40 ans de fonctionnement. Le scénario retenu dans l'inventaire de réserve a pour objectif de maximiser le nombre de combustibles usés à stocker.

Dans le cadre du PNGMDR 2016-2018[130], l'Andra a proposé d'intégrer dans l'inventaire de réserve :

- les déchets HA et MA-VL qui résulteraient d'un éventuel allongement de la durée de fonctionnement des réacteurs et installations existantes pour une durée comprise entre 50 et 60 ans selon les réacteurs[131], au lieu d'une durée uniforme de 50 ans retenue pour l'inventaire de référence :
  - ✓ le retraitement des combustibles utilisés pendant ces années de fonctionnement supplémentaires des réacteurs induit la production de 9 623 colis HA et MA-VL supplémentaires[132], par rapport au scénario de référence, représentant un volume de colis primaires de 1 732 m³ ;
  - ✓ le fonctionnement des réacteurs induit la production de 120 colis MA-VL supplémentaires (déchets activés), ce qui représente un volume de 240 m³ ;
- les combustibles usés des réacteurs expérimentaux et les combustibles usés de la propulsion nucléaire navale ;
  - ✓ 4 164 éléments combustibles pour un volume de 278 m³ ;
- les combustibles usés issus de l'exploitation des réacteurs électronucléaires qui n'auraient pas fait l'objet d'un retraitement dans les installations actuelles prévues à cet effet ; Les quantités maximales retenues sont celles évaluées sur la base d'un scénario de non-renouvellement de la production électronucléaire :
  - ✓ l'inventaire de réserve comporte à ce titre 57 940 éléments combustibles représentant un volume de 14 469 m³. Cet inventaire se répartit entre les éléments combustibles de type UNE (plus de 39 000 éléments combustibles), MOX (11 391 éléments combustibles) et URE (7 145 éléments combustibles). S'ajoutent également un peu plus de 1 000 éléments combustibles de réacteurs à neutrons rapides neufs ou usés (196 m³) et près de 2 700 éléments combustibles EL4 (26 m³) ;
- une partie des déchets destinés à la filière FA-VL tels que déclarés pour l'édition 2018 de l'Inventaire national :
  - ✓ les colis de déchets bitumés relevant de la filière FA-VL (32 901 colis pour un volume de 12 733 m³)
  - ✓ les chemises[133] et empilements[134] en graphite (14 921 colis pour un volume de 92 935 m³) ;
  - ✓ les déchets dits « UNGG de La Hague » (3 014 colis pour un volume de 3 962 m³) ;
- les déchets particuliers de « petits » producteurs et du « nucléaire diffus »[135] (42 colis pour un volume de 37 m³).

Dans son avis du 1er décembre 2020 (21), l'ASN estime « *satisfaisant que la mise à jour de l'inventaire de réserve, proposée par l'Andra, intègre désormais l'ensemble des combustibles usés du CEA (civils et défense), des déchets des petits producteurs et du nucléaire diffus et des empilements de graphite* ».

L'ensemble des substances figurant dans l'inventaire de réserve doit pouvoir être stocké en toute sûreté par l'introduction d'évolutions de conception pouvant être mises en œuvre, à un coût économiquement acceptable, au cours du fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

Afin de garantir cette possibilité, l'Andra mène des études dites « d'adaptabilité » du centre de stockage Cigéo, en parallèle de la conception visant au stockage de l'inventaire de référence. Ces études d'adaptabilité seront intégrées au dossier support à la demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 5.4.5 du présent document).

Si, au cours de l'exploitation du centre de stockage Cigéo, une décision était prise d'y stocker des déchets de l'inventaire de réserve, une demande d'autorisation spécifique serait déposée par l'Andra. La réception des déchets de l'inventaire de réserve et la mise en œuvre des évolutions de conception feront l'objet, le moment venu, des procédures d'autorisation adéquates selon le cadre réglementaire en vigueur. En particulier l'accueil de combustibles usés nécessitera une nouvelle demande d'autorisation.

Les études d'adaptabilité menées à ce stade montrent que le stockage des déchets de l'inventaire de réserve dans Cigéo serait possible (cf. Chapitre 5.4.5 du présent document). Ces résultats d'études offrent donc des choix de gestion aux générations successives, mais ils ne modifient, ni les voies de gestion actuellement retenues pour ces déchets, ni les études pour le développement de filières qui leur seraient plus spécifiquement adaptées qui sont organisées par le plan national de gestion des matières et des déchet radioactifs (PNGMDR).

3.5 Les déchets d'éventuelles futures installations nucléaires

Les déchets qui seraient produits par un éventuel futur parc de réacteurs ou de nouvelles installations nucléaires ne sont pris en compte, ni dans l'inventaire de référence, ni dans l'inventaire de réserve.

Les caractéristiques de ces déchets, en particulier ceux qui seraient produits par un éventuel parc de centrales nucléaires de quatrième génération, ne sont pas suffisamment connues.

La gestion des déchets qui seraient produits par des installations futures, non prévues à ce jour, serait à apprécier au moment de leur demande d'autorisation de leur création. Elle pourrait éventuellement nécessiter la création d'autres centres de stockage.

Suivant le même principe de responsabilité qui conduit à demander aujourd'hui la création du centre de stockage Cigéo pour la mise en sécurité définitive des déchets créés par les installations nucléaires actuelles, les générations qui décideraient de créer de nouvelles installations nucléaires devraient, à leur tour, mettre en œuvre les filières de gestion durables adaptées aux nouveaux déchets générés.

---

130 Document « Proposition de types et de quantité de déchets à inclure dans l'inventaire de réserve de Cigéo en application de l'article 56 de l'arrêté du 23 février 2017 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 » disponible sur le site de l'ASN

131 Scénario cohérent avec celui défini dans l'édition 2018 de l'Inventaire national de l'Andra (118).

132 Déchets HA vitrifiés et déchets MA-VL de structure compactés et technologiques (cf. Annexe 1 du présent document)

133 Les chemises en graphite sont les enveloppes cylindriques creuses qui entouraient le combustible dans les réacteurs de la filière Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG).

134 Les empilements en graphite accueillaient les chemises et constituaient des éléments du cœur des réacteurs de la filière Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG).

135 Selon l'arrêté du 23 avril 2012 pris en application du décret n° 2012-542 du 23 avril 2012 pris pour l'application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs, les déchets radioactifs du nucléaire « diffus » sont les déchets radioactifs produits ponctuellement et en quantités limitées hors des installations nucléaires de base et des installations nucléaires de base secrètes (120).

Synthèse

Les déchets destinés au centre de stockage Cigéo sont les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), dont le niveau de radioactivité et la durée de vie ne permettent pas de les stocker de manière sûre en surface ou à faible profondeur.

Les déchets HA sont essentiellement des résidus extraits des combustibles nucléaires lors de leur retraitement (produits de fission et actinides mineurs), puis vitrifiés.

Les déchets MA-VL sont principalement des pièces métalliques issues du traitement des assemblages de combustibles nucléaires, des composants ayant séjourné dans des réacteurs nucléaires, des déchets issus du fonctionnement des installations nucléaires (déchets de maintenance, résidus des procédés…) et de leur démantèlement.

Le centre de stockage Cigéo est conçu pour accueillir les déchets d'un inventaire de référence dont les hypothèses de constitution ont été présentées lors du débat public de 2013. Cet inventaire de référence repose sur l'inventaire des déchets HA et MA-VL déjà produits (environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL) et ceux qui seront produits à l'avenir par les installations nucléaires existantes et par celles dont la création a été autorisée à fin 2016, jusqu'au terme prévisible de leur fonctionnement, puis de leur démantèlement.

Le volume des colis de déchets radioactifs de l'inventaire de référence, destiné à être stocké dans Cigéo si le centre de stockage est autorisé, est de l'ordre de 83 000 m³ (environ 10 000 m³ pour les colis de de déchets HA et environ 73 000 m³ pour les colis de déchets MA-VL). Il correspond à environ 225 000 colis stockés.

Le planning prévisionnel de livraison est étudié en concertation avec les producteurs de déchets. Les colis qui pourraient être stockés les premières années sont :

- des colis MA-VL ;
- des colis HA présentant un dégagement de chaleur modéré.

Pour tenir compte des incertitudes liées à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou d'évolutions de la politique énergétique, l'Andra étudie les adaptations du centre de stockage Cigéo qui seraient nécessaires si l'inventaire des déchets à stocker venait à être modifié. Ces évolutions sont étudiées au travers d'un inventaire de réserve composé d'une partie des déchets aujourd'hui orientés vers la filière FA-VL, des combustibles expérimentaux et de la propulsion nucléaire navale et des combustibles usés des réacteurs électronucléaires qui ne seraient pas retraités dans un scénario de politique énergétique consistant à arrêter la production d'électricité d'origine électronucléaire.

Les études d'adaptabilité menées à ce stade montrent que le stockage des déchets de l'inventaire de réserve dans Cigéo serait possible (cf. Chapitre 5.4.5 du présent document). Ces résultats d'études offrent donc des choix pour de futures décisions en matière de gestion de ces déchets, mais ne modifient, ni leurs voies de gestion retenues actuellement, ni les études pour le développement de filières qui leur seraient plus spécifiquement adaptées. Celles-ci qui sont organisées par le Plan national de gestion des matières et des déchet radioactifs (PNGMDR).

4

La description des installations du projet global

4.1 Le projet global Cigéo 154
4.2 La localisation du projet global Cigéo 154
4.3 Le centre de stockage Cigéo 156
4.4 Les opérations du projet global Cigéo, situées hors du centre de stockage 193

4.1 Le projet global Cigéo

Le projet global Cigéo est présenté dans le volume I de la présente étude d'impact. Il comprend le centre de stockage Cigéo et l'ensemble des opérations (installations, aménagements, constructions d'ouvrages et activités) nécessaires à la réalisation et à l'exploitation du centre de stockage Cigéo, menées par l'Andra et par d'autres maîtres d'ouvrage (cf. Figure 4-1).

L'objet du présent chapitre 4 est la description des opérations qui composent le projet global Cigéo. Cette description sera actualisée dans le cadre des nombreuses autorisations qui seront nécessaires à la réalisation du projet global Cigéo (autorisation de création d'une installation nucléaire de base, autorisations environnementales, permis de construire, etc.). Elle intégrera progressivement l'avancement de l'élaboration de chaque opération et les conclusions des participations du public et des multiples consultations.

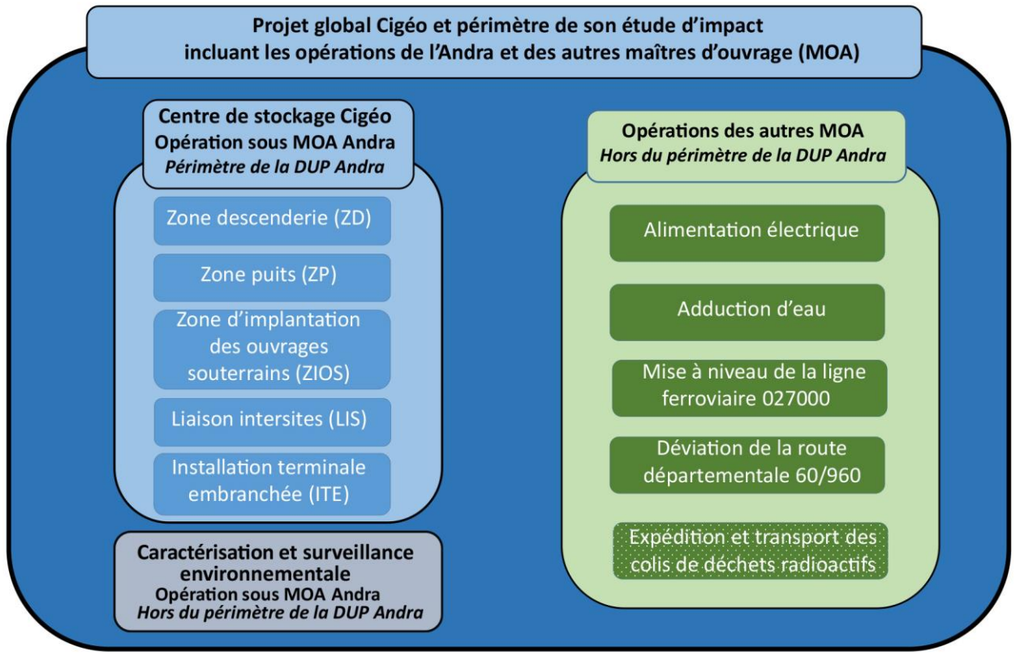


Figure 4-1 Les opérations du projet global Cigéo

4.2 La localisation du projet global Cigéo

Le projet global Cigéo est situé principalement dans la région Grand Est de la France à la limite des départements de la Meuse et de la Haute-Marne (cf. Figure 4-2).

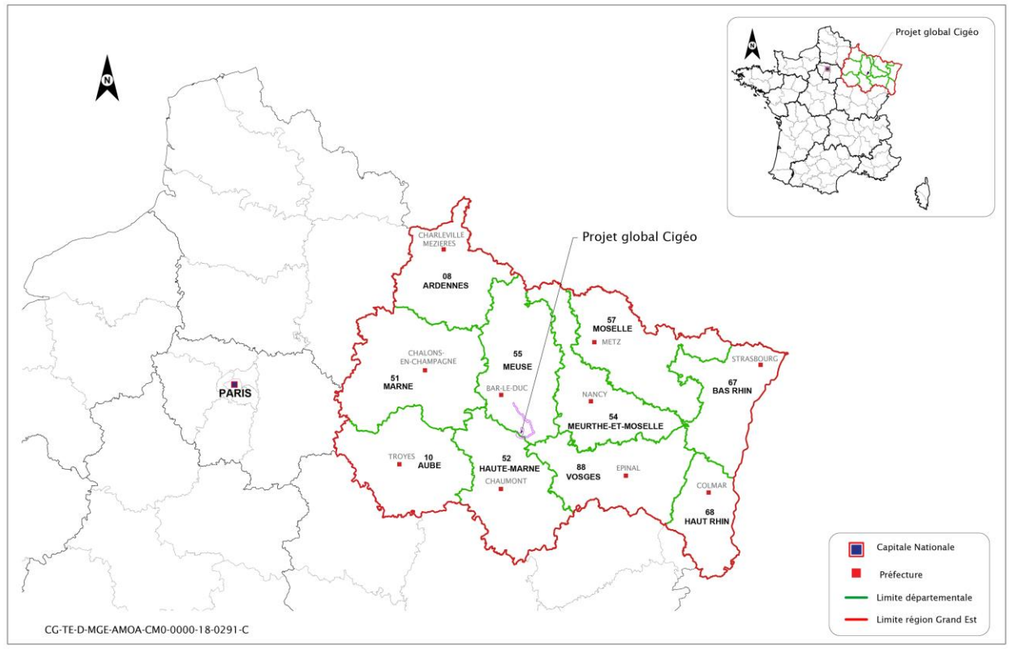


Figure 4-2 Localisation du projet global Cigéo

Les principaux éléments justifiant cette localisation sont présentés aux chapitres 2.6 et 2.8 du présent document.

L'implantation des différentes opérations du projet global Cigéo est présentée sur la figure 4-3. Cette figure correspond à une vue centrée sur la zone d'intervention potentielle du centre de stockage et n'inclut pas l'intégralité de la ligne 400 kV représentée sur la figure 4-62.

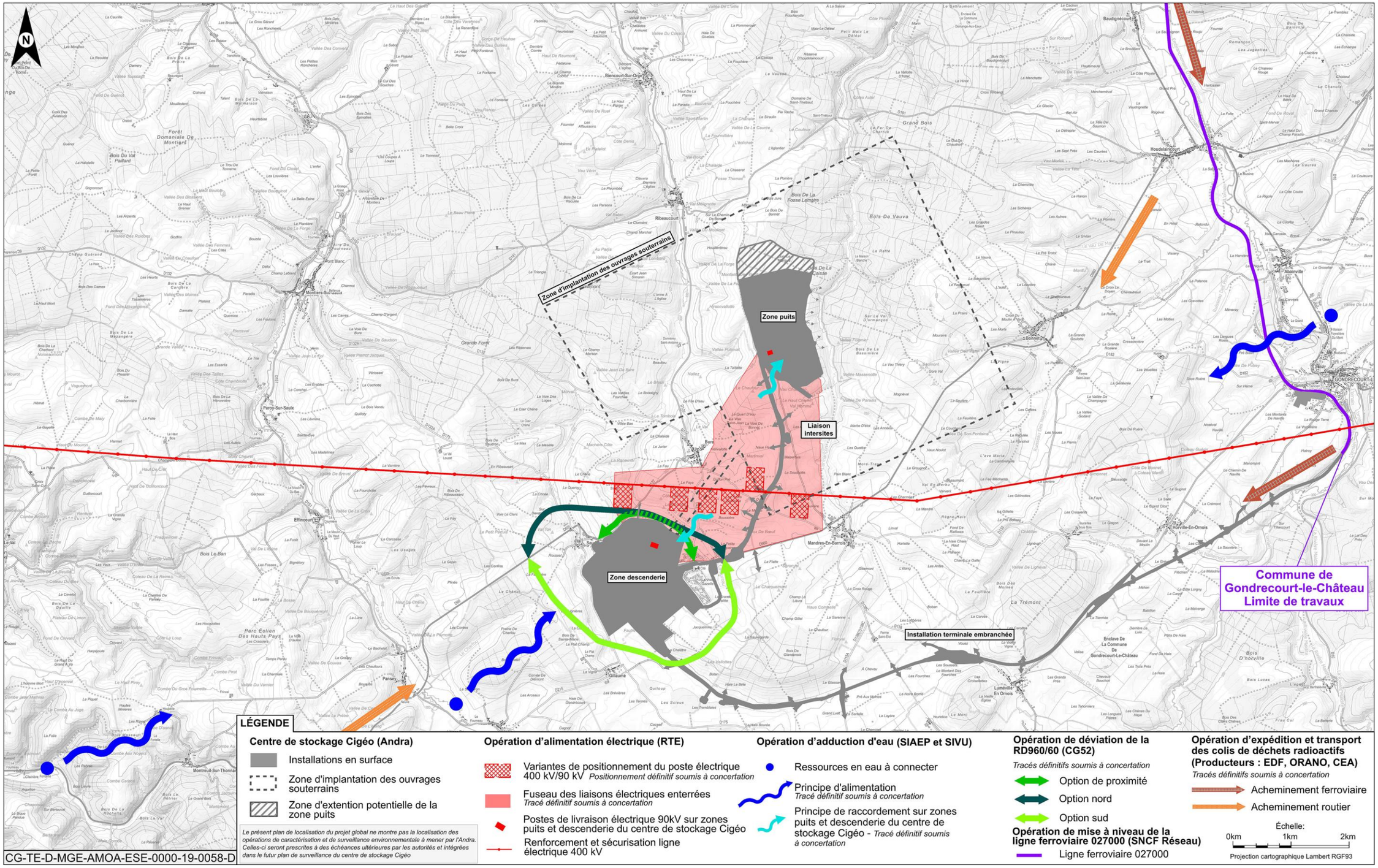


Figure 4-3 Implantation des différentes opérations du projet global Cigéo – Vue rapprochée

4.3 Le centre de stockage Cigéo

4.3.1 L'organisation générale du centre de stockage Cigéo

L'organisation générale des installations du Centre industriel de stockage géologique Cigéo est illustrée sur la figure 4-4 et sur la figure 4-5.

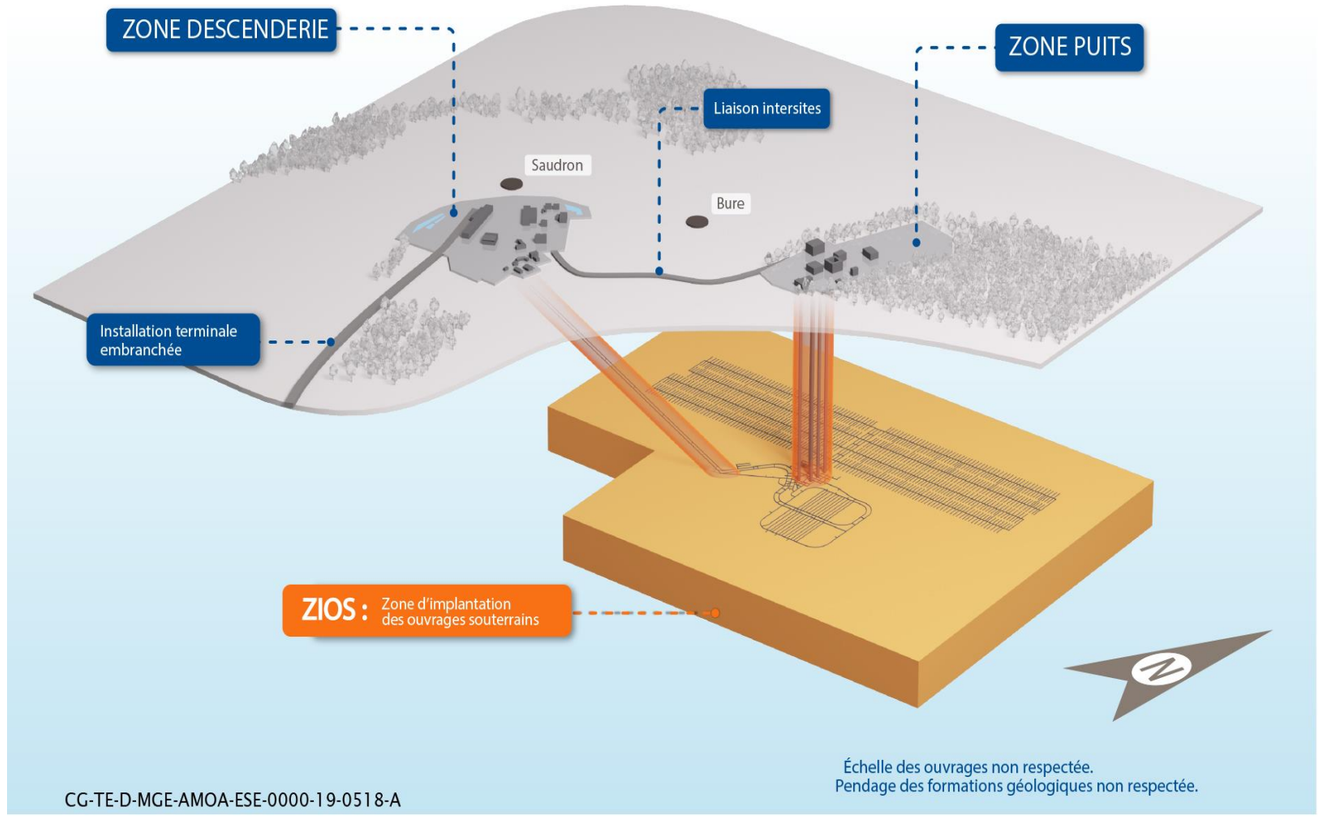


Figure 4-4 Représentation illustrative du centre de stockage Cigéo

Le centre de stockage Cigéo est implanté sur les communes de Bonnet, Bure, Cirfontaines-en-Ornois, Gillaumé, Gondrecourt-le-Château, Houdelaincourt, Horville-en-Ornois, Mandres-en-Barrois, Ribeaucourt, Saint-Joire, Saudron.

Le centre de stockage Cigéo comprend :

- une zone descenderie (ZD), principalement dédiée à la réception des colis de déchets radioactifs expédiés par les producteurs, à leur contrôle et à leur préparation avant transfert dans l'installation souterraine pour leur stockage ;
- une zone puits (ZP), dédiée aux installations de soutien aux activités réalisées dans l'installation souterraine et en particulier aux travaux de creusement ;
- une zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS), comprenant les accès depuis la surface, des quartiers de stockage des colis de déchets radioactifs et des zones de soutien logistique (ZSL) ;
- une liaison intersites (LIS) en surface, reliant la zone puits à la zone descenderie, comprenant un convoyeur, une voie privée dédiée à la circulation des poids lourds et une route publique pour la circulation des véhicules légers ;
- une installation terminale embranchée (ITE), voie ferrée reliant la zone descenderie au Réseau ferré national (RFN) à Gondrecourt-le-Château et incluant une plateforme logistique dans cette commune.

La figure 4-5 précise leurs localisations.

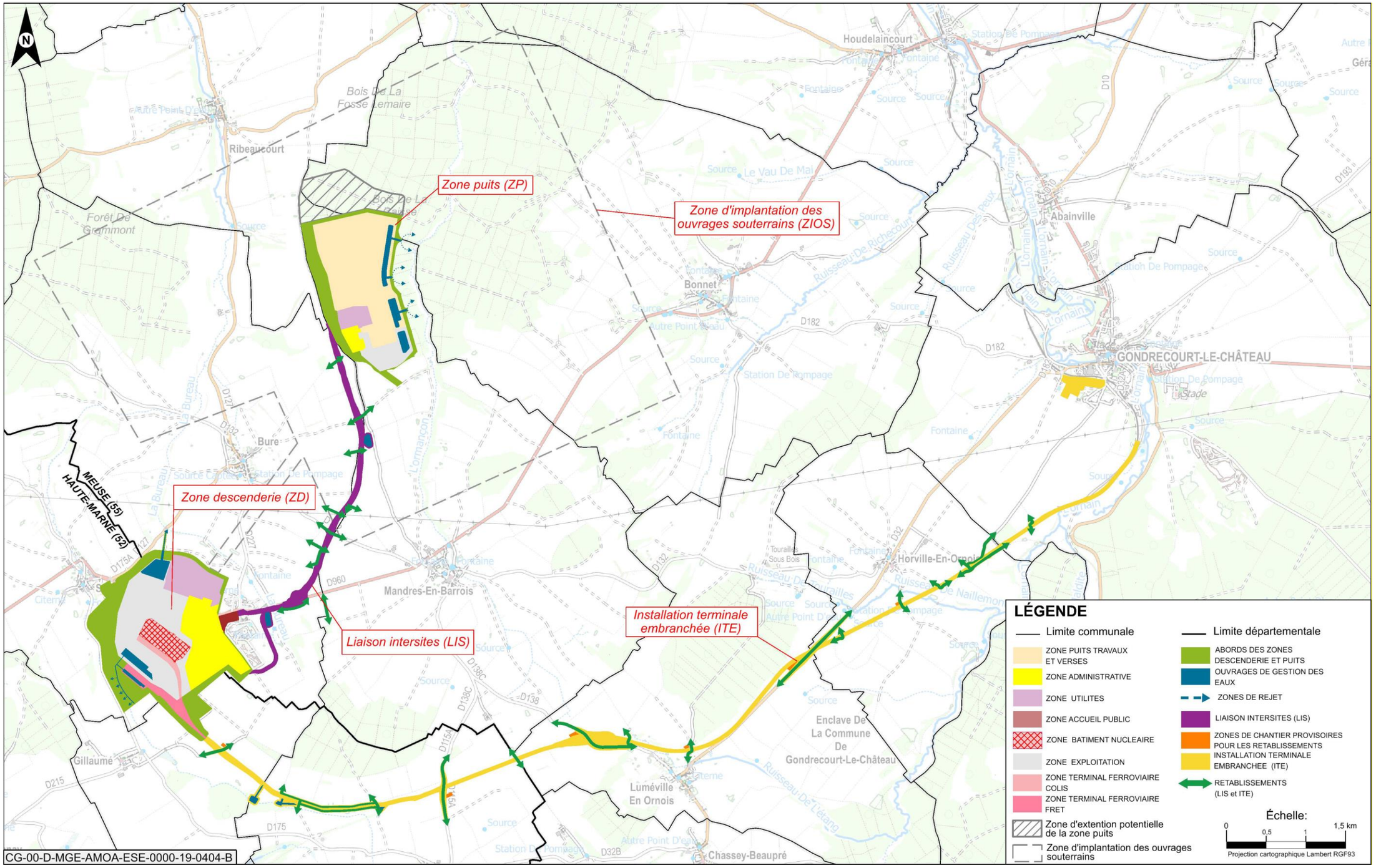


Figure 4-5 Localisation des installations du centre de stockage Cigéo

4.3.2 Les principes de fonctionnement du centre de stockage Cigéo

La figure 4-6 présente le fonctionnement du centre de stockage Cigéo. Ces grandes fonctions industrielles sont la réception des colis de déchets expédiés par les producteurs, leur contrôle et leur préparation pour le stockage, leur transfert vers l'installation souterraine où ils sont positionnés dans des alvéoles de stockage en fonction de leur nature et de leur activité.

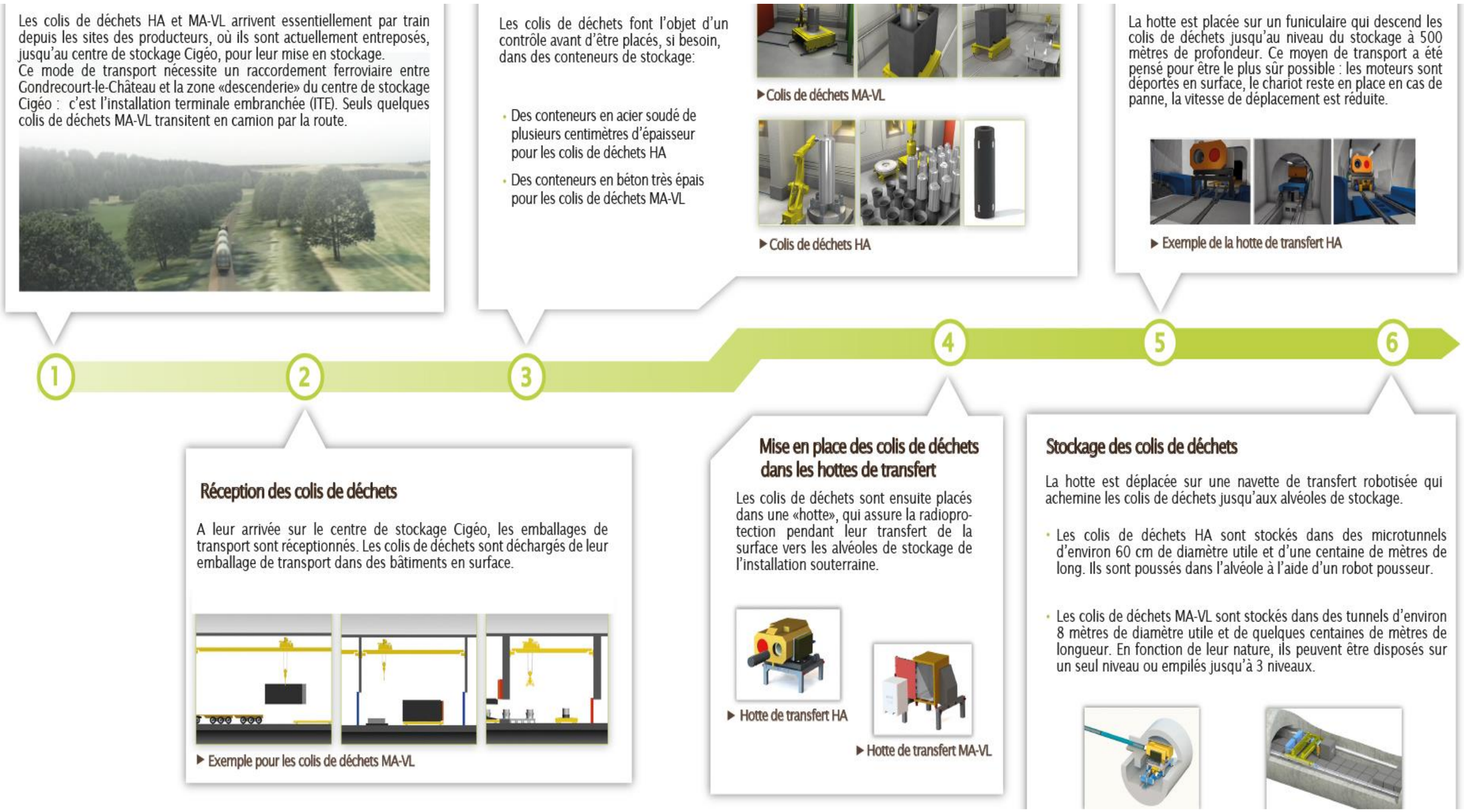


Figure 4-6 Cheminement des colis de déchets jusqu'à leur emplacement de stockage

Après réception et contrôle des emballages de transport dans le hall de déchargement (cf. Figure 4-7), les colis de déchets reçus sur le centre de stockage Cigéo, dits « colis primaires » [136], sont extraits de leur emballage (cf. Figure 4-6 - étape 2).

Les « colis primaires » sont ensuite contrôlés et placés dans des conteneurs de stockage (cf. Figure 4-8) permettant leur manutention et leur stockage (cf. Figure 4-6 - étape 3).

Les conteneurs sont ensuite introduits dans une enceinte blindée appelée hotte (cf. Figure 4-9) qui assure leur protection, notamment vis-à-vis des chocs éventuels, et qui participe à la protection des travailleurs contre les rayonnements (cf. Figure 4-6 - étape 4).

La hotte chargée est descendue dans l'installation souterraine dans une descenderie (tunnel) par un funiculaire (cf. Figure 4-10) (cf. Figure 4-6 - étape 5).

À l'arrivée au fond, les colis sont acheminés *via* des systèmes de transfert automatisés (cf. Figure 4-11) jusqu'aux espaces de stockage souterrains appelés « alvéoles » dans lesquels ils sont introduits (cf. Figure 4-12) (cf. Figure 4-6 - étape 6).

Les colis sont disposés d'abord au fond de l'alvéole, puis progressivement de plus en plus proche de son entrée. En fonction de leur nature, ils peuvent être disposés sur un seul niveau ou empilés jusqu'à trois niveaux.

La conception du centre de stockage Cigéo prévoit que les colis peuvent être retirés pendant toute la durée du fonctionnement, de façon similaire à leur mise en stockage. Le procédé s'effectue en sens inverse depuis l'alvéole jusqu'à la surface.

Les opérations effectuées sur les colis de déchets sont commandées à distance et les systèmes d'information et de gestion du centre de stockage Cigéo permettent de connaître en temps réel la position de chaque colis dans les installations du centre de stockage, leurs caractéristiques ainsi que la cartographie de toutes les alvéoles (emplacement exact de chaque colis de déchets).



Figure 4-7 *Exemple illustratif d'opérations de contrôle d'un emballage de transport menées sur une installation nucléaire*

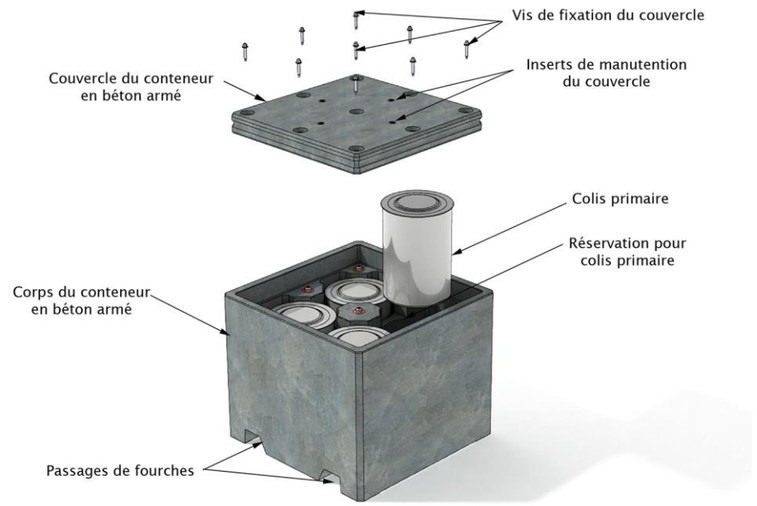


Figure 4-8 *Illustration de la mise en conteneur de stockage de colis de déchets MA-VL*

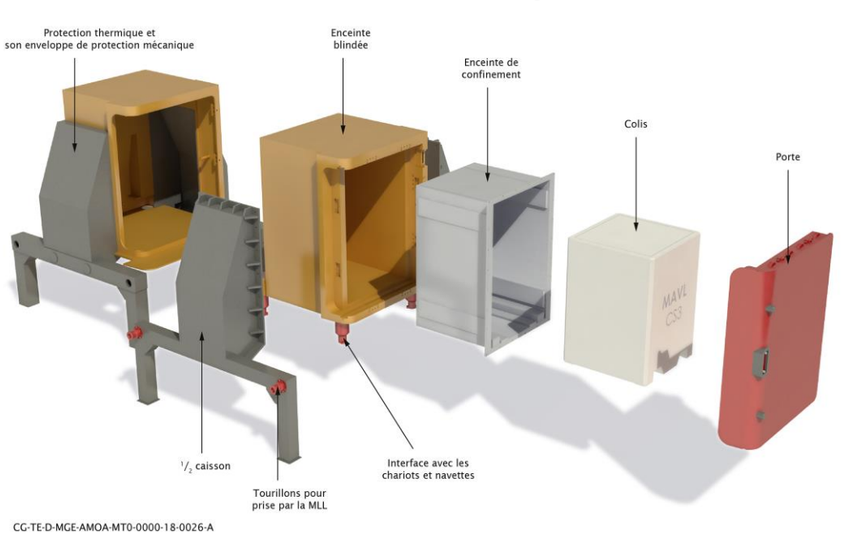


Figure 4-9 *Vue éclatée d'une hotte pour colis de déchets MA-VL*

[136] Les colis dits « primaires » reçus sur le centre de stockage Cigéo correspondent à des colis « définitifs » au sens de la décision ASN relative au conditionnement des déchets (Décision 2017-DC-0587 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 23 mars 2017 (121).

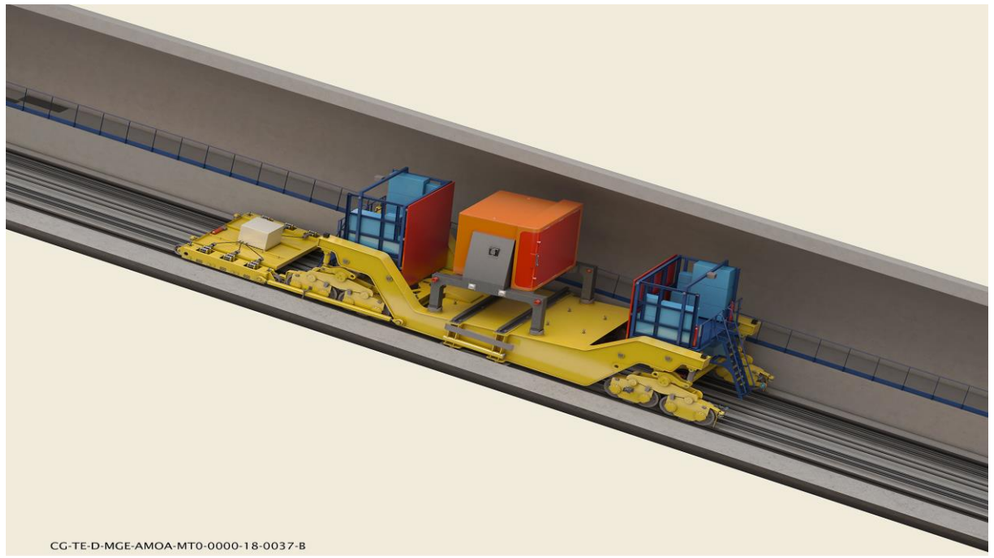


Figure 4-10 Illustration du funiculaire transportant une hotte MA-VL dans la descenderie

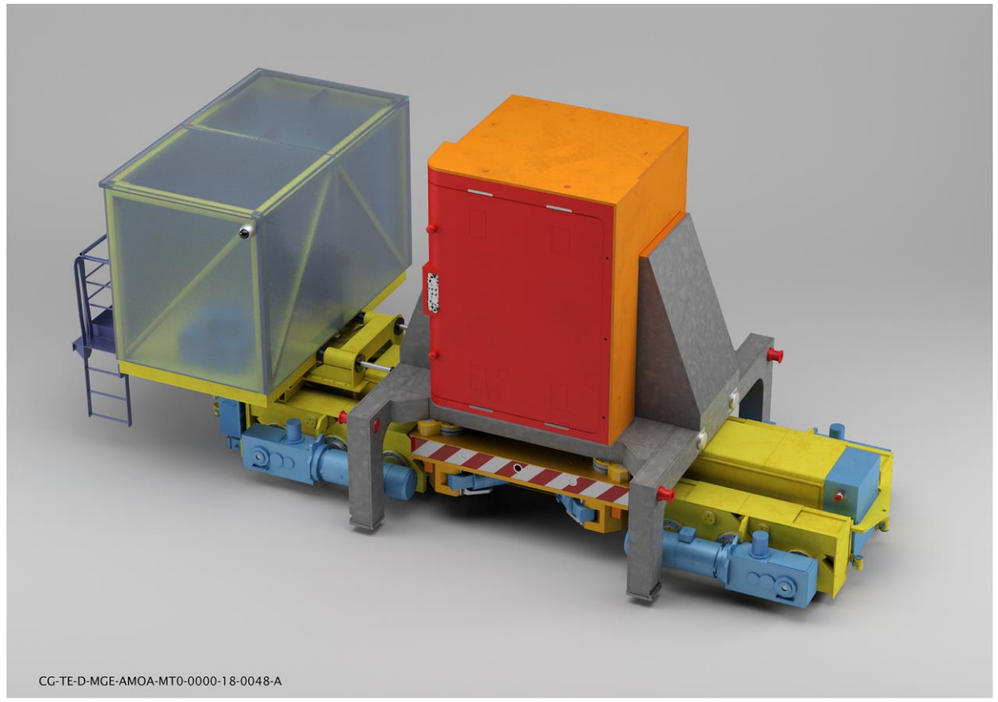


Figure 4-11 Illustration du système de transfert automatisé d'une hotte MA-VL

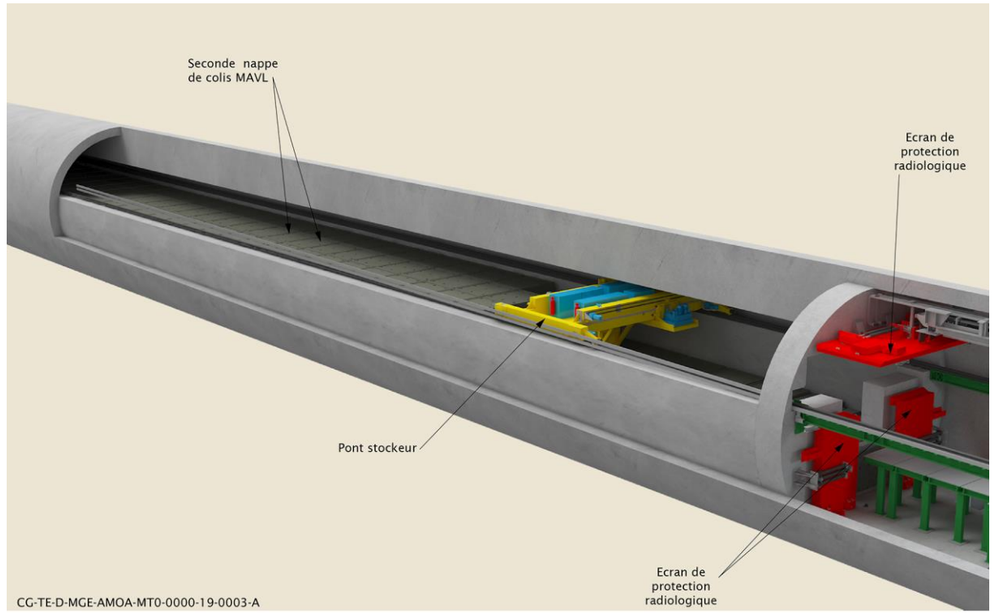


Figure 4-12 Illustration d'un alvéole de stockage de déchets MA-VL

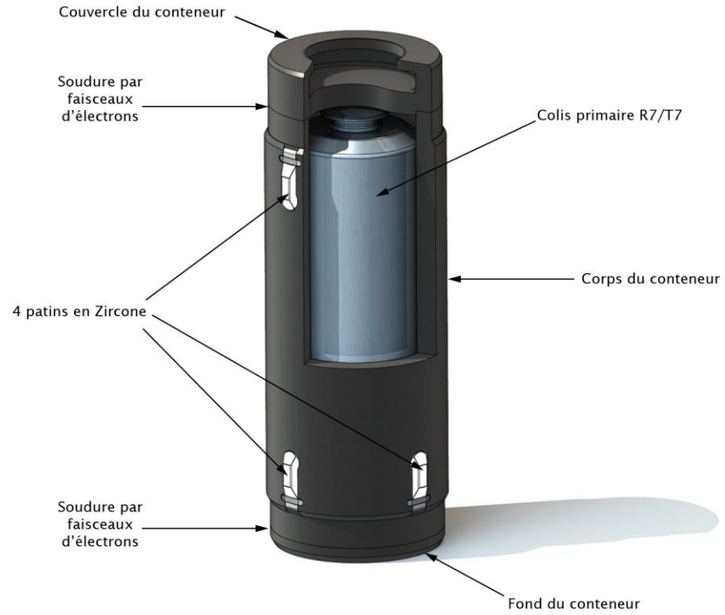


Figure 4-13 Illustration de conteneur de stockage de colis de déchets HA

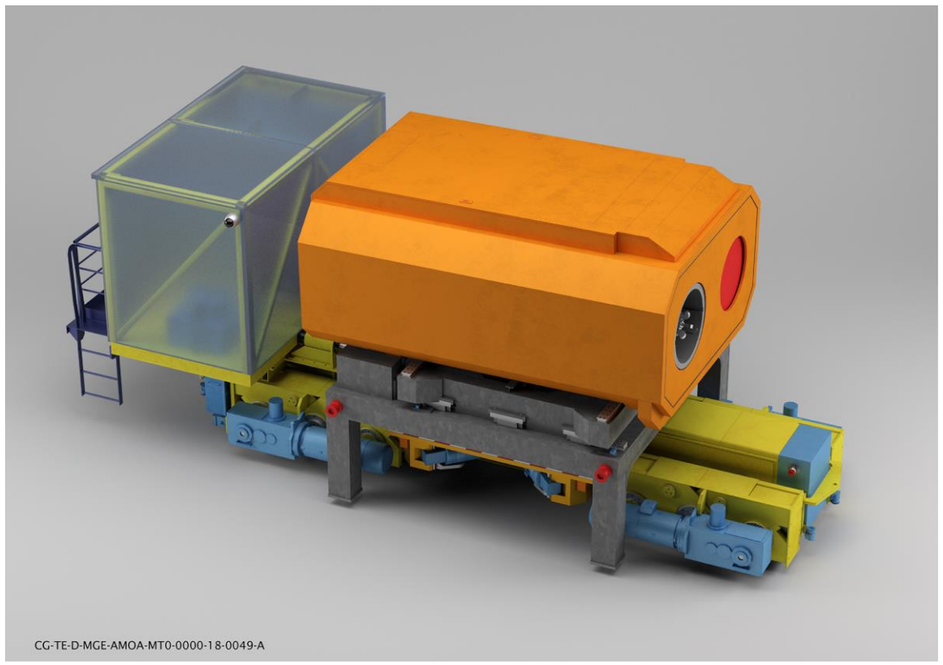


Figure 4-14 Illustration du système de transfert automatisé d'une hotte HA

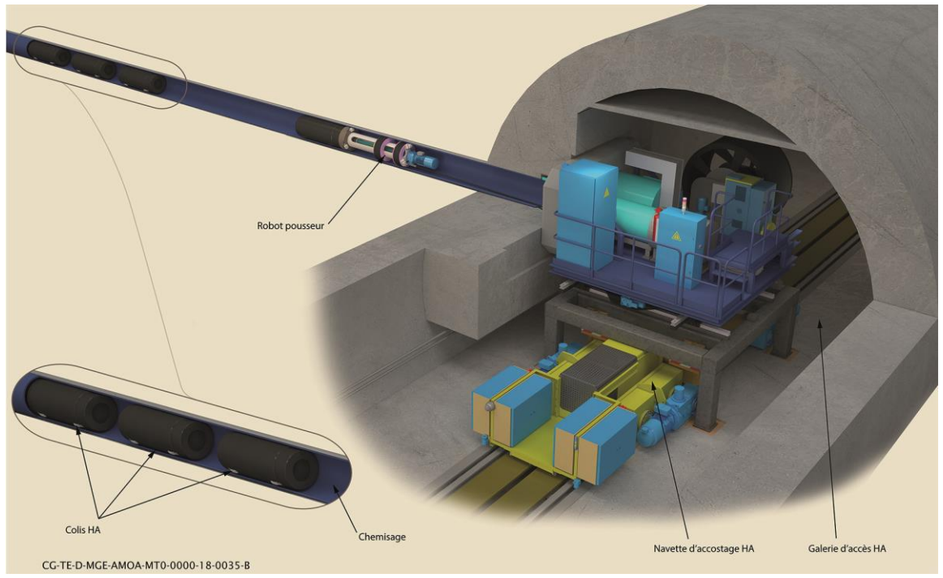


Figure 4-15 Illustration d'un alvéole de stockage de déchets HA

4.3.3 Les ouvrages de surface en zone descenderie

4.3.3.1 Présentation générale

La zone descenderie (ZD), d'une surface totale de 296 ha, dont 269 ha de surface remaniée, est dédiée à la réception, au contrôle et à la préparation des colis de déchets radioactifs avant leur transfert pour stockage dans l'installation souterraine. Elle comprend l'ensemble des surfaces accueillant les bâtiments, ouvrages, équipements et aménagements paysagers de la zone descenderie.

Afin de couvrir une partie des besoins des mesures de compensation environnementale localisées à ses abords directs, elle intègre une bande d'environ 24 hectares de milieux agricoles.

Elle se trouve à l'ouest du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne de l'Andra, dont elle est indépendante.

Son implantation concerne les communes définies au tableau suivant :

Tableau 4-1 Communes d'implantation de la zone descenderie

Département	Commune	Cigéo
Meuse (dép.55)	Bure	Zone descenderie
Haute-Marne (dép.52)	Gillaumé	Zone descenderie
	Saudron	Zone descenderie

La zone descenderie est organisée de la manière suivante :

- une zone dédiée à l'exploitation, comprenant notamment le bâtiment nucléaire et le terminal ferroviaire nucléaire accueillant les colis de déchets radioactifs ;
- une zone dite administrative regroupant les installations de soutien à l'exploitation et à la maintenance de la zone descenderie ainsi que des bâtiments administratifs pour l'ensemble du centre de stockage Cigéo ;
- une zone dédiée à l'accueil du public, regroupant en particulier un bâtiment d'accueil du public et un bâtiment dédié notamment à la conservation de la mémoire ;
- une zone utilités regroupant les installations permettant la production et la distribution d'énergie et de fluides sur la zone descenderie ;
- une zone permettant d'accueillir un terminal ferroviaire fret.

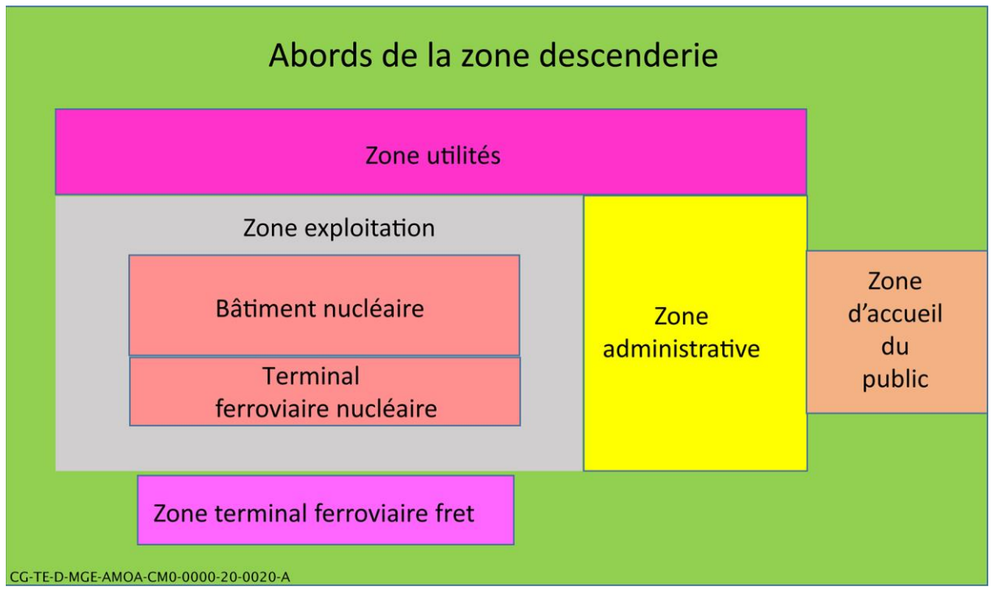


Figure 4-16 Représentation schématique de l'organisation de la zone descenderie

L'entrée de cette zone s'effectue par l'est à proximité du rond-point de la route départementale D60/960 desservant actuellement l'entrée du Laboratoire souterrain.

La figure ci-après présente l'organisation générale de la zone descenderie par zone fonctionnelle.

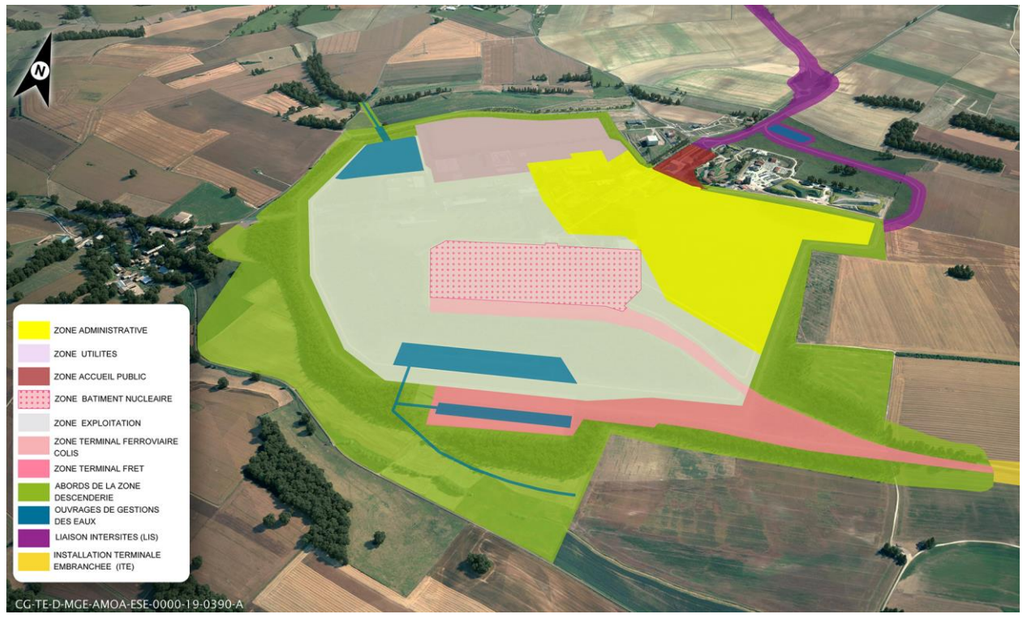


Figure 4-17 Organisation générale de la zone descenderie (ouvrages non représentés)

La zone descenderie prend place dans un territoire agricole ouvert. Elle est articulée autour du bâtiment nucléaire de surface.

La Figure 4-18 présente un exemple d'aménagement et d'insertion paysagère possibles de la zone descenderie.



Figure 4-18 Exemple d'aménagement et d'insertion paysagère possibles de la zone descenderie

Les ouvrages de la ZD sont intégrés dans des clôtures permettant d'en contrôler les accès et de leur apporter le niveau de protection approprié.

L'ensemble des installations est desservi par des cheminements piétons ainsi que par un réseau de voiries internes adaptées à des circulations à faible vitesse de véhicules légers et de poids lourds. La surface au sol globale de ces voiries, mais aussi des infrastructures ferroviaires internes à la zone (hors terminaux ferroviaires) et des plateformes associées est de l'ordre de 250 000 m^2.

Différentes aires de stationnement sont réparties sur la zone pour une surface de l'ordre de 19 000 m^2.

4.3.3.2 Les installations de la zone exploitation de la zone descenderie

Ces installations permettent d'assurer l'ensemble des opérations nécessaires à la prise en charge des colis de déchets radioactifs, depuis leur réception, jusqu'à leur transfert vers les infrastructures souterraines de stockage.



Figure 4-19 Localisation des installations liées à l'exploitation de la zone descenderie

Le terminal ferroviaire nucléaire et installations de chargement/déchargement

Les convois de colis de déchets expédiés par les producteurs arrivent sur le terminal ferroviaire nucléaire en zone descenderie *via* le réseau national et, sur les derniers kilomètres, par l'installation terminale embranchée (cf. Chapitre 2.6.2.8 du présent document). Ce terminal possède une surface au sol approximative de 35 000 m^2.

À leur arrivée, après un premier contrôle administratif, les wagons chargés sont stationnés sur le terminal avant d'être dirigés vers les installations nucléaires de préparation des colis. Ce transfert se fait par un engin de manœuvre (locotracteur électrique) qui reste sur le centre de stockage Cigéo. Le déchargement et le contrôle des emballages de transport contenant les colis de déchets sont effectués à l'intérieur de ces installations. Celles-ci permettent également l'accueil des convois routiers pour les emballages arrivant sur le site par transport routier. Un hangar de maintenance d'environ 500 m^2, proche des voies, permet la maintenance du locotracteur et la recharge de ses batteries.

Installations nucléaires de préparation des colis pour leur stockage

Ces installations nucléaires sont déployées en deux phases :

- un premier bâtiment dénommé « Exploitation phase 1 » (EP1), dédié au déchargement, au contrôle et à la préparation pour le stockage des colis de moyenne activité à vie longue (MA-VL) et des colis de haute activité à vie longue dégageant peu de chaleur (HA0). L'ordre de grandeur correspondant à son emprise au sol est de 32 000 m^2 ;
- un second, moins étendu, dénommé « Exploitation phase 2 » (EP2), dédié au déchargement, au contrôle et à la préparation pour le stockage des colis HA dits « thermiques » (HA1/HA2) qui ne seraient pris en charge qu'à l'horizon 2070-2080. Sa construction, assujettie à l'obtention des autorisations administratives adéquates, n'est envisagée qu'après plusieurs décennies d'exploitation. L'ordre de grandeur correspondant à sa surface au sol est de 20 000 m^2.

Ces bâtiments, d'une hauteur de l'ordre de 20 à 25 mètres, comprennent trois niveaux et sont partiellement enterrés. Ils sont reliés par une galerie à la tête de la descenderie colis (TDC) qui permet de descendre les colis vers les ouvrages souterrains de stockage.

Après passage par une filtration de très haute efficacité (filtres THE), les rejets gazeux issus de la ventilation de ces installations nucléaires de surface sont canalisés et rejetés par une cheminée de hauteur suffisante pour leur bonne diffusion (de l'ordre d'une quarantaine de mètres de hauteur à compter des voiries d'accès du bâtiment).

Le bâtiment « EP1 » est constitué des sous-ensembles ou ouvrages suivants (cf. Figure 4-20) :

- **L'ouvrage abritant le procédé nucléaire qui prend en charge les colis :**

  Il assure notamment le déchargement et le contrôle des emballages de transport à déchargement vertical, utilisés pour la livraison des colis. Les colis extraits de leur emballage de transport font l'objet de contrôles permettant de vérifier leur intégrité et la conformité des caractéristiques des colis reçus déclarées par leur producteur.

  Les colis, appelés « colis primaires » sont ensuite placés, lorsque nécessaire, dans un conteneur permettant de renforcer leur durabilité et/ou d'assurer un écran vis-à-vis des rayonnements émis par les déchets. Les conteneurs chargés de colis de déchets sont dénommés « colis de stockage » (cf. Figure 4-8).

  Un fois le colis de stockage prêt pour être descendu dans l'installation souterraine, il est introduit dans une hotte qui est acheminée *via* une galerie de l'ordre de 100 m de longueur vers l'entrée de la descenderie colis pour être placé sur le chariot du funiculaire. Le funiculaire assure sa descente vers les ouvrages souterrains de stockage. La tête de descenderie colis, distincte de l'EP1, représente une surface au sol complémentaire d'environ 7 000 m^2 pour une hauteur d'environ 25 m.
- **L'ouvrage des contrôles dits « de second niveau » (catégorie de contrôle de la qualité des colis de déchets) :**

  Les contrôles de second niveau ne sont pas systématiques. Ils sont effectués sur des colis primaires prélevés par sondage, après leurs déchargements de l'emballage de transport. Ces contrôles permettent notamment de vérifier la qualité des conteneurs et la nature des déchets contenus *via* une installation de radiographie X très haute énergie
- **La zone conventionnelle, non nucléaire :**

  Cette zone du bâtiment EP1 ne contient pas de colis de déchet. Elle abrite notamment des bureaux et la salle de conduite centralisée à partir de laquelle sont commandées les opérations nécessaires au fonctionnement (contrôle visuel et gestion des alarmes) des installations ;
- **L'ouvrage de déchargement des emballages de transport à déchargement horizontal appelé « ETH » (construit de façon différée aux ouvrages précités) :** Une fois déchargés, les contrôles et le conditionnement des colis sont repris dans l'ouvrage abritant le procédé.

Toutes les opérations sur les colis sont automatisées et suivies par vidéo-surveillance à partir de la salle de conduite centralisée.

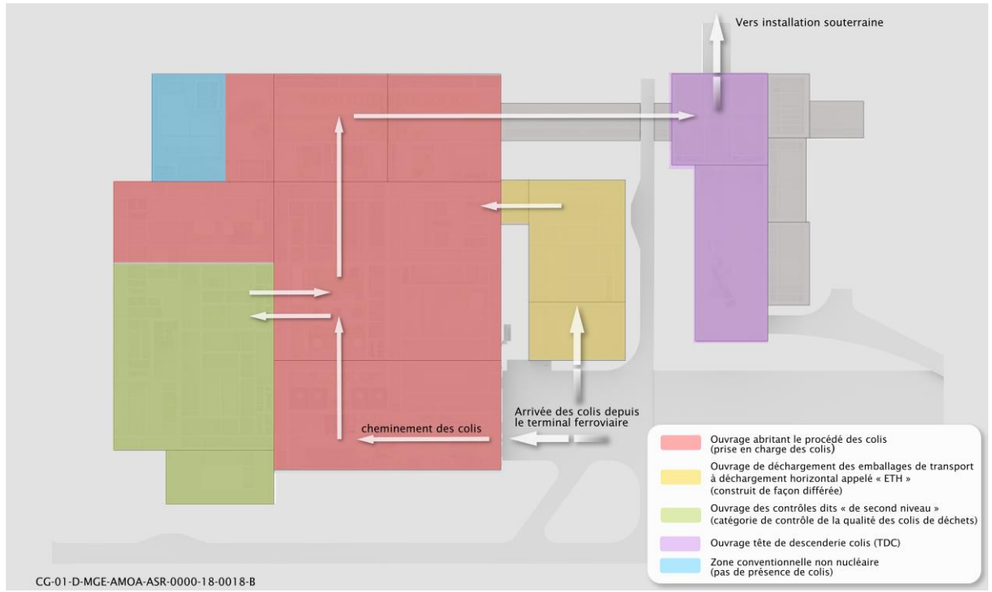


Figure 4-20 *Principe d'organisation spatiale du bâtiment EP1 et de la tête de descenderie colis*

L'insertion paysagère du bâtiment « EP1 » est assurée par des aménagements au sud et à l'ouest permettant ainsi une intégration de qualité de cette installation de surface par rapport aux villages de Saudron et de Gillaumé.

La configuration générale du bâtiment « EP1 » et son intégration dans l'environnement sont présentées dans l'exemple de vue présentée en figure 4-21.

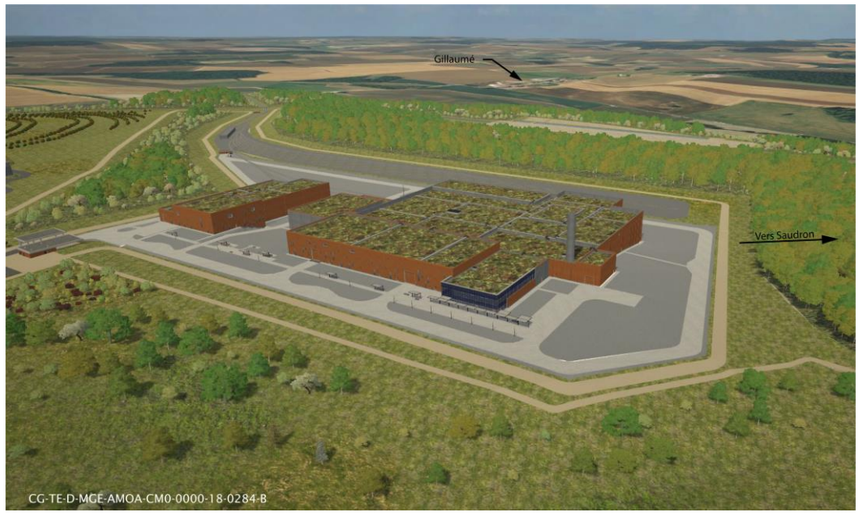


Figure 4-21 *Exemple de configuration possible du bâtiment EP1 et de la tête de descenderie*

Entrée de la descenderie de service

L'entrée de la descenderie de service est un bâtiment d'une surface au sol d'environ 2 000 m², pour une hauteur de l'ordre de 10 m, permettant notamment l'accès aux infrastructures souterraines (véhicules, maintenance, intervention…) et leur ventilation. Cet accès aux ouvrages souterrains est distinct de la descenderie colis.

Ouvrages de protection du site

La protection du site est assurée par un ensemble de dispositions comprenant notamment :

- un bâtiment dédié aux fonctions « sécurité » et « environnement », accueillant en particulier les équipes de pompiers et de protection physique, leurs locaux et les hangars nécessaires aux véhicules d'intervention. Cet ouvrage d'environ 15 m de hauteur possède une surface au sol d'environ 2 500 m². Ce bâtiment intègre également un laboratoire de surveillance de l'environnement en charge des analyses des prélèvements (air, eaux, terres…) effectués sur et autour des zones d'implantation du centre de stockage. Une station météorologique est installée à proximité de cet ouvrage ;



Figure 4-22 *Exemple de configuration possible du bâtiment dédié aux fonctions de sécurité et environnement*

- un réseau de postes de gardes et de clôtures permettant de gérer les accès. Globalement, ces postes de garde ont une surface au sol de quelques centaines de mètres carrés pour une hauteur d'environ 5 m ;
- les ouvrages amont de la lutte contre l'incendie (réseaux, réservoirs enterrés et locaux de localisation des pompes ou pomperie) pour une surface au sol globale d'environ 1 700 m² et d'une hauteur de 4 m pour les locaux pomperie ;
- une centrale de secours et un poste de distribution 20 kV en cas de coupure d'alimentation électrique. La surface au sol correspondante est de l'ordre de 2 200 m². Les groupes électrogènes fonctionnent avec du fioul stocké à proximité dans des réservoirs enterrés à double parois ;
- une paroi étanche, de profondeur moyenne d'environ 18 m, permettant de protéger des fluctuations de la nappe des Calcaires du Barrois : le bâtiment EP1, l'ouvrage de la tête de descenderie colis, l'entrée de la descenderie de service ainsi que le terminal ferroviaire nucléaire. À ce stade, ce dispositif est une option, parmi d'autres, dont la conception fait l'objet d'une démarche itérative en regard de l'objectif de protection des ouvrages.

Atelier et magasin support au bâtiment EP1

Ce bâtiment, d'environ 20 m de hauteur et de surface au sol approximative de 4 600 m², permet la maintenance et le stockage de pièces de rechanges nécessaires à certains équipements du procédé nucléaire.

Ouvrages liés au traitement des eaux de l'ensemble de la zone descenderie

Les principes de gestion des eaux pluviales et des effluents sont les suivants :

- Les eaux pluviales sont collectées et acheminées dans des bassins étanches de traitement, contrôlées et régulées avant rejet ;
- Les eaux de fond, comprenant des eaux d'exhaure et des eaux industrielles, sont pompées vers un bassin étanche, contrôlées et traitées. Ces eaux sont principalement recyclées puis stockées dans le réservoir des eaux issues du traitement des eaux usées pour réutilisation interne au centre de stockage Cigéo. L'excédent fait l'objet d'un rejet local régulé après contrôle.
- Les eaux usées, comprenant les eaux vannes (WC), les eaux grises (douches, lavabos, cuisine…) ainsi que les eaux conventionnelles de surface, sont contrôlées, traitées au sein de la station d'épuration de la zone descenderie puis stockées en réservoir (de capacité de l'ordre de 700 m³) pour réutilisation interne au centre de stockage Cigéo. L'excédent fait l'objet d'un rejet local régulé après contrôle.
- Les eaux de ruissellement provenant des zones à production possible de déchets nucléaires font l'objet d'une gestion distincte sans rejet liquide vers le milieu naturel local.

Le traitement des eaux de la zone descenderie est assuré par différents dispositifs :

- Une station d'épuration pour le traitement des eaux usées de surface au sol d'environ 1 600 m². Elle est composée d'installations de prétraitement (récupération mécanique des éléments les plus accessibles), d'installations de traitements biologiques (notamment par l'utilisation de disques biologiques, de systèmes de clarification des eaux et de séchage des boues) ainsi que de systèmes de filtration (charbon actif et membranaire) avant désinfection. Les eaux de fond transiteront quant-à-elles par des unités de traitement (liées principalement aux activités de travaux) permettant la séparation des matières en suspension et des hydrocarbures. Elles transitent ensuite par un bassin de décantation d'environ 1 200 m³ pour une surface de l'ordre de 1 000 m², avant traitement final. Ces traitements permettent leur utilisation sous forme d'eau recyclée ou leur rejet régulé dans le milieu extérieur après contrôle (rejet compatible avec les critères de bon état chimique et écologique des eaux superficielles).
- Des bassins qualitatifs nécessaires à la gestion des eaux pluviales recueillies sur les surfaces imperméabilisées ainsi que sur les surfaces non imperméabilisées collectées. Le total des surfaces imperméabilisées de la zone descenderie est de l'ordre de 320 000 m². Ces bassins, localisés au nord et au sud de la zone descenderie, permettent la collecte et le traitement des eaux pluviales avant rejet vers les bassins quantitatifs. Ils ont une capacité globale de stockage de l'ordre de 20 000 m³. En complément, un bassin spécifique de capacité d'environ 1 000 m³ récupère les eaux pluviales du terminal ferroviaire fret. La surface globale approximative de ces bassins est de 20 000 m².
- Des bassins quantitatifs avant rejet vers le milieu extérieur. Ces bassins permettent de réguler le débit d'eau rejeté dans le milieu extérieur. Ils ont une capacité globale de l'ordre de 90 000 m³. En complément, un bassin spécifique de capacité d'environ 10 000 m³ récupère les eaux pluviales du terminal ferroviaire fret. La surface globale approximative de ces bassins est de 48 000 m².
- Deux bassins complémentaires, dits de « confinement », de capacité globale d'environ 2 300 m³ et de surface d'environ 1 000 m². Ils sont positionnés sur le terminal ferroviaire nucléaire en amont des bassins qualitatifs sud de la zone descenderie.

GESTION DES EFFLUENTS RADIOACTIFS LIQUIDES

Aucun des procédés du centre de stockage Cigéo ne génère d'effluent radioactif liquide en fonctionnement normal et maintenance.

Les eaux de ruissellement provenant des zones à production possible de déchets radioactifs, potentiellement contaminées, feront l'objet d'une gestion distincte.

Le centre de stockage Cigéo ne prévoit aucun rejet d'effluent liquide issu de ces zones vers le milieu naturel local.

Les potentiels effluents liquides provenant des zones à production possible de déchets radioactifs seront isolés, éventuellement traités sur site, conditionnés et envoyés dans une filière agréée de traitement de déchets liquides à l'extérieur du site.

Tableau 4-2 *Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone exploitation de la zone descenderie*

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone exploitation	Terminal ferroviaire nucléaire		≈ 35 000
	Hangar de maintenance locotracteur		≈ 500
	Installations nucléaires de préparation des colis pour leur stockage :		
	• Exploitation phase 1 (EP1)	H Variant de 20 m à 25 m pour les ouvrages et ≈ 40 m pour la cheminée	≈ 32 000
	• Exploitation phase 2 (EP2)	H Variant de 20 m à 25 m pour les ouvrages et ≈ 40 m pour la cheminée	≈ 20 000
	• Tête de descenderie colis	H ≈ 25 m	≈ 7 000
	• Entrée de la descenderie de service	H ≈ 10 m	≈ 2 000
	Ouvrages de protection du site :		
	• bâtiment dédié aux fonctions de sûreté, sécurité et environnement	H ≈ 15 m	≈ 2 500
	• ensemble de postes de garde	H ≈ 5 m	Quelques centaines de m²/poste
	Ouvrages amont de la lutte contre l'incendie	H ≈ 4 m pour les locaux pomperies	≈ 1 700
	Centrale de secours et poste de distribution 20 kV		≈ 2 200
	Paroi étanche	Prof. moyenne ≈ 18 m	
	Atelier et magasin support au bâtiment EP1	H ≈ 20 m	≈ 4 600

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
	Ouvrages liés au traitement des eaux :		
	• Stations d'épuration		≈ 1 600
	• Réservoir de stockage des eaux recyclées	≈ 700 m³	Ouvrage enterré
	• Bassins de décantation des eaux de fond	≈ 1 200 m³	≈ 1 000
	• Bassins qualitatifs	≈ 21 000 m³	≈ 20 000
	• Bassins quantitatifs	≈ 100 000 m³	≈ 48 000
	• Bassins de confinement	2 300 m³	≈ 1 000

4.3.3.3 Les installations de la zone administrative de la zone descenderie

Ces installations participent au bon fonctionnement des activités liées à l'exploitation et à la maintenance de la zone descenderie.

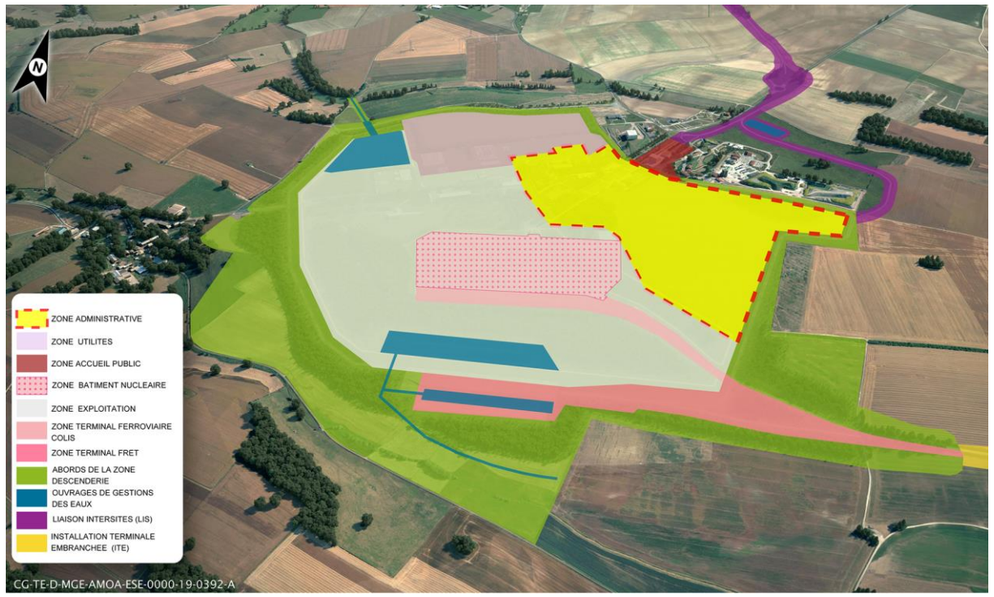


Figure 4-23 *Localisation des installations liées à la zone administrative de la zone descenderie*

Bâtiment tertiaire

Le bâtiment tertiaire regroupe les services administratifs communs aux deux sites du centre de stockage. Cet ouvrage permet de fait de limiter les emprises associées à la zone puits. Ce bâtiment de 20 m de hauteur environ est composé de cinq niveaux. Sa surface au sol approximative est de 1 400 m². Il est situé à proximité de l'entrée du site.

Centre de formation du personnel et d'essais des équipements

Le centre de formation du personnel et d'essais des équipements s'intègre dans les locaux de l'Espace technologique existant de surface au sol de 3 900 m² et de hauteur 13,50 m. Il permet la formation du personnel exploitant (télémanipulation, pilotage de caméras…) ainsi que les tests, qualifications et développements des automates nécessaires à l'exploitation.

Restaurant d'entreprise

La zone descenderie dispose d'un restaurant d'entreprise muni d'une cuisine de production. Cet ouvrage alimente aussi la salle du restaurant implantée sur la zone puits.

Le bâtiment occupe une surface au sol d'environ 2 000 m² et possède deux niveaux (environ 8 m de hauteur totale). Il se trouve positionné au centre de cette zone pour en faciliter les accès.

Centre médical

Le centre médical, d'une surface au sol d'environ 600 m² et de 6 m de hauteur, regroupe les fonctions « Médecine du travail » et « Infirmerie/premiers secours ». Il est associé à une hélisurface positionnée à proximité.

Atelier de maintenance conventionnelle de surface

Ce bâtiment, regroupant atelier et magasin, permet la maintenance dite « courante » et le stock principal des pièces de rechanges. Il abrite également les moyens nécessaires à l'entretien des bâtiments, des voiries et des espaces verts.

Ce bâtiment, d'environ 15 m de hauteur, est composé de trois niveaux. Sa surface au sol approximative est de 2 500 m².

Station-service carburant

Cet ouvrage permet le ravitaillement des véhicules légers. Il est constitué d'une aire bétonnée d'environ 500 m² équipée de cuves enterrées doubles parois et d'un séparateur à hydrocarbures.

Tableau 4-3 *Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone administrative de la zone descenderie*

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone administrative	Bâtiment tertiaire	H ≈ 20 m	≈ 1 400
	Centre de formation du personnel et d'essais des équipements	H = 13.50	= 3 900
	Restaurant d'entreprise	H ≈ 8 m	≈ 2 000
	Centre médical	H ≈ 6 m	≈ 600
	Atelier de maintenance et magasin associés aux domaines des services conventionnels de surface	H ≈ 15 m	≈ 2 500
	Station-service carburant	-	≈ 500

4.3.3.4 Les installations de la zone d'accueil du public de la zone descenderie

Ces installations regroupent les espaces d'information destinés à l'accueil du public.

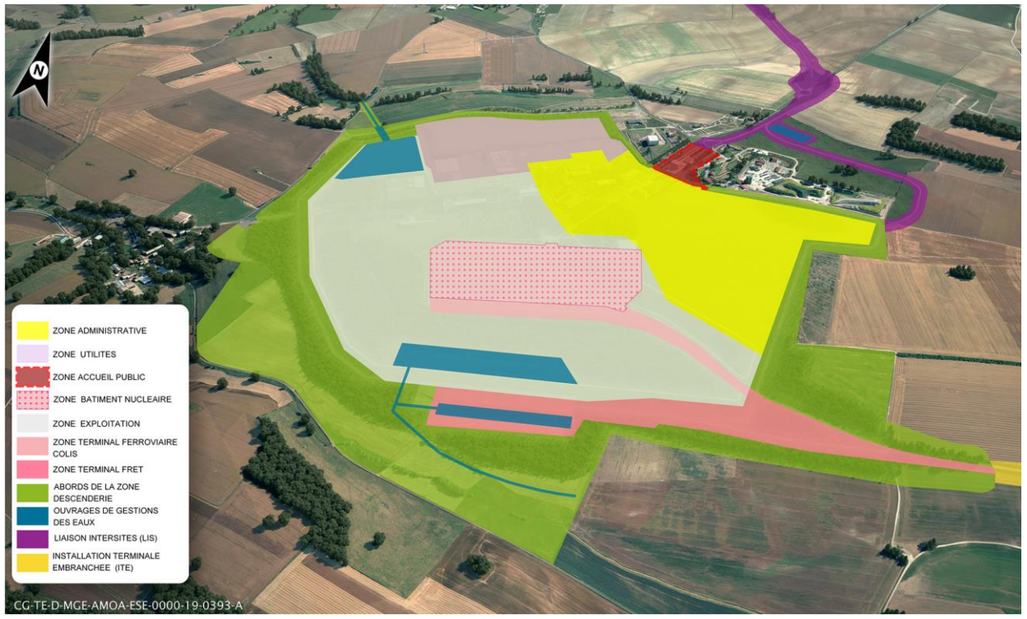


Figure 4-24 Localisation des installations liées à l'accueil du public

Ces installations sont regroupées dans un ensemble de bâtiments regroupant le bâtiment d'accueil du public et le bâtiment « mémoire ».

Le bâtiment d'accueil du public est destiné à recevoir un public composé de visiteurs (riverains, presse…), ainsi que des scientifiques et des professionnels dans un cadre de recherches ou de conférences. Ce bâtiment sert de façon générale à l'information autour du centre de stockage Cigéo (journée porte ouverte, stations pédagogiques…).

Le bâtiment « mémoire » est destiné notamment à la conservation et la consultation des archives historiques et intermédiaires de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), en redondance de sécurité par rapport aux versements également effectués aux archives nationales. Les parties du bâtiment « mémoire » abritant les archives historiques et les dispositifs mémoriels seront conservés le plus longtemps possible après la phase de démantèlement et de fermeture sans limite de durée présagée (*a priori* durant plusieurs centaines d'années), dans le cadre de la phase de surveillance du centre de stockage Cigéo.

Cet édifice unique d'environ 30 m de hauteur est composé de six niveaux. Sa surface au sol approximative est de 4 000 m^2. Un parking y est associé afin d'accueillir les visiteurs. Il est identifiable depuis le rond-point d'accès au site. L'accès au bâtiment se fait par des allées piétonnes depuis le parc de stationnement visiteurs.

La configuration de cet ensemble de bâtiments et son intégration dans l'environnement sont présentées dans l'exemple d'illustration de la figure 4-25.



Figure 4-25 Exemple de configuration possible du bâtiment d'accueil du public

Tableau 4-4 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone d'accueil du public de la zone descenderie

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m^2)
Zone d'accueil du public	Bâtiment d'accueil du public	H ≈ 30 m	≈ 4 000
	Bâtiment « Mémoire »		

4.3.3.5 Les installations de la zone utilités de la zone descenderie

La zone utilités regroupe les installations permettant la production et la distribution d'énergie et de fluides (eau potable, réseaux de chaleurs, eau « glacée » …) pour la zone descenderie. Associée à cette zone se trouve également une zone dite « entreprises » permettant notamment d'accueillir les entreprises extérieures en charge de la maintenance des installations.

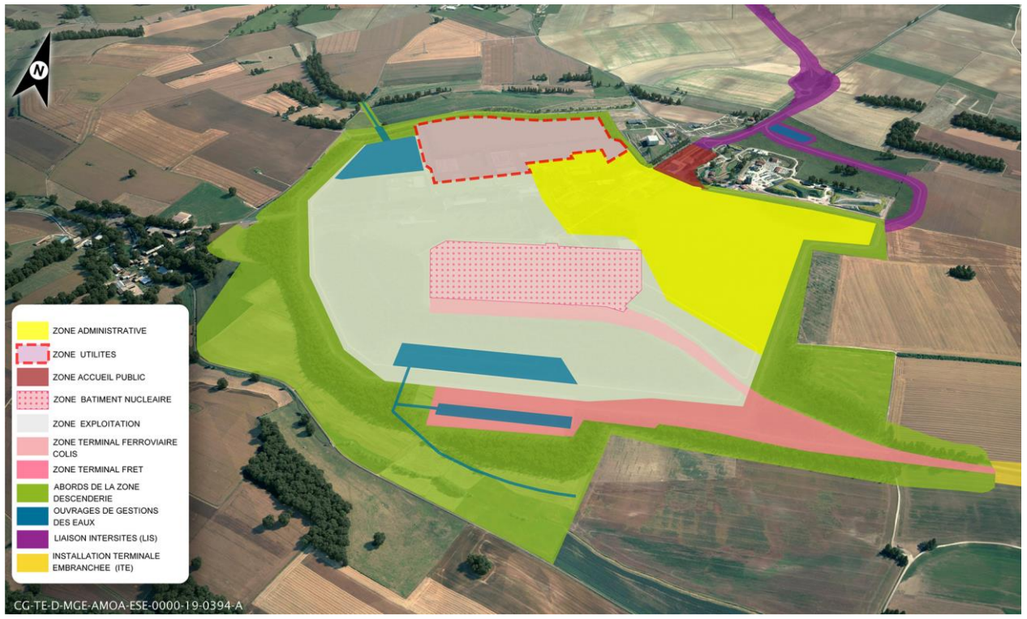


Figure 4-26 Localisation de la zone utilités

Les groupes d'ouvrages présents dans la zone utilités sont décrits ci-après.

Transformation et distribution électrique

Le poste de transformation et de distribution électrique sur la zone descenderie permet d'abaisser la tension de l'électricité fournie par RTE de 90 kV à 20 kV pour alimenter les différentes installations de la zone descenderie. Cet ouvrage maçonné d'une hauteur approximative de 7 m possède une surface au sol d'environ 1 600 m².

Un poste de livraison électrique (90 kV), sous responsabilité de RTE, est nécessaire en amont du poste de transformation et de distribution évoqué. Il est positionné dans la zone utilité et possède une surface au sol d'environ 12 000 m² pour une hauteur d'environ 10 m.

Ouvrages participants au fonctionnement du réseau d'eau potable

L'eau potable arrive sur site *via* une canalisation enterrée. Le point de livraison est situé en bordure de site. L'eau potable est ensuite dirigée vers le réseau site ou vers un réservoir enterré en béton de l'ordre de 150 m³. L'eau potable est ensuite distribuée sur site au moyen de pompes situées dans un local surpresseur. Cette capacité de stockage d'eau potable pourra éventuellement être revue à la hausse, dans la suite des études, afin de compléter le dispositif permettant de pallier une défaillance éventuelle de l'alimentation en eau du centre de stockage. Il est à noter, que pour les usages d'eau non potable, différents réservoirs de stockage des eaux recyclées sont également prévus pour l'approvisionnement des installations du centre de stockage (cf. Chapitre 4.3.3.2 du présent document).

Bâtiments de production des utilités

Les bâtiments de production des utilités permettent :

- la production d'eau chaude notamment pour le chauffage des locaux. Cette production se fait grâce à une chaudière. Le choix du type de chaudière est à l'étude en lien avec le territoire. Une chaudière biomasse est envisagée. Du gaz peut être utilisé afin de s'adapter aux variations de consommation et d'assurer la sûreté de fonctionnement. Des attentes permettant un éventuel raccordement à une canalisation de biogaz venant du territoire ainsi qu'un poste de raccordement à un réseau de chaleur (chambre à vanne) sont envisagées ;
- la production d'eau « glacée » pour le refroidissement de la ventilation. L'évacuation des calories des groupes froids se fait par l'intermédiaire de refroidisseurs à circuit fermé (pas d'interface entre le fluide à refroidir et l'air ambiant).
- les sous-stations et équipements électriques nécessaires à la production d'eau chaude pour le chauffage et d'eau « glacée » pour le refroidissement.

La surface au sol globale de ces installations représente environ 2 600 m² pour des hauteurs variant de 4 m à 10 m. Des cheminées de l'ordre d'une dizaine de mètres de hauteur sont nécessaires.

Déchetterie industrielle conventionnelle

Cet ouvrage recueille les déchets conventionnels produits par le centre de stockage Cigéo. Il permet la collecte, le tri, le conditionnement, le stockage temporaire et la préparation au transport des déchets conventionnels vers les filières adaptées.

La plateforme d'accueil correspondante représente une surface au sol maximale de 13 000 m².

Tableau 4-5 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone utilités de la zone descenderie

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone « utilités »	Poste de livraison RTE (90 KV)	H ≈ 10 m	≈ 12 000
	Transformation et distribution électrique	H ≈ 7 m	≈ 1 600
	Ouvrages participants au fonctionnement du réseau d'eau potable	≈ 150 m³	Ouvrages enterrés
	Bâtiments de production des utilités : • production d'eau chaude • production d'eau « glacée » • sous-stations et équipements électriques	H variables ≈ de 4 m à 10 m	≈ 2 600
	Déchetterie industrielle conventionnelle		≈ 13 000

4.3.3.6 Les installations de la zone accueillant le terminal ferroviaire fret de la zone descenderie

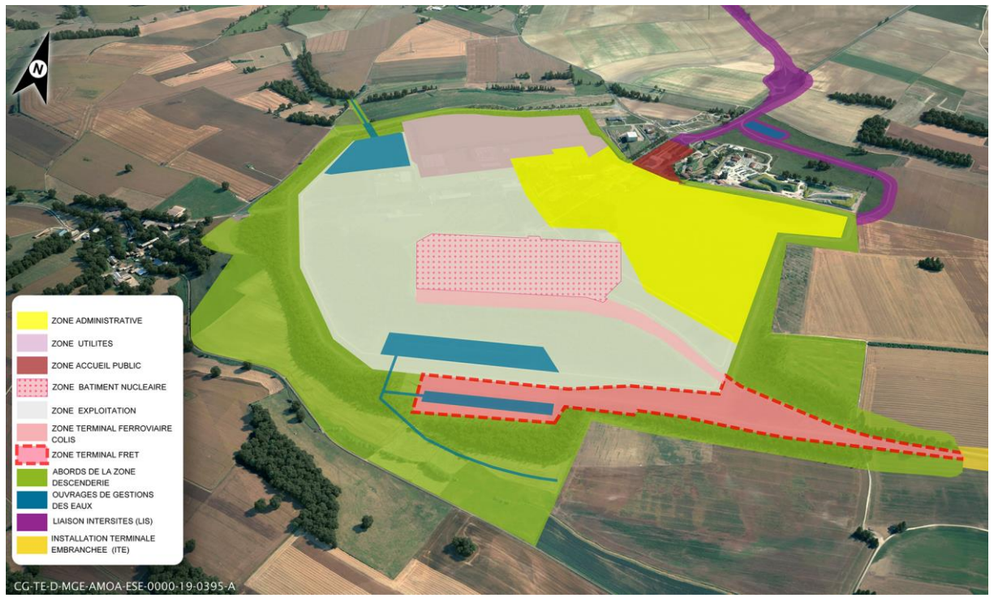


Figure 4-27 *Localisation de la zone terminal ferroviaire fret de la zone descenderie*

Le terminal ferroviaire fret est utilisé pour l'acheminement de matières premières et matériels pour les phases de construction initiale, les travaux de déploiement des installations souterraines, le démantèlement et la fermeture définitive.

Ce terminal est construit de fait dès les premières phases de chantier afin de limiter le transit sur les voiries du domaine public.

Ce terminal, de surface au sol approximative de 35 000 m², est desservi *via* l'installation terminale embranchée. Il est implanté au sud de la zone descenderie et du terminal ferroviaire nucléaire d'accueil des colis. Une surface d'environ 6 500 m² complémentaire est nécessaire pour la gestion du stock tampon des matériaux réceptionnés avant transfert.

Le déchargement, le stock tampon et le transfert sont assurés :

- par des convoyeurs acheminant les matériaux en zone descenderie ainsi que vers la zone puits en utilisant la bande transporteuse semi-enterrée de la liaison intersites ;
- par la piste routière poids lourds de la liaison intersites.

Tableau 4-6 *Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone accueillant le terminal ferroviaire fret de la zone descenderie*

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone accueillant le terminal ferroviaire fret	Terminal ferroviaire fret		≈ 35 000
	Gestion du stock tampon des matériaux		≈ 6 500

4.3.3.7 Les volumes de terrassement et principaux ouvrages en terre en zone descenderie

Les volumes de terrassement en zone descenderie proviennent essentiellement de la réalisation lors des aménagements préalables des plateformes d'accueil des ouvrages de surface et du nivellement des voiries.

Pendant cette phase, les mouvements de terres de la zone descenderie mobilisent un volume de terre en place de l'ordre de 5 millions de m³. Les phases suivantes (construction initiale et fonctionnement) représentent quant-à-elles un volume de l'ordre de 1,6 millions de m³. Ces mouvements de terre permettent globalement d'obtenir un équilibre déblais/remblais[137] pour le nivellement général de la zone.

Les principaux ouvrages en terre (cf. Figure 4-28) correspondent :

- au nivellement des bassins nord de la zone exploitation (1) pouvant entrainer jusqu'à +10 m de remblais ;
- aux plateformes au droit de l'actuelle route départementale D60/960 (2) entrainant ponctuellement des remblais de l'ordre de +6 m ;
- à la zone du bâtiment nucléaire (3) amenant des déblais allant de -6 m à -10 m ;
- au terminal ferroviaire fret entraînant une dizaine de mètres de déblais (4). Dans ce secteur, quelques déblais très ponctuels peuvent atteindre – 17 m ;
- au merlon (5) de la zone exploitation qui amène des déblais de l'ordre de -10 m et des remblais pouvant aller jusqu'à +15 m.

[137] Les remblais sont notés en hauteur positive (+) et les déblais en profondeur négative (-).

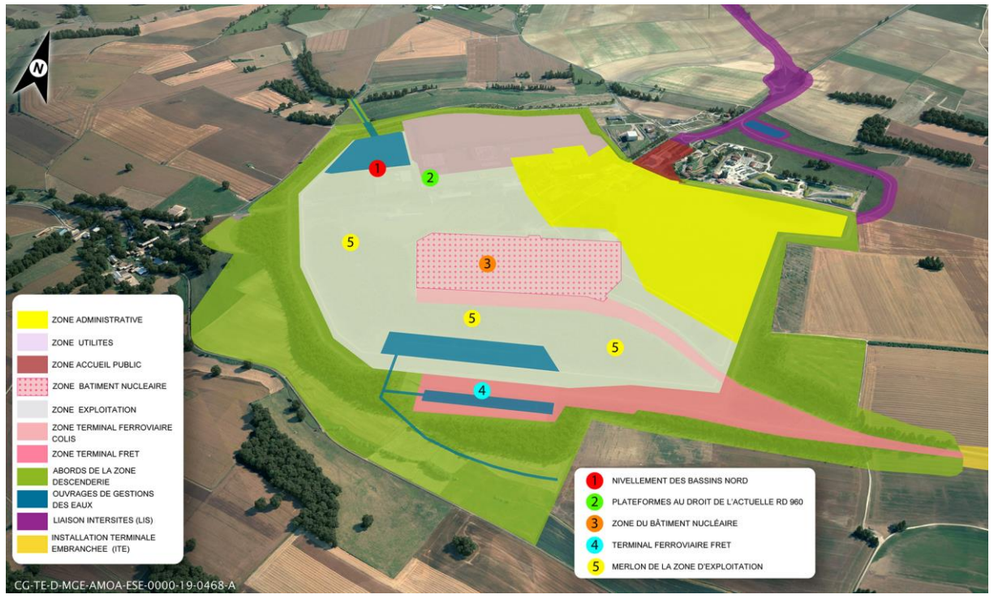


Figure 4-28 Identification des principaux ouvrages en terre en zone descenderie

Les bilans d'utilisation des terres déblais/remblais sont présentés au chapitre 6.1.3 du présent document.

4.3.3.8 Récapitulatif des caractéristiques des ouvrages les plus importants de la zone descenderie

Tableau 4-7 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone descenderie

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone exploitation	Terminal ferroviaire nucléaire		≈ 35 000
	Hangar de maintenance locotracteur		≈ 500
	Installations nucléaires de préparation des colis pour leur stockage :		
	• Exploitation phase 1 (EP1)	H Variant de 20 m à 25 m pour les ouvrages et ≈ 40 m pour la cheminée	≈ 32 000
	• Exploitation phase 2 (EP2)	H Variant de 20 m à 25 m pour les ouvrages et ≈ 40 m pour la cheminée	≈ 20 000
	• Tête de descenderie colis	H ≈ 25 m	≈ 7 000
	• Entrée de la descenderie de service	H ≈ 10 m	≈ 2 000
	Ouvrages de protection du site :		
	• bâtiment dédié aux fonctions de sûreté, sécurité et environnement	H ≈ 15 m	≈ 2 500
	• ensemble de postes de garde	H ≈ 5 m	Quelques centaines de m²/poste
	Ouvrages amont de la lutte contre l'incendie	H ≈ 4 m pour les locaux pomperies	≈ 1 700
	Centrale de secours et poste de distribution 20 kV		≈ 2 200
	Paroi étanche	Prof. moyenne ≈ 18 m	
	Atelier et magasin support au bâtiment EP1	H ≈ 20 m	≈ 4 600
	Ouvrages liés au traitement des eaux :		
	• Stations d'épuration		≈ 1 600
	• Réservoir de stockage des eaux recyclées	≈ 700 m³	Ouvrage enterré
	• Bassins de décantation des eaux de fond	≈ 1 200 m³	≈ 1 000
	• Bassins qualitatifs	≈ 21 000 m³	≈ 20 000
	• Bassins quantitatifs	≈ 100 000 m³	≈ 48 000
	• Bassins de confinement	2 300 m³	≈ 1 000
Zone administrative	Bâtiment tertiaire	H ≈ 20 m	≈ 1 400
	Centre de formation du personnel et d'essais des équipements	H = 13.50	= 3 900
	Restaurant d'entreprise	H ≈ 8 m	≈ 2 000
	Centre médical	H ≈ 6 m	≈ 600
	Atelier de maintenance et magasin associés aux domaines des services conventionnels de surface	H ≈ 15 m	≈ 2 500
	Station-service carburant	-	≈ 500
Zone d'accueil du public	Bâtiment d'accueil du public	H ≈ 30 m	≈ 4 000
	Bâtiment « Mémoire »		
Zone « utilités »	Poste de livraison RTE (90 KV)	H ≈ 10 m	≈ 12 000
	Transformation et distribution électrique	H ≈ 7 m	≈ 1 600
	Ouvrages participants au fonctionnement du réseau d'eau potable	≈ 150 m³	-
	Bâtiments de production des utilités :		

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
	• production d'eau chaude • production d'eau « glacée » • sous-stations et équipements électriques	H variables ≈ de 4 m à 10 m	≈ 2 600
	Déchetterie industrielle conventionnelle		≈ 13 000
Zone accueillant le terminal ferroviaire fret	Terminal ferroviaire fret		≈ 35 000
	Gestion du stock tampon des matériaux		≈ 6 500
Aires de stationnement	Réparties sur le site		≈ 19 000
Voiries et plateformes associées	Réparties sur le site		≈ 250 000

4.3.4 Les ouvrages de surface en zone puits

4.3.4.1 Présentation générale

La zone puits (ZP), d'une surface totale à terme de 202 ha dont 184 ha de surface remaniée, est dédiée principalement aux installations de soutien aux activités souterraines de stockage et de travaux (déploiement progressif des zones de stockage). Elle est implantée dans la partie sud du bois Lejuc, sur un terrain naturellement incliné vers l'est, vers la vallée de l'Ormançon.

Son implantation concerne les communes définies au tableau suivant :

Tableau 4-8 Communes d'implantation de la zone puits

Département	Commune	Cigéo
Meuse (55)	Mandres-en-Barrois	Zone puits
	Bonnet	Zone puits (à compter de la seconde surface de dépôt des matériaux excavés quelques années après la mise en service du centre de stockage)

La zone puits est organisée de la manière suivante :

- une zone dédiée aux installations de soutien aux activités de travaux de creusement des installations souterraines et au dépôt des déblais d'excavation du Callovo-Oxfordien appelée zone puits travaux et verses, comprenant notamment :
  - ✓ le puits permettant l'extraction d'air de la zone souterraine en travaux ;
  - ✓ le puits assurant l'apport d'air frais et le transfert du personnel vers la zone souterraine en travaux ;
  - ✓ le puits de transfert des matériels et matériaux ;
  - ✓ la zone de gestion des déblais d'excavation du Callovo-Oxfordien déposés sous forme de « verses » notamment pour la mise en réserve des matériaux utiles à la fermeture du stockage ;
- une zone dédiée à l'exploitation, comprenant notamment :
  - ✓ le puits permettant l'extraction d'air de la zone souterraine en exploitation ;
  - ✓ le puits assurant l'apport d'air frais et le transfert du personnel, des équipements, matériels et matériaux vers la zone souterraine en exploitation ;
- une zone administrative regroupant les installations de soutien à l'exploitation et à la maintenance de la zone puits ;
- une zone utilités regroupant les installations permettant la production et la distribution d'énergie et de fluides de la zone puits et de l'installation souterraine.

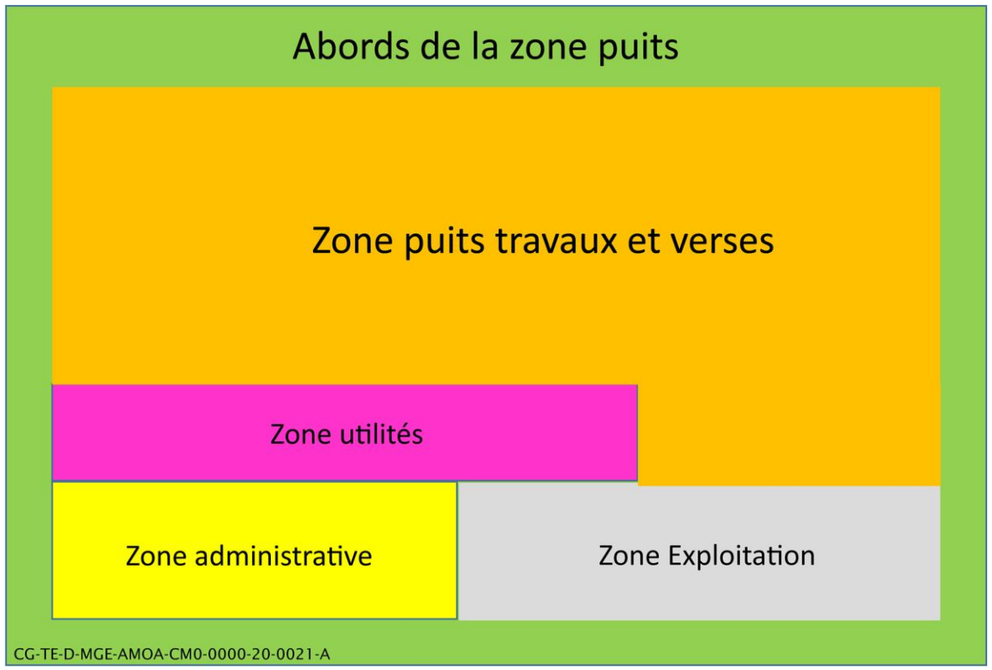


Figure 4-29 Représentation schématique de l'organisation de la zone puits

L'accès à la zone puits s'effectue *via* une route faisant partie de la liaison intersites (cf. Chapitre 4.3.6 du présent document), depuis la route départementale D60/960. En cas de situation exceptionnelle, une voie de secours privée située au sud de la zone puits permet de rejoindre cette route.

La figure 4-30 présente l'organisation générale de la zone puits par zone fonctionnelle.



Figure 4-30 Organisation générale de la zone puits (ouvrages non représentés)

La figure 4-31 présente un exemple d'aménagement et d'insertion paysagère possibles de la zone.



Figure 4-31 Exemple d'aménagement et d'insertion paysagère possibles de la zone puits (vision en fin de phase de fonctionnement)

Les ouvrages de la zone puits sont intégrés dans des secteurs clôturés permettant d'assurer les procédures de contrôle et d'apporter le niveau de protection approprié.

L'ensemble des installations est desservi par des cheminements piétons ainsi que par un réseau de voiries internes adaptées à des circulations à faible vitesse de véhicules légers et de poids lourds. La surface globale de ces voiries et des plateformes associées est de l'ordre de 160 000 m^2. L'aire de stationnement principale est située à l'entrée de la zone descenderie.

Aucun colis de déchets radioactifs ne transite sur la zone puits.

Lors de la première phase de construction, la surface de la zone puits est de l'ordre de 136 ha de surface remaniée. Elle inclut la surface de l'ordre de 60 ha nécessaire pour la gestion des matériaux excavés (Z1). Quelques années après la mise en service du centre stockage, une seconde surface de gestion des déblais (Z2) d'environ 48 ha est nécessaire. La zone puits est étendue vers le nord (cf. Chapitre 4.3.4.2 du présent document).

Pour la gestion du Callovo-Oxfordien excavé par les travaux de réalisation des derniers ouvrages souterrains, une troisième zone (Z3), d'environ 39 ha de surface remaniée, pourrait devoir être aménagée dans plusieurs décennies en cas de non-disponibilité dans le temps des filières de valorisation. Cette zone, représentée sur la figure 4-5, n'est pas reportée sur les illustrations de la zone puits du présent chapitre. Elle est cependant prise en compte dans la présente Étude d'impact, en particulier pour l'évaluation des incidences.

4.3.4.2 Les installations de la zone « puits travaux et verses » de la zone puits

La zone « puits travaux et verses » de la zone puits regroupe les ouvrages de soutien aux activités souterraines de travaux et de gestion des déblais d'excavation (verses). La présente la localisation des installations de la zone puits travaux et verses.



Figure 4-32 Localisation des installations de la zone puits travaux et verses

Le principe retenu est de déployer progressivement les ouvrages souterrains, par tranches successives, en fonction des besoins de stockage des colis de déchets radioactifs. Des travaux de creusement et d'équipements des quartiers de stockage sont donc effectués pendant la phase de fonctionnement du centre.

Les activités de travaux sont physiquement séparées des activités liées à l'exploitation nucléaire, aussi bien en surface qu'au fond.

a) Les puits

Trois puits de la zone puits travaux et verses sont dédiés aux activités souterraines de travaux :

- Le puits dénommé « ventilation air frais travaux » (VFT) permet l'apport d'air frais et le transfert par ascenseur du personnel vers la partie en travaux de l'installation souterraine.

  Ce puits comprend un chevalement (structure positionnée au-dessus du puits) d'une surface au sol de l'ordre de 400 m² et d'une hauteur d'environ 45 m au-dessus de la plateforme. Cet ouvrage intègre la machinerie de l'ascenseur et de la cage de secours, ainsi qu'une cabine de contrôle et un accès aux magasins pour l'acheminement du petit matériel.

  Des vestiaires et une lampisterie permettent la mise à disposition des équipements de sécurité du personnel avant transfert au fond. Un espace détente ainsi qu'un cheminement couvert relient cet ensemble. La surface au sol correspondante est de l'ordre de 2 500 m² pour une hauteur d'environ 5 m.

  L'usine de ventilation associée, de surface au sol d'environ 1 600 m², est semi-enterrée. Elle est composée de deux niveaux pour une hauteur d'environ 8 m. Elle comprend les unités de ventilation (traitement de l'air et soufflage) et les locaux techniques.

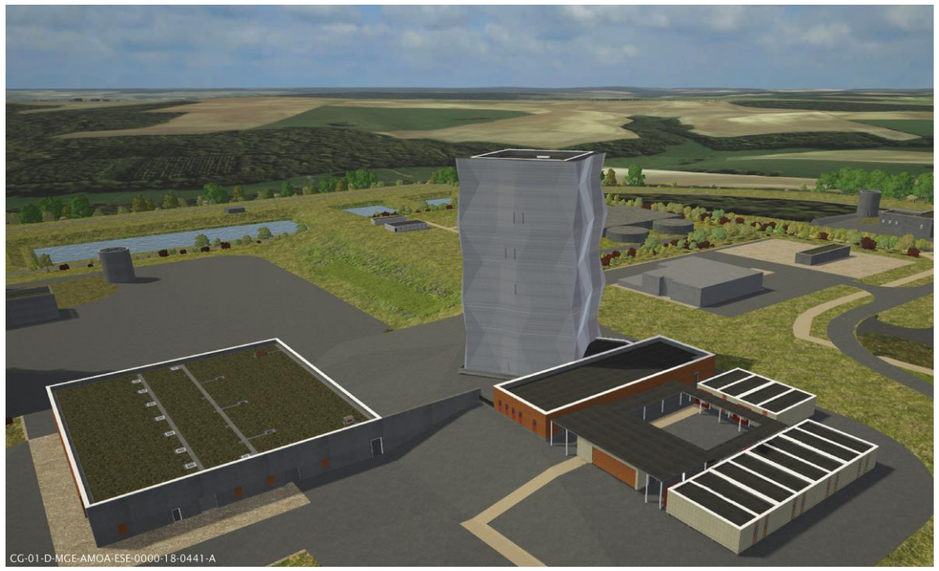


Figure 4-33 Exemple de configuration possible du puits « ventilation air frais travaux » (VFT)

- Le puits dénommé « ventilation air vicié travaux » (VVT) canalise l'extraction d'air de la zone souterraine en travaux.

  Le bâtiment au-dessus de ce puits, d'environ 400 m² de surface au sol et d'une hauteur de l'ordre de 8 m, abrite les équipements d'inspection et de maintenance du puits.

  L'usine de ventilation associée, d'environ 1 200 m² de surface au sol, est construite sur deux niveaux pour une hauteur d'environ 8 m. Elle comprend les unités de ventilation (aspiration) et de récupération de chaleur et les locaux techniques. Elle est reliée à la cheminée de rejet, d'une hauteur d'environ 10 m, contenant l'instrumentation de surveillance des rejets ;
- Le puits dénommé « matériels et matériaux travaux » (MMT) permet de transférer les équipements et les matériels lourds ainsi que les matériaux nécessaires aux travaux souterrains vers la partie en travaux de l'installation souterraine. Il permet aussi de remonter vers la surface les déblais issus des creusements.

Il est composé d'un ouvrage de transfert d'environ 500 m² de surface au sol pour une hauteur approximative de 12 m ainsi que d'un chevalement d'environ 60 m de hauteur pour environ 400 m² de surface.



Figure 4-34 Exemple de configuration possible du puits « matériels et matériaux travaux » (MMT)

- l'atelier de maintenance et magasin associés aux activités travaux, bâtiment implanté à proximité du puits matériels et matériaux travaux d'environ 10 m de hauteur et d'environ 1 200 m² de surface au sol. Il assure le stockage de pièces de rechange et la maintenance des équipements nécessaires à la construction souterraine ;
- les zones de stockage matériels/matériaux pour la conservation à ciel ouvert de matériel ou de matériaux utiles aux travaux et qui ne nécessitent pas d'être protégés des conditions climatiques extérieures. La surface au sol de ces zones est de l'ordre de 20 000 m² ;
- les aires techniques/aires de stationnement, deux parkings poids lourds présents sur la zone, chacun positionné à proximité d'une aire de carburant et d'une aire de lavage. La surface au sol de ces aires est d'environ 1 600 m². La surface au sol des aires de stationnement est d'environ 2 500 m² ;
- les ouvrages de protection du site, réseau de postes de garde et de clôtures permettant de gérer l'accès aux différents périmètres. Globalement, ces postes de garde ont une surface au sol pouvant aller de quelques centaines de mètres carrés à 1 000 m² pour une hauteur d'environ 5 m.

b) Gestion des matériaux excavés

Les déblais du Callovo-Oxfordien dans lequel sont implantés les ouvrages de stockage, excavés progressivement lors des travaux de creusement, sont remontés à la surface et gérés sur la zone des verses située au nord de la zone puits.

Parmi les déblais du Callovo-Oxfordien, on distingue :

- les verses dites « vives » qui serviront, après leur traitement, de matériau de remblai pour l'obturation et la fermeture définitive de l'installation souterraine ;
- les verses dites « mortes », qui ne seront pas réutilisées pour la fermeture du stockage.

Afin de réduire la surface à défricher du bois Lejuc en vue d'y déposer les verses et d'éviter le corridor écologique du SRCE, l'Andra prévoit de valoriser les verses « mortes » dans des filières extérieures au centre de stockage. La surface envisagée pour la zone d'implantation des verses permet principalement :

- la gestion des verses vives (environ 40 % du volume extrait total) ;
- la gestion des matériaux terreux réutilisés progressivement pour le couvert végétal des verses ;
- la gestion des flux de verses mortes qui sont évacuées du site pour valorisation (cf. Ci-dessous).

La Figure 4-35 permet de visualiser la zone de gestion de matériaux en verses. La zone Z1 (surface d'environ 60 ha) permettant l'implantation des verses vives est nécessaire dès le début de la construction initiale et la zone Z2 (surface de 48 ha) sera aménagée ultérieurement pour gérer les déblais issus de creusement de l'extension de l'installation souterraine. La surface des verses (bassins compris) représente une surface totale de 108 ha (Z1 + Z2). Le volume global de Callovo-Oxfordien excavé déposé et transitant sur ces plateformes correspond à environ 11 000 000 m³.



Figure 4-35 Plan de principe de localisation du déploiement des verses en zone puits

Dans l'éventualité où les filières de valorisation des verses n'aboutiraient pas ou si leur pérennité venait à être remise en question pendant le fonctionnement du centre, l'Andra devrait avoir recours à une extension de la zone des verses à l'horizon 2070-2080. Cette opération nécessiterait éventuellement, sous réserve du contexte réglementaire à cette échéance, le dépôt d'une demande d'enquête publique préalable à une déclaration d'utilité publique modificative. Afin de couvrir cette incertitude et d'évaluer l'ensemble des impacts potentiels de son projet, l'Andra étudie et présente, dans la présente Étude d'impact, les incidences maximales du centre de stockage Cigéo prenant en compte une augmentation de 39 hectares de surface remaniée de la zone d'implantation des verses.

c) Mode opératoire de mise en œuvre pour la gestion des matériaux excavés

Les matériaux excavés sont regroupés en surface sur des aires de conservation provisoire, situées à proximité des points d'extraction, puis acheminés vers la zone de gestion par bandes transporteuses. Si nécessaire, ils sont homogénéisés (concassage, tri) dans un bâtiment dédié. Cet ouvrage, de surface au sol d'environ 8 000 m² et de hauteur approximative de 18 m permet également d'assurer un stock tampon en cas de maintenance des bandes transporteuses.

Compte tenu de la topographie du site présentant un dénivelé vers la vallée de l'Ormançon, la zone d'implantation des verses est aménagée sur des plateformes étagées. Afin d'optimiser cette mise en dépôt et de réduire la surface totale de la zone, ces plateformes sont munies d'une digue sur les côtés nord, ouest et sud. La hauteur maximale actuellement envisagée pour les verses est d'environ 20 mètres. Une couverture végétalisée est installée au fur et à mesure afin de protéger le Callovo-Oxfordien excavé des intempéries et de réduire les impacts environnementaux.

Une fois les verses vives réutilisées pour refermer l'installation (après 100 ans à 150 ans de fonctionnement en fonction des décisions prises alors), les plateformes peuvent faire l'objet de travaux écologiques pour reconstituer un milieu naturel s'intégrant dans l'environnement.

La réalisation des aménagements nécessaires à la gestion des verses (digue, bassins) sur la zone puits est étendue graduellement, afin de limiter le défrichement et la consommation d'emprise foncière dans le temps au juste nécessaire.

d) Ouvrages liés au traitement des eaux de la zone puits travaux et verses

Comme évoqué précédemment, les verses déposées sont progressivement recouvertes de matériaux terreux et de végétation. Sur les parties recouvertes, les eaux pluviales s'infiltrent dans ces couches de couverture. Elles ne sont, ni collectées spécifiquement, ni traitées par la filière de rejet.

Les eaux pluviales qui ruissellent sur les parties des verses en activité (non encore recouvertes) sont collectées par un fossé étanche qui les dirige vers le bassin qualitatif. Elles transitent ensuite vers un bâtiment de traitement (rejet compatible avec les critères de bon état chimique et écologique des eaux superficielles) de surface approximative de 400 m² et de 5 m de hauteur puis vers un bassin quantitatif avant rejet régulé par des ouvrages de diffusion dans l'Ormançon. Les principes de dimensionnement des procédés de traitement sont décrits au chapitre 5.2.7 du volume VII de la présente étude d'impact.

Le bassin qualitatif a une capacité de stockage d'environ 10 000 m³.

Le bassin quantitatif qui gère le rejet est un bassin étanche qui possède une capacité de stockage évolutive allant d'environ 47 000 m³ (Z1 verses) à environ 64 000 m³ (cumul Z1 et Z2 verses). La surface au sol globale de ces bassins est d'environ 28 000 m² (Z1 verses) à environ 45 000 m² (cumul Z1 et Z2 verses).

Les ouvrages liés au traitement des eaux ne provenant pas du ruissellement des verses sont du même type que ceux décrits dans le chapitre 4.3.3 relatif aux installations liées à la zone exploitation.

Des éléments complémentaires sur la nature physico-chimique des déblais du Callovo-Oxfordien sont présentés au chapitre 4.3.2 du volume III de la présente étude d'impact.

Tableau 4-9 *Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone puits travaux et verses de la zone puits*

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone puits travaux et verses	**Trois puits :**		
	• puits dit « ventilation air frais travaux » (VFT)	H variant entre 5 m à 8 m pour les bâtiments et ≈ 45 m pour le chevalement	≈ 4 500
	• puits dit « ventilation air vicié travaux » (VVT)	H ≈ 8 m pour les bâtiments et ≈ 10 m pour la cheminée	≈ 1 600
	• puits dit « matériel et matériaux travaux » (MMT)	H ouvrage ≈ 12 m et ≈ 60 m pour chevalement	≈ 900
	Atelier de maintenance et magasins associés aux activités de travaux	H ≈ 10 m	≈ 1 200
	Zones de stockage matériels/matériaux	-	≈ 20 000
	Aires techniques/aires de stationnement PL	-	≈ 4 100
	Ouvrages de protection du site – Postes de garde	H ≈ 5 m	Quelques centaines de m²/poste à 1 000 m²
	Gestion des matériaux extraits « verses » :		
	• emprise Z1	H ≈ 20 m maximum	≈ 600 000
	• emprise Z2	H ≈ 20 m maximum	≈ 480 000
	Bâtiment de gestion des verses	H ≈ 18 m	≈ 8 000
	Ouvrages liés au traitement des eaux des verses :		
	• Ouvrage de traitement	H ≈ 5 m	≈ 400
	• Bassin qualitatif	≈ 10 000 m³	Ouvrage enterré
	• Bassin quantitatif	≈ 47 000 m³ (Z1) à ≈ 64 000 m³ (Z1 + Z2)	Au global ≈ 28 000 m² (Z1) à 45 000 m² (Z1 + Z2)

4.3.4.3 Les installations de la zone exploitation de la zone puits

La zone exploitation de la zone puits regroupe les installations de soutien aux activités souterraines d'exploitation.



Figure 4-36 *Localisation des installations liées à la zone exploitation de la zone puits*

a) Les puits

Deux puits sont dédiés aux activités souterraines d'exploitation :

- le puits dénommé « ventilation air frais exploitation » (VFE) permet d'assurer le transfert du personnel vers la zone de soutien logistique exploitation et l'apport d'air frais vers la zone souterraine en exploitation.

  Ce puits comprend un chevalement (structure positionnée au-dessus du puits) d'une surface au sol de l'ordre de 400 m² et d'une hauteur d'environ 45 m au-dessus de la plateforme. Cet ouvrage intègre la machinerie de l'ascenseur et de la cage de secours, ainsi qu'une cabine de contrôle et un accès aux magasins pour l'acheminement du petit matériel.

  Des vestiaires et une lampisterie permettent la mise à disposition des équipements de sécurité du personnel avant transfert au fond. Un espace détente ainsi qu'un cheminement couvert relient cet ensemble. La surface au sol correspondante est de l'ordre de 2 500 m² pour une hauteur d'environ 5 m.

  L'usine de ventilation associée, d'une surface au sol d'environ 2 600 m², est semi-enterrée. Elle est composée de deux niveaux pour une hauteur d'environ 8 m. Elle comprend les unités de ventilation (traitement de l'air et soufflage) et les locaux techniques ;



Figure 4-37 *Exemple de configuration possible du puits de ventilation air frais exploitation (VFE)*

- le puits dénommé « ventilation air vicié exploitation » (VVE) canalise l'extraction d'air de la zone souterraine en exploitation.

  Le bâtiment au-dessus de ce puits, d'environ 200 m² et d'une hauteur de 8 m, abrite les équipements d'inspection et de maintenance du puits.

  L'usine de ventilation associée, d'environ 900 m², est construite sur deux niveaux pour une hauteur d'environ 8 m. Elle comprend les unités de ventilation (aspiration), les unités de récupération de chaleur et les locaux techniques. Elle est reliée à la cheminée de rejet, d'une hauteur d'environ 12 m, contenant l'instrumentation de surveillance des rejets.

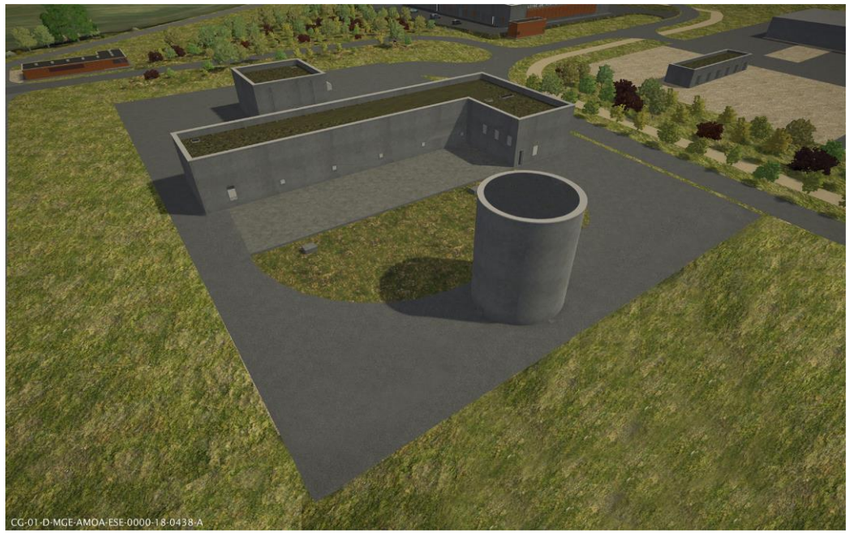


Figure 4-38 *Exemple de configuration possible du puits de ventilation air vicié exploitation (VVE)*

b) Ouvrages de protection du site

La protection du site est assurée par un ensemble d'ouvrages comprenant notamment :

- une caserne secondaire pour la lutte contre l'incendie et le secours aux victimes (surface et fond), en appui au bâtiment de la zone descenderie. Il accueille notamment les équipes de pompiers, leurs locaux et le hangar nécessaires aux véhicules d'intervention. Cet ouvrage d'environ 8 m de hauteur (2 niveaux) possède une surface au sol d'environ 1 500 m². Une station météorologique est implantée à proximité de cet ouvrage ;
- les ouvrages amont pour la lutte contre l'incendie (réseaux, réservoirs et locaux de localisation des pompes) pour une surface au sol globale de 1 700 m² et une hauteur de 4 m pour les locaux de localisation des pompes ;
- un réseau de postes de gardes et de clôtures permettant de gérer les accès. Globalement, ces postes de garde peuvent avoir une surface au sol pouvant aller de quelques centaines de mètres carrés pour une hauteur d'environ 5 m à environ 1 300 m² pour une hauteur d'environ 12 m ;
- une centrale de secours et un poste de distribution 20 kV, en cas de coupure d'alimentation. La surface au sol est de l'ordre de 2 200 m². Les groupes électrogènes fonctionnent avec du fioul stocké à proximité, dans des réservoirs enterrés à double parois.

c) Atelier et magasin support à l'exploitation

Ce bâtiment, d'environ 9 m de hauteur et de surface au sol approximative de 1 000 m², permet la maintenance et le stockage de pièces de rechanges nécessaires à l'exploitation.

d) Ouvrages liés au traitement des eaux de l'ensemble de la zone puits

Tout comme pour la zone descenderie, les principes de gestion des eaux pluviales et des effluents sur la zone puits (hors eaux de ruissellement de verses décrites dans le chapitre 4.3.4.2d)) sont les suivants :

- les eaux pluviales sont collectées et acheminées dans des bassins étanches de traitement, contrôlées et régulées avant rejet ;
- les eaux de fond, comprenant les eaux d'exhaure et des eaux industrielles, sont pompées vers un bassin étanche, contrôlées et traitées. Ces eaux sont principalement recyclées puis stockées en réservoirs (de capacité de l'ordre de 1600 m³) pour réutilisation interne au centre de stockage Cigéo. L'excédent fait l'objet d'un rejet local régulé après contrôle ;
- les eaux usées, comprenant les eaux vannes (WC), les eaux grises (douches, lavabos, cuisine…) ainsi que les eaux conventionnelles de surface sont contrôlées, traitées au sein de la station d'épuration de la zone puits, puis stockées en réservoirs (de capacité de l'ordre de 200 m³) pour réutilisation interne au centre de stockage Cigéo. L'excédent fait l'objet d'un rejet local régulé après contrôle.

Le traitement des eaux de la zone puits est assuré par différents dispositifs :

- une station d'épuration pour le traitement des eaux usées de surface globale au sol d'environ 800 m². Elle est composée d'installations de prétraitement (récupération mécanique des éléments les plus accessibles), d'installations de traitement biologiques (notamment par l'utilisation de disques biologiques, de système de clarification des eaux et de séchage des boues) ainsi que de systèmes de filtration (charbon actif et membranaire) avant désinfection. Les eaux de fond transiteront quant-à-elles par des unités de traitement (liées principalement aux activités de travaux) permettant la séparation des matières en suspension et des traces d'hydrocarbures. Elles transitent ensuite par un bassin de décantation, d'environ 1 300 m³ sur une surface au sol de l'ordre de 1 000 m², avant traitement final. Ces traitements permettent leur utilisation sous forme d'eau recyclée ou leur rejet régulé dans le milieu extérieur après contrôle (rejet compatible avec les critères de bon état chimique et écologique des eaux superficielles). Les principes de dimensionnement des procédés de traitement sont décrits au chapitre 5.2.7 du volume VII de la présente étude d'impact.
- des bassins qualitatifs nécessaires à la gestion des eaux pluviales recueillies sur les surfaces imperméabilisées ainsi que sur les surfaces non imperméabilisées collectées. Le total des surfaces imperméabilisées de la zone puits est de l'ordre de 260 000 m². Ces bassins, localisés à l'est de la zone puits, permettent la collecte et le traitement des eaux pluviales avant rejet vers les bassins quantitatifs. Ils ont une capacité globale de stockage de l'ordre de 10 000 m³ pour une surface au sol approximative de 10 000 m².

- Des bassins quantitatifs avant rejet vers le milieu extérieur. Ces bassins permettent de réguler le débit d'eau rejeté dans le milieu extérieur. Ils ont une capacité globale de l'ordre de 54 000 m³ pour une surface au sol d'environ 30 000 m².

Aucun des procédés de la zone puits du centre de stockage de Cigéo ne génère d'effluent radioactif liquide en fonctionnement normal et maintenance. Les eaux de ruissellement provenant des zones à production possible de déchets nucléaires des zones souterraines en exploitation sont transférées vers la zone descenderie et feront l'objet d'une gestion distincte.

Tableau 4-10 *Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone exploitation de la zone puits*

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone exploitation	**Deux Puits :**		
	• puits dit « ventilation air frais exploitation » (VFE)	H variant entre 5 m à 8 m pour les bâtiments et ≈ 45 m pour le chevalement	≈ 5 500
	• puits dit « ventilation air vicié exploitation » (VVE)	H ≈ 8 m pour les bâtiments et ≈ 12 m pour la cheminée	≈ 1 100
	Ouvrages de protection du site :		
	• secondaire	H ≈ 8 m	≈ 1 500
	• ouvrages amont de la lutte contre l'incendie	H ≈ 4 m pour les locaux pomperies	≈ 1 700
	• ensemble de postes de garde	H ≈ 5 m à 12 m	Quelques centaines de m²/poste à 1 300 m²
	• centrale de secours et poste de distribution 20 kV		≈ 2 200
	Atelier et magasin support à l'exploitation	H ≈ 9 m	≈ 1 000
	Ouvrages liés au traitement des eaux :		
	• stations d'épuration		≈ 800
	• réservoirs de stockage des eaux recyclées	≈ 200 m³ et 1 600 m³	Ouvrages enterrés
	• bassins de décantation des eaux de fond	≈ 1 300 m³	≈ 1 000
	• bassins qualitatifs	≈ 10 000 m³	≈ 10 000
	• bassins quantitatifs	≈ 54 000 m³	≈ 30 000

4.3.4.4 Les installations de la zone administrative de la zone puits

Ces installations participent au bon fonctionnement des activités de la zone puits.



Figure 4-39 *Localisation des installations liées à la zone administrative de la zone puits*

a) Parking silo

Dans un souci d'optimisation des emprises, le stationnement des véhicules du personnel d'exploitation des travaux et des visiteurs professionnels est organisé dans un ouvrage dénommé « parking silo ». Il est composé de quatre niveaux permettant le stationnement d'environ 460 véhicules. Ce bâtiment de 15 m de hauteur environ possède une surface au sol d'environ 3 500 m². Il est localisé à proximité de l'entrée de la zone puits.

b) Bâtiment tertiaire

Le bâtiment tertiaire regroupe les bureaux nécessaires aux équipes de suivi des travaux souterrains et une zone dédiée au suivi scientifique. Ce bâtiment de 15 m de hauteur environ est composé de quatre niveaux. Sa surface au sol est d'environ 3 600 m². Il est situé à proximité de l'entrée de la zone puits.

c) Restaurant d'entreprise

La zone puits dispose d'un restaurant d'entreprise satellite du restaurant principal situé en zone descenderie. Ce restaurant est situé à proximité de l'entrée de la zone puits. Ce bâtiment de 10 m de hauteur environ possède une surface au sol de l'ordre de 600 m².

d) Centre médical

Le centre médical « Travaux de construction » permet d'apporter les premiers soins au personnel de la zone puits en cas d'accident. Il est adossé au parking silo se trouvant à l'entrée de site. Sa surface au sol est d'environ 200 m2 et sa hauteur de 6 m.

e) Atelier de maintenance conventionnelle de surface

Ce bâtiment, regroupant atelier et magasin, permet la maintenance dite courante et le stock secondaire des pièces de rechanges de la zone puits. Il abrite également les moyens nécessaires à l'entretien des bâtiments, des voiries, des espaces verts.

Ce bâtiment, d'environ 9 m de hauteur, est composé de deux niveaux. Sa surface au sol est d'environ 1 500 m².

Tableau 4-11 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone administrative de la zone puits

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone administrative	Parking silo	H ≈ 15 m	≈ 3 500
	Bâtiment tertiaire	H ≈ 15 m	≈ 3 600
	Restaurant d'entreprise	H ≈ 10 m	≈ 600
	Centre médical	H ≈ 6 m	≈ 200
	Atelier de maintenance et magasin associés aux domaines des services conventionnels de surface	H ≈ 9 m	≈ 1 500

4.3.4.5 Les installations de la zone utilités de la zone puits

La zone utilités regroupe les installations permettant la production et la distribution d'énergie et de fluides (eau potable, réseaux de chaleur, eau « glacée » ...) pour la zone puits et l'installation souterraine.

Associée à cette emprise se trouve également une zone dite « travaux » permettant notamment d'accueillir des installations de support aux activités souterraines de travaux installations (production de béton, atelier de maintenance et magasin associés aux activités travaux notamment).



Figure 4-40 Localisation de la zone utilités

a) Transformation et distribution électrique

Le poste de transformation et de distribution électrique sur la zone puits permet d'abaisser la tension de l'électricité fournie par RTE de 90 kV à 20 kV pour alimenter les installations de la zone puits et de l'installation souterraine. Cet ouvrage est un bâtiment maçonné d'environ 1 600 m² pour une hauteur d'environ 7 m.

Un poste de livraison électrique (90 kV), sous la responsabilité de RTE, est nécessaire en amont du poste de transformation et de distribution évoqué. Il est positionné dans la zone utilité et possède une surface au sol d'environ 9 000 m² pour une hauteur d'environ 10 m.

b) Ouvrages participants au fonctionnement du réseau d'eau potable

L'eau potable arrive sur la zone puits *via* une canalisation enterrée. Le point de livraison est situé en bordure de site. L'eau potable est ensuite dirigée vers le réseau ou vers un réservoir enterré en béton de l'ordre de 150 m³. L'eau potable est ensuite distribuée sur la zone puits au moyen de pompes situées dans un local surpresseur. Cette capacité de stockage d'eau potable pourra éventuellement être revue à la hausse, dans la suite des études, afin de compléter le dispositif permettant de pallier une défaillance éventuelle de l'alimentation en eau du centre de stockage Cigéo. Il est à noter, que pour les usages d'eau non potable, différents réservoirs de stockage des eaux recyclées sont également prévus pour l'approvisionnement des installations du centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 4.3.4.3 du présent document).

c) Bâtiments de production des utilités

Les bâtiments de production des utilités permettent :

- la production d'eau chaude notamment pour le chauffage des locaux et le traitement de l'air des installations souterraines. Cette production se fait grâce à une chaudière. Le choix du type de chaudière est à l'étude en lien avec le territoire. Une chaudière biomasse est envisagée. Du gaz peut être utilisé afin de s'adapter aux variations de consommation et d'assurer la sûreté de fonctionnement. Des attentes permettant un éventuel raccordement à une canalisation de biogaz venant du territoire ainsi qu'un poste de raccordement à un réseau de chaleur (chambre à vanne) sont envisagés ;
- la production d'eau « glacée » pour le refroidissement de la ventilation. L'évacuation des calories des groupes froids se fait par l'intermédiaire de refroidisseurs à circuit fermé (pas d'interface entre le fluide à refroidir et l'air ambiant) ;
- les sous-stations et équipements électriques nécessaires à la production d'eau chaude chauffage et d'eau « glacée ».

La surface au sol globale de ces installations représente environ 3 700 m2 pour une hauteur d'environ 10 m. Des cheminées de l'ordre d'une dizaine de mètre de hauteur sont également nécessaires.

d) Déchetterie industrielle conventionnelle

Cet ouvrage recueille les déchets conventionnels de la zone puits avant transfert vers la zone descenderie. Il est composé de différentes bennes qui recueillent les différents types de déchets présents sur le site. La plateforme d'accueil correspondante présente une surface au sol d'environ 4 000 m².

e) Installations pour la production de béton

Les travaux souterrains nécessitent la mise en œuvre de béton dont la quantité et le contrôle de qualité nécessitent la production sur place. La préparation du béton est réalisée à partir de plusieurs ouvrages. L'objectif est de positionner les premières opérations à proximité de l'approvisionnement en matières premières, en zone « travaux », et d'effectuer le mélange final à proximité du puits matériels et matériaux travaux.

Le stockage des granulats est réalisé dans un ouvrage en charpente métallique d'environ 18 m de haut et d'environ 1 500 m² de surface au sol pouvant accueillir jusqu'à 4 000 m³ de matériaux. Les granulats sont acheminés vers la centrale à béton qui dispose d'un réservoir pour l'eau de gâchage ainsi que d'un bassin de récupération et de recyclage des eaux de laitance. Le mélange est envoyé par canalisation vers le bâtiment de malaxage.

f) Atelier de maintenance et magasin associés aux activités travaux

Un bâtiment implanté sur la zone « travaux » assure l'accueil du personnel et le stockage d'outils et de matériels permettant la maintenance des moyens de soutien des activités de travaux souterrains. Il comprend un atelier mécanique, des magasins de stockage, des espaces de travail, ainsi que des espaces communs pour une surface au sol globale de l'ordre de 2 500 m². La hauteur maximale de cet ouvrage est d'environ 10 m.

Tableau 4-12 *Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone utilités de la zone puits*

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone « utilités »	Poste de livraison RTE (90 kV)	H ≈ 10 m	≈ 9 000
	Transformation et distribution électrique	H ≈ 7 m	≈ 1 600
	Ouvrages participants au fonctionnement du réseau d'eau potable	≈ 150 m³	Ouvrages enterrés
	Bâtiment de production des utilités : • production d'eau chaude • production d'eau « glacée » Sous-stations et équipements électriques	H ≈ 10 m	≈ 3 700
	Déchetterie industrielle conventionnelle	-	≈ 4 000
	installations pour la production de béton	H ≈ 18 m	≈ 1 500
	Atelier de maintenance et magasins associés aux activités de travaux	H ≈ 10 m	≈ 2 500

4.3.4.6 Les volumes de terrassement et principaux ouvrages en terre en zone puits

Les volumes de terrassement en zone puits proviennent essentiellement des plateformes d'accueil des ouvrages de surface et du nivellement des voiries.

Pendant les aménagements préalables, les mouvements de terres de la zone puits mobilisent un volume de terre en place de l'ordre de 4 millions de m³. Les phases suivantes (construction initiale et fonctionnement) représentent quant-à-elles un volume de l'ordre de 2 millions de m³. Ces mouvements de terre permettent globalement d'obtenir un équilibre déblais/remblais[138] dans le nivellement général de la zone.

Les principaux ouvrages en terre (cf. Figure 4-41) correspondent :

- à la réalisation de la digue sud/ouest et nord (1) de la zone de dépôt des verses amenant des remblais, pour les plus importants, allant de + 9 m à +15 m avec très ponctuellement des remblais à +18 m ;
- à la plateforme de dépôt des verses (2) pouvant entraîner des déblais allant de -6 m à -9 m ;
- au bassin nord (3) nécessitant des déblais variant entre – 9 m et -15 m ;
- aux bassins sud (4) amenant des déblais de – 8 m à -12 m.

[138] Les remblais sont notés en hauteur positive (+) et les déblais en profondeur négative (-).

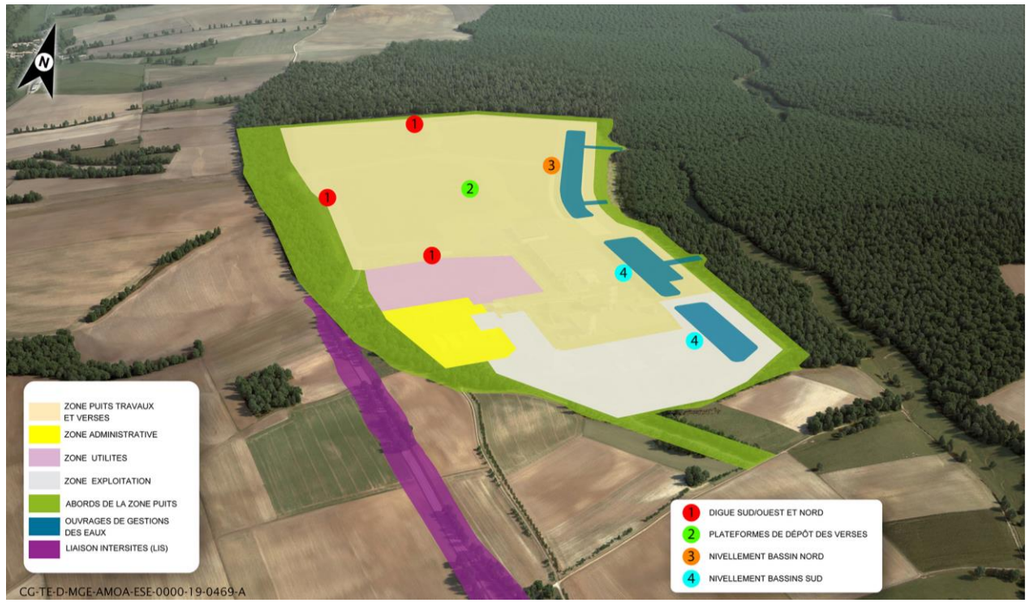


Figure 4-41 *Identification des principaux ouvrages en terre en zone puits*

4.3.4.7 Récapitulatif des caractéristiques des ouvrages les plus importants de la zone puits

Tableau 4-13 *Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone puits*

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone puits travaux et verses	**Trois puits :**		
	• puits dit « ventilation air frais travaux » (VFT)	H variant entre 5 m à 8 m pour les bâtiments et ≈ 45 m pour le chevalement	≈ 4 500
	• puits dit « ventilation air vicié travaux » (VVT)	H ≈ 8 m pour les bâtiments et ≈ 10 m pour la cheminée	≈ 1 600
	• puits dit « matériel et matériaux travaux » (MMT)	H ouvrage ≈ 12 m et ≈ 60 m pour chevalement	≈ 900
	Atelier de maintenance et magasins associés aux activités de travaux	H ≈ 10 m	≈ 1 200
	Zones de stockage matériels/matériaux	-	≈ 20 000
	Aires techniques/aires de stationnement PL	-	≈ 4 100
	Ouvrages de protection du site – Postes de garde	H ≈ 5 m	Quelques centaines de m²/poste à 1 000 m²

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone exploitation	**Gestion des matériaux extraits « verses » :**		
	• emprise Z1	H ≈ 20 m maximum	≈ 600 000
	• emprise Z2	H ≈ 20 m maximum	≈ 480 000
	Bâtiment de gestion des verses	H ≈ 18 m	≈ 8 000
	Ouvrages liés au traitement des eaux des verses :		
	• Ouvrage de traitement	H ≈ 5 m	≈ 400
	• Bassin qualitatif	≈ 10 000 m³	
	• Bassin quantitatif	≈ 47 000 m³ (Z1) à ≈ 64 000 m³ (Z1 + Z2)	Au global ≈ 28 000 m² (Z1) à 45 000 m² (Z1 + Z2)
	Deux Puits :		
	• puits dit « ventilation air frais exploitation » (VFE)	H variant entre 5 m à 8 m pour les bâtiments et ≈ 45 m pour le chevalement	≈ 5 500
	• puits dit « ventilation air vicié exploitation » (VVE)	H ≈ 8 m pour les bâtiments et ≈ 12 m pour la cheminée	≈ 1 100
	Ouvrages de protection du site :		
	• secondaire	H ≈ 8 m	≈ 1 500
	• ouvrages amont de la lutte contre l'incendie	H ≈ 4 m pour les locaux pomperies	≈ 1 700
	• ensemble de postes de garde	H ≈ 5 m à 12 m	Quelques centaines de m²/poste à 1 300 m²
	• centrale de secours et poste de distribution 20 kV		≈ 2 200
	Atelier et magasin support à l'exploitation	H ≈ 9 m	≈ 1 000
	Ouvrages liés au traitement des eaux :		
	• stations d'épuration		≈ 800
	• réservoirs de stockage des eaux recyclées	≈ 200 m³ et 1 600 m³	Ouvrages enterrés
	• bassins de décantation des eaux de fond	≈ 1 300 m³	≈ 1 000
	• bassins qualitatifs	≈ 10 000 m³	≈ 10 000
	• bassins quantitatifs	≈ 54 000 m³	≈ 30 000

Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
Zone concernée	Ouvrages concernés	Dimensionnement (hauteurs/volumes) approximatif	Surface au sol (m²)
	Bâtiment tertiaire	H ≈ 15 m	≈ 3 600
	Restaurant d'entreprise	H ≈ 10 m	≈ 600
	Centre médical	H ≈ 6 m	≈ 200
	Atelier de maintenance et magasin associés aux domaines des services conventionnels de surface	H ≈ 9 m	≈ 1 500
Zone « utilités »	Poste de livraison RTE (90 kV)	H ≈ 10 m	≈ 9 000
	Transformation et distribution électrique	H ≈ 7 m	≈ 1 600
	Ouvrages participants au fonctionnement du réseau d'eau potable	≈ 150 m³	Ouvrages enterrés
	Bâtiment de production des utilités :		
	• production d'eau chaude	H ≈ 10 m	≈ 3 700
	• production d'eau « glacée »		
	Sous-stations et équipements électriques		
	Déchetterie industrielle conventionnelle	-	≈ 4 000
	Installations pour la production de béton	H ≈ 18 m	≈ 1 500
	Atelier de maintenance et magasins associés aux activités de travaux	H ≈ 10 m	≈ 2 500
Voiries et plateformes associées	Réparties sur le site		≈ 160 000

4.3.5 La zone d'implantation des ouvrages souterrains

4.3.5.1 Les ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo

Les ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo sont déployés progressivement au sein de la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS). Les ouvrages dédiés au stockage des colis sont implantés dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien à une profondeur d'environ 500 m. Des liaisons surface-fond (puits et descenderies) relient la zone descenderie et à la zone puits, décrites précédemment, aux parties de l'installation souterraine implantées dans cette couche de roche. Le déploiement progressif des ouvrages souterrains, par tranches, c'est-à-dire par groupes d'ouvrages, se fera sous réserve d'autorisations spécifiques progressives.

La ZIOS s'étend sur environ 29 km² (cf. Figure 4-42).

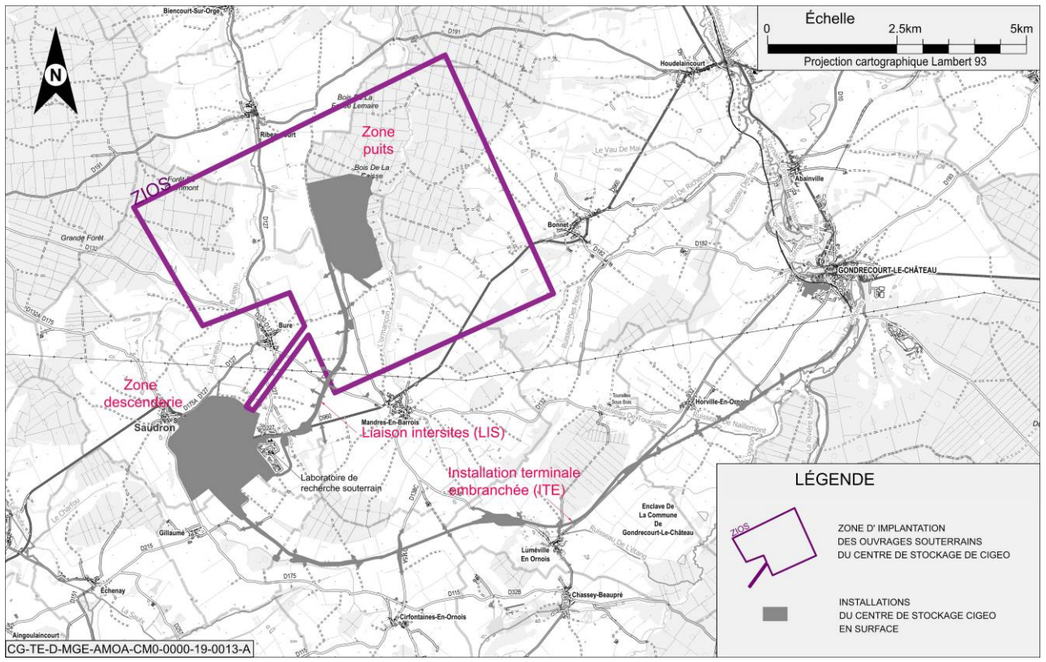


Figure 4-42 Localisation de la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS)

Elle est située sur les communes listées dans le tableau 4-14 ci-après. Aucune habitation n'est située à l'aplomb de cette zone.

Tableau 4-14 Communes à l'aplomb de la zone possible de déploiement des ouvrages souterrains de stockage

Département	Commune	Centre de stockage Cigéo
Meuse (55)	Mandres-en-Barrois	Descenderies/puits et zones de stockage
	Bonnet	Zones de stockage
	Bure	Descenderies et zones de stockage
	Ribeaucourt	Déploiement possible de l'installation souterraine à terminaison
	Houdelaincourt	
	Saint-Joire	

La zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) comprend à terminaison :

- deux descenderies et cinq puits qui relient respectivement la zone descenderie et la zone puits à la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE) et à la zone de soutien logistique travaux (ZSLT) ;
- une zone de soutien logistique exploitation (ZSLE) qui supporte les activités de la zone souterraine en exploitation et par laquelle transitent les colis de déchets radioactifs ;
- une zone de soutien logistique travaux (ZSLT) qui supporte les activités de la zone souterraine en travaux et par laquelle transitent les équipements et les matériaux pour la construction ;
- un quartier pilote HA (accueillant des colis HA0) ;
- un quartier de stockage de colis de déchets radioactifs MA-VL ;
- un quartier de stockage HA.

Toutes les opérations sur les colis dans la ZIOS sont automatisées et suivies par vidéo-surveillance à partir de la salle de conduite centralisée localisée dans le bâtiment nucléaire de surface (cf. Chapitre 4.3.3.2 du présent document).

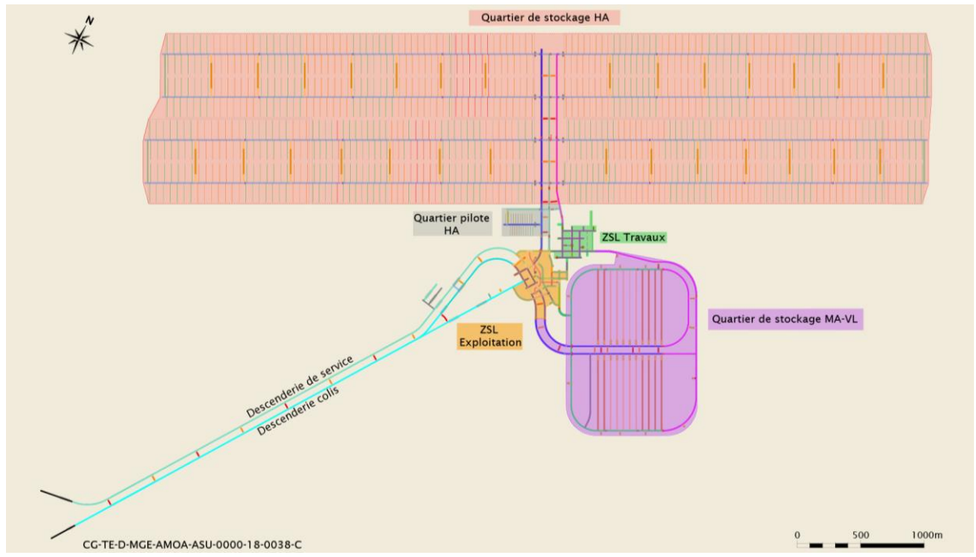


Figure 4-43 Organisation générale des ouvrages souterrains à terminaison

4.3.5.2 La concomitance de l'exploitation et des travaux de construction

Après l'autorisation de mise en service délivrée par l'ASN, commence la réception de premiers colis de déchets radioactifs utilisés pour des essais actifs des équipements, puis des opérations de stockage.

Le fonctionnement du centre de stockage Cigéo dure une centaine d'années au cours desquelles ont lieu simultanément des opérations de réception et de mise en stockage de colis de déchets radioactifs et des travaux d'extension des zones de stockage, par tranches successives. Pendant le fonctionnement du centre de stockage Cigéo, les études sont poursuivies pour améliorer sa conception, notamment pour l'optimisation des tranches successives.

Pour des raisons de sûreté, les zones nucléaires en exploitation sont toujours séparées physiquement des zones en travaux (maîtrise des risques de co-activité). Tous les flux travaux et exploitation (réseaux électriques, aérage, personnel, matériel, etc.) sont séparés.

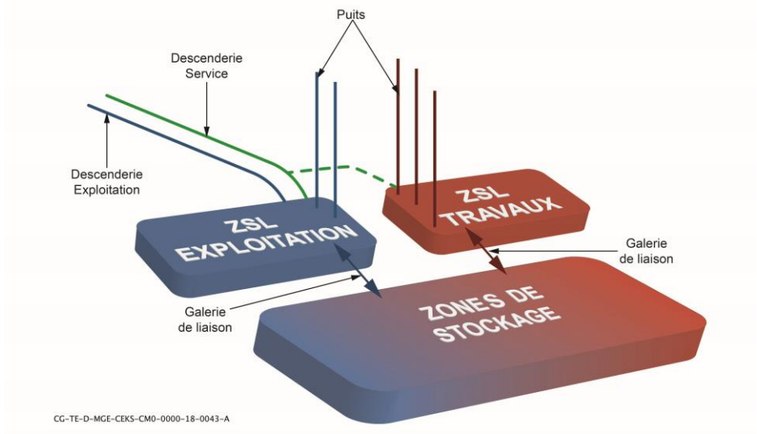


Figure 4-44 *Illustration du principe de séparation des différentes zones et liaisons surface-fond (dimensions et proportions des zones non représentatives)*

Ainsi, les travaux de construction peuvent être effectués sans impact sur la poursuite des opérations de mise en stockage. Un événement dans une zone n'a pas d'incidence sur l'autre zone.

Sous réserve d'autorisation, des travaux d'obturation d'alvéoles, de galeries et de fermeture de quartiers de stockage pourront également être réalisés pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage en respectant la même logique de séparation des activités.

4.3.5.3 Les liaisons surface-fond

Les liaisons surface-fond (LSF) permettent de relier la zone descenderie et la zone puits respectivement à la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE) et à la zone de soutien logistique travaux (ZSLT). Elles sont constituées par :

- deux descenderies (tunnels inclinés) reliant la zone exploitation de la zone descenderie (cf. Chapitre 4.3.3.2 du présent document) à la zone de soutien logistique exploitation ;
- deux puits verticaux reliant la zone exploitation de la zone puits (cf. Chapitre 4.3.4.3 du présent document) à la zone de soutien logistique exploitation ;
- trois puits reliant la zone puits travaux et verses de la zone puits (cf. Chapitre 4.3.4.2 du présent document) de la zone puits à la zone de soutien logistique travaux.

a) Les descenderies

Les descenderies sont deux tunnels inclinés (12 %), d'environ 4 km, parallèles (distants de 60 m environ) et de même diamètre excavé (10 m environ).

Des recoupes relient les descenderies tous les 400 m. Elles permettent l'implantation de locaux techniques et constituent des galeries d'évacuation des personnels et d'accès aux secours pour les interventions d'urgence.

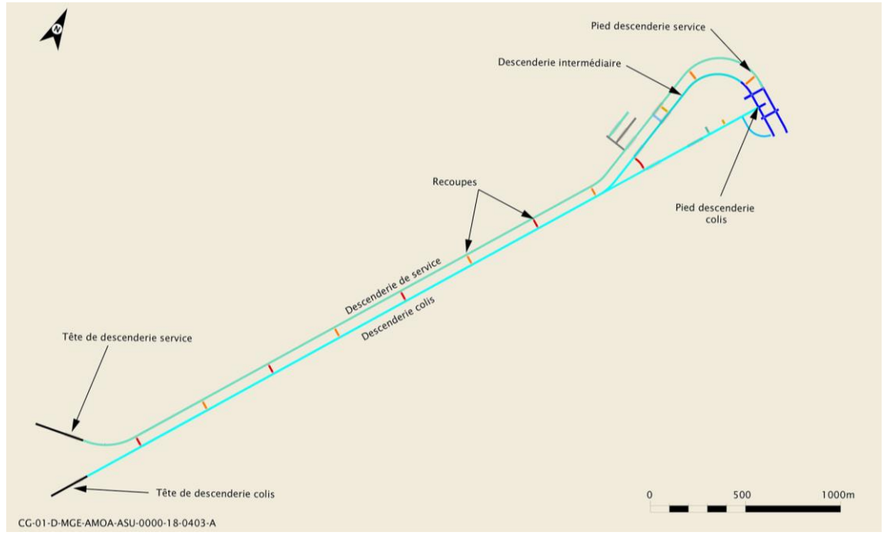


Figure 4-45 *Vue d'ensemble des descenderies service et colis*

La descenderie colis permet d'acheminer la hotte contenant les colis de déchets radioactifs vers la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE) au moyen d'un funiculaire. Elle permet également un cheminement piéton sur le quai de part et d'autre de la voie de circulation du funiculaire, pour l'inspection, la maintenance et l'évacuation/secours. Elle est également utilisée pour le passage d'une partie des réseaux d'utilités alimentant les ouvrages de la zone souterraine en exploitation. Le pied de la descenderie colis rejoint les voies de circulation des chariots de déchargement du funiculaire, afin de poursuivre le transfert de la hotte vers les zones de stockage.

La descenderie service, dédiée aux fonctions d'exploitation est reliée à la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE). Elle permet de réaliser les transferts liés à la maintenance, à l'acheminement de matériels et de matériaux, à l'évacuation des personnels et d'accès aux secours pour les interventions d'urgence. Cet ouvrage est également utilisé pour le passage d'une partie des réseaux d'utilités alimentant les ouvrages de la zone souterraine en exploitation. Elle permet la remontée des effluents collectés au fond et la ventilation remontante. Deux véhicules (secours ou service) peuvent s'y croiser.

b) Les puits

Les puits constituent les liaisons verticales entre la zone puits et les zones de soutien logistique. Cinq puits sont prévus pour assurer les flux des personnels, matériels et matériaux nécessaires au fonctionnement et pour assurer la ventilation :

- deux puits pour l'exploitation, qui émergent en zone exploitation (ZEXP) de la zone puits (cf. Chapitre 4.3.4.3 du présent document) et qui desservent la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE) ;
- trois puits pour les travaux, qui émergent en zone puits travaux/verses (ZPTV) de la zone puits (cf. Chapitre 4.3.4.2 du présent document) et qui desservent la zone de soutien logistique travaux (ZSLT).

Leur diamètre utile varie entre 6 m et 8 m et leur longueur entre 500 m et 560 m.

Le schéma ci-dessous (cf. Figure 4-46) présente une vue d'ensemble d'un puits.

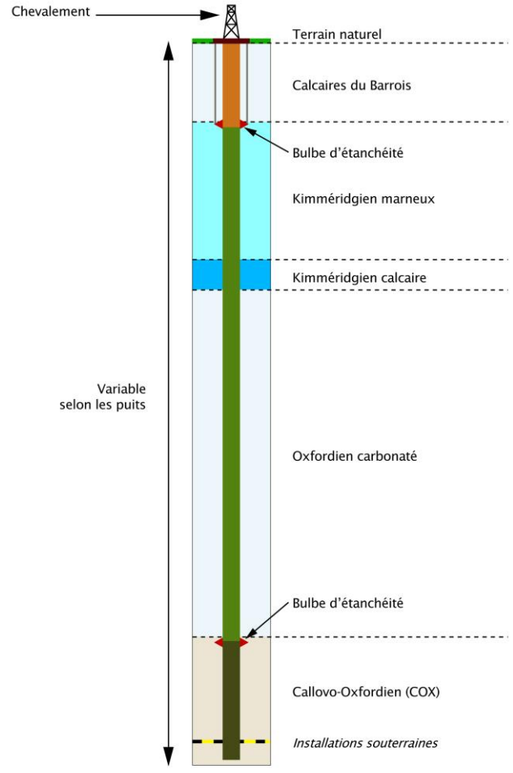


Figure 4-46 *Vue d'ensemble d'un puits (principe)*

4.3.5.4 Les zones de soutien logistique (ZSL)

Les zones de soutien logistique (ZSL) se décomposent en deux zones distinctes :

- une zone de soutien logistique dédiée aux travaux (ZSLT) ;
- une zone de soutien logistique dédiée à l'exploitation (ZSLE).

a) La zone de soutien logistique travaux

La zone de soutien logistique travaux (ZSLT) constitue l'interface entre les puits travaux et la zone souterraine en travaux (cf. Figure 4-47). Cette zone permet le passage des flux pour la construction des ouvrages à savoir les flux de matériaux entrants (voussoirs, béton et autres équipements utiles à la construction) et les flux de matériaux sortants.

La zone de soutien logistique travaux est en lien avec les trois puits travaux décrits précédemment (cf. Chapitre 4.3.5.3 du présent document) :

- le puits matériels matériaux travaux (MMT) ;
- le puits ventilation air vicié travaux (VVT) ;
- le puits ventilation personnel air frais Travaux (VFT).

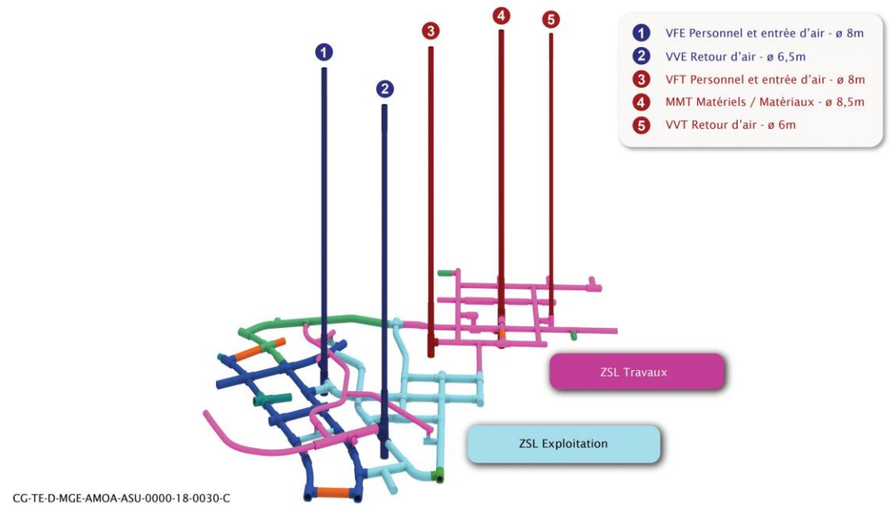


Figure 4-47 *Principe d'organisation de la zone de soutien logistique travaux et de la zone de soutien logistique exploitation*

b) La zone de soutien logistique exploitation

La zone de soutien logistique exploitation (ZSLE) constitue l'interface entre les descenderies et les puits exploitation et la zone souterraine en exploitation (cf. Figure 4-47). Les colis de stockage arrivent dans une hotte au niveau de cette zone par la descenderie colis au moyen du funiculaire. La hotte est ensuite transférée du funiculaire vers un chariot. Selon la nature des colis, le chariot de transfert est orienté vers les galeries de liaison des quartiers de stockage MA-VL ou vers celles du quartier pilote HA et du quartier de stockage HA par l'intermédiaire de tables tournantes.

La zone de soutien logistique exploitation accueille les locaux techniques nécessaires à la maintenance des chariots et des hottes, ainsi que les équipements nécessaires pour l'intervention en cas d'événement. Afin de limiter la présence du personnel dans les installations souterraines, seuls les locaux indispensables au procédé nucléaire, aux secours et aux opérations de maintenance courante sont implantés dans la zone de soutien logistique exploitation.

Cette zone est en lien également avec la descenderie colis, avec la descenderie de service, le puits ventilation air frais exploitation (VFE) et le puits ventilation air vicié exploitation (VVE).

La ventilation des galeries de la zone de soutien logistique exploitation assure la distribution d'air frais.

4.3.5.5 Le quartier de stockage MA-VL

Le quartier de stockage MA-VL, dédié au stockage des colis de déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL), se situe au sud de la ZIOS. Il est composé de plusieurs types d'ouvrages, répondant aux besoins de l'activité de stockage :

- les galeries de liaison d'exploitation (GLI) nord et sud ;
- les galeries de liaison « travaux » (GLI en travaux) ;
- les galeries de retour d'air (GRA) ;
- les recoupes entre les GLI et galeries techniques ;
- les alvéoles dans lesquels seront stockés des colis et un ouvrage dédié aux essais dans lequel ne seront pas stockés de colis, dénommé « démonstrateur ».

Le quartier de stockage MA-VL est représenté schématiquement sur la figure 4-48. Au début du déploiement (tranche 1), quatre premiers alvéoles et le démonstrateur MA-VL sont réalisés. Sous réserve d'autorisation, les

autres alvéoles et recoupes sont ensuite déployées progressivement pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage.

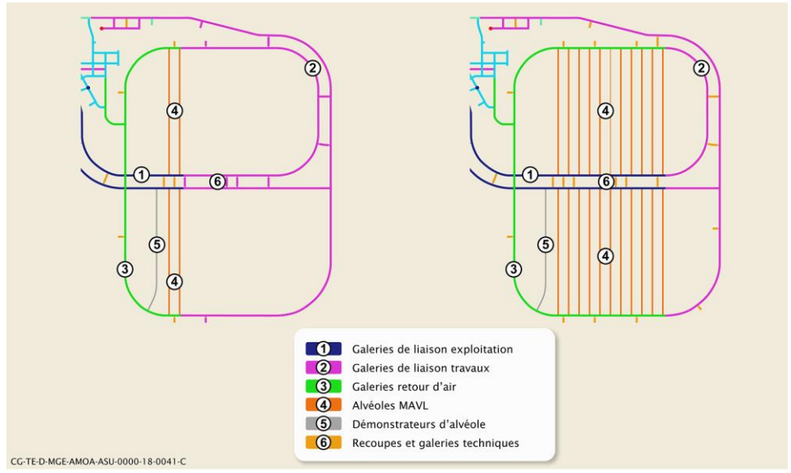


Figure 4-48 *Plan général du quartier de stockage MA-VL à T1 (à gauche) et illustration à terminaison (à droite)*

a) Les galeries de liaison d'exploitation MA-VL

Les galeries de liaison d'exploitation (GLI) MA-VL permettent l'accès à l'entrée des alvéoles depuis le pied des descenderies, en passant par la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE).

Elles ont un diamètre utile d'environ 8 m. La voûte achemine l'air extrait en fond de galerie vers le puits ventilation air vicié exploitation.

b) Les galeries de liaison travaux MA-VL

Les galeries de liaison travaux MA-VL permettent le déploiement des travaux de construction du quartier de stockage MA-VL. Elles assurent la circulation des personnels et des matériels/matériaux et contiennent les réseaux d'utilités propres à la zone travaux.

Elles sont physiquement isolées de la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE) (séparation stricte exploitation/travaux) mais sont reliées à la zone de soutien logistique travaux grâce à la configuration en boucle.

Les galeries sont dimensionnées pour permettre le passage des engins travaux, secours, ainsi que les équipements nécessaires. Elles ont un diamètre utile d'environ 8 m.

c) Les galeries de retour d'air MA-VL

Les galeries de retour d'air (GRA) permettent de relier le fond des alvéoles MA-VL à la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE) pour assurer leur ventilation.

Elles ont également une fonction d'évacuation et de secours, grâce à un cheminement protégé disposant d'une ventilation dédiée (amenée d'air frais en pleine section et extraction en voûte). Elles ont un diamètre utile d'environ 8 m.

d) Les recoupes MA-VL

Les recoupes entre galeries abritent des locaux techniques et répondent aux fonctions d'évacuation et de secours. Elles sont aménagées sur deux niveaux. Elles ont un diamètre utile d'environ 8 m.

Leur agencement permet d'assurer les fonctions d'évacuation du personnel et d'intervention avec un véhicule de secours. Un exemple de recoupe technique est proposé sur la figure 4-49.

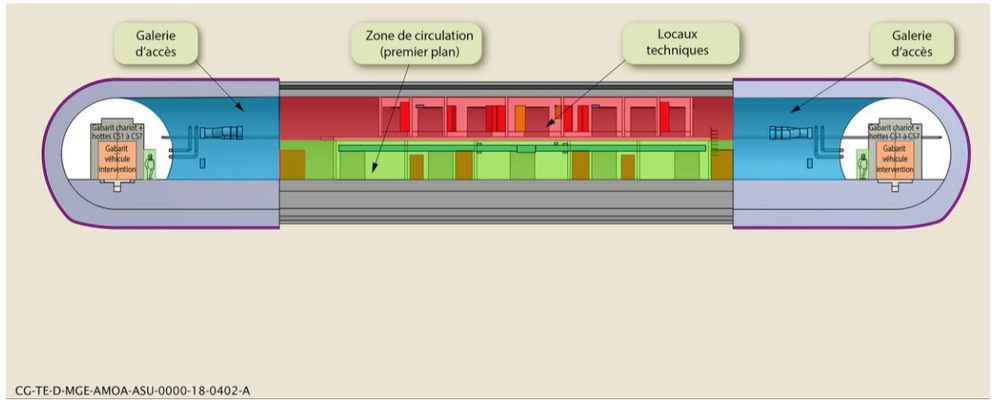


Figure 4-49 *Principe de recoupe et évacuation/secours entre les galeries de liaison exploitation*

e) Les alvéoles MA-VL

Les alvéoles MA-VL permettent le stockage des colis de déchets MA-VL, acheminés en hotte par chariot de transfert depuis le pied de descenderie colis.

Ils ont un diamètre utile au stockage d'environ 8 m et d'une longueur utile maximale d'environ 500 m.

Les alvéoles sont des ouvrages en béton de conception rigide avec un revêtement en béton. Ils sont dimensionnés et organisés en fonction de la nature et des dimensions du type de colis MA-VL qu'ils accueillent afin de limiter le taux de vide après remplissage.

Une vingtaine d'alvéoles ainsi qu'un démonstrateur d'alvéole doivent être réalisés. L'entraxe entre les alvéoles est de 50 m.

Les alvéoles MA-VL sont ventilés de façon traversante et structurés comme suit :

- une galerie d'accès qui relie l'alvéole à la galerie de liaison d'exploitation (GLI) et permet le transfert de la hotte contenant le colis depuis la GLI vers la cellule de manutention ;
- une façade d'accostage qui sert d'interface entre la galerie d'accès et la cellule de manutention. Elle permet l'ouverture de la hotte et la récupération du colis de stockage ;
- une cellule de manutention permettant l'extraction du colis de la hotte et l'acheminement *via* un pont, vers sa position dans l'alvéole de stockage ;
- un alvéole de stockage, correspondant à la longueur de l'alvéole utile pour le stockage du type de colis prévu ;
- une jonction de retour d'air située au fond de l'alvéole et rejoignant la galerie de retour d'air (GRA) après traitement de l'air dans un local de filtration.

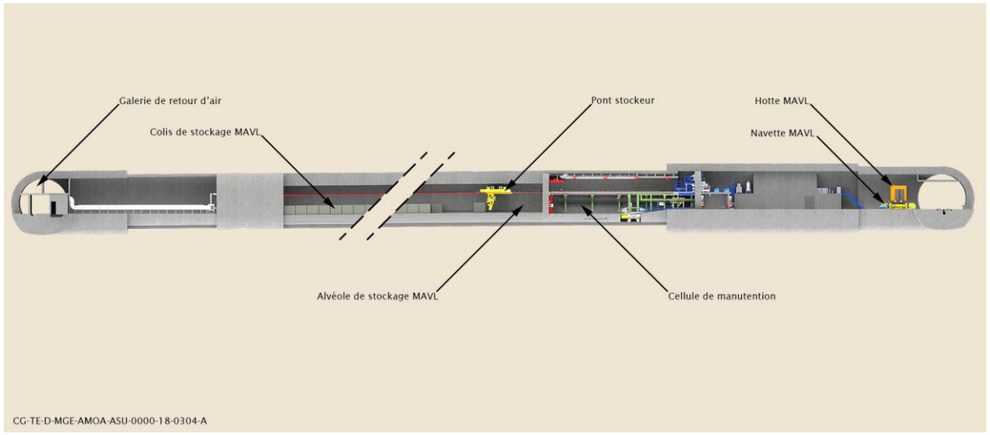


Figure 4-50 Coupe longitudinale schématique d'un alvéole MA-VL

4.3.5.6 Le quartier pilote HA

Le quartier pilote HA est destiné au stockage des déchets vitrifiés HA peu exothermiques dénommés « HA0 ».

Il est composé de plusieurs types d'ouvrages répondant aux besoins de l'activité de stockage :

- des galeries de liaison (GLI) exploitation ;
- des recoupes techniques entre les galeries de liaison ;
- la galerie d'évacuation et de secours (GES) ;
- la galerie d'accès ;
- des alvéoles dans lesquels seront stockés des colis et des alvéoles dédiés aux essais dans lesquels ne seront pas stockés de colis, dénommés « démonstrateurs » ;
- des niches d'exhaure.

Les galeries de liaisons assurent la desserte du quartier.

La galerie d'évacuation et de secours (GES) permet l'évacuation si nécessaire, vers la zone de soutien logistique en parallèle de la galerie de liaison exploitation.

La galerie d'accès permet de rejoindre les alvéoles depuis la galerie de liaison. Le quartier pilote HA comporte une vingtaine d'alvéoles de stockage et quelques alvéoles dédiés aux essais (démonstrateurs).

Leur diamètre utile est de 8 m environ.

Le quartier pilote HA comporte 3 recoupes, situées entre les GLI exploitation et la galerie d'évacuation et de secours (GES), conçues de façon identiques à celles du quartier de stockage MA-VL (cf. Chapitre 4.3.5.5d) du présent document).

Ces éléments sont représentés sur le schéma ci-dessous.

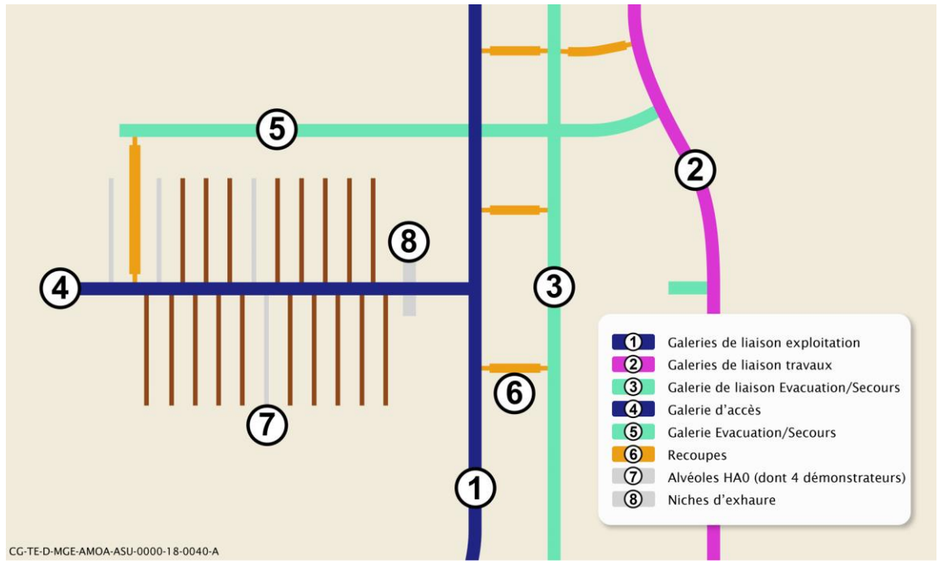


Figure 4-51 Plan général du quartier pilote HA

La hotte est tout d'abord déchargée du funiculaire en pied de la descenderie colis et reprise par un chariot de transfert qui l'achemine jusqu'à la galerie d'accès. La hotte est ensuite reprise par une navette qui assure la liaison jusqu'à l'alvéole de stockage où le colis est déchargé après ouverture de la hotte. Il est positionné dans l'alvéole par un robot pousseur.

Les alvéoles de stockage HA0 sont des ouvrages borgnes, faiblement inclinés et revêtus d'un chemisage en acier. Une vingtaine d'alvéoles HA0 doit être réalisée. Ils sont distribués de part et d'autre de la galerie d'accès HA0 et distants de 20 m environ. Ils ont environ une longueur de 80 m pour un diamètre utile de 60 cm. Ces éléments sont représentés sur la figure 4-52.

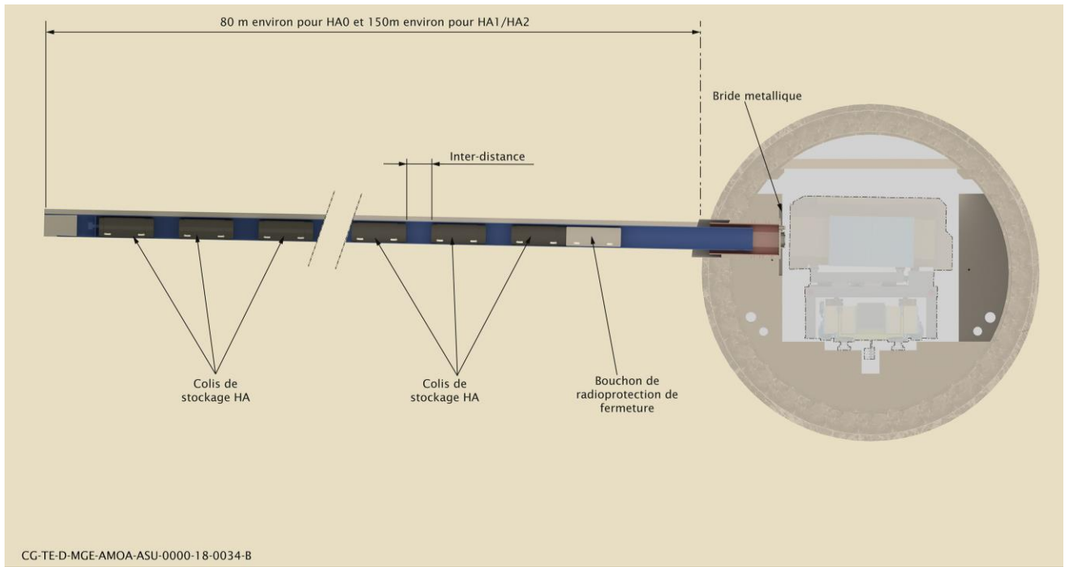


Figure 4-52 Coupe longitudinale schématique d'un alvéole HA0

4.3.5.7 Le quartier de stockage HA

Le quartier de stockage HA est destiné au stockage des déchets vitrifiés. Il est composé de plusieurs types d'ouvrages, répondant aux besoins de l'activité de stockage :

- les galeries de liaison d'exploitation (GLI), travaux et évacuation/secours ;
- les galeries d'accès ;
- les alvéoles de stockage ;
- les recoupes entre les galeries de liaison et entre les galeries d'accès.

Ils assurent les mêmes fonctions que ceux du quartier pilote HA et sont conçus, à ce stade des études, sur des principes similaires. La galerie de liaison assure la desserte depuis la zone de soutien logistique exploitation (ZSLE).

Le quartier de stockage HA comporte des alvéoles de stockage, regroupées en quatre sous-quartiers.

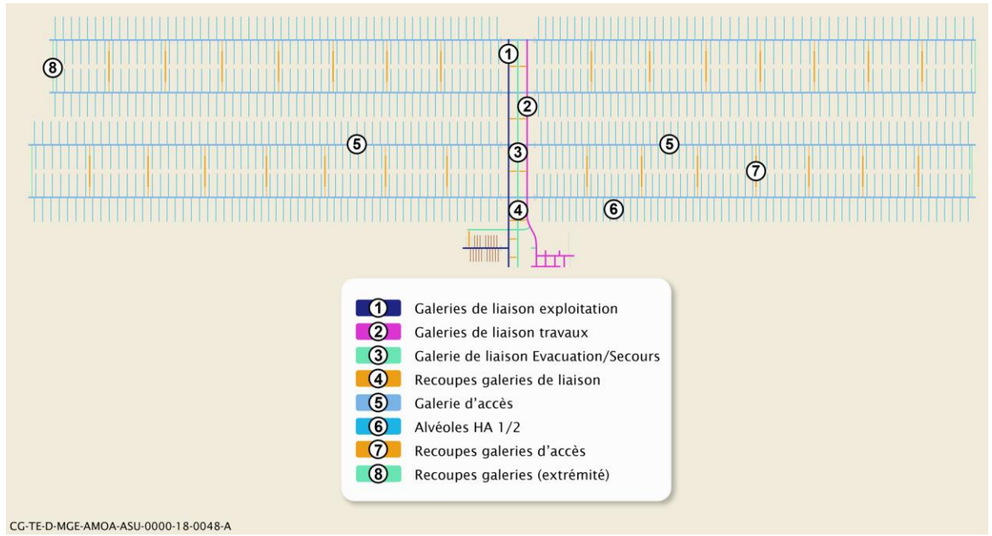


Figure 4-53 Vue d'ensemble du quartier de stockage HA

La hotte de transfert est tout d'abord déchargée du funiculaire en pied de la descenderie colis et reprise par un chariot de transfert qui l'achemine jusqu'à la galerie d'accès. La hotte est ensuite transportée par une navette qui assure la liaison jusqu'à l'alvéole de stockage, où le colis de stockage est déchargé après ouverture de la hotte. Il est mis en place dans l'alvéole par un robot pousseur.

Les alvéoles de stockage HA sont des ouvrages borgnes, faiblement inclinés et revêtus d'un chemisage en acier. Environ 900 alvéoles HA doivent être réalisés.

Ils sont disposés en quinconce de part et d'autre de chaque galerie d'accès. Leur espacement est de 45 m en moyenne. L'espacement entre les sous-quartiers laisse 30 m environ entre deux fonds d'alvéoles HA voisins. Chaque alvéole a une longueur de 150 m pour un diamètre utile de 60 cm environ. Ces éléments sont représentés sur le schéma de la figure ci-dessus.

4.3.5.8 Les ouvrages de fermeture des ouvrages souterrains

Pour garantir la mise en sécurité des déchets stockés sur de très longues périodes de temps, les ouvrages souterrains de Cigéo devront être refermés. Cette fermeture se réalisera de façon progressive, selon un processus d'autorisation spécifique. Le milieu géologique est choisi et l'installation de stockage est conçue de telle sorte qu'après la fermeture définitive de l'installation, la sûreté est assurée de façon passive, c'est-à-dire que les personnes et l'environnement seront protégés des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir.

Préalablement à la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo, pendant sa phase de fonctionnement, les premières opérations d'obturation d'alvéoles et de galeries et de fermeture de quartiers de stockage peuvent être anticipées, si les générations en charge de l'exploitation du centre de stockage le décident. En pratique, ces opérations consistent au démontage des équipements d'exploitation et à la construction d'ouvrages, complémentaires de la barrière géologique, pour assurer le bon fonctionnement du stockage après sa fermeture définitive.

Le remblaiement des galeries se réalise en réutilisant les déblais argileux excavés au moment du creusement et conservés en surface, appelées « verses vives » (cf. Chapitre 4.3.4.2 du présent document).

Si des décisions de fermeture interviennent pendant le fonctionnement, des ouvrages seraient réalisés pour :

- obturer les alvéoles de stockage ;
- remblayer les galeries ;
- sceller des galeries.

Pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo, certaines installations de surface pourraient aussi être démantelées. La principale opération de démantèlement prévue avant la fermeture définitive concernerait l'installation EP1, en lien avec la fin du remplissage et la fermeture anticipée éventuelle du quartier de stockage MA-VL.

La proposition de schéma de fermeture graduel, décrit ci-après, défini à partir des études d'avant-projet menées à ce stade, sera approfondi et soumis à la gouvernance du projet à échéances périodiques. L'engagement de ces étapes de fermeture fera l'objet de procédures d'autorisation adaptées :

- fermer le quartier pilote HA environ 40 ans après son remplissage. Il est ainsi maintenu 40 ans au plus haut niveau de surveillance et de récupérabilité.
- fermer le quartier de stockage MA-VL à l'issue de son remplissage. Il est ainsi maintenu environ 70 ans au plus haut niveau de surveillance et de récupérabilité.
- fermer le quartier de stockage HA à l'issue de son remplissage. En fonction de leur mise en service, les sous-quartiers sont ainsi maintenus jusqu'à environ 60 ans au plus haut niveau de surveillance et de récupérabilité.

Chaque quartier serait fermé en une seule et même opération regroupant la construction des ouvrages d'obturation de tous les alvéoles et le remblaiement et le scellement des galeries. Cette disposition permet une organisation optimisée des travaux de fermeture.

Après la réception des derniers colis et la fermeture des quartiers, la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo, que seule une loi peut autoriser (L. 542-10-1 du code de l'environnement), consiste à remblayer les dernières galeries de la zone de soutien logistique, à sceller et à remblayer les puits et les descenderies. Les installations de surface sont démantelées. Certaines d'entre elles perdureront pour les besoins de la phase de surveillance.

4.3.5.9 L'absence d'incidence directe des activités souterraines du centre de stockage sur les terrains situés en surface, à la verticale de la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS)

L'Andra n'a pas prévu d'acquérir les terrains situés à la verticale de la ZIOS, si ceux-ci n'accueillent pas d'installations de surface du centre de stockage Cigéo. En effet, les activités du centre non pas d'effet sur les usages essentiellement agricoles et forestiers menés actuellement sur ces terrains.

Les servitudes éventuellement nécessaires pour protéger les installations du centre de stockage Cigéo et son environnement proche seront fixées par le décret d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base qui viendra définir un périmètre de protection des ouvrages, notamment souterrains, au sein duquel des servitudes d'utilité publique pourront être mises en place (cf. article L. 542-10-1 du code de l'environnement). Ces servitudes, qui viendront encadrer les usages des terrains en surface, ont pour objectif de préserver l'intégrité du stockage (notamment la couche du Callovo Oxfordien qui permet d'assurer la sûreté passive du centre à long terme) en réglementant par exemple les forages à grande profondeur.

D'autres restrictions d'usage des terrains, sous forme de servitudes pourraient éventuellement (à la demande du territoire ou en réponse aux analyses détaillées des risques présentées dans le futur dossier de demande d'autorisation de création) être mises en place au sein ou en dehors de ce périmètre de protection.

a) Les vibrations

Les activités souterraines de construction et d'exploitation du centre de stockage Cigéo sont des sources de vibrations potentiellement susceptibles d'entraîner des incidences en surface. Il s'agit des vibrations générées par les machines de creusement, par les moyens de transport des hottes de manutention des colis de déchets, par la circulation de véhicules et d'engins. La source de vibrations jugée la plus importante est celle liée aux machines de creusement.

Les vibrations générées par les machines les plus puissantes utilisées pour le creusement des ouvrages souterrains ne peuvent pas être supérieures à celles d'un tir de mine de 100 g d'explosif environ. La vitesse de vibration initiale peut être de l'ordre de 10 mm/s, comme pour un tir de mine, mais elle décroit très rapidement en se propageant dans le sous-sol. Au-delà de quelques mètres, l'atténuation est très importante (plus d'un facteur 10). Au-delà de quelques dizaines de mètres, les vibrations ne sont plus ressenties.

Les parties de l'installation souterraine situées dans le Callovo-Oxfordien étant éloignées d'au moins 500 m des terres agricoles et forestières hors du centre Cigéo, aucune vibration liée aux machines de creusement ne sera ressentie en surface.

S'agissant des descenderies, elles sont éloignées d'au moins 100 m des terrains situés entre la zone descenderie et la zone puits. L'énergie des vibrations émises par la circulation du funiculaire et des engins sera imperceptible en surface.

b) La température

Les activités de construction et d'exploitation au sein de l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo sont des sources de chaleur potentiellement susceptibles d'entraîner des incidences en surface. Il s'agit des dégagements thermiques des engins et des équipements en fonctionnement et des colis de déchets exothermiques stockés, principalement les déchets HA.

La ventilation de l'installation évacue la majeure partie de la chaleur émise dans l'installation fond, à l'exception de celle dégagée par les colis de déchets HA qui se propage majoritairement dans le milieu géologique.

Le transfert de chaleur au travers du milieu géologique se fait par conduction. Les formations géologiques concernées par le centre de stockage ont des diffusivités thermiques de l'ordre de 10^{-6} m²/s. Le temps caractéristique de propagation de la chaleur depuis 500 m de profondeur jusqu'à la surface serait de plusieurs milliers d'années.

Les sources de chaleur liées aux activités de construction et d'exploitation ont des durées limitées (quelques heures, quelques années). La chaleur transmise dans le milieu géologique est réduite par la ventilation. Sa propagation s'amortit sur quelques mètres.

Le dégagement de la chaleur produite par les déchets décroit dans le temps avec la radioactivité. Pour les déchets HA, qui sont les plus exothermiques, la conception limite la température due au chargement thermique du stockage à 100 °C dans le Callovo-Oxfordien.

Compte tenu de la décroissance radioactive des déchets et de la température limite de 100 C fixée par la conception, l'élévation maximale de température dans le milieu géologique est de l'ordre de 20 °C à environ 50 m du quartier de stockage HA et de moins de 10 °C à environ 150 m de la surface. Ces maximums de température sont atteints très lentement, respectivement au bout d'environ 1 000 ans et 2 000 ans. En surface, l'élévation de la température est imperceptible et non significative au regard des variations climatiques qui déterminent la température à la surface du sol.

c) L'éventuel effondrement

L'effondrement d'un ouvrage souterrain de l'installation fond du centre de stockage Cigéo, très improbable par conception, est potentiellement susceptible d'engendrer une incidence en surface, par exemple du type fontis[139].

L'installation souterraine du centre de stockage Cigéo fond, est éloignée de la surface et représente un volume très petit par rapport au volume de roche l'environnant (localement moins de 0,1 % de la formation du Callovo-Oxfordien). Il est à comparer au ratio pour une mine (on parle de taux de défruitement) qui peut varier de 40 % à 75 % dans le cas d'une exploitation par chambres et piliers. Il est encore plus faible après fermeture définitive avant laquelle les ouvrages sont remblayés et scellés.

Les ouvrages souterrains de l'installation fond du centre de stockage Cigéo sont significativement espacés entre eux en regard de leur dimension. Cette séparation vise à limiter toute interaction physico-chimique mais contribue à réduire les risques de nature mécanique. Par ailleurs, tous les ouvrages sont revêtus (revêtement en béton ou chemisage), ce qui contribue à leur stabilité. Enfin, le Callovo-Oxfordien présente des caractéristiques mécaniques élevées qui contribuent à la faisabilité et la bonne tenue mécanique des ouvrages souterrains dans le temps, comme le montre les résultats du Laboratoire souterrain. De plus, les roches sus-jacentes sont résistantes, particulièrement la formation de l'Oxfordien carbonaté située juste au-dessus du Callovo-Oxfordien.

De ce fait, l'éventuel effondrement accidentel d'un ouvrage souterrain, voire de toute l'installation souterraine, aurait un effet mécanique d'extension limitée à quelques mètres, voire à la dizaine de mètres au maximum à proximité des ouvrages effondrés, et serait sans incidence perceptible en surface.

d) Les rayonnements produits par les colis de déchets radioactifs

Les déchets HA et MA-VL stockés émettent des rayonnements, principalement béta/gamma et alpha, potentiellement susceptibles d'engendrer une incidence en surface.

Le rayonnement alpha est arrêté très facilement, même par une feuille de papier (cf. Chapitre 1 du présent document).

Le rayonnement alpha est arrêté rapidement par les solides, par exemple des feuilles d'aluminium.

Le rayonnement gamma décroit du fait de la distance parcourue et de la densité du milieu traversé.

Le débit de dose absorbée au contact des colis de stockage est au maximum de l'ordre de 20 Gy/h.

Le Callovo-Oxfordien et les formations géologiques situées entre le Callovo-Oxfordien et la surface, de par leurs densités élevées (la densité du Callovo-Oxfordien est proche de celle du béton) et de par leurs épaisseurs, absorbent les rayonnements émis par les colis de déchets. Ils sont imperceptibles en surface et n'augmentent pas le niveau du rayonnement émis naturellement par le sol.

Par ailleurs, durant la période de fonctionnement et sur de très longues échelles de temps après la fermeture définitive du centre de stockage (plusieurs centaines de milliers d'années), aucun radionucléide n'est susceptible de migrer au travers du milieu géologique jusqu'en surface.

4.3.6 La liaison intersites

La liaison intersites, d'une surface totale de 46 ha dont 23 remaniés, assure les échanges entre la zone descenderie et la zone puits et permet l'accès des véhicules légers à la zone puits.

Elle est constituée de trois infrastructures : une piste routière et une bande transporteuse semi-enterrée, toutes deux privées, ainsi que d'une route ouverte au public. Le plan de localisation de cette liaison intersites est présenté en figure 4-54.

[139] Un fontis est un effondrement du sol en surface, causé par la déliquescence souterraine progressive des terrains porteurs. Dans une cavité enfouie, naturelle ou creusée par l'homme, si la pression des terrains ou la circulation de fluides provoquent la détérioration du plafond de la cavité, des conséquences peuvent être constatées jusqu'en surface.

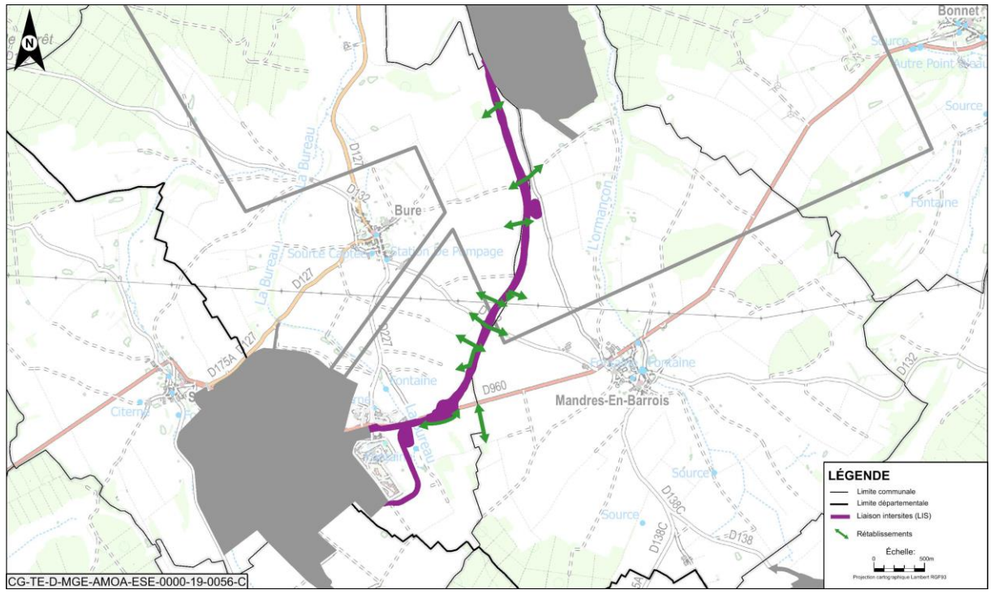


Figure 4-54 Localisation de la liaison intersites

Les deux infrastructures privées limitent les interférences des activités du centre de stockage Cigéo avec le réseau local de circulation.

Leurs fonctions sont :

- la circulation des poids lourds entre la zone puits et la zone descenderie (la LIS peut être rejointe depuis la route départementale D60/960) ;
- l'acheminement des matériaux extraits du creusement depuis la zone descenderie jusqu'à la zone puits pour leur dépôt, principalement lors de la construction initiale ;
- l'acheminement des matériaux de construction livrés en zone descenderie jusqu'à la zone puits.

Les objectifs de la route ouverte au public sont :

- la desserte de la zone puits par le sud depuis la route départementale D60/960 pour les véhicules légers ;
- l'accès aux parcelles agricoles *via* les chemins ruraux interceptés par les deux infrastructures privées.

Le tracé de cette liaison s'étend sur deux communes meusiennes. Le tableau 4-15 récapitule les informations administratives correspondantes.

Tableau 4-15 Région, département et communes traversés par le projet de liaison intersites

Région	Département	Commune	ITE
Grand Est : Alsace Champagne - Ardenne Lorraine	Meuse (55)	Bure	Raccordement au sud – est et à l'est de la zone descenderie
		Bure	Section courante
		Mandres-en-Barrois	
		Bure	Raccordement au sud – ouest de la zone puits

La longueur totale des infrastructures privées de la liaison intersites s'élève à environ 5 kilomètres. La longueur totale de la route ouverte au public s'élève à environ 4 kilomètres.

L'accès de la piste routière privée est adapté aux véhicules de type poids lourds en lien avec le chantier et le fonctionnement du centre de stockage Cigéo. Elle permet également les opérations de maintenance sur le convoyeur semi-enterré.

Le convoyeur semi-enterré à bande transporteuse est implanté dans un caisson en béton armé, composé de deux murets recouverts par des dalles (cf. Figure 4-55).



Figure 4-55 Exemple de convoyeur à bande en caisson béton

L'Andra ne prévoit pas de clôturer la liaison intersites.

La route ouverte au public pourra être rétrocédée au Conseil départemental de la Meuse.

Le tracé de la liaison intersites croise et/ou modifie deux routes départementales (RD), onze chemins ruraux (CR) et deux chemins d'exploitation agricole (CA) dans leur section courante.

4.3.7 L'installation terminale embranchée

L'installation terminale embranchée (ITE) du centre de stockage Cigéo comprend une infrastructure ferroviaire privée et une plateforme logistique.

4.3.7.1 L'infrastructure ferroviaire

L'infrastructure ferroviaire privée de l'installation terminale embranchée, d'une surface totale de 121 ha dont 53 ha remaniés, permet de raccorder la zone descenderie du centre de stockage Cigéo au réseau ferré national (RFN). Le plan de localisation de cette infrastructure ferroviaire est présenté en figure 4-56.

Les objectifs de cette infrastructure sont :

- l'acheminement des colis de déchets radioactifs depuis les sites des producteurs ;
- l'acheminement des matériaux de construction au plus tôt pour alimenter les chantiers durant les différentes phases travaux de déploiement du centre de stockage Cigéo.

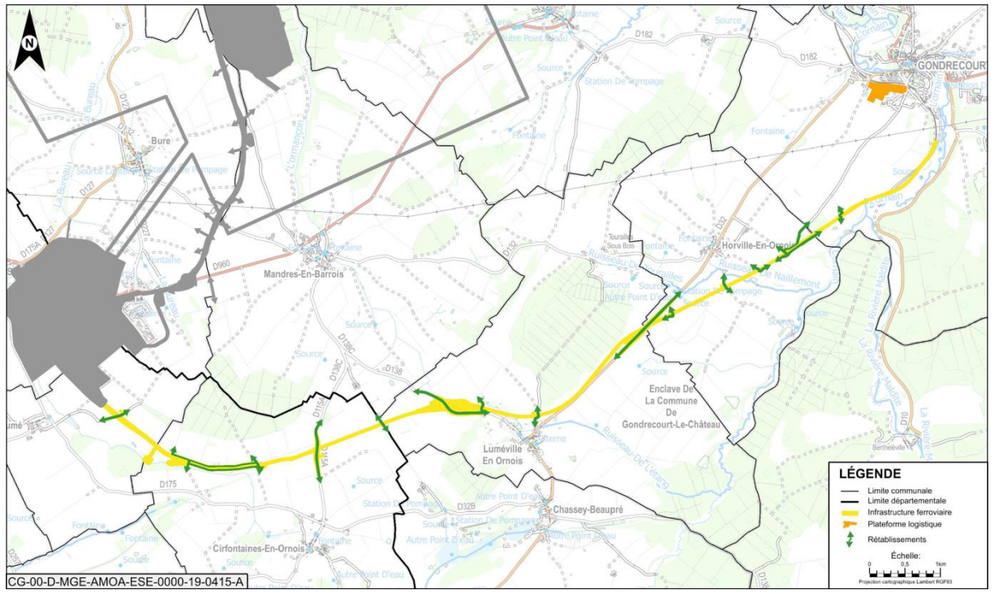


Figure 4-56 Localisation de l'installation ferroviaire terminale embranchée

Le territoire traversé par l'infrastructure ferroviaire de l'installation terminale embranchée s'étend sur quatre communes des départements meusien et haut-marnais.

Le tableau ci-dessous récapitule les informations administratives correspondantes.

Tableau 4-16 Région, départements et communes traversés par l'infrastructure ferroviaire de l'installation terminale embranchée

Région	Département	Commune	ITE
Grand Est : Alsace, Champagne-Ardenne, Lorraine	Meuse (55)	Gondrecourt-le-Château	Départ Raccordement au réseau ferroviaire national
		Gondrecourt-le-Château	Section courante
		Horville-en-Ornois	
	Haute-Marne (52)	Cirfontaines-en-Ornois	
		Gillaumé	

La longueur totale de l'infrastructure ferroviaire de l'installation terminale embranchée est d'environ 14 km, dont 10 km s'inscrivant sur le tracé d'une ancienne ligne ferroviaire (ancienne ligne Gondrecourt-le-Château/Joinville) dont elle reprend la plateforme. Cette dernière est désaffectée depuis plusieurs décennies et ne comporte plus d'équipement ferroviaire (rails, traverses et ballast). Seuls les ouvrages d'art et des maisons de garde-barrière subsistent sur le territoire.

L'infrastructure ferroviaire est constituée d'une voie unique avec un chemin latéral en support. L'infrastructure ferroviaire de l'installation terminale embranchée est une infrastructure privée. Par ailleurs, le chemin latéral ne sera pas ouvert à la circulation du public.

L'Andra n'a pas prévu de clôturer l'infrastructure ferroviaire.

L'infrastructure ferroviaire de l'installation terminale embranchée intercepte des routes et des chemins dont la continuité doit être rétablie dans de bonnes conditions de circulation et de visibilité. La localisation de ces rétablissements est présentée en figure 4-56.

Durant la phase de construction initiale, l'ITE est en exploitation. Elle sert au transport de fret jusqu'au terminal fret ferroviaire situé sur la zone descenderie. Le trafic fret est estimé à environ 3 trains par jour (moyenne mensuelle maximale en phase de construction initiale). Le trafic se fera majoritairement en journée. La vitesse sur l'ITE sera de 30 km/h.

En phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo, l'accès par voie ferrée permet :

- l'arrivée de la grande majorité des colis de déchets radioactifs destinés au stockage jusqu'au terminal ferroviaire nucléaire de la zone descenderie. En effet, Les colis primaires de déchets HA et MA-VL arriveront sur le centre de stockage Cigéo essentiellement par convois ferroviaires depuis les sites d'expédition des producteurs où ils sont entreposés. Au démarrage du stockage de déchets radioactifs en phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo, les flux de convois acheminés par voie ferroviaire sont estimés à environ 8 trains par an. Ensuite, le flux s'intensifierait pendant la phase de fonctionnement pour atteindre 76 trains par an, soit une moyenne d'environ 6 trains par mois. Les trains circuleront majoritairement en journée ;
- la poursuite de l'acheminement des matériaux. Le trafic fret est estimé entre 1 et 2 trains par semaine, en journée.

4.3.7.2 La plateforme logistique de Gondrecourt-le-Château

Implantée sur un ancien site industriel, cette plateforme logistique privée a une surface de 9 hectares.

Son implantation concerne la commune définie au tableau suivant :

Tableau 4-17 Commune d'implantation de la plateforme logistique

Région	Département	Commune	ITE
Grand Est : Alsace, Champagne-Ardenne, Lorraine	Meuse (55)	Gondrecourt-le-Château	Plateforme logistique

Elle comprend trois voies ferrées raccordées à la ligne ferroviaire 027000, des voies routières associées en lien avec la RD 32 et des aires de conservation de matériaux/matériels.

Les quatre bâtiments existants, actuellement utilisés par l'Andra, notamment pour la conservation d'échantillons (carottes géologique) de sols extraits lors de forages, sont conservés (cf. Figure 4-57). Aucune nouvelle construction n'est aujourd'hui envisagée. Le dispositif actuel d'assainissement des eaux de la plateforme est conservé. Une réhabilitation du dispositif actuel de gestion des eaux pluviales est prévue pour la plateforme logistique de Gondrecourt-le-Château (en attente de la définition technique des futures installations/activités implantés sur la plateforme logistique).

Il est possible que les fonctionnalités de cette plateforme évoluent dans le futur en fonction des activités de l'Andra. La plateforme pourrait notamment être utilisée pour faciliter la construction de l'ITE (accueil d'installation de chantier, d'équipements…) ou pour gérer les flux de matériaux pour la construction du centre de stockage Cigéo.

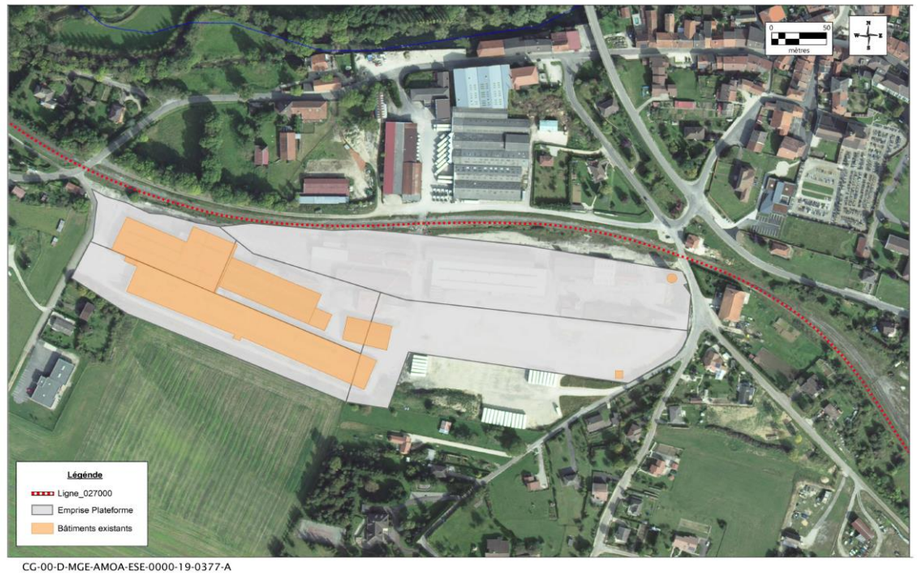


Figure 4-57 Vue aérienne de la plateforme logistique de Gondrecourt-le -Château

4.3.8 Les principales modalités d'exécution des travaux du centre de stockage Cigéo menés lors des phases d'aménagements préalables et de construction initiale

Le phasage du projet global Cigéo est décrit au chapitre 5 du présent document.

Les travaux décrits au présent chapitre concernent les deux premières phases du projet, c'est-à-dire la phase d'aménagements préalables et la phase de construction initiale. Ils sont menés sur le centre de stockage Cigéo pour la réalisation de ses ouvrages et installations.

D'autres travaux du projet global Cigéo sont menés pendant la phase d'aménagements préalables, en dehors du centre de stockage Cigéo. Ils visent principalement (cf. Chapitre 4.1 du présent document) :

- l'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo ;
- l'adduction d'eau potable ;
- la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 entre Nançois-Tronville et Gondrecourt-le-Château ;
- la déviation de la route départementale D60/960 ;
- la caractérisation, la surveillance environnementale et le suivi des mesures environnementales (forages, mesures sur le milieu naturel, inventaires).

4.3.8.1 Les travaux menés sur le centre de stockage Cigéo pendant la phase d'aménagements préalables

Les travaux menés lors de la phase d'aménagements préalables sur le centre de stockage Cigéo ont pour objectif de préparer les travaux de construction des bâtiments et ouvrages du centre de stockage Cigéo.

Les principaux travaux communs pour la zone descenderie et pour la zone puits consistent :

- à sécuriser les sites (mise en place de clôtures de sécurisation périphérique) ;
- à terrasser les plateformes d'accueil des utilités ;
- à viabiliser et à organiser les plateformes nécessaires aux installations de chantier des premières entreprises de construction ;
- à réaliser les terrassements (cf. Chapitre 5.3.1 du présent document) ;
- à construire certains ouvrages et installations supports, notamment sur les plateformes d'accueil des utilités, par exemple la déchetterie industrielle conventionnelle et les postes de transformation et de distribution 90/20 kV ;
- à mener des campagnes d'investigations géotechniques (cf. Chapitre 4.3.8.4 du présent document).

L'ensemble des travaux s'accompagne de la mise en œuvre des réseaux internes (eau, électricité, télécoms) nécessaires aux installations de chantier, ainsi que des voiries structurantes permettant la circulation des flux des chantiers.

D'agissant de la gestion des eaux, des bassins et ouvrages d'assainissement permettront la gestion des eaux pluviales et des eaux de ruissellement durant les premières années des travaux avant la mise en fonctionnement des installations définitives. Des ouvrages d'assainissement seront réalisés pour la gestion des eaux usées des installations de chantier, dans l'attente de la mise en service des ouvrages définitifs prévus pour le fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

Des groupes électrogènes pourront être utilisés ponctuellement avant les raccordements électriques lorsque nécessaire.

Certains des travaux de terrassement pourront nécessiter l'utilisation d'explosifs (terrassements grandes masses).

En complément de ces travaux communs, les travaux menés spécifiquement sur la zone descenderie pendant la phase d'aménagements préalables comprennent également :

- la réalisation de fouilles archéologiques prescrites suite aux diagnostics archéologiques déjà réalisés en 2015-2016 ;
- la réalisation d'une paroi étanche (profondeur d'environ 18 m) visant à protéger le bâtiment nucléaire EP1 (cf. Chapitre 4.3.3.2 du présent document), l'ouvrage de tête de descenderie colis, l'entrée de la descenderie de service et le terminal ferroviaire nucléaire des remontées de nappe phréatique. Des ouvrages de drainages des eaux sont associés à cette paroi pour permettre leur réinjection directe dans le milieu naturel. À ce stade, ce dispositif est une option, parmi d'autres, dont la conception fait l'objet d'une démarche itérative en regard de l'objectif de protection des ouvrages.

En complément des travaux communs, les travaux menés spécifiquement sur la zone puits pendant la phase d'aménagements préalables comprennent également :

- les premières opérations de défrichement du bois Lejuc qui correspondent à la surface d'implantation des installations de surface de la zone puits et à la première zone de gestion des déblais du Callovo-Oxfordien excavé (cf. Chapitre 2.7.5 du présent document) ;
- la réalisation des diagnostics archéologiques et les éventuelles fouilles préventives en cas de découverte de vestiges d'intérêt (cf. Chapitre 4.3.8.3 du présent document) ;
- la préparation de la première plateforme de gestion des déblais de Callovo-Oxfordien excavé. Cette première plateforme (cf. Chapitres 2.6.2.10 et 2.7.5 du présent document) permet de gérer les déblais issus du creusement de la phase de construction initiale. Elle sera étendue ultérieurement en lien avec l'extension progressive de l'installation souterraine.

Les travaux menés lors de la phase d'aménagements préalables sur le centre de stockage Cigéo comprennent également des travaux de préparation de la construction de la liaison intersites (cf. Chapitre 4.3.6 du présent document) et l'installation terminale embranchée (cf. Chapitre 4.3.7 du présent document. Ils sont toutefois de moindre ampleur que ceux menés sur la zone descenderie et la zone puits.

Certains des travaux, commencés pendant la phase d'aménagements préalables, pourront le cas échéant se terminer durant la phase de construction initiale, en particulier des travaux de terrassement des plateformes.

4.3.8.2 Précisions sur les travaux de défrichement de la zone puits menés pendant la phase d'aménagements préalables

Les premières opérations de défrichement sont effectuées au sein du bois Lejuc. Elles concernent l'aire d'implantation des installations de surface de la zone puits et l'aire destinée à la gestion des déblais du Callovo-Oxfordien excavés lors des premiers creusements (Z1 des verses, cf. Chapitres 2.6.2.10 et 2.7.5 du présent document) qui constituent une surface remaniée totale d'environ 136 ha.

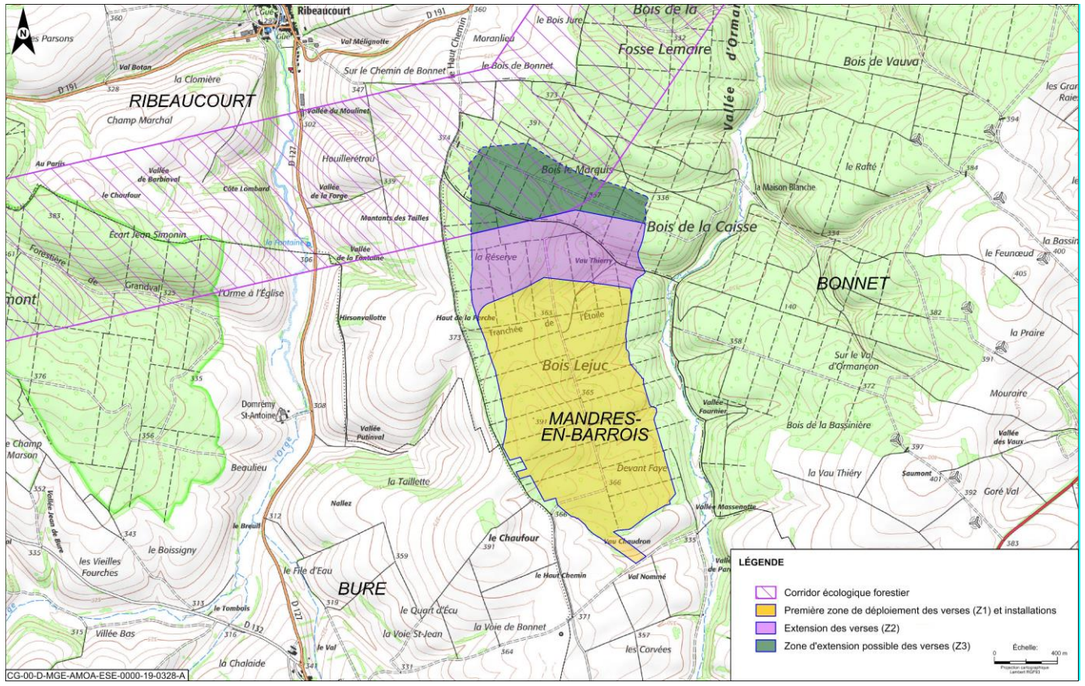


Figure 4-58 Périmètre des installations de la zone puits situées en zone boisée

Les travaux de défrichement de la zone puits sont nécessaires pour y engager les opérations d'archéologie préventive.

Le défrichement est effectué en plusieurs temps :

- un abattage des arbres sans dessouchage préalable aux diagnostics d'archéologie préventive ;
- un dessouchage partiel réalisé par les archéologues pendant le diagnostic d'archéologie préventive ;
- un dessouchage réalisé par des entreprises sur les emprises libérées par les archéologues après les diagnostics ;
- un dessouchage réalisé par les archéologues sur les emprises faisant l'objet de prescriptions de fouilles.

L'abattage des arbres se fait en période hivernale pour respecter les enjeux écologiques (cf. volume IV).

Les travaux de défrichement font l'objet de mesures de compensation forestière (cf. volume 4 de la présente Étude d'impact).

4.3.8.3 Précisions sur les travaux d'archéologie préventive menés pendant la phase d'aménagements préalables

Classiquement, les opérations d'archéologie préventive sont réalisées en deux temps :

- dans un premier temps, des « diagnostics » archéologiques sont réalisés par l'Institut national de recherches archéologiques préventives (INRAP) ;
- en fonction des résultats du diagnostic, des « fouilles » peuvent être prescrites par arrêté préfectoral. Dans ce cas, des « fouilles » sont ensuite réalisées par l'INRAP ou par tout autre opérateur agréé par l'État.

L'ARCHÉOLOGIE PRÉVENTIVE

(source INRAP https://www.inrap.fr/les-etapes-du-diagnostic-9721 (122) et https://www.inrap.fr/les-etapes-de-la-fouille-9722 (123))

En amont de grands travaux d'aménagement (lignes à grande vitesse, autoroutes...) ou lorsqu'un permis de construire est déposé (parking, immeuble), le préfet de région et son service archéologique peuvent ordonner un diagnostic archéologique. Son objectif est de vérifier si le terrain recèle des traces d'anciennes occupations humaines susceptibles d'être détruites lorsque le sol sera remanié. Réalisés bien avant que les travaux ne commencent, le diagnostic permet d'éviter qu'ils soient interrompus en cas de découverte fortuite. Chaque année, environ 8 % des projets d'aménagement font l'objet d'un diagnostic archéologique.

Dans la plupart des cas, le diagnostic consiste en des sondages à intervalles réguliers pour déterminer la présence d'éventuels vestiges. La taille d'un sondage varie en fonction du terrain. En règle générale, il s'agit d'une tranchée de 1,3 à 3 m de large (correspondant à la largeur du godet de la pelle mécanique), et de longueur variable. Lorsque des vestiges apparaissent, il est parfois utile d'élargir légèrement les sondages - alors dénommés "fenêtres" -, pour une meilleure compréhension. La profondeur dépend du niveau d'enfouissement des vestiges. Quelques-uns des vestiges apparus peuvent être partiellement fouillés, les objets ainsi recueillis et analysés permettant de dater les occupations humaines auxquels ils sont liés. À l'issue du diagnostic, un rapport de diagnostic est rendu aux services de l'État (DRAC/Service régional de l'Archéologie de la région concernée).

Lorsque le diagnostic a attesté la présence de vestiges archéologiques dignes d'intérêt scientifique et suffisamment conservés, l'État peut prescrire une fouille archéologique préventive. Cela concerne environ 20 % des diagnostics. Cette opération fait l'objet d'un contrat entre l'aménageur et l'opérateur choisi par ses soins. L'intervention sur le terrain se déroule suivant l'ordre successif des couches archéologiques, dont chacune correspond à un moment de l'histoire du site. Tous les vestiges mis au jour sont enregistrés et documentés (relevés topographiques, dessins, photographies, plans et coupes). Le mobilier est transféré au centre de recherches archéologiques. Dans un deuxième temps, les données scientifiques recueillies sur le terrain sont exploitées par les archéologues pour reconstituer l'histoire du site, ses occupations humaines et son évolution à travers les siècles. Les conclusions des fouilles sont consignées dans un rapport, remis par l'opérateur aux services de l'État.

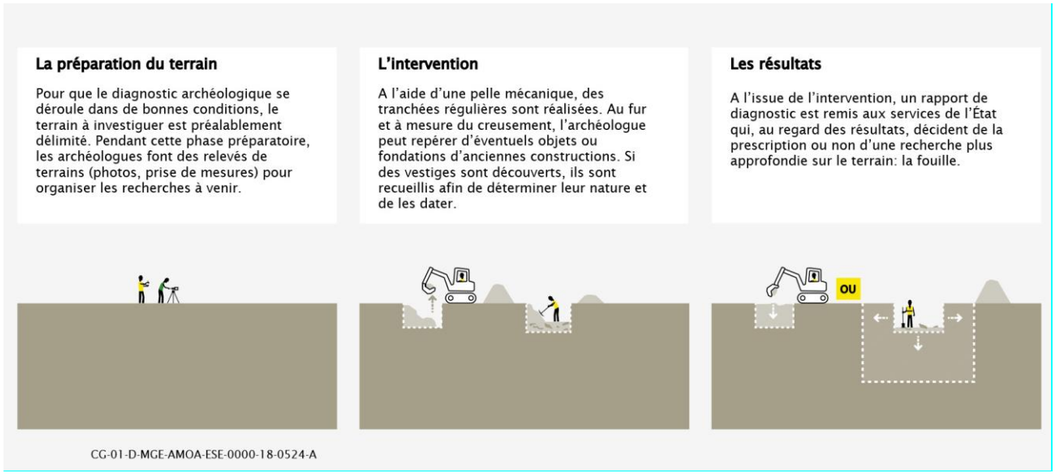


Figure 4-59 Principe d'un diagnostic archéologique

Un premier diagnostic d'archéologie préventive a été réalisé en 2015-2016 par l'INRAP sur les surfaces retenues pour l'implantation de la zone descenderie et de l'ITE du centre de stockage Cigéo. Il a mis en évidence des vestiges pouvant présenter un intérêt archéologique. Des opérations de fouilles ont été prescrites à l'Andra par le Préfet. L'Andra procédera à des fouilles archéologiques sur une surface minimum d'environ 70 ha.

Sur la zone puits, pour des raisons techniques liées aux investigations archéologiques en milieu boisé et la sécurité des archéologues, le diagnostic ne peut pas se dérouler sans l'abattage de certains arbres. Sur la zone d'implantation de la liaison intersites (LIS), les diagnostics archéologiques n'ont pas encore été réalisés, son tracé définitif ayant été arrêté à l'issue de la concertation (cf. Chapitre 2.6.2.7 du présent document).

Les opérations d'archéologie préventive (diagnostics et fouilles qui restent à effectuer préalablement à l'aménagement des zones de surface du centre de stockage Cigéo) seront planifiées et organisées par le ou les opérateurs agréés en accord avec l'Andra. Leur durée dépend des éventuels vestiges découverts. Ces opérations seront engagées dès que l'Andra aura obtenu les autorisations nécessaires. Elles permettront d'aménager le centre de stockage Cigéo sans craindre la destruction involontaire de vestiges dignes d'intérêt scientifique et patrimonial.

4.3.8.4 Les travaux menés sur le centre de stockage Cigéo lors de la phase de construction initiale

La phase de construction initiale du centre de stockage Cigéo débute à l'obtention du décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo.

Les principaux travaux menés pendant cette phase visent la construction des ouvrages et bâtiments permettant la mise en service de l'INB du centre de stockage, c'est-à-dire la réception de premiers colis de déchets radioactifs. Ils comprennent la construction d'installations en surface et le creusement et à la construction des premiers ouvrages souterrains (cf. Chapitre 4.3 du présent document).

Les principaux ouvrages construits et équipés pendant cette phase sont :

- l'installation de réception et de préparation des colis de déchets radioactifs avant leur stockage (EP1) et tous les autres bâtiments de surface liés au fonctionnement de l'INB du centre de stockage ;
- les liaisons surface-fond (descenderies et puits) et les zones souterraines de soutien logistique ;
- les ouvrages souterrains du quartier pilote HA et les premiers ouvrages du quartier de stockage des colis de déchets MA-VL.

Pour permettre ces opérations de construction, différentes installations temporaires seront installées sur les sites.

Ces installations temporaires de chantier comprennent des bureaux (bungalows), des centrales à béton, des parkings et des voiries de dessertes, des zones de préfabrication d'éléments structurels, des zones de maintenance, de stockage, d'entretien et de nettoyage des matériels ainsi que des moyens de levage.

La zone descenderie accueille les installations temporaires de chantier nécessaires à la construction des bâtiments de surface de la zone descenderie et au creusement et à la construction des descenderies et des premiers ouvrages souterrains des zones de soutien logistique et des zones de stockage.

La zone puits accueille les installations temporaires de chantier nécessaires à la construction des bâtiments de surface de la zone puits et au creusement des puits.

Sur chaque zone, des chantiers sont répartis sur différentes parties de la zone en fonction de la nature des travaux. Par exemple, sur la zone descenderie, le chantier de construction des descenderies est séparé du chantier de construction du bâtiment EP1. Ils disposent chacun d'une centrale à béton adaptée à l'importance des besoins et aux caractéristiques particulières des bétons nécessaires à la construction des ouvrages. Le béton pour les autres bâtiments est fourni par des centrales à béton réparties sur le site.

Sur la zone descenderie, une centrale à enrobé pour imperméabiliser les voiries, installée dès les aménagements préalables, est conservée jusqu'à la fin de la construction initiale.

Comme les aménagements préalables, les travaux de construction initiale s'accompagnent d'investigation géotechniques.

CAMPAGNES DE FORAGES GÉOTECHNIQUES

De façon classique, préalablement à la construction d'ouvrages et de bâtiments, des campagnes de forages géotechniques sont réalisées pour évaluer la capacité du sol et du sous-sol à les accueillir et pour finaliser les études de conception et de dimensionnement des bâtiments.

Différentes campagnes sont réalisées de manière graduelle. Elles permettent de définir, dans un premier temps et durant la phase de conception des ouvrages, les principes généraux de construction (campagne géotechnique G1). Puis, dans un second temps, sont définis les principes constructifs présentant une ébauche dimensionnelle des fondations des ouvrages (campagne géotechnique G2). Enfin, de dernières campagne sont réalisées par les entreprises en charge de la construction lors de l'exécution des travaux (campagnes géotechniques G3/G4).

Pour le centre de stockage Cigéo, des campagnes de forages géotechniques de type G1 et G2 ont déjà été menées sur l'emprise des ouvrages de la zone descenderie et de l'installation terminale embranchée. Elles sont encore à réaliser pour la zone puits et pour la liaison intersites.

Les campagnes de forages géotechniques G3 et G4 seront réalisées ultérieurement par les entreprises d'exécution.

4.4 Les opérations du projet global Cigéo, situées hors du centre de stockage

4.4.1 L'alimentation électrique

4.4.1.1 L'organisation générale et la localisation

RTE (Réseau de transport d'électricité) est le maître d'ouvrage de l'opération d'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo.

L'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo est assurée par un raccordement sur la ligne existante 400 kV Houdreville/Mery[140] (cf. Figure 4-60

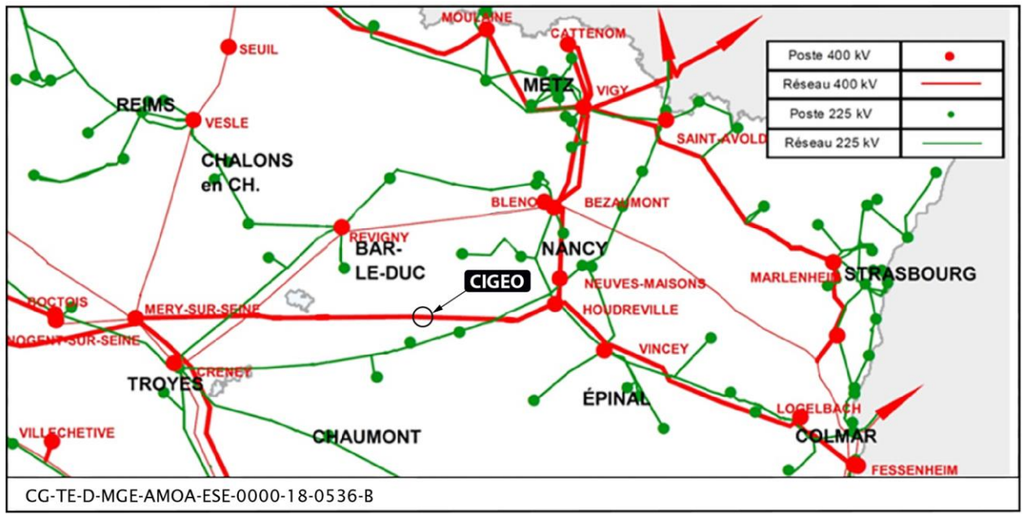


Figure 4-60). Cette ligne « Très Haute Tension » passe entre la zone descenderie et la zone puits.

» DÉFINITION

Le courant électrique est déplacé en grande quantité avec un minimum de perte sur les lignes à très haute tension (400 kV et 225 kV), similaires à des autoroutes de l'électricité. Des réseaux secondaires sur de plus petites distances, à l'image des départementales, transportent l'électricité en haute tension (90 kV et 63 kV) et moyenne tension (20 kV).

Des transformateurs sont nécessaires sur ce réseau de transport de l'électricité pour aiguiller l'électricité dans la direction souhaitée, faire le lien entre les lignes de différentes tensions, assurer la sécurité des installations.

L'appareillage électrique d'un transformateur à haute tension est organisé en cellules assemblées et reliées entre elles. Une cellule comprend les différents organes nécessaires au fonctionnement d'un poste : disjoncteur, sectionneur, transformateur. Elle sert à raccorder les jeux de barres aux transformateurs du poste et/ou aux lignes électriques sortant du poste.

Un jeu de barres désigne un ensemble de conducteurs métalliques reliant les cellules entre elles.

[140] Houdreville est située au sud de Nancy, à l'est du centre de stockage. Mery est située au nord de Troyes, à l'ouest du centre de stockage.

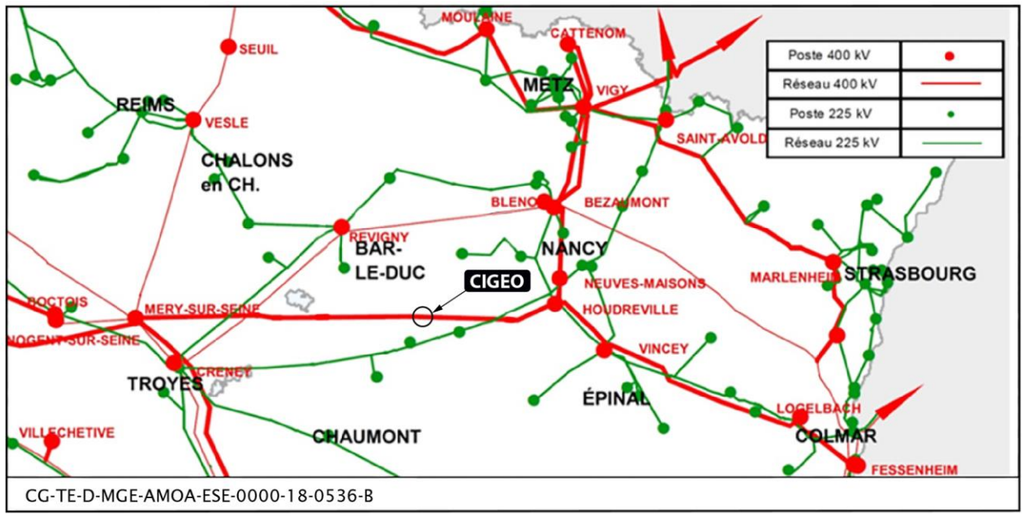


Figure 4-60 Localisation du raccordement électrique du centre de stockage Cigéo sur le réseau 400 kV

Les nouvelles liaisons électriques enterrées qui distribuent l'électricité au centre de stockage Cigéo sont branchées sur la ligne 400 kV existante grâce à un poste de transformation.

L'alimentation complète du centre de stockage Cigéo schématisée sur la figure 4-61 nécessite la réalisation :

- de travaux de sécurisation de la ligne 400 kV sur 124 km, du pylône n° 79 de la commune de Balignicourt (Aube), jusqu'au poste d'Houdreville (Meurthe-et-Moselle) ;
- d'un poste de transformation 400/90 kV, raccordé sur la ligne 400 kV Houdreville-Mery, cette opération implique la mise en place de deux nouveaux pylônes électriques entre la ligne électrique aérienne et le nouveau poste de transformation ;
- d'environ 10 km de liaison électrique 90 kV enterrées ;
  - ✓ une liaison électrique enterrée entre le nouveau poste de transformation 400/90 kV et le poste de livraison 90 kV de la zone descenderie,
  - ✓ une liaison électrique enterrée entre le nouveau poste de transformation 400/90 kV et le poste de livraison 90 kV de la zone puits,
  - ✓ une liaison électrique enterrée entre les deux postes de livraison des zones descenderie et puits,
- de deux postes de transformation 90/20 kV, sous la maîtrise d'ouvrage de l'Andra, respectivement accolés au poste de livraison RTE sur la zone descenderie et sur la zone puits.

La position exacte du poste de transformation 400/90 kV et des raccordements souterrains tiendra compte de la concertation préalable qui s'est tenue au 1er trimestre 2020. La solution retenue parmi six variantes (cf. Chapitre 2.8.1 du présent document) fera l'objet d'un approfondissement des études et d'une actualisation de la présente étude d'impact.

Les installations présentent un haut niveau de fiabilité et permettent un maintien de la puissance nominale même en cas d'indisponibilité d'un transformateur pendant plusieurs mois. Les circuits de raccordement sont doublés et les postes de la zone descenderie et de la zone puits sont reliés afin d'assurer une redondance d'alimentation.

La puissance totale pouvant être fournie est de 110 MW. Elle est répartie entre les postes : environ 65 % de la puissance pour le poste de la zone descenderie et environ 35 % pour le poste de la zone puits.

Tableau 4-18 *Communes actuellement identifiées pour l'implantation du poste 400 kV et des lignes enterrées de l'opération d'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo*

Départements	Communes
Haute-Marne (52)	Saudron
Meuse (55)	Bure
	Mandres-en-Barrois

La construction du poste de transformation 400/90 kV et des liaisons électriques enterrées induit une artificialisation supplémentaire des sols de 6 ha à la fin des travaux en phase d'aménagements préalables.

LA GESTION DE LA VÉGÉTATION SOUS LA LIGNE

L'État a confié à RTE, dans le cadre de missions de service public, l'exploitation, la maintenance et le développement du réseau public de transport d'électricité français.

RTE est garant de la sûreté de fonctionnement du système électrique et de la sécurité des personnes et des biens aux abords de ses ouvrages.

Dans le cadre de l'article L. 323-4 du code de l'énergie et de l'arrêté interministériel du 17 mai 2001 modifié, dit « arrêté technique », RTE assure notamment la surveillance de la végétation sous et aux abords des lignes électriques qu'il exploite.

En effet, à partir d'une certaine distance, la végétation est susceptible d'interférer avec le réseau électrique. Ainsi, RTE est amené à mandater régulièrement des prestataires pour faire procéder aux travaux de coupes nécessaires.

L'utilisation de produits phytosanitaires est interdite pour la gestion de la végétation entourant le poste de transformation 400 kV/90 kV (périmètre de protection éloignée du captage de Rupt-en-Nonains).

Le contrôle de la végétation au droit du couloir de servitude de la ligne 400 kV est établi en conformité avec les zones que la ligne traverse (périmètre de protection d'un captage d'alimentation en eau potable, zone Natura 2000.

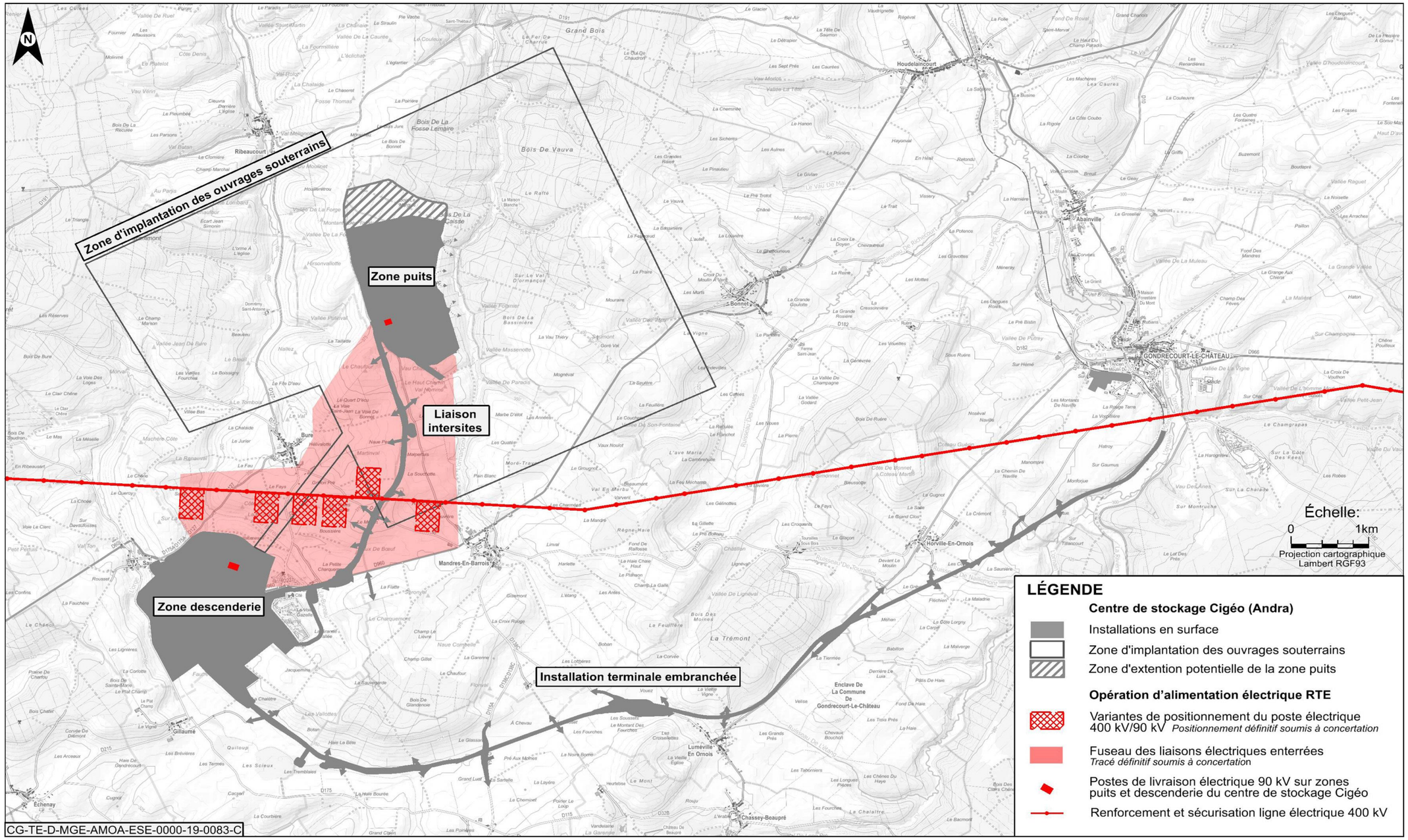


Figure 4-61 Plan de localisation des installations d'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo

4.4.1.2 La sécurisation de la ligne 400 kV

a) Introduction

Pour assurer la fiabilité de l'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo, la ligne aérienne 400 kV Houdreville-Méry existante doit faire l'objet de travaux entre les pylônes n° 79 à n° 312 (234 supports) sur une longueur de 124 km. Comme le montre la figure 4-62, les travaux s'étendent de la commune de Balignicourt (Aube) jusqu'au poste d'Houdreville (Meurthe-et-Moselle). Ils concernent 48 communes de cinq départements listées dans le tableau 4-19.

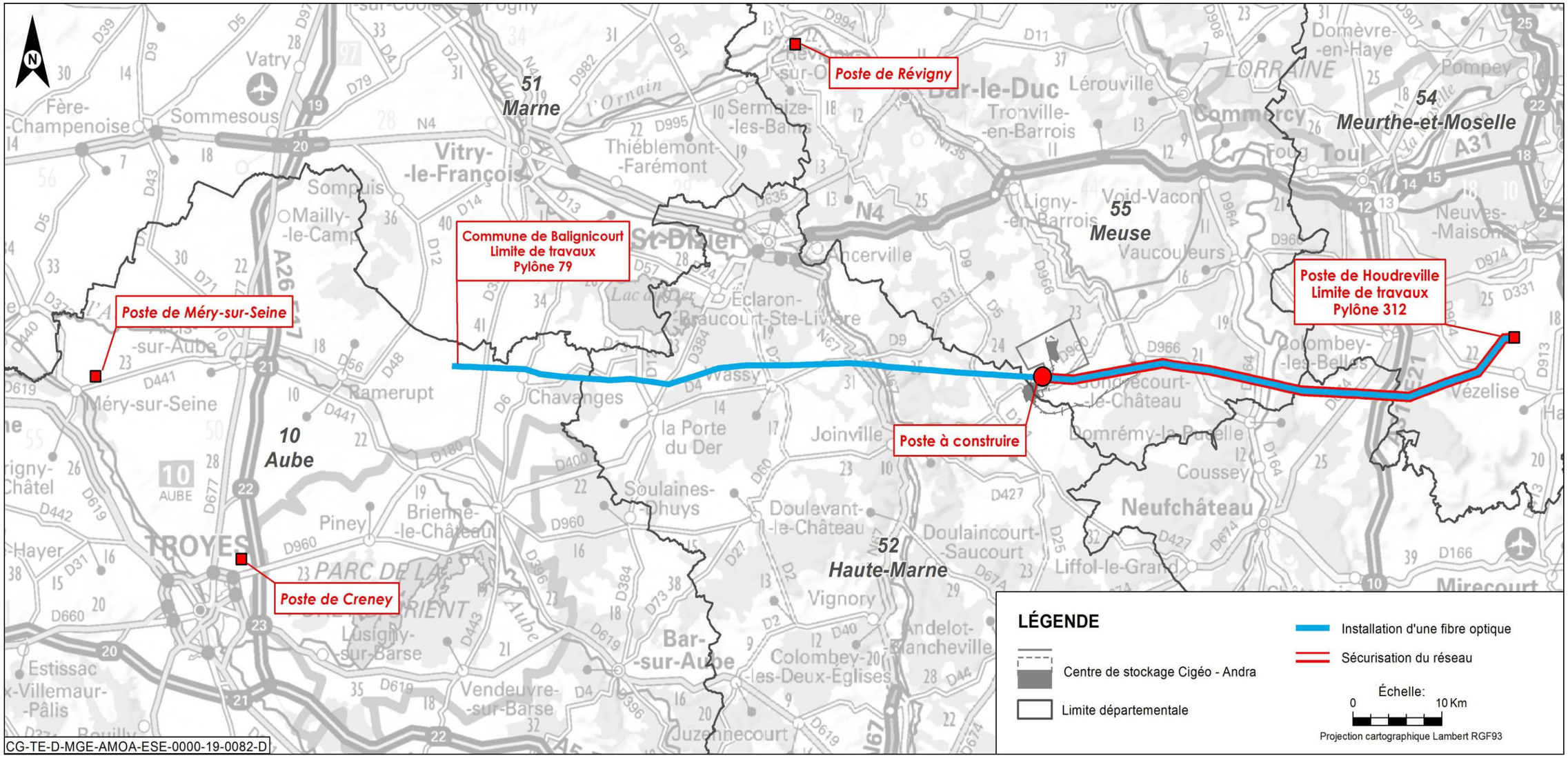


Figure 4-62 Plan de localisation de la portion de la ligne 400 kV faisant l'objet de travaux de sécurisation

Tableau 4-19 *Communes actuellement identifiées pour les travaux de sécurisation de la ligne 400 kV de l'opération d'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo*

Département	Commune		
Aube (10)	Balignicourt	Pars-lès-Chavanges	Lentilles
	Saint-Léger-sous-Margerie	Chavanges	Bailly-le-Franc
Haute-Marne (52)	Rives Dervoises[141]	Attancourt	Curel
	Montier-en-Der	Magneux	Osne-le-Val
	Planrupt	Trois fontaines-la-Ville	Paroy-sur-Saulx
	Frampas	Sommancourt	Effincourt
	Voilecomte	Rachecourt-sur-Marne	Saudron
	Wassy	Chevillon	/
Meuse (55)	Bure	Horville-en-Ornois	Goussaincourt
	Mandres-en-Barrois	Amanty	Brixey-aux-Chanoines
	Bonnet	Vouthon-Bas	Sauvigny
	Gondrecourt-le-Château	Taillancourt	/
Vosges (88)	Clérey-la-Côte	Punerot	Harmonville
	Ruppes	Autreville	/
Meurthe-et-Moselle (54)	Favières	Laloeuf	Hammeville
	Saulxerotte	Goviller	Parey-Saint-Césaire
	Dolcourt	Vitrey	Houdreville

La réalisation des travaux au niveau de la ligne électrique existante n'engendre aucune création supplémentaire de surface artificialisée à la fin des travaux de la phase d'aménagements préalables.

[141] Regroupement des communes Puellemontier et de Droyes

» RAISON DES TRAVAUX DE SÉCURISATION DE LA LIGNE 400 KV

Les tempêtes de l'hiver 1999-2000 ont conduit RTE à lancer un programme de sécurisation mécanique de son réseau. L'objectif est d'éviter les coupures d'alimentation occasionnées par des événements climatiques exceptionnels en renforçant les infrastructures pour une meilleure résistance au vent.

Chaque poste électrique doit ainsi être raccordé *a minima* par une ligne sécurisée mécaniquement. Pour le poste de transformation destiné à alimenter le centre de stockage Cigéo, raccordé sur la ligne à 400 000 volts Houdreville – Méry, le choix de sécurisation s'est porté sur le tronçon de la ligne existante vers Houdreville, plus court que le tronçon existant vers Méry.

Depuis le 14 novembre 2015, la norme AFNOR NF EN 50341-1 (124) permet l'application des Eurocodes et prescrit les méthodes d'évaluation de la résistance mécanique des ouvrages de génie civil particuliers que sont les lignes aériennes. Cette norme constitue aujourd'hui la règle de l'art en vigueur en matière de calcul de la résistance mécanique.

RTE réalise les travaux sur la ligne 400 kV conformément à son référentiel, applicable depuis le 1er janvier 2020 pour les opérations sur lignes aériennes existantes, adossé à cette norme. Celle-ci impose pour tous les composants une méthode de calcul de la résistance mécanique associée à un taux de défaut de l'ordre de 0,1%. L'ensemble des calculs sur le tronçon de 124 km implique plusieurs mois d'études.

Ainsi, il n'est pas possible de préciser à ce stade la consistance technique exacte des travaux de renforcement mécanique à mener sur chaque pylône de la ligne 400 kV existante, ni de préciser les pistes d'accès provisoires dont le dimensionnement dépend des travaux à effectuer. Les incidences des travaux sur l'ouvrage aérien seront identifiées et appréciées dans la version actualisée de l'étude d'impact qui sera produite par RTE à l'appui de sa propre demande de DUP. RTE a toutefois précisé la nature des travaux envisagés au niveau des sites Natura 2000 traversés par la ligne électrique 400 kV (cf. Chapitre 4.4.1.2.g) du présent document).

Les travaux concernés sont de différentes natures présentées dans les chapitres suivants.

b) Les travaux de création de pistes provisoires d'accès au pylône

L'utilisation des chemins existants pour accéder aux pylônes et au besoin l'utilisation du couloir de servitude de la ligne 400 kV est privilégié. Si des accès complémentaires doivent être aménagés, 3 types de constructions de pistes provisoires peuvent être mis en œuvre en fonction du terrain :

- construction de piste après décapage de la terre végétale sur une quinzaine de centimètres d'épaisseur et sur 3 mètres de large, puis mise en place d'un géotextile et ensuite de cailloux pour former une piste (cf. Figure 4-63) ;
- construction d'une piste du même type, mais au-dessus du terrain naturel sans décapage ;
- mise en place de plaques de roulement sur le terrain naturel pour éviter les phénomènes d'orniérage (cf. Figure 4-64).

À la fin des travaux, les pistes sont démontées (enlèvement des matériaux extérieurs et régalage de la terre végétale) et le terrain est remis en état.



Figure 4-63 *Illustration de piste provisoire d'accès au pylône avec décapage de la terre végétale et mise en place d'un géotextile recouvert de cailloux (source : RTE - juin 2020) (125)*



Figure 4-64 *Illustration de piste provisoire d'accès au pylône constitué de plaques de roulement (source : RTE, juin 2020) (125)*

c) Les travaux de renforcement des structures métalliques des pylônes

Les travaux consistent à remplacer ou à ajouter des cornières et/ou des boulons dans la structure du pylône. C'est une intervention légère par une équipe limitée, ne nécessitant que l'utilisation de véhicules légers. Les zones de travaux sont limitées aux abords immédiats de chacun des pylônes.

d) Les travaux de renforcement des fondations de certains pylônes

Après acheminement du matériel aux pieds du pylône par des engins légers (petite pelleteuse à chenille, transporteurs à chenilles, véhicules 4X4), le renforcement des fondations d'un pylône est constitué de 3 étapes (cf. Figure 4-65) :

- forage : La machine de forage est positionnée à chaque pied du support du pylône et fore le massif de la fondation existante puis du sous-sol. Une tige métallique est introduite au fur et à mesure du forage puis du béton de liaison est injecté ;
- piquage du massif : Une fois consolidé et après avoir dégagé les pieds du support, le massif de la fondation existante (cheminées ou dalle) est piqué au marteau-piqueur ;
- réfection du massif : Un nouveau massif est reconstitué avec un coffrage des cheminées pour coulage du béton.

Ces travaux ne nécessitent pas la consignation électrique de la ligne électrique 400 kV.

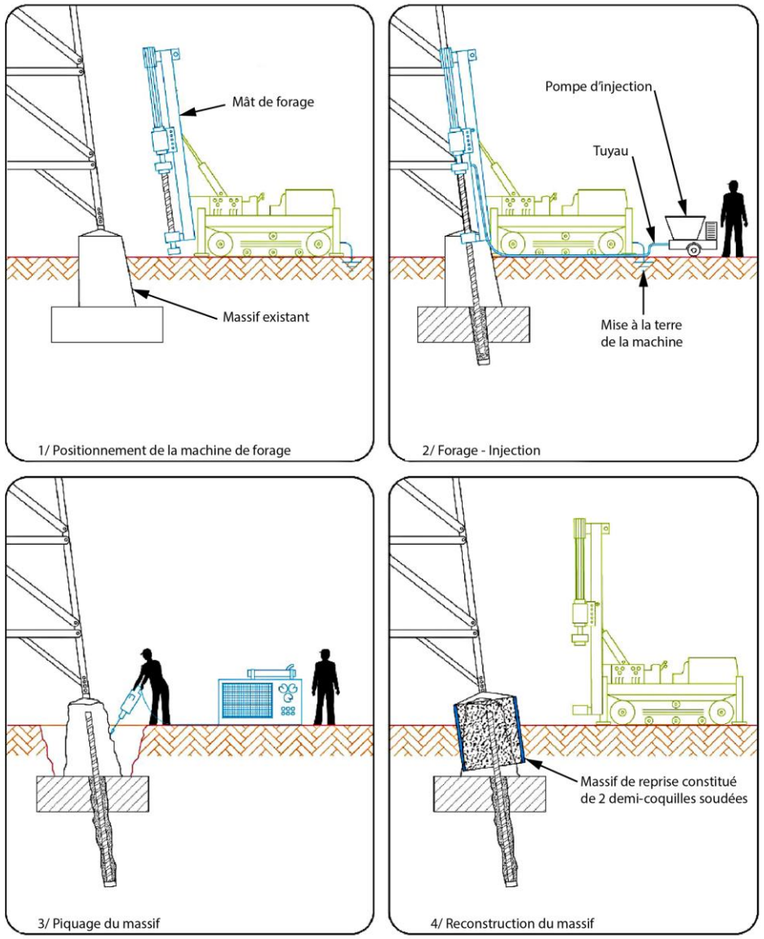


Figure 4-65 *Travaux de renforcement des fondations (source RTE - juin 2020) (125)*

e) Les travaux de remplacement de support

En cas de nécessité de remplacement d'un support, le nouveau pylône de mêmes caractéristiques (hauteur, forme) est généralement implanté en lieu et place ou bien à proximité immédiate de l'existant (décalage entre 5 et 10 m). Après réalisation des fondations, le nouveau support est assemblé, monté puis élevé.

Une fois érigé, les câbles de la ligne sont transférés de l'ancien pylône au nouveau. L'ancien support est ensuite déposé et ses massifs arasés à -1 m.

f) Le remplacement du câble de garde actuel par un câble de garde avec fibre optique incorporée

Entre le pylône n° 79 de la ligne Houdreville-Méry et le poste d'Houdreville, le remplacement du câble de garde[142] actuel par un câble de garde avec fibre optique incorporée s'effectue selon la technique dite du « Déroulage Sous Tension Mécanique » (DSTM), technique qui consiste à se servir du câble à remplacer pour tirer le nouveau câble, et ce sans toucher le sol.

[142] Les câbles de garde, qui ne transportent pas de courant, sont disposés au-dessus des câbles conducteurs qu'ils protègent contre la foudre. Ils participent aussi à la stabilisation des pylônes.

Cette opération se décompose en deux interventions :

- la première a pour objectif la mise en place d'une poulie (cf. Figure 4-67) permettant le déroulage du câble de garde et le montage d'un béquillon. Le nouveau câble, attaché à l'ancien, est tiré par un treuil d'un côté tout en étant maintenu au-dessus du sol grâce à une freineuse disposée de l'autre côté (cf. Figure 4-68) ;
- la seconde intervention, a pour objectif l'enlèvement de la poulie et remise en place du câble de garde.

Pour réaliser ces travaux, des plateformes sont créées aux abords des supports où sont installés les treuils ou les freineuses (cf. Figure 4-66). Ces plateformes, d'environ 200 m², sont construites selon les 3 techniques présentées pour les pistes d'accès provisoire dans le chapitre précédent. Elles ne sont pas imperméabilisées. Après les travaux, elles sont démontées et le terrain est remis en état.

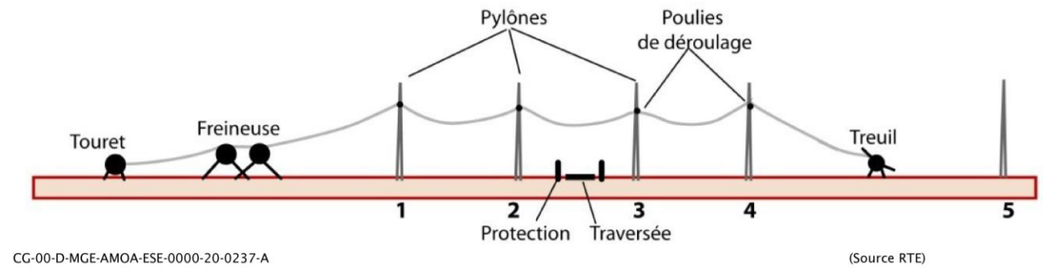


Figure 4-66 *Représentation schématique du remplacement du câble de garde actuel par un câble de garde avec fibre optique incorporée (en cours de création) (source RTE - juin 2020) (125)*



Figure 4-67 *Illustration d'une poulie de déroulage (source RTE - juin 2020) (125)*



Figure 4-68 *Illustration d'une freineuse au niveau du couloir de servitude de la ligne 400 kV (source RTE - juin 2020) (125)*

g) Nature des travaux envisagés au niveau des sites Natura 2000 traversés par la ligne électrique 400 kV

Le réseau Natura 2000 est un ensemble de sites naturels européens identifiés pour la rareté ou la fragilité des espèces animales ou végétales et de leurs habitats.

RTE s'est attaché à définir la nature des travaux à entreprendre au niveau de chaque pylône situé sur ou à proximité immédiate de sites classés Natura 2000 (cf. Chapitre 2.6 du Volume V de la présente étude d'impact).

Le tableau 4-20 ci-dessous présente les travaux envisagés par site traversé et par pylône.

Tableau 4-20 *Travaux envisagés au niveau des sites Natura 2000 traversés par la ligne électrique 400 kV*

Sites N2000 concernés	Numéro des pylônes	Travaux de création de pistes provisoires	Travaux de renforcement des structures	Travaux de renforcement des fondations	Remplacement à l'identique de support	Remplacement du câble de garde	Plateformes provisoires de déroulage du câble de garde
Étang de la Horre FR2110091 (ZPS) FR2100332 (ZSC) RNN	Pylônes 103 à 108	-	-	-	-	✓	-
Herbages et cultures des vallées de la Voire FR2112001 (ZPS)	Pylônes 114 à 116 situés entre 350 et 500 m de la ligne	-	-	-	-	✓	-
Forêts de Gondrecourt FR4100182 (ZSC)	Pylône 232	✓	✓	✓	-	✓	-
	Pylône 233	✓	✓	-	-	✓	
	Pylônes 239 à 243	-	-	-	-	✓	
Vallée de la Meuse FR4112008 (ZPS)	Pylônes 257, 258 et 259	✓	✓	✓	-	✓	-

RNN : Réserve naturelle nationale ; ZPS : Zone de protection spéciale ; ZSC : Zones spéciale de conservation

Afin d'éviter des incidences de l'opération sur ces sites à enjeux, RTE s'est imposé de ne pas créer de plateforme provisoire de déroulage de câble de garde.

Afin de réduire les incidences de l'opération sur ces sites à enjeux, RTE s'est imposé de ne pas procéder au remplacement des pylônes en place et à privilégier les chemins d'accès existants.

L'ensemble des éléments techniques complémentaires relatifs aux opérations réalisées par RTE dans ou à proximité de sites Natura 2000 est repris dans le volume V de la présente étude d'impact. L'absence d'incidence significative du projet global Cigéo sur les sites Natura 2000 est confirmée.

4.4.1.3 Le raccordement à la ligne 400 kV Houdreville-Méry

Le choix initial d'implanter un poste de raccordement 400/90 kV à proximité immédiate de la ligne 400 kV Houdreville-Méry permet d'éviter l'installation d'un long linéaire de ligne électrique accompagné de plusieurs pylônes. Ainsi, la zone d'étude d'implantation du poste de transformation 400/90 kV s'attache à limiter la création de pylônes supplémentaires au nombre de 2. Ils auront une hauteur de 30 m, pour une emprise au sol de 8 m sur 8 m.



Figure 4-69 *Illustration de pylônes pour ligne 400 kV (source RTE - juin 2020) (125)*

4.4.1.4 Le poste de transformation 400/90 kV

Pour la mise à disposition de l'alimentation électrique nécessaire à la construction du centre de stockage Cigéo, les équipements électriques installés dans le poste 400/90 kV (cf. Figure 4-70) sont :

- un poste 400 kV comprenant deux cellules lignes 400 kV (reliées aux nouveaux pylônes 400 kV), deux jeux de barres et un couplage 400 kV, deux cellules de transformateurs 400 kV ;
- un poste 90 kV comprenant deux cellules « arrivée » transformateur 90 kV, deux jeux de barre et un couplage 90 kV, deux cellules « départ » lignes 90 kV vers les lignes électriques enterrées d'alimentation des postes de transformation 90/20 kV des zone puits et zone descenderie ;
- deux transformateurs 400/90 kV de 240 MVA reliant le poste 400 kV et le poste 90 kV.

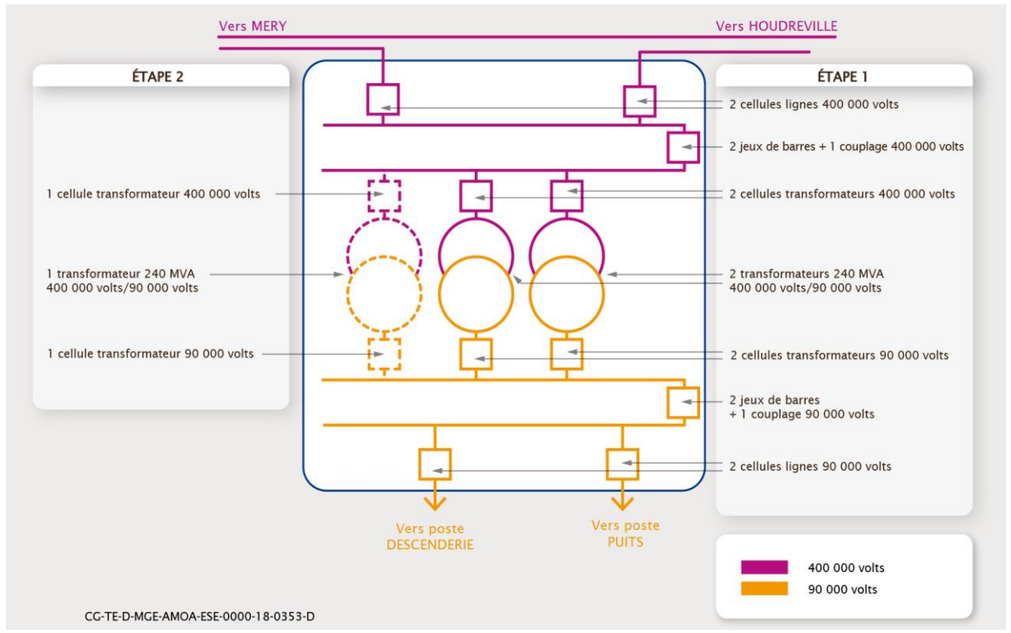


Figure 4-70 Représentation schématique du poste de transformation 400/90 kV

Chacun des transformateurs est enfermé dans une cuve d'acier contenant de l'huile servant à l'isolation. Un transformateur 400/90 kV et ses équipements associés contiennent de l'ordre de 60 tonnes d'huile, soit 55 m³. Des fosses étanches sous les transformateurs permettent de récupérer d'éventuelles fuites d'huile.



Figure 4-71 Exemple de transformateur 400/90 kV

Le poste de transformation est conçu pour une exploitation et un développement adaptable. La nécessité d'équipements complémentaires sera appréciée à l'issue des études détaillées d'optimisation des consommations

électriques. Elles pourront aussi être nécessaires pour maintenir l'activité du poste pendant la maintenance et la jouvence des installations.

Au sein de ces emprises initiales, le poste pourrait être complété lors de l'étape 2 par :

- une cellule transformateur 400 kV ;
- un troisième transformateur 400/90 kV ;
- une cellule transformateur 90 kV associée.

En complément des équipements électriques, l'opération de création de ce poste de transformation nécessite pour son fonctionnement, son exploitation et sa sécurité :

- une voirie d'accès ;
- des pistes permettant de relier les équipements ;
- des bâtiments techniques de hauteur inférieure à 4 m.

Les abords du poste sont agrémentés de plantations paysagères (arbustes, arbres, aménagements de talus) pour accompagner son insertion dans l'environnement et le paysage du site.



Figure 4-72 Illustration d'un poste de transformation 400/90 kV

Au total, la surface nécessaire à l'implantation du poste est d'environ 6 ha, comprenant les installations électriques des étapes 1 et 2 ainsi que les aménagements paysagers. La hauteur maximale des installations électriques est celle des charpentes métalliques du poste 400 kV. Elle est de l'ordre de 20 m.

L'ensemble du poste (hors pylônes) est clôturé par une double clôture pour garantir la sécurité des installations et des personnes.

En phase exploitation, le poste électrique fonctionne sans personnel permanent sur site. Le personnel de RTE, ses fournisseurs ou ses sous-traitants interviennent ponctuellement sur le poste pour la maintenance du poste et de son système de gestion des eaux pluviales ainsi que pour l'entretien des aménagements paysagers.

L'ensemble des eaux pluviales du poste de transformation 400/90 kV est infiltré. Pour les surfaces non imperméabilisées laissées en concassé, l'infiltration des eaux de pluie est réalisée *in situ* sans collecte, ni récupération, ni traitement. Les eaux des secteurs imperméabilisées qui ne présentent pas de risque de pollution seront directement infiltrées *via* des puits d'infiltration, des tranchées drainantes ou par écoulement libre. Les eaux des secteurs imperméabilisés qui présentent un risque de pollution (eaux d'extinctions d'incendie, fuites d'huile) sont collectées et amenées vers une fosse étanche munie d'un séparateur/récupérateur d'huile qui débouche sur une tranchée d'infiltration.

Les installations électriques du poste contiennent des matériaux combustibles, isolants fluides ou synthétiques par exemple. Leur dysfonctionnement peut créer un arc électrique. La conception du poste prévoit de réduire ces risques grâce à :

- l'éloignement des phases et masses ;
- le dimensionnement de l'isolement ;
- l'installation de filets de garde ;
- un système de télésurveillance qui alerte le poste de contrôle à distance en cas de dysfonctionnement.

4.4.1.5 Les liaisons électriques enterrées de 90 kV

Le poste 400/90 kV desservira les postes 90 kV/20 kV par des liaisons électriques 90 kV enterrées. Pour garantir l'approvisionnement électrique du centre de stockage Cigéo, une troisième liaison électrique enterrée 90 kV reliera directement les zones descenderie et puits. Ainsi, en cas de défaillance d'une des liaisons électriques, les postes sont toujours alimentés par la seconde.

Les liaisons électriques enterrées 90 kV sont donc constituées de 3 tronçons :

- entre le poste 400/90 kV et le poste 90/20 kV de la zone descenderie ;
- entre le poste 400/90 kV et le poste 90/20 kV de la zone puits ;
- directement entre les deux postes 90/20 kV avec un cheminement en parallèle des deux autres liaisons électriques.

Ces liaisons électriques enterrées 90 kV sont réalisées sous la maîtrise d'ouvrage de RTE.

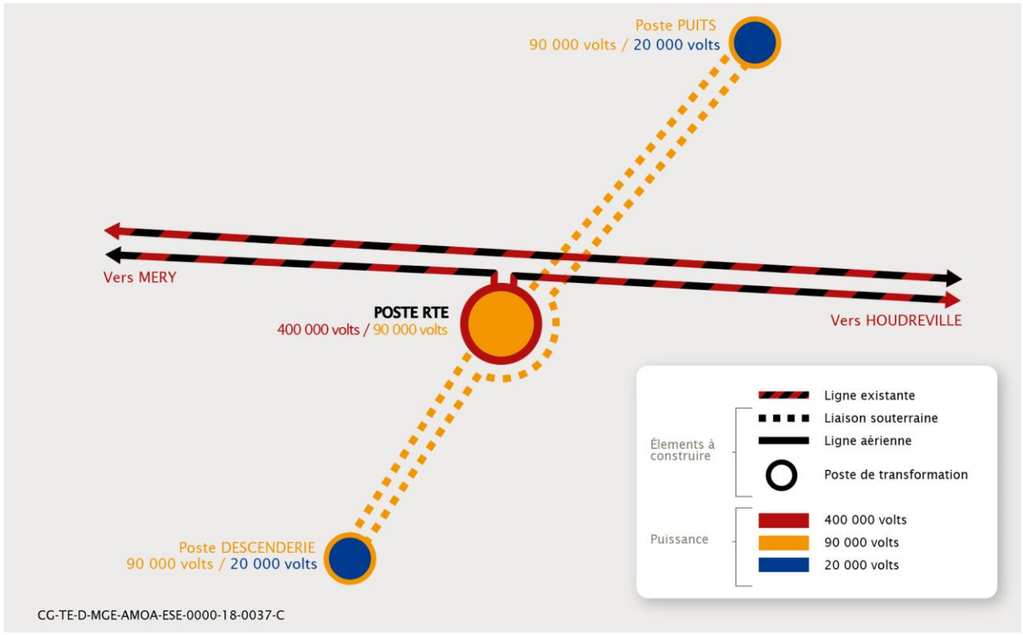


Figure 4-73 Illustration des opérations de raccordement sur la ligne électrique 400 kV (Source RTE)

Pour des raisons de sécurité, ces liaisons électriques enterrées chemineront dans deux tranchées parallèles espacées de l'ordre de 5 m (cf. Figure 4-74). Cette distance est suffisante pour qu'en cas d'avarie ou d'agression mécanique sur une des liaisons, la seconde ne soit pas impactée.

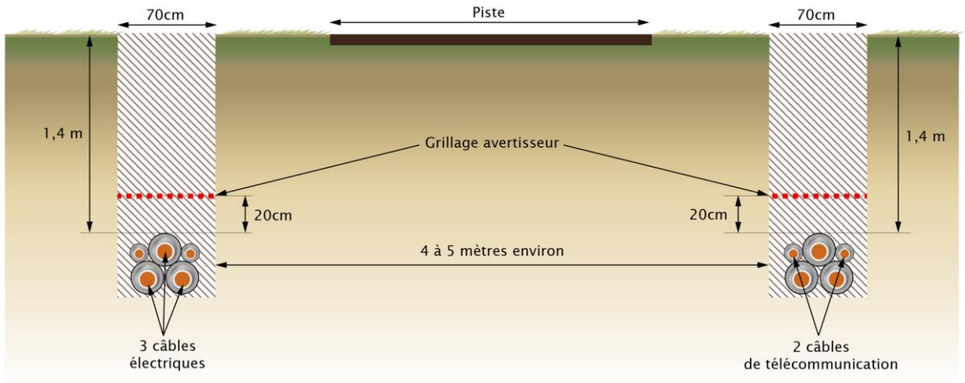


Figure 4-74 *Schéma de principe d'installation des deux liaisons électriques enterrées 90 kV en tranchées parallèles*

Les liaisons électriques enterrées sont constituées de 3 câbles électriques et de 2 câbles fibre optique. Ces câbles sont tirés dans des gaines placées à faible profondeur dans des tranchées. Un grillage avertisseur est disposé au-dessus des câbles pour signaler la présence de la liaison électrique lors d'éventuels creusements ultérieurs du sol.

La fouille est remblayée. Les plantations d'arbres de hautes tiges seront interdites dans une bande de 2,50 m de chaque côté de la liaison électrique enterrée.

Les tracés précis des liaisons électriques enterrées seront définis à l'intérieur du fuseau de moindre impact retenu à l'issue de la concertation (cf. Chapitre 2.8.1 du présent document).

4.4.1.6 Les postes de livraison et de transformation 90/20 kV

Deux postes, permettant chacun la livraison du 90 kV et la transformation 90/20 kV (cf. Figure 4-75), sont implantés, l'un sur la zone descenderie et l'autre sur la zone puits.

Les cellules 90 kV, les jeux de barre et le couplage sont sous la maîtrise d'ouvrage de RTE. Les cellules de transformation et de distribution 20 kV sont sous la maîtrise d'ouvrage de l'Andra.

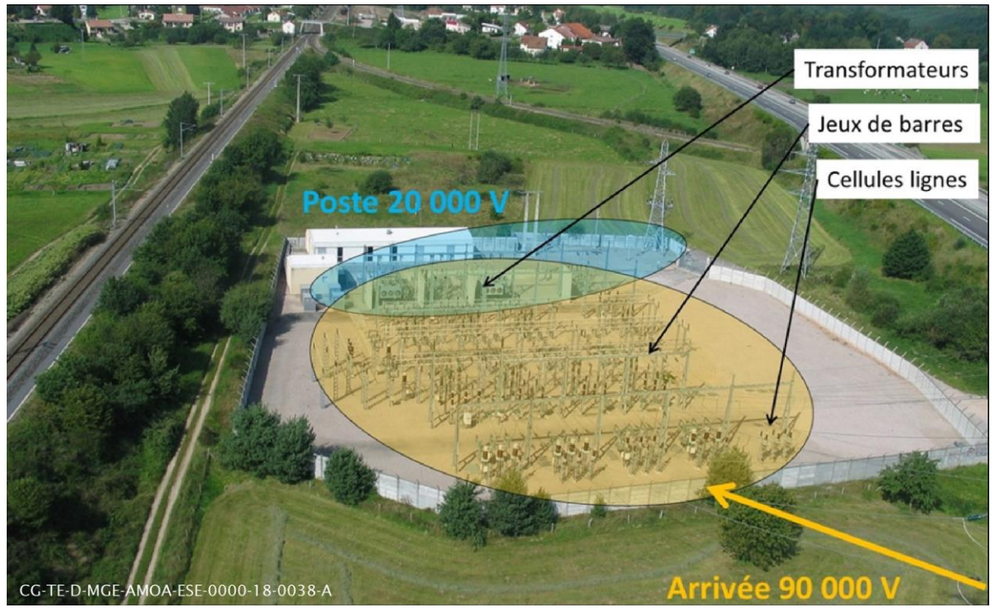


Figure 4-75 *Exemple du poste de transformation 90/20 kV de Pouxeux (Vosges)*

Chacun de ces postes de livraison et de transformation occupe une surface de l'ordre de 1 ha. La hauteur maximale des installations électriques est de 10 m pour les charpentes métalliques.

Ces installations présentent les mêmes principes de protection anti-incendie que le poste 400/90 kV. Les eaux pluviales issues des infrastructures routières seront collectées et connectées aux réseaux du centre de stockage Cigéo. Sur les restes de la plateforme les eaux seront infiltrées selon les mêmes modalités que pour le poste 400/90 kV.

À moyen et long terme, de nouveaux raccordements pourront être envisagés sur ces postes pour le développement industriel du territoire.

4.4.2 L'adduction d'eau

Les syndicats de gestion des eaux d'Échenay et du Haut-Ornain sont les maîtres d'ouvrage de l'opération d'adduction en eau potable du centre de stockage Cigéo.

Les pics de besoins en eau du centre de stockage Cigéo sont évalués à 500 $m^3.j^{-1}$ maximum pour la période 2020-2030, puis à une moyenne de 200 $m^3.j^{-1}$ après cette période.

Certaines utilisations de l'eau ne nécessitent pas une qualité équivalente à celle de l'eau potable. Il a donc été choisi de concevoir des filières de traitement des eaux afin de recycler une partie des eaux produites. La qualité des eaux recyclées est adaptée au besoin en eau non potable du centre de stockage ainsi qu'à la compatibilité des rejets du centre de stockage Cigéo avec les critères de bon état chimique et écologique des eaux superficielles. Ces eaux recyclées (cf. Chapitre 2.7.4 du présent document), alimenteront les postes les plus consommateurs en eau : fabrication du béton, arrosage des espaces verts, et fonctionnement du tunnelier. Seuls les usages sanitaires bénéficieront d'une alimentation en eau potable.

Les alimentations en eau potable sont envisagées conjointement depuis les sources et forages suivants (cf. Figure 4-76) :

- Gondrecourt-le-Château géré par le syndicat intercommunal à vocation unique (SIVU) du Haut Ornain ;
- Échenay géré par le syndicat intercommunal d'alimentation en eau potable (SIAEP) de la région d'Échenay ;
- Thonnance-lès-Joinville géré par le SIAEP de Thonnance-lès-Joinville/Suzannecourt.

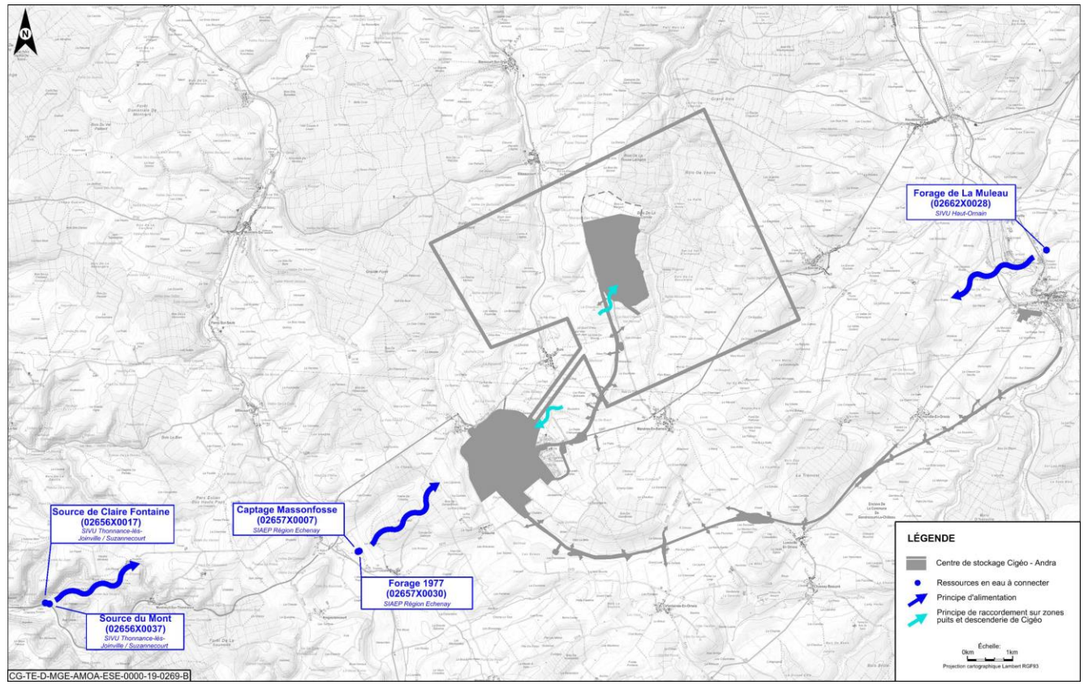


Figure 4-76 Localisation de l'opération d'adduction d'eau

Les travaux de raccordement du centre de stockage Cigéo sont conçus de manière à restructurer les réseaux et à améliorer la distribution locale de façon à la sécuriser. Des études de faisabilité (126) montrent que les travaux vont offrir un débit suffisant pour répondre conjointement aux besoins du centre de stockage Cigéo et du territoire. Ils seront réalisés sous la maîtrise d'ouvrage des syndicats de gestion des réseaux d'eau.

Plusieurs options (non exclusives les unes des autres) sont :

- le renforcement des réseaux d'alimentation existants du SIAEP d'Échenay et du SIVU du Haut Ornain ;
- la création de canalisations, de pompes de relevage et réservoirs pour amener l'eau potable jusqu'au centre de stockage Cigéo ;
- l'interconnexion des réseaux existants à proximité du centre de stockage Cigéo ;
- l'extension limitée des réseaux existants pour alimenter d'autres communes si l'alimentation en eau potable de ces communes était éventuellement affectée par les travaux et/ou le fonctionnement de Cigéo.

Les réseaux distribuent deux réservoirs d'eau potable du centre de stockage Cigéo, d'une capacité de 500 m³ chacun, situés, un sur la zone descenderie, l'autre sur la zone puits.

Le Tableau 4-21 Communes actuellement identifiées pour l'implantation des ouvrages de l'opération d'adduction d'eau du centre de stockage Cigéo

(seules figurent les communes des captages, les communes concernées par les travaux de raccordement seront déterminées après finalisation des études techniques et de la concertation) (cf. Chapitre 2.8.2 du présent document).

Départements	Communes	
Haute-Marne (52)	Échenay	Thonnance-lès-Joinville
Meuse (55)	Gondrecourt-le-Château	

À la fin des travaux de la phase d'aménagements préalables et au stade actuel des études, il est pris comme hypothèse une artificialisation des sols de l'ordre d'1 ha suite la construction de postes de relevage.

Ces travaux seront principalement réalisés le long des infrastructures existantes. Plusieurs techniques de pose de canalisation pourront être mise en œuvre :

- en tranchée le long des routes (cf. Figure 4-77);
- en encorbellement le long de ponts existants ;
- en souterrain par fonçage (cf. Figure 4-79).
  - ✓ l'opération consiste à pousser une gaine dans le sol et à en extraire les déblais au fur et à mesure. Un outil de tête, muni de pics, creuse le sol sur un diamètre équivalent à celui du tuyau. Les déblais sont extraits de l'intérieur du tube et ramenés dans la fosse par une vis sans fin ;
- en souterrain par forage dirigé :
  - ✓ l'opération consiste à réaliser dans le sol un tunnel stable dans lequel l'ouvrage sera mis en place. Un forage pilote de diamètre réduit est progressivement élargi grâce à des aléseurs. Après le dernier forage, une extrémité de la canalisation préalablement construite sera fixée à un aléseur approprié et elle sera tirée d'une extrémité à l'autre.

La consistance exacte des travaux d'adduction d'eau sera déterminée après participation du public à l'élaboration du projet lors de concertations (cf. Chapitre 2.8.2 du présent document). Les solutions retenues feront l'objet d'un approfondissement des études et d'une actualisation de la présente étude d'impact.



Figure 4-77 Trancheuse pour pose de canalisation

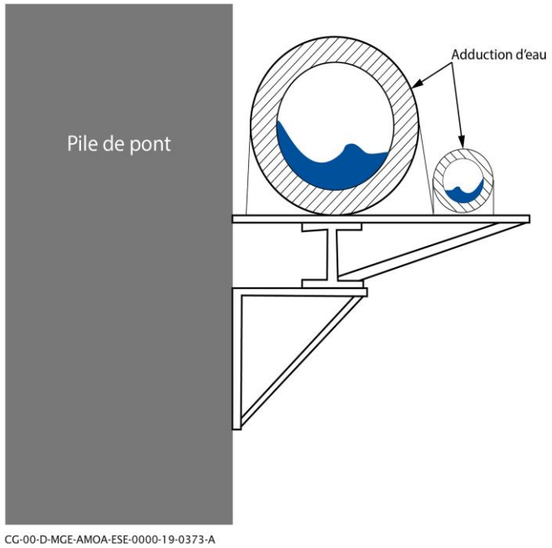


Figure 4-78 *Canalisation en encorbellement*



Figure 4-79 *Tête de foreuse pour fonçage*

4.4.3 La mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000

4.4.3.1 La localisation et la description de la ligne

SNCF réseau est le maître d'ouvrage de l'opération de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000.

La ligne ferroviaire 027000 (cf. Figure 4-80) du réseau ferré national est connectée à l'installation terminale embranchée (ITE) du centre du centre de stockage Cigéo. Elle relie l'ITE du centre de stockage Cigéo à la ligne Paris-Strasbourg (cf. Chapitre 2.8.3 du présent document).

La ligne ferroviaire 027000 était utilisée pour le transport de fret de la gare de Nançois-Tronville jusqu'à Gondrecourt-le-Château. Elle est fermée depuis 2014 (sauf sa partie nord, partiellement rouverte à la circulation entre Nançois-Tronville et les silos de Ligny-en-Barrois. Ce tronçon, partiellement réhabilité, est fermé depuis décembre 2019).

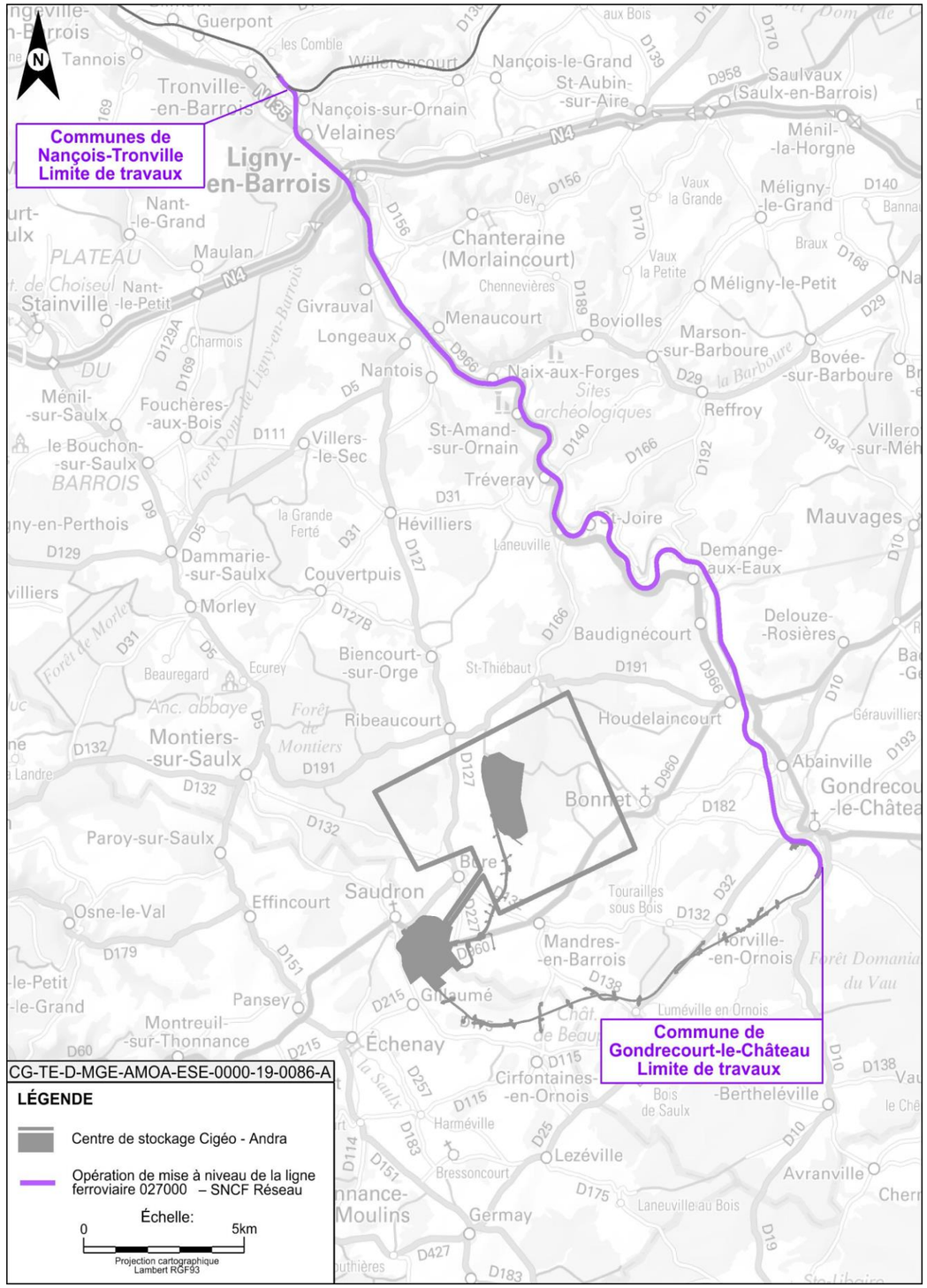


Figure 4-80 *Localisation de la ligne ferroviaire 027000*

Cette ligne, d'une longueur de 36 km, est intégralement située dans le département de la Meuse (département 55). Le Tableau 4-22 présente les seize communes qu'elle traverse.

Tableau 4-22 Communes actuellement identifiées pour l'opération de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000

Département	Communes			
Meuse (55)	Nançois-sur-Ornain	Velaines	Ligny-en-Barrois	Givrauval
	Longeaux	Menaucourt	Nantois	Naix-aux-Forges
	Saint-Amand-sur-Ornain	Tréveray	Saint-Joire	Demange-Baudignécourt
	Houdelaincourt	Abainville	Gondrecourt-le-Château	Tronville-en-Barrois

Au stade actuel des études et notamment des rétablissements en cours de définition au droit de la ligne ferroviaire 027000, il est attendu une artificialisation de l'ordre de 14 ha en plus de la plateforme ferroviaire existante.

Cette ligne du réseau ferré national est une ligne à voie unique non électrifiée, avec une vitesse maximale de 40 km.h^{-1}.

Une fois mise à niveau, la ligne ferroviaire 027000 est exploitée en voie unique à trafic restreint (VUTR) pour l'usage du centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 4.4.3.2 du présent document). Ce mode de fonctionnement implique la présence d'un seul train sur la ligne ce qui limite le trafic à 8 passages quotidiens (4 allers et retours). Le trafic maximal sera du même ordre que sur l'ITE, à savoir trois trains par jour (6 passages) en phase de construction initiale.

Le profil de la ligne est majoritairement en remblai rasant ou au niveau du terrain naturel.

La ligne comprend 26 ouvrages d'art décomposés en :

- 17 ponts rails (la voie ferrée passe au-dessus des routes), dont 2 ponts rails métalliques d'une longueur supérieure à 20 mètres ;
- 3 ponts routes (où la route passe au-dessus de la voie ferrée) ;
- 1 passerelle (pont piéton au-dessus des rails) ;
- 1 saut de mouton (dispositif ferroviaire constitué d'un pont, d'une tranchée ou d'un court tunnel permettant à une voie ferrée d'en croiser une autre en passant par-dessus ou par-dessous) ;
- 4 murs de soutènement.

Elle compte aussi 57 ouvrages hydrauliques et 59 passages à niveau, dont 43 sans barrière.

4.4.3.2 Le mode d'exploitation retenu pour la ligne ferroviaire 027000

Trois modes d'exploitation sont possibles pour la ligne ferroviaire 027000 à voie unique :

- le mode d'exploitation déjà utilisé pour la ligne ferroviaire 027000 jusqu'à sa fermeture dénommé « exploitation en voie unique à trafic restreint » (VUTR) :
  - ✓ les trains circulent dans les deux sens sur l'unique voie. Les dispositions de sécurité ne sont pas assurées par des dispositifs automatisés ou gérés à distance, ni relayés par des signaux lumineux. La sécurité résulte des consignes locales d'exploitation spécifiques qui sont appliquées par les conducteurs de train et le personnel de ligne. Afin d'assurer la sécurité de ce mode d'exploitation, seuls 4 passages quotidiens de train (soit 2 allers-retours) sont admis ;
- l'exploitation en navette où un seul train circule de façon pendulaire dans les deux sens ;
- la voie banalisée où différents types d'installations de sécurité télécommandées empêchent la circulation simultanée de trains en sens contraire et garantissent une distance de sécurité suffisante entre des trains circulant dans le même sens. Le CCVB (commande centralisée de voie banalisée) est un de ces modes d'exploitation de voie banalisée.

SNCF Réseau a analysé les modes d'exploitation adaptés aux besoins du centre de stockage Cigéo. L'exploitation en navette d'un seul train a été écartée, car elle empêcherait l'utilisation de la ligne ferroviaire pour d'autres utilisateurs éventuels.

Le VUTR demande moins d'investissements pour mettre à niveau la ligne, mais limite la circulation. L'ajout de transmetteurs à chaque embranchement sur la ligne permet d'augmenter le trafic à 8 passages quotidiens, soit 4 aller/retour.

La voie banalisée permet de faire circuler plus de train, mais induit des travaux plus onéreux pour mettre la ligne à niveau (environ 20 % supérieurs au VUTR, et 50% plus élevé pour son entretien).

Étant donné le trafic restreint dont a besoin le centre de stockage Cigéo (cf. volume IV), la solution VUTR (mode d'exploitation précédent de la ligne) est privilégiée. Toutefois, les travaux de mise à niveau intégreront des dispositions permettant une éventuelle évolution ultérieure de son mode d'exploitation.

4.4.3.3 Les travaux de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000

La ligne ferroviaire 027000 étant fermée à la circulation depuis 2014, des travaux de mise à niveau sont nécessaires pour permettre la desserte du centre de stockage Cigéo. Ces travaux n'impliquent aucune modification de tracé.

Le diagnostic réalisé par SNCF réseau révèle un état médiocre de la voie dans son ensemble. La composante la plus abîmée est son plancher. Les traverses sont souvent très anciennes. Le ballast est décompacté, mélangé à de la terre et de la végétation s'est installée. La plateforme est envahie par la végétation. Son système de drainage est largement déficient et un quart des ouvrages hydrauliques doit être rénové.

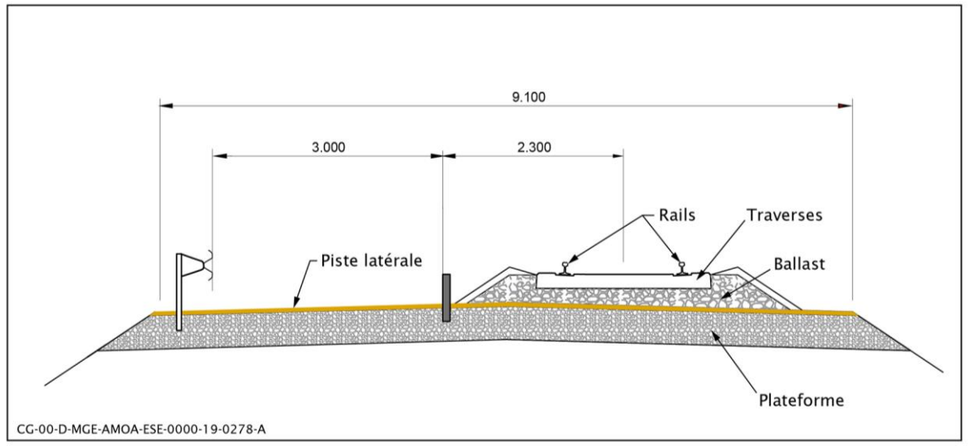


Figure 4-81 Profil en travers type d'une voie ferrée

Tous les ouvrages d'art nécessitent des travaux de réfection. Les salles d'exploitation des gares de Nançois-Tronville et de Lérouville doivent être adaptées pour intégrer le raccordement entre la ligne Paris-Strasbourg et la ligne ferroviaire 027000. Il faut également agrandir la salle à relais du poste de Lérouville.



Figure 4-82 Passage à niveau à Abainville



Figure 4-83 L'ancienne gare de Ligny-en-Barrois

Les principaux travaux de rénovation au sein des emprises actuelles de la SNCF sont les suivants :

- en gare de Nançois-Tronville, création de connexions directes depuis Paris et vers Strasbourg grâce à l'installation de jonctions électrifiées et à la motorisation des aiguillages ;
- installation de transmetteurs à l'entrée des ITE ;
- renouvellement total des composants de la plateforme et de la voie afin de limiter les interventions dans les 100 prochaines années ;
  - ✓ renouvellement des rails, traverses et ballasts ;
  - ✓ renouvellement des matériaux de la plateforme sur 60 cm de profondeur ;
- réfection des ouvrages hydrauliques ;
- réfection des ouvrages d'arts au fur et à mesures des cycles de régénération ;
  - ✓ étanchéité des ouvrages ;
  - ✓ réfection des maçonneries ;
  - ✓ remplacement des tabliers métalliques des ouvrages par des tabliers en béton ;
- pose d'un câble de communication tout le long de la ligne.

Les choix relatifs aux passages à niveau seront précisés à l'issue d'une concertation spécifique à cette problématique dont le maître d'ouvrage sera SNCF Réseau (cf. Chapitre 2.8.3 du présent document). Les travaux de modernisation des passages à niveaux et leurs emprises seront spécifiés ultérieurement en fonction de la solution retenue. La solution retenue fera l'objet d'un approfondissement des études et d'une actualisation de la présente étude d'impact.



Figure 4-84 Ligne ferroviaire 027000 à Nançois-Tronville



Figure 4-85 Ouvrage d'art de la ligne ferroviaire 027000

Préalablement aux travaux, un débroussaillage est effectué notamment au niveau des fossés et des ouvrages d'art et hydrauliques.

Une fois les travaux de rénovation de la voie réalisés, des opérations de maintenance seront nécessaires :

- vérification annuelle de l'état des installations ;
- nettoyage annuel des voies et leurs abords ;
- désherbage et débroussaillage annuel ;
- graissage des aiguilles joints et des aiguilles ;
- réparations et remplacements de pièce selon les besoins.



Figure 4-86 Enlèvement de portions d'ancienne voie ferrée

4.4.4 La déviation de la route départementale D60/960

Le Conseil départemental de la Haute-Marne est le maître d'ouvrage de l'opération de déviation de la route départementale 60/960 pour contourner la zone descenderie du centre de stockage Cigéo.

La route départementale 60/960 relie Soulaine d'Huys (Aube) à Toul (Meurthe-et-Moselle) en passant par Saudron (Haute-Marne).

Cette route départementale fait le lien avec les axes structurants suivants :

- la route nationale 67 à Joinville qui relie Chaumont au sud à Saint-Dizier au nord ;
- la route départementale 966 à Houdelaincourt qui relie Bar-le-Duc au nord à Neufchâteau au sud.

Les études de conception du centre de stockage Cigéo montrent la nécessité de dévier localement la route départementale 60/960 pour déployer les installations de la zone descenderie sur une emprise continue. La déviation modifie le tracé de la route départementale D60/960 sur le tronçon compris entre Pansay et Mandres-en-Barrois.

L'objectif de l'opération est de contourner la zone descenderie en maintenant les fonctionnalités et les niveaux de service et de sécurité actuels suivants :

- route à double sens constituée de deux voies d'une longueur variable selon les options ;
- maintien de l'actuel profil en travers de la route départementale D60/960 ;
- route classée Route à Grande Circulation (RGC) permettant notamment la circulation de convois exceptionnels.

La nouvelle section déviée respectera les normes de construction routière en vigueur. Chaque intersection avec les autres routes sera conçue pour sécuriser les mouvements de véhicules compte tenu du trafic modéré attendu (inférieur à quelques milliers de véhicules par jour en moyenne annuelle).

Trois options sont en cours d'études par le Conseil Départemental de la Haute-Marne :

- une option Sud qui passerait entre la zone descenderie et Gillaumé en contournant Saudron ;
- une option Nord qui contournerait Saudron ;
- une option de proximité qui longerait la limite nord de la zone descenderie.

Le tracé final de l'option retenue sera élaboré de façon à éviter les zones les plus sensibles et à réduire les incidences environnementales ne pouvant être évitées.

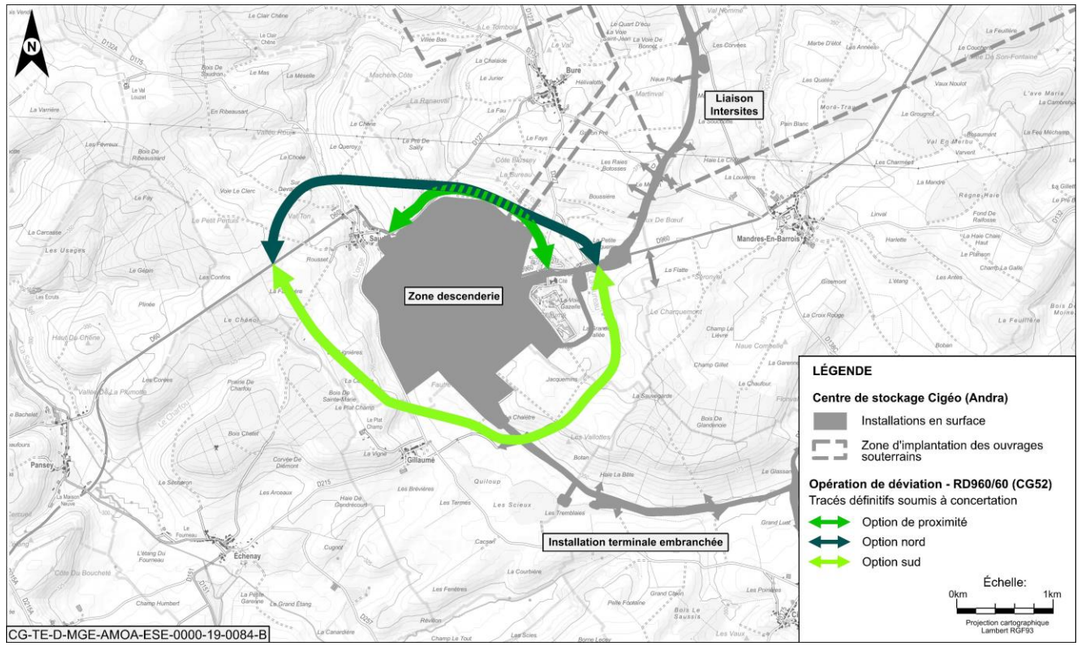


Figure 4-87 Opération de déviation de la route départementale D60/960 – options étudiées en vue de la concertation

Les communes concernées par ces options sont indiquées dans le Tableau 4-23.

Tableau 4-23 Communes concernées actuellement identifiées pour l'opération de déviation de la route départementale D60/960

Département	Commune
Meuse (55)	Bure
Haute-Marne (52)	Saudron
	Gillaumé

Selon l'option la plus longue impliquant un franchissement de l'Orge, la surface artificialisée à la fin des travaux de la phase d'aménagements préalables serait d'environ 10 ha pour la déviation de la route départementale D60/960.

Après participation du public à l'élaboration du projet, la solution retenue fera l'objet d'un approfondissement des études techniques et environnementales (cf. Chapitre 2.8.4 du présent document). Les résultats permettront l'actualisation de la présente étude d'impact. Cette étude d'impact actualisée sera jointe aux demandes d'autorisation de réaliser les travaux de l'opération de déviation de la route départementale.

4.4.5 L'expédition et le transport des colis de déchets

Les colis de déchets destinés au centre de stockage Cigéo sont entreposés temporairement dans des installations dédiées chez les différents producteurs, puis acheminés depuis :

- les installations Orano du site de La Hague dans le département de la Manche ;
- l'installation EDF ICEDA (Installation de conditionnement et d'entreposage des déchets activés) sur le site de la centrale nucléaire de Bugey dans le département de l'Ain ;
- les installations du CEA du centre de Marcoule dans le département du Gard, du centre de Cadarache dans le département des Bouches-du-Rhône et du centre de Valduc dans le département de la Côte d'Or.

La localisation des installations des producteurs à partir desquelles seront expédiés les colis de déchets destinés au centre de stockage Cigéo est représentée sur la figure 4-88 qui illustre les acheminements envisagés vers Cigéo.



Figure 4-88 Illustration de l'acheminement des colis de déchets radioactifs vers Cigéo

Tableau 4-24 Communes actuellement identifiées pour les installations liées à l'opération d'expédition et de transport

Département	Communes	
Ain (01)	Saint-Vulbas	
Bouches du Rhône (13)	Saint-Paul-lez-Durance	
Côte-d'Or (21)	Salives	
Gard (30)	Chusclan	Codolet
	Laudun-L'Ardoise	Orsan
Manche (50)	La Hague	Valognes

Aucune artificialisation supplémentaire des sols n'est attendu pour cette opération du projet global Cigéo.

4.4.5.1 L'organisation pour les transports de colis de déchets vers le centre de stockage Cigéo

Les producteurs de déchets sont responsables des moyens de transport et de l'acheminement des colis de déchets depuis les sites de production jusqu'au centre de stockage Cigéo. Bien que ne faisant pas partie des installations du centre de stockage Cigéo proprement dites, les installations d'expédition des colis radioactifs depuis les sites des producteurs ont un lien fonctionnel avec Cigéo. Elles participent à la chaîne d'acheminement des colis de déchets vers le centre de stockage Cigéo.

La stratégie industrielle du centre de stockage Cigéo consiste à minimiser le nombre de colis de déchets en attente de stockage dans les installations privilégiant une gestion de type flux tendu. Ainsi, l'Andra et les producteurs de déchets planifient et mettent en cohérence les moyens industriels à mettre en œuvre dans le cadre du développement du centre de stockage Cigéo.

L'installation terminale embranchée du centre de stockage Cigéo assure le raccordement au réseau ferré national et permet de privilégier le transport des colis radioactifs par le rail.

Les éléments de justification de ces choix sont présentés dans le chapitre 2.7.6 du présent document.

Le transport des emballages de transport chargés de colis de déchets, effectué sous la responsabilité des producteurs, expéditeurs des colis de déchet, conformément à la réglementation des transports de marchandises dangereuses, comprend toutes les opérations et conditions associées au mouvement des déchets radioactifs, telles que la conception des emballages, leur fabrication, leur entretien et leur réparation, et la préparation, l'envoi, le chargement, l'acheminement, y compris l'entreposage en transit, le déchargement et la réception au lieu de destination final des colis.

Les colis de déchets sont transportés dans des emballages (cf. Figure 4-89) adaptés à chacun des types de colis de déchets produits. Ces emballages sont conçus conformément à la réglementation en matière de transport des déchets, pour assurer la protection radiologique, évacuer la chaleur résiduelle et résister à des agressions possibles (choc, chute, incendie à proximité…) lors des trajets et des manutentions.



Figure 4-89 Convoi de déchets radioactifs

En particulier, ces emballages permettent de réduire les niveaux d'irradiation pour les rendre inférieurs aux limites fixées par la réglementation. Ils sont par ailleurs soumis à différentes épreuves correspondant à des conditions accidentelles sévères prenant en compte les caractéristiques des colis de déchets pour le transport desquels ils sont utilisés et pour lesquels ils sont agréés par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Ils font l'objet d'agrément par l'Autorité de sûreté nucléaire. Par ailleurs, les transports de substances radioactives sont assurés par des sociétés spécialisées et agréées par l'ASN.

Compte tenu des emballages existants, de l'avancement des études de faisabilité sur les emballages à développer et de leur retour d'expérience dans le domaine des transports, les producteurs de déchets (EDF, CEA et Orano) ont confirmé qu'ils disposeront des flottes d'emballages et des moyens de transport nécessaires, en particulier pour les colis de déchets devant être expédiés durant les premières années de fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

Les colis de déchets destinés à être stockés seront expédiés par les producteurs après contrôle de leur conformité aux réglementations relatives aux transports et aux critères d'acceptation pour le centre de stockage Cigéo.

Au démarrage du fonctionnement du centre de stockage Cigéo, les flux de convois acheminés par voie ferroviaire sont estimés à environ 8 trains[143] par an. Ensuite, le flux s'intensifierait progressivement pour atteindre, une moyenne maximale d'environ six trains par mois.

Même si la voie ferrée est l'option de référence, un acheminement par camion peut être justifié compte tenu de la localisation de certains sites, de flux limités ou de circonstances particulières.

Les constructions et/ou les modifications des installations d'expédition par les producteurs sont actuellement à l'étude. Si celles-ci s'avéraient nécessaires, elles feraient l'objet de demandes d'autorisations spécifiques portées par le producteur concerné et incluant l'analyse des impacts prenant en compte le secteur d'implantation et les activités envisagées. En tout état de cause, de telles constructions ou modifications d'installations n'interviendraient que plusieurs années après la mise en service de Cigéo. Elles concerneraient des sites nucléarisés faisant déjà l'objet d'études environnementales. Elles seraient prises en compte dans les versions ultérieures actualisées de la présente étude d'impact.

Les orientations retenues par les producteurs de déchets pour l'expédition de leurs colis de déchets vers le centre de stockage Cigéo sont présentées dans les chapitres suivants.

[143] Un train convoie, en moyenne, environ 7 emballages de transport, pouvant contenir jusqu'à 36 colis MA-VL ou 26 colis HA.

4.4.5.2 Les orientations retenues pour l'expédition de colis de déchets radioactifs depuis les sites EDF vers le centre de stockage Cigéo

L'expédition des colis de déchets radioactifs destinés au centre de stockage Cigéo sera effectuée à partir de l'installation de conditionnement et d'entreposage des déchets activités (ICEDA).

Cette installation a été autorisée par décret n 2010-402 du 23 avril 2010 (127) et constitue l'Installation nucléaire de base (INB) n° 173. Elle est implantée sur le site de la centrale de Bugey.

Le site de Bugey est raccordé au réseau ferroviaire, ce qui permet l'expédition vers Cigéo par rail des colis de déchets radioactifs.

Compte tenu d'une part des dimensions du colis primaire de déchets (C1PG) qui y sera produit pour conditionner les déchets MA-VL et d'autre part des dimensions prévisionnelles importantes de l'emballage de transport de ces C1PG, le transport par voie ferroviaire est privilégié à ce stade par EDF pour les expéditions depuis ICEDA (116)

Une réservation a été prévue au sein d'ICEDA pour l'atelier de chargement des C1PG dans leur l'emballage de transport vers Cigéo. Toutefois, étant donné que les expéditions de C1PG depuis ICEDA vers Cigéo ne débuteront pas avant le milieu des années 2040, la conception et la réalisation de cet atelier spécifique ont été différées afin qu'elles soient adaptées, le moment venu, aux emballages de transport agréés conformément à la réglementation applicable (116).

La construction ou l'aménagement d'installations supplémentaires pour le conditionnement, l'entreposage et l'expédition d'autres déchets, en particulier les déchets de déconstruction des centrales actuellement en activité seront envisagés en lien avec le programme de déconstruction des réacteurs de la seconde génération (cf. Chapitre 1.2.2 du présent document).

4.4.5.3 Les orientations retenues pour l'expédition de colis de déchets radioactifs depuis les sites Orano vers le centre de stockage Cigéo

La solution de référence d'Orano est celle déjà retenue actuellement pour le retour vers les clients étrangers des colis de déchets issus du retraitement sur le site de La Hague (Manche). Il s'agit d'expéditions effectuées à partir du site de La Hague jusqu'au terminal ferroviaire de Valognes, situé à une quarantaine de kilomètres, par route, puis par convoi ferroviaire jusqu'à Cigéo.

Les ateliers d'expédition des colis HA et MA-VL existent sur le site de La Hague. Il s'agit des ateliers de désentreposage des résidus vitrifiés et des résidus compactés (DRV), de l'atelier de désentreposage et extension de l'entreposage de déchets solides (D/E EDS) et de l'atelier de désentreposage/entreposage extension bitume (D/E EB). Ces ateliers peuvent être utilisés pour expédier des colis de déchets vers le centre de stockage Cigéo.

Orano estime que l'organisation des expéditions et des transports de colis de déchets vers le centre de stockage Cigéo n'implique pas de modification majeure des installations actuelles de La Hague.

4.4.5.4 Les orientations retenues pour l'expédition de colis de déchets radioactifs depuis les centres du CEA vers le centre de stockage Cigéo

Plusieurs installations existantes d'entreposage de déchets destinés au centre de stockage Cigéo sont implantées sur les centres de Marcoule (Gard), Cadarache (Bouches-du-Rhône) et Valduc (Côte d'Or).

On peut citer sur le centre de Cadarache, l'installation de Conditionnement et d'Entreposage de Déchets Radioactifs (CEDRA) et sur le site de Marcoule l'installation DIADEM (déchets radioactifs irradiants ou alpha de démantèlement), autorisée en 2016, ou l'entreposage intermédiaire polyvalent, installation de conception modulaire, permettant la construction d'alvéoles d'entreposage en fonction des besoins. Le centre de Valduc dispose également d'installations d'entreposage et le CEA étudie actuellement des capacités d'entreposage supplémentaires sur ce centre.

Compte tenu de l'environnement géographique des centres de Marcoule et de Cadarache, des voies et des infrastructures de transport disponibles dans leurs champs proches, ainsi que des spécificités des installations concernées, le CEA a créé début 2013 un projet en vue d'étudier la transportabilité de ses colis de déchets vers

Cigéo et élaborer des scénarios de transport de référence viables sur toute la durée de fonctionnement de Cigéo (116).

L'installation CEDRA permet l'expédition des colis destinés au centre de stockage Cigéo au départ du centre de Cadarache. Le centre de Valduc dispose également d'un atelier d'expédition. La construction d'installations permettant de recevoir et d'expédier les colis depuis Marcoule sera également étudiée en fonction des flux à expédier vers le centre de stockage Cigéo.

Alors que l'arrivée à Cigéo par voie ferroviaire est figée, tous les modes de transports au départ des centres ont été envisagés par le CEA pour élaborer ses scénarios (route, fer, voie navigable, transports multimodaux) à l'exception du mode aérien jugé rédhibitoire compte tenu des masses à transporter, des flux et de la difficulté à concevoir les modèles de colis de transport adaptés. Chaque scénario est évalué au regard des performances de fonctionnement, de la sécurité du transport, de l'acceptabilité par le public, des impacts potentiels sur l'environnement et des contraintes liées à la conception.

Le CEA ne s'interdit aucun mode de transport pour se prémunir de difficultés liées à l'utilisation de la voie ferroviaire ou routière. Les scénarios envisagés pourront nécessiter :

- l'adaptation des installations de départ actuellement sous dimensionnées ou la création d'installations de transfert ;
- la création de plateformes d'expédition ;
- la création ou l'adaptation de terminaux de transbordement ferroviaires ou fluviaux.

Le choix définitif des scénarios de transport de référence au départ des centres CEA de Marcoule et de Cadarache n'interviendra qu'après le résultat des dernières études de faisabilité complémentaires en cours, le remontage global des coûts et la décision d'engager ou non les investissements pour les phases de conception et de réalisation des infrastructures et des emballages de transport.

Concernant les expéditions des colis de déchets depuis le centre de Valduc, non embranché au réseau ferré national et situé à environ 150 km par la route du centre de stockage Cigéo, le mode d'expédition préférentiel sera par voie routière. En effet, compte tenu du faible nombre de colis de déchets à transporter en provenance du centre de Valduc (une centaine de camion sur toute la durée de fonctionnement de Cigéo), il ne semble pas justifié du point de vue environnemental de créer de nouvelles infrastructures pour permettre leur livraison par rail.

4.4.6 Les opérations de caractérisation et de surveillance environnementale

4.4.6.1 Les opérations de caractérisation

Les opérations de caractérisation correspondent à des investigations qui permettent d'acquérir une meilleure connaissance de l'environnement au sens large (géologie du site, biodiversité, milieu physique…) du centre de stockage Cigéo. Les opérations de caractérisation sont sous la maîtrise d'ouvrage de l'Andra.

Des opérations de caractérisation sont menées sur les emprises du centre de stockage pendant les phases d'aménagements préalables, de construction initiale et de fonctionnement, par exemple des forages géotechniques.[144] Dans ce cas, elles sont incluses dans les opérations menées sur la zone descenderie, la zone puits, la zone d'implantation des ouvrages souterrains, la liaison intersites et l'installation terminale embranchée.

Certaines opérations de caractérisation complémentaires doivent être menées hors du centre de stockage Cigéo. Elles font partie du projet global Cigéo. Le présent chapitre traite spécifiquement de ces opérations de caractérisation réalisées hors des emprises du centre de stockage (cf. Chapitre 2.8.6 du présent document). Elles feront l'objet de compléments d'information et de processus d'autorisations réglementaires adaptés à leur nature et à leurs incidences potentielles sur l'environnement.

Des opérations de caractérisation pourront être menées avant et pendant la construction et le fonctionnement du centre de stockage. L'acquisition de ces connaissances peut parfois répondre à des obligations réglementaires.

[144] Les forages de caractérisation géotechnique sont des opérations classiques pour la construction d'ouvrages et d'installations. Ils sont réalisés préalablement aux travaux de construction et ne justifient pas une présentation spécifique dans le cadre de la présente étude d'impact.

Par exemple, l'actualisation de l'étude d'impact du projet global (en particulier de son chapitre relatif à l'état « actuel » de l'environnement), dans le cadre d'une future demande d'autorisation, pourra nécessiter de nouvelles investigations. Des opérations de caractérisation peuvent également être utiles pour améliorer la conception, la construction et le fonctionnement du centre de stockage Cigéo, ou pour en maîtriser mieux les impacts.

Les opérations de caractérisation sont principalement de deux types : des caractérisations géologiques et des inventaires environnementaux.

S'agissant des caractérisations géologiques, l'Andra a procédé depuis les années quatre-vingt-dix à de nombreuses campagnes d'investigations pour l'étude de la géologie régionale à locale dans le cadre de sa mission de recherche de site, puis de conception du centre. Des opérations de forage et des campagnes géophysiques depuis la surface ont notamment été menées sur le territoire de la Meuse/Haute-Marne (cf. Chapitre 2.6 du présent document).

De nouvelles campagnes de forages sont nécessaires, pour poursuivre les études de recherche et développement et pour affiner certaines données utilisées pour la conception du centre de stockage Cigéo.

Les forages de caractérisation sont regroupés en deux grandes catégories, à savoir :

- les forages de caractérisation hydrogéologique (connaissance des circulations d'eaux souterraines) ;
- les forages de caractérisation du milieu géologique.

Le positionnement de ces forages sera défini à des étapes ultérieures. Il sera fonction des données hydrogéologiques et géologiques à acquérir et des contraintes environnementales locales en surface.

LES FORAGES DE CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE : PIÉZOMÈTRES ET ESSAIS D'EAU

Les piézomètres sont des puits de petit diamètre (quelques centimètres à dizaines de centimètres) qui servent à mesurer le niveau des eaux souterraines, à faire des prélèvements d'eau de nappe ponctuels pour analyse chimique, à déterminer la perméabilité des terrains traversés et à mesurer les niveaux des eaux souterraines. Ces paramètres contribuent à établir l'état hydrogéologique des zones d'études. Ils sont également utilisés pour concevoir les bâtiments et leurs dispositions d'étanchéité et de drainage.

Les forages de caractérisation hydrogéologiques peuvent être maintenus ouverts pour poursuivre les mesures dans le temps. Ils peuvent donc être utilisés à la fois pour la caractérisation et pour la surveillance environnementale. Plusieurs dizaines de ces ouvrages seront implantés, à des profondeurs variables en fonction de la masse d'eau.

La partie visible et accessible en surface est une dalle de béton d'au moins 2 m x 2 m x 0,3 m de hauteur autour d'une tête métallique qui protège le piézomètre. Le piézomètre comporte un capteur de pression et une centrale d'acquisition et de transmission. Un cabanon de protection est fixé sur la dalle.

Les forages pour essai d'eau, d'un diamètre de 115 mm, permettent de caractériser la conductivité hydraulique de chacune des couches de terrain testées. Ils sont arrêtés tous les mètres pour un essai d'infiltration d'eau. Ils sont refermés après mesures.





Figure 4-90 *Centrale d'acquisition de données dans un cabanon de protection de forage (à gauche) et tête de piézomètre (à droite)*

LES FORAGES DE CARACTÉRISATION DU MILIEU GÉOLOGIQUE

Les forages de caractérisation géologiques sont des forages dont la profondeur dépend de la roche étudiée (de 100 m de profondeur pour l'étude des calcaires du Barrois jusqu'à 600/900 m de profondeur pour l'étude de l'Oxfordien, du Callovo-Oxfordien et du Dogger).

Pour les forages les plus profonds, la caractérisation portera en priorité sur le Callovo-Oxfordien, mais aussi, de façon opportuniste, sur les autres formations géologiques traversées que sont l'Oxfordien carbonaté, le Kimméridgien et la partie supérieure du Dogger.

Leur objectif est de consolider les connaissances disponibles sur les formations géologiques traversées. Ils ont des objectifs spécifiques. Ils permettent d'acquérir notamment la géométrie, la minéralogie et les paramètres géomécaniques statiques et dynamiques des terrains traversés.

Ces paramètres sont obtenus, soit par prélèvements de roche dénommés « carottes » (les carottes sont analysées sur le chantier et utilisées pour des tests en laboratoire de géomécanique et de géotechnique), soit par passage dans les forages d'outils dits de « diagraphies » et d'outils spécialisés tels que les pressiomètres, des sources vibratoires et géophones ou accéléromètres associés.

Ces forages peuvent être refermés après mesures ou maintenus ouverts pour poursuivre les mesures dans le temps. Ils peuvent donc être utilisés à la fois pour la caractérisation et pour la surveillance environnementale (cf. Chapitre 2.8.6 du présent document).

La partie visible et accessible en surface est du même type que pour les piézomètres (dalle de béton d'au moins 2 m × 2 m × 0,3 m de hauteur, centrale d'acquisition et de transmission et cabanon de protection fixé sur la dalle).



Figure 4-91 *Plateforme de forage profond*

S'agissant des inventaires environnementaux, et comme pour les opérations de caractérisation géologique, l'Andra procède depuis des années à des investigations de terrain sur le territoire pour en acquérir une bonne connaissance environnementale. Des études spécifiques devront néanmoins encore être menées pour mettre à jour les inventaires, principalement de la biodiversité, dans les zones susceptibles d'être affectées par le développement du centre de stockage Cigéo. Ces inventaires permettent de maintenir une bonne connaissance de l'état de conservation des populations et d'évaluer leurs déplacements et l'étendue de leur territoire de vie. Ils concernent par exemple des protocoles d'écoute (points d'écoutes fixes ou pose d'enregistreurs) ou de recherche de gites de chiroptères, des observations des oiseaux (fixes ou mobiles, diurnes ou nocturnes), des relevés de la présence de reptiles (à vue ou sous plaques), des observations de mammifères (pièges photographiques, comptages…) et des passages de naturalistes pour répertorier les habitats naturels et la flore.

D'autres mesures de caractérisation, de moindre enjeu environnemental, pourront également être réalisées sur le milieu physique hors du centre de stockage (relevés topographiques, débit de cours d'eau, mesures de bruit…). Ces opérations peuvent être des mesures ponctuelles effectuées par simple circulation de personnes (ou matériel) ou des mesures effectuées à partir de dispositifs physiquement implantés sur le terrain (bornes topographiques, station de mesures, stations de jaugeage des cours d'eau…).

4.4.6.2 Les opérations de surveillance environnementale

Des opérations de surveillance environnementale seront prescrites par les autorités dès l'engagement des premiers travaux de la phase de construction initiale du centre de stockage, pendant toute sa phase de fonctionnement et après sa fermeture, aussi longtemps qu'elles seront jugées utiles pour la protection de la santé et de l'environnement.

Ces actions de surveillance environnementales correspondent à la réalisation de mesures, continues ou périodiques, permettant de :

- contrôler le fonctionnement du centre de stockage, et notamment de son installation nucléaire de base (INB), pour en détecter les éventuelles dérives, identifier leur cause et mettre en œuvre des actions correctives ;
- vérifier le respect des obligations réglementaires qui incombent à l'Andra en matière de protection de l'environnement.

La surveillance environnementale joue ainsi un rôle essentiel pour suivre l'impact des activités du centre de stockage sur son environnement, pour limiter tout risque de contamination, pollution ou nuisance et pour réduire les conséquences des situations anormales, dégradées ou accidentelles.

Des opérations de surveillance environnementales seront prescrites sur les emprises du centre de stockage, par exemple des mesures de la qualité de l'eau prélevée dans des piézomètres. Dans ce cas, elles sont incluses dans les opérations menées sur la zone descenderie, la zone puits, la zone d'implantation des ouvrages souterrains, la liaison intersites et l'installation terminale embranchée.

Certaines opérations de surveillance environnementales devront être menées hors du centre de stockage Cigéo. Elles font partie du projet global Cigéo. Le présent chapitre traite spécifiquement de ces opérations de surveillance environnementales réalisées hors des emprises du centre de stockage (cf. Chapitre 2.8.6 du présent document). Elles feront l'objet de compléments d'information et de processus d'autorisations réglementaires adaptés à leur nature et à leurs incidences potentielles sur l'environnement.

Les mesures associées à la surveillance environnementales concernent des critères et des paramètres définis dans les différentes autorisations qui seront délivrées à l'Andra pour le centre de stockage Cigéo. Ces critères et paramètres seront définis notamment dans les prescriptions de l'Autorité de sûreté nucléaire. Ils portent sur les prélèvements et la consommation d'eau, les émissions d'effluents et de façon générale sur toutes les composantes de l'environnement susceptibles d'être affectées par le centre de stockage (article 4.2.1 de l'arrêté INB du 7 février 2012 (90)).

Une synthèse des résultats des mesures associées à la surveillance environnementale du centre de stockage Cigéo sera transmise *a minima* mensuellement à l'ASN, à l'Agence régionale de santé (ARS) et au service chargé de la police de l'eau.

Un rapport annuel sera établi pour présenter l'impact du centre de stockage durant l'année civile écoulée. Il sera transmis à l'ASN, à la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), à l'Agence régionale de santé (ARS), au service chargé de la police de l'eau, ainsi qu'à la future Commission locale d'information (CLI).

Les implantations des dispositifs de surveillance seront fixées par les différentes autorisations en fonction des critères et paramètres à mesurer et des contraintes environnementales de surface. Ils pourront être situés à proximité du centre de stockage Cigéo ou dans un environnement éloigné de plusieurs kilomètres. Ces implantations seront présentées dans une version ultérieure de l'étude d'impact. La mise en place de ces dispositifs donnera lieu, lorsque nécessaire, à des compléments d'information et à des processus d'autorisations réglementaires adaptés à leur nature et à leurs enjeux environnementaux.

Au stade actuel des études, il est considéré 4 plateformes d'un demi-hectares en dehors des emprises du centre de stockage Cigéo pour la mise en place de forage. Comme les autres aspects de la surveillance environnementale ne nécessitent pas la création de plateforme spécifique, il est retenu une artificialisation du sol d'environ 2 ha.

Parmi les dispositifs de surveillance, des forages permettront de suivre la qualité, les fluctuations et les écoulements des nappes d'eaux souterraines (forages hydrogéologiques) et le comportement des terrains géologiques accueillant le stockage.

Tableau 4-25 Besoins de surveillance du stockage par forages

Fonctions et exigences	Besoins de surveillance	Possibilité de répondre aux besoins et moyens d'y répondre
Moyen d'évaluer ou de surveiller l'éventuelle migration de radionucléides	Piézométrie et suivi de la composition chimique des eaux dans les calcaires du Barrois, le Kimméridgien, les Calcaires de l'Oxfordien et le Dogger	Forages instrumentés depuis la surface
Préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien	Évolution des pressions interstitielles dans le Callovo-Oxfordien	
	Échauffement (mesures réparties dans le plan du stockage et verticalement), déformations mécaniques et thermomécaniques en grand dans le Callovo-Oxfordien et l'Oxfordien	
	Évolution de la piézométrie dans les calcaires du Barrois, le Kimméridgien, les Calcaires de l'Oxfordien et le Dogger	

Outre les forages, des dispositifs de mesure, de moindre impact environnemental, seront disposés sur le territoire pour la surveillance environnementale. Il s'agit notamment de balises permettant des prélèvements d'air et des mesures, en particulier de la qualité de l'air ou de radioactivité volumique ou ambiante. Des dispositifs permettront également de surveiller la qualité et les débits des eaux superficielles.

Des prélèvements dans les cours d'eau, des prélèvements de sol, de végétaux et de productions agricoles seront également menés pour surveiller les écosystèmes terrestres et aquatiques.

Les prélèvements et mesures seront réalisés par l'Andra ou par ses prestataires selon des exigences fixées par les autorités. Les analyses des prélèvements seront réalisées par des laboratoires, internes au centre de stockage ou extérieurs, agréés par l'ASN ou par le ministère en charge de l'environnement.

LA SURVEILLANCE APRÈS FERMETURE

Pour le centre de stockage Cigéo, la surveillance sera maintenue après la fermeture définitive. La durée de cette dernière phase, appelée « phase de surveillance » sera précisée par les autorités (cf. Chapitre 5 du présent document). Elle est destinée à confirmer le bon fonctionnement du stockage et notamment le confinement des radioéléments.

Cette surveillance après fermeture ne devra pas perturber le système de stockage. Plusieurs solutions techniques opérationnelles de surveillance sont envisagées (techniques de géophysique non intrusives depuis la surface, mesures depuis des forages instrumentés, mesures au sein même des ouvrages de stockage avec transmission des données sans fil à travers les terrains depuis le fond jusqu'à la surface…).

Cette phase de surveillance est associée à une période de contrôle institutionnel qui comprendra le maintien de servitudes d'utilité publique. Le contrôle institutionnel peut aller au-delà de la phase de surveillance en particulier pour renforcer le maintien de la mémoire du site après sa fermeture.

La phase de surveillance s'achève avec le déclassement de l'installation (article L. 593-33 du code de l'environnement).

Comme indiqué au chapitre 18.1 du volume IV de l'étude d'impact, « *après la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo, la sûreté est assurée de façon passive, c'est-à-dire que les personnes et l'environnement sont protégés des éléments radioactifs et des substances chimiques toxiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir* ».

Une fois les installations nucléaires de surface démantelées et l'installation souterraine remblayée et scellée, la couche du Callovo-Oxfordien ainsi que les dispositifs ouvragés mis en place à la fermeture

(scellements en particulier au niveau des liaisons surface-fond et des galeries) assurent la protection de l'homme et l'environnement de manière passive.

Le dossier de demande d'autorisation de création, conformément à l'article R. 593-16 du code de l'environnement, comprendra une pièce dite « Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance » qui présentera les principes méthodologiques, les étapes et les délais envisagés pour le démantèlement des parties de l'installation qui ne seront plus nécessaires à l'exploitation du stockage, pour la fermeture et pour la surveillance de l'installation une fois l'autorisation de fermer définitivement l'installation souterraine du centre de stockage promulguée.

Par ailleurs, afin de s'assurer qu'une fois l'installation souterraine fermée, les dispositifs naturels et ouvragés protègent l'homme et l'environnement de façon passive, des activités de surveillance du comportement des ouvrages souterrains et des perturbations éventuelles apportées par le stockage sur la couche du Callovo-oxfordien (suivi par exemple du comportement mécanique et des caractéristiques hydrauliques) seront mises en œuvre. À cette fin, des forages réalisés dès la phase de construction initiale pourront être mis à profit. La surveillance après fermeture dont la durée minimale sera fixée par l'Autorité de sureté nucléaire (ASN) dans le décret de démantèlement et de fermeture de l'INB, comprendra des dispositifs déjà mis en place avant la fermeture définitive et maintenus si besoin après la fermeture du centre de stockage Cigéo et préconisera éventuellement des dispositifs complémentaires.

Tous les dispositifs de suivi après fermeture seront choisis de manière à préserver la couche du Callovo-Oxfordien afin qu'elle puisse jouer pleinement son rôle central vis-à-vis de la protection à long terme de l'homme et l'environnement. Plusieurs pistes sont à ce stade envisageables : techniques non intrusives en surface (géophysique…), mesures dans des forages instrumentés réalisés depuis la surface jusqu'à l'Oxfordien calcaire situé au-dessus de la couche du Callovo-Oxfordien (cf. Chapitre 5.1.1.1 du volume IV de l'étude d'impact). Un périmètre de protection des ouvrages souterrains, prévu obligatoirement par l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement, sera défini et permettra de réglementer, via des servitudes, les usages des terrains.

Suite au décret de démantèlement et à l'issue des opérations préalables à la fermeture définitive de l'installation, une décision de l'ASN viendra autoriser le passage en phase de surveillance sur la base d'un dossier de l'Andra qui portera notamment la démonstration de l'efficacité des actions de surveillance. Cette autorisation précisera les modalités envisagées pour la conservation et la transmission de la mémoire de l'installation pendant et après la phase de surveillance (article R. 593 75 VII du code de l'environnement).

4.4.6.3 Les opérations de suivi des mesures environnementales

Les opérations de suivi des mesures environnementales correspondent aux actions menées pour vérifier l'efficacité des mesures d'évitement, de réduction et de compensation des impacts du centre de stockage Cigéo, prescrites à l'Andra dans les différentes autorisations administratives (dérogation d'atteinte aux espèces protégées, dite « dérogation CNPN », autorisations environnementales par exemple pour le défrichement, permis d'aménager, IOTA…). Des mesures du même type seront prescrites aux autres maîtres d'ouvrage du projet global.

Des opérations de suivi des mesures environnementales seront prescrites à l'Andra et aux autres maîtres d'ouvrages dès l'engagement des premiers aménagements préalables du centre de stockage, pendant sa phase de construction initiale et pendant toute sa phase de fonctionnement.

Ces mesures peuvent être du même type que celles prescrites pour la surveillance environnementale (suivi des eaux souterraines, des eaux superficielles, de la qualité de l'air, des impacts sur les écosystèmes terrestres et aquatiques…) (cf. Chapitre 2.8.6 du présent document).

Les opérations de suivi des mesures environnementales recouvrent en particulier les actions qui visent à vérifier l'efficacité des mesures prescrites de restauration des milieux, menées sur les sites de compensation. À des fins de cohérence et d'efficacité, les maîtres d'ouvrage du projet global coopèrent pour coordonner la mise en œuvre de l'ensemble des mesures de compensation.

Les opérations de suivi des mesures environnementales seront concertées avec les riverains pour recueillir leurs sensibilités particulières, voire pour les associer à certains dispositifs de mesures".

LE PLAN DE SURVEILLANCE

L'ensemble des opérations de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales prescrites à l'Andra par les autorisations de l'ASN et par les autorisations préfectorales constitue un dispositif réglementaire global de surveillance des activités et des impacts environnementaux du centre de stockage Cigéo.

Il est regroupé et formalisé par l'Andra dans un plan de surveillance du centre de stockage Cigéo. Une première approche de ce plan est présentée dans le volume IV de la présente étude d'impact. Il couvre tous les compartiments de l'environnement. Il sera progressivement approfondi dans les versions ultérieures actualisées de l'étude d'impact, associées aux procédures administratives d'autorisation des opérations de travaux.

Tableau 4-26 Communes actuellement identifiées par les opérations caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales

Départements	Communes
Haute-Marne (52)	Seront définies ultérieurement en lien avec l'avancée des études et les prescriptions des autorisations réglementaires
Meuse (55)	

Synthèse

Le centre de stockage Cigéo comprend :

- une zone descenderie (ZD), principalement dédiée à la réception des colis de déchets radioactifs expédiés par les producteurs, à leur contrôle et à leur préparation avant transfert dans l'installation souterraine pour leur stockage ;
- une zone puits (ZP), dédiée aux installations de soutien aux activités réalisées dans l'installation souterraine et en particulier aux travaux de creusement ;
- une zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS), comprenant les accès depuis la surface, des quartiers de stockage des colis de déchets radioactifs et des zones de soutien logistique (ZSL) ;
- une liaison intersites (LIS) en surface, reliant la zone puits à la zone descenderie, comprenant un convoyeur, une voie dédiée à la circulation des poids lourds et une voie pour la circulation des véhicules légers ;
- une installation terminale embranchée (ITE), voie ferrée reliant la zone descenderie au Réseau ferré national (RFN) à Gondrecourt-le-Château et incluant une plateforme logistique dans cette commune.

Les opérations du projet global Cigéo liés à la construction et au fonctionnement du centre de stockage Cigéo comprennent 6 opérations :

- l'alimentation électrique par un raccordement sur la ligne existante 400 kV Houdreville/Mery ;
- l'adduction d'eau potable depuis les captages de Thonnance-les-Joinville, d'Échenay et de Gondrecourt-Le-Château ;
- la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 entre Nançois-Tronville et Gondrecourt-le-Château ;
- la déviation de la route départementale D60/960 ;
- l'expédition et le transport des colis de déchets depuis les installations Orano du site de La Hague (Manche), l'installation EDF ICEDA (Ain), les centres CEA de Marcoule (Gard), de Cadarache (Bouches-du-Rhône) et de Valduc (Côte d'Or) ;
- des opérations de caractérisation et de surveillance environnementale menées par l'Andra à l'extérieur du centre de stockage Cigéo pour acquérir des connaissances et contrôler le fonctionnement de ses installations.

5

Le phasage du projet global Cigéo et la réversibilité du stockage

5.1 Les phases temporelles successives de déploiement du centre de stockage Cigéo 218
5.2 La phase industrielle pilote 219
5.3 La description des phases temporelles de déploiement du centre de stockage Cigéo 221
5.4 La réversibilité du stockage 226

5.1 Les phases temporelles successives de déploiement du centre de stockage Cigéo

Le déploiement du centre de stockage Cigéo est envisagé selon plusieurs phases temporelles successives :

- la phase d'aménagements préalables ;
- la phase de construction initiale ;
- la phase de fonctionnement ;
- la phase de démantèlement et de fermeture ;
- les phases de surveillance et de post-surveillance.

Le code de l'environnement prévoit une phase industrielle pilote (Phipil) pour le centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 5.2 du présent document). L'Andra propose que cette phase particulière couvre la phase de construction initiale et de premières années de la phase de fonctionnement. Cette proposition fera l'objet de concertations et pourra naturellement être modifiée sur la base des échanges avec les parties prenantes et le public.

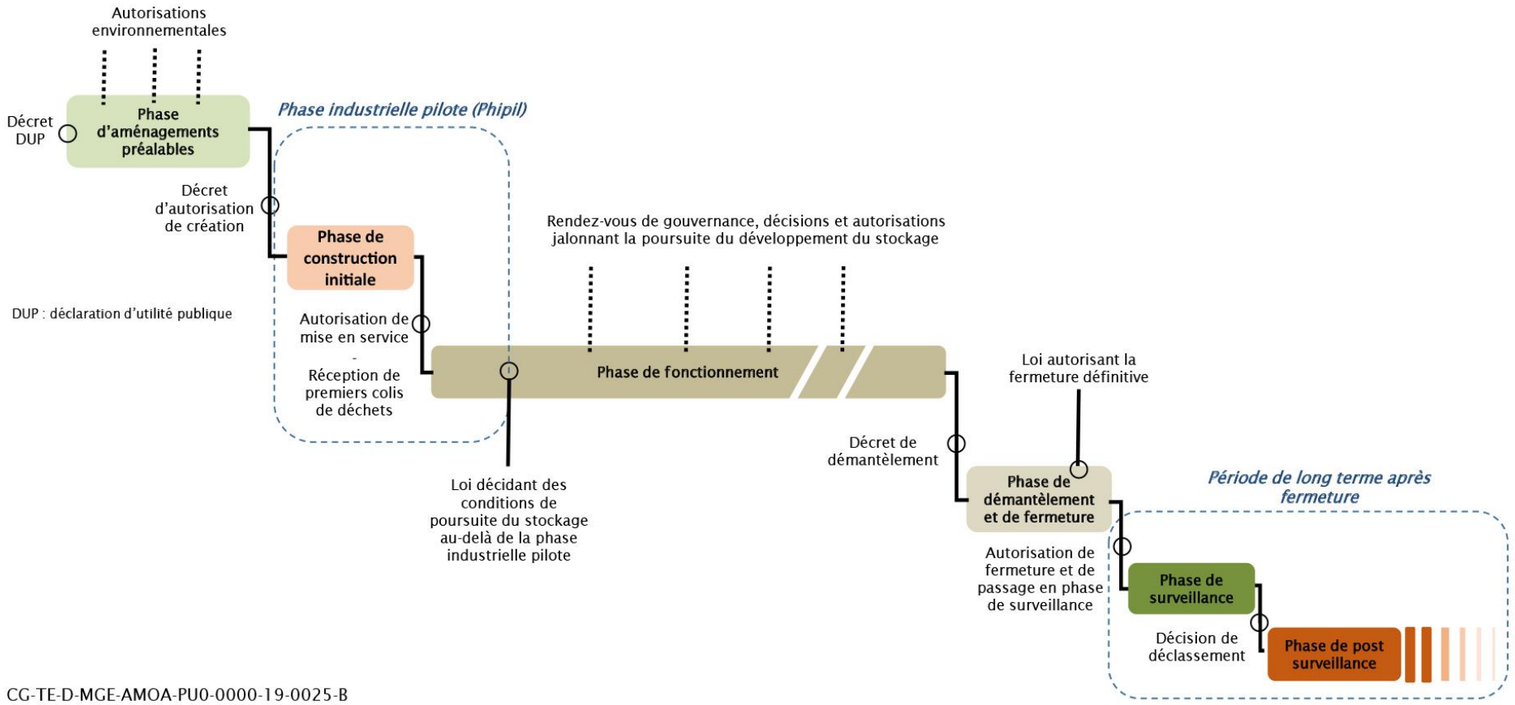


Figure 5-1 Les phases temporelles successives de déploiement du centre de stockage Cigéo

La phase d'aménagements préalables débute à la délivrance du décret de déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo et se termine à la délivrance du décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo. Les aménagements préalables correspondent à de premiers travaux qui sont réalisés pour préparer la construction du centre (cf. Chapitre 5.3.1 du présent document).

La phase de construction initiale du centre de stockage Cigéo débute à la délivrance du décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo et se termine à la mise en service de cette installation nucléaire. Les travaux menés lors de la phase de construction initiale ont pour objectifs de réaliser tous les ouvrages qui permettent cette mise en service (cf. Chapitre 5.3.2 du présent document).

La phase de fonctionnement débute à la mise en service de l'INB du centre de stockage Cigéo, c'est-à-dire à la réception de premiers colis de déchets radioactifs, et se termine à la délivrance de son décret de démantèlement. Elle se déroule pendant une centaine d'années au cours de laquelle auront principalement lieu des activités de réception et de stockage de colis de déchets et des travaux d'extension de l'installation souterraine, par tranches successives, afin de poursuivre la réception des colis de l'inventaire (cf. Chapitre 5.3.3 du présent document).

La phase de démantèlement et de fermeture débute à la délivrance du décret de démantèlement de l'INB du centre de stockage Cigéo et se termine par la décision d'autorisation de fermeture et de passage en phase de surveillance (cf. Chapitre 5.3.4 du présent document). Cette phase comporte les opérations visant la fermeture définitive du centre de stockage que seule une loi peut autoriser.

La phase de surveillance débute avec la décision d'autorisation de fermeture et de passage en phase de surveillance et se termine avec la décision de déclassement de l'INB du centre de stockage Cigéo. Pendant cette phase, la sûreté du stockage est assurée de façon passive. Après la décision de déclassement, on parle de « post-surveillance » (cf. Chapitre 5.3.5 du présent document).

5.2 La phase industrielle pilote

5.2.1 L'origine de la phase industrielle pilote et son inscription dans la réglementation

En complément des phases temporelles successives de déploiement du projet décrites au chapitre 5.1 du présent document, une période de développement particulière est prévue pour le centre de stockage Cigéo : la « phase industrielle pilote » (Phipil).

La phase industrielle pilote (Phipil) a été introduite dans le projet par l'Andra suite au débat public mené en 2013 sur le projet de centre de stockage Cigéo. Elle concrétise la démarche prudente nécessaire pour construire et démarrer progressivement une installation industrielle considérée comme complexe, compte tenu de sa profondeur, de ses dimensions inhabituelles et des très longues durées pour lesquelles elle est conçue. Cigéo est le premier centre de stockage géologique de déchets radioactifs HA et MA-VL dans l'argile, en France et dans le monde.

La loi du 25 juillet 2016 a retenu le principe d'une phase industrielle pilote (Phipil) pour un centre de stockage géologique en disposant d'un certain nombre d'objectifs repris dans le code de l'environnement (article L 542-10-1).

» LES OBJECTIFS DE LA PHASE INDUSTRIELLE PILOTE DANS LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT

L'article L 542-10-1 du code de l'environnement fixe des objectifs et des contraintes pour la phase industrielle pilote (Phipil).

L'exploitation du centre de stockage commence par une phase industrielle pilote.

La phase industrielle pilote permet de conforter le caractère réversible et la démonstration de sûreté du centre de stockage, notamment par un programme d'essais in situ.

Elle comporte des essais de récupération de colis de déchets.

Tous les colis de déchets doivent rester aisément récupérables durant la Phipil.

Les résultats de la phase industrielle pilote font l'objet :

- d'un rapport de l'Andra ;
- d'un avis de la commission nationale d'évaluation (CNE) ;
- d'un avis de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) ;
- du recueil de l'avis des collectivités territoriales.

Le rapport de l'Andra, accompagné des avis de la CNE et de l'ASN, est évalué par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) qui rend compte de ses travaux aux commissions compétentes de l'Assemblée nationale et du Sénat.

Le Gouvernement présente un projet de loi adaptant les conditions d'exercice de la réversibilité du stockage et prenant en compte, le cas échéant, les recommandations de l'OPECST.

Dans la loi de 2016, le Parlement a associé à la phase industrielle pilote un nouveau jalon législatif. Sur la base d'un rapport produit par l'Andra pour présenter les résultats des premières années de l'exploitation du centre de stockage Cigéo, et après un processus d'instruction spécifique, une nouvelle loi sera présentée par le Gouvernement pour décider des conditions de poursuite du projet. Le centre de stockage Cigéo est, à ce jour, la seule installation nucléaire de base (INB) pour laquelle la règlementation prévoit, après son autorisation par décret, un rendez-vous législatif conditionnant son éventuelle poursuite. Ce sera la quatrième loi encadrant son développement après les échéances de 1991, 2006 et 2016. Si le projet est poursuivi, ce ne sera pas la dernière, il est d'ores et déjà prévu par le code de l'environnement que seule une loi puisse autoriser sa fermeture définitive (article L-542-10-1).

Le débat public mené en 2019 sur le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) a confirmé l'importance de la Phipil pour les parties prenantes en termes de gouvernance, de sûreté et de réversibilité (97). Les objectifs et les critères de réussite de la phase industrielle pilote seront fixés par le PNGMDR (article 8 de la décision de la ministre de la transition écologique et solidaire et du président de l'Autorité de sûreté nucléaire sur les suites à donner au débat public PNGMDR (97).

L'Andra a formalisé, dans un dossier concertation publié en janvier 2021, ses propositions en matière de phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo (https://www.andra.fr/concertation-sur-la-phase-industrielle-pilote-de-cigeo). La concertation sur la phase industrielle pilote (Phipil), lancée en janvier 2021 lors d'un webinaire public réunissant près de 280 participants, se poursuivra jusqu'à fin 2021 (cf. Chapitre 2.5.3.3b) du présent document).

5.2.2 Les apports techniques de la phase industrielle pilote

En termes techniques, la phase industrielle pilote (Phipil) constitue une phase de confirmation de l'ensemble de la conception et de la démonstration de sûreté du centre de stockage Cigéo. Elle permet à l'Andra de confirmer, en situation réelle, des données sur le milieu géologique dans lequel l'installation souterraine est construite. Les données qui seront acquises « *in situ* », en situation réelle, seront plus représentatives que celles acquises au

Laboratoire ou depuis la surface. De plus, elle permet de mesurer les évolutions de la roche et des ouvrages dans les premières années après leur réalisation et de vérifier qu'elles correspondent aux prévisions.

La démarche progressive de l'Andra implique d'abord la construction de « démonstrateurs » d'alvéoles (HA et MA-VL) qui ne seront pas utilisés pour le stockage de colis, mais qui serviront à acquérir des compléments de connaissance et à confirmer la qualité des ouvrages réalisés en vraie grandeur (alvéoles de taille supérieure à ceux qui peuvent être réalisés en préalable au laboratoire). Les démonstrateurs permettront également à l'Andra de vérifier la capacité à surveiller leur comportement dans le temps[145].Une fois ces informations acquises, la construction d'alvéoles destinés à stocker des colis de déchets sera entreprise. Dans cette optique d'acquisition progressive de connaissance, des démonstrateurs d'ouvrages de fermeture seront construits dès la Phipil et seront étudiés pendant toute la durée du fonctionnement de Cigéo afin de préparer au mieux l'échéance encore lointaine de leur construction. Par exemple, un démonstrateur de scellement de descenderie sera construit en Phipil, alors que les ouvrages industriels de scellement des descenderies sont prévus à l'horizon 2150.

La phase industrielle pilote est également utilisée par l'Andra pour qualifier, confirmer et justifier progressivement l'ensemble du fonctionnement de l'installation, notamment ces équipements industriels atypiques, comme le funiculaire, sa sûreté, sa réversibilité et sa surveillance :

- dans un premier temps, l'Andra teste les équipements installés et les opérations prévues en réalisant d'abord des essais en « inactif », c'est-à-dire en utilisant des « maquettes » de colis de déchets ne contenant pas de radioactivité ;
- dans un second temps, après l'autorisation de la mise en service de l'installation par l'Autorité de sûreté nucléaire, des essais sont réalisés en « actif », c'est-à-dire avec des colis de déchets radioactifs.

L'ensemble des essais menés aux différents stades permettra d'établir progressivement les règles et consignes d'exploitation, y compris en situation dégradée ou accidentelle, de vérifier les performances des équipes d'exploitation (pilotage du procédé, maintenance) et d'intervention en cas de situations incidentelles ou accidentelles (incendie, blessés, malveillance) et de les entraîner.

Un programme d'essai particulier, en inactif puis en actif, sera dédié à la récupérabilité. Il s'agira de démontrer la capacité de l'Andra à retirer les colis de déchets stockés dans les alvéoles du centre de stockage Cigéo en effectuant des opérations unitaires et complètes de retrait (essais de retrait des alvéoles et essais de remontée dans les installations en surface).

Après les essais en actif, la phase industrielle pilote se poursuivra pendant quelques années par des opérations de mise en stockage de colis de déchets radioactifs. Cette période seconde partie de la phase industrielle pilote aura pour objectif d'acquérir du retour d'expérience sur le fonctionnement du centre de stockage, sur son évolution, la surveillance de ses impacts environnementaux et sa sûreté (inspections, modifications, événements et éventuels incidents) et sa réversibilité.

L'ensemble de ces éléments de retour d'expérience techniques, acquis avant et après la mise en service de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo seront analysés dans le rapport qui sera produit par l'Andra et transmis pour instruction dans l'optique d'une décision du Parlement sur les conditions de poursuite du stockage.

5.2.3 Les apports de la phase industrielle pilote en termes de gouvernance

En termes de gouvernance, la Phipil concrétise une approche visant à « *garantir la participation des citoyens tout au long de la vie* » du centre de stockage Cigéo, telle qu'exigée par le code de l'environnement (article L 542-10-1). Cette approche est renforcée par l'exigence réglementaire de produire et de mettre à jour tous les 5 ans, « *en concertation avec l'ensemble des parties prenantes et le public* », un plan directeur de l'exploitation (PDE) (article L 542-10-1). Cette mise à jour concertée du PDE d'effectue en parallèle des revues périodiques de réversibilité et des réexamens périodiques de sûreté (article L 593-18). Le centre de stockage Cigéo est la seule installation nucléaire de base (INB) pour laquelle un tel processus de participation et de gouvernance a été créé par la réglementation. Il garantit que le stockage sera développé sous le regard et le contrôle des parties prenantes et des citoyens.

La définition du schéma de gouvernance du centre de stockage Cigéo est prévue dans la feuille de route actuelle de l'Andra pour la concertation à l'échelle locale et nationale (cf. Chapitre 2.5.3.3 du présent document)[146]. À cet égard, lors de premiers échanges, les parties prenantes (ANCCLI, CLIS, syndicats…) ont identifié la Phipil comme une des phases essentielles pour la gouvernance et ont souhaité contribuer à la définition des modalités d'échanges et de décisions pour Cigéo et pour les déchets qui lui sont destinés.

En pratique, les premières années après l'éventuelle délivrance du décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo constituent, pour la participation du public et des parties prenantes, une phase de mise en place, de rodage et d'acquisition de connaissance, au même titre que les essais dans l'installation pour les aspects techniques. Le schéma de gouvernance pourra être modifié et renforcé sur la base du retour d'expérience de son fonctionnement. L'expérience acquise en matière de gouvernance et d'échanges avec le public sera présenté dans le rapport qui sera produit par l'Andra et transmis pour instruction dans l'optique d'une décision du Parlement sur les conditions de poursuite du stockage. Dans son examen des conditions de poursuite éventuelle du projet, le Parlement accordera probablement une importance particulière au bon fonctionnement de la gouvernance du centre de stockage.

L'Andra est convaincue que, dès lors que la Phipil sera menée dans le respect des principes de gouvernance définis avec les parties prenantes et les citoyens, elle jouera un rôle essentiel dans la construction de la confiance nécessaire à la réussite du projet Cigéo.

L'Andra a formalisé, dans un dossier concertation publié en mai 2021, ses propositions en matière de gouvernance du centre de stockage Cigéo (https://www.andra.fr/lancement-de-la-concertation-sur-la-gouvernance-de-cigeo). La concertation actuellement en cours se poursuivra jusqu'à fin 2021 (cf. Chapitre 2.5.3.3a) du présent document).

5.2.4 Le déroulement et l'issue de la phase industrielle pilote

L'Andra propose que la phase industrielle pilote se déroule en deux parties :

- la première partie commence après la délivrance du décret de création de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo. Elle couvre la phase de construction initiale. En effet, c'est lors de cette phase que de premières décisions structurantes sont prises pour orienter les travaux de construction et pour en suivre les impacts. En fonction de l'avancée des travaux, cette première partie de la phase industrielle pilote, en « inactif », pourrait durer de 10 à 15 ans ;
- la seconde partie commence après la mise en service de l'installation nucléaire de base du centre de stockage Cigéo et se poursuit pendant quelques années pour acquérir un retour d'expérience sur le fonctionnement du centre de stockage, sur son évolution, sa surveillance, ses impacts environnementaux, sa sûreté (inspections, modifications, événements et éventuels incidents) et sa réversibilité. Cette seconde partie de la phase industrielle pilote, en « actif », pourrait durer de 5 à 10 ans.

La phase industrielle pilote prendra fin dans les conditions qui seront décidées par le Parlement. Les objectifs et les critères de réussite de la phase industrielle pilote seront fixés par le plan national pour la gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) (97).

Au vu du retour d'expérience acquis lors de la construction, puis du fonctionnement du centre de stockage Cigéo sur plusieurs années, l'Andra préparera un rapport de synthèse de la Phipil pour le Parlement afin qu'il décide des conditions de poursuite du projet. Il s'agira *a priori*, soit de renoncer à cette filière de gestion des déchets pour tout ou partie des déchets HA et MA-VL, soit d'engager la phase suivante de développement du centre de stockage Cigéo, éventuellement en modifiant sa conception ou ses modalités d'exploitation et de développement.

Si la décision du Parlement est d'abandonner le stockage dans le centre de stockage Cigéo pour tout ou partie des déchets HA et MA-VL, les colis concernés seront retirés du stockage et renvoyés chez les producteurs.

[145] Du point de vue mécanique, les démonstrateurs seront notamment utilisés pour vérifier l'atteinte d'un comportement asymptotique durable où leur déformation progressive, liée à leur mise en charge, est très limitée.

[146] L'objectif de l'Andra est de proposer, dans le cadre de la demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo, un schéma de gouvernance concerté avec les parties prenantes ou, a minima, des modalités partagées de co-construction de ce schéma avec la société, à mettre en œuvre pendant l'instruction de la DAC. Cette concertation est encadrée par les garants de la Commission nationale du débat public (CNDP).

Si la décision du Parlement est de poursuivre le fonctionnement du centre de stockage Cigéo à l'issue de la Phipil, une nouvelle étape de son développement pourra être engagée, dans la même logique de progressivité du développement et de concertation. La vie du centre de stockage restera jalonnée de multiples rendez-vous décisionnels (décision de construction des extensions successives, décision de réception de colis de déchets HA à l'horizon 2070-2080, décisions de démantèlement et de fermeture…). Ces rendez-vous permettent de relier le développement du centre de stockage aux décisions, encore incertaines à ce jour, liées à la politique énergétique, par exemple le nombre et la durée de vie des centrales du parc électronucléaire, l'avenir du traitement des combustibles, la politique de recyclage… (cf. Chapitre 5.4 du présent document). La gouvernance se poursuivra et pourra encore s'enrichir pour les exercices périodiques de concertation et les jalons décisionnels à venir.

5.2.5 Les impacts environnementaux de la phase industrielle pilote

Si elle présente une importance capitale en termes de gouvernance, du développement technique et de décision politique (jalon législatif), la phase industrielle pilote n'entraîne pas d'impacts environnementaux spécifiques ou supplémentaires par rapport à ceux évalués pour la phase de construction initiale (cf. Chapitre 5.3.2 du présent document) et pour la phase de fonctionnement (cf. Chapitre 5.3.3 du présent document) sur lesquelles elle est positionnée temporellement.

Dans la présente étude d'impact, la phase industrielle pilote ne fait donc pas l'objet d'une évaluation d'impact distincte. Ses impacts sont couverts par ceux des phases de construction initiale et de fonctionnement (cf. volume IV de la présente étude).

5.3 La description des phases temporelles de déploiement du centre de stockage Cigéo

5.3.1 La phase d'aménagements préalables

La phase d'aménagements préalables débute à la délivrance du décret de déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo et se termine à la délivrance du décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo. C'est au cours de cette phase que la demande d'autorisation de création de l'INB est instruite.

Les travaux menés lors de la phase d'aménagements préalables sur le centre de stockage Cigéo ont pour objectif de préparer les travaux de construction des installations du centre de stockage Cigéo. Comme pour tout projet, ces travaux sont engagés avant la construction proprement dite. Certains pourront se terminer après l'obtention du décret d'autorisation de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo durant la phase de construction initiale, en particulier les travaux de terrassement de plateformes.

Les travaux d'aménagements préalables sur le centre de stockage Cigéo visent d'abord la sécurisation des sites, la viabilisation et l'organisation des zones de surface pour y installer les premières entreprises de construction. Ils visent ensuite le terrassement des plateformes d'accueil des utilités (eau, électricité, télécom), puis ils s'étendent progressivement au terrassement de l'ensemble des zones de surface du centre de stockage Cigéo (zone descenderie, zone puits, liaison intersites, installation terminale embranchée). Ils sont décrits, à leur stade actuel de définition technique, aux chapitres 4.3.8 du présent document.

Les premières opérations de défrichement sont effectuées au sein du bois Lejuc. Elles concernent l'aire d'implantation des installations de surface de la zone puits et l'aire destinée à la gestion des déblais du Callovo-Oxfordien excaves lors des premiers creusements (Z1 des verses, cf. Chapitres 2.6.2.10 et 2.7.5 du présent document) qui constituent une surface remaniée totale d'environ 136 ha.

De premières opérations de fouilles ont été prescrites à l'Andra suite aux diagnostics d'archéologie préventive réalisés en 2015-2016 par l'INRAP sur les surfaces retenues pour l'implantation de la zone descenderie et de l'ITE du centre de stockage Cigéo. Des diagnostics sur la zone puits et sur la zone d'implantation de la liaison intersites (LIS), sont à réaliser, suivis éventuellement de fouilles si des vestiges d'intérêt sont découverts (cf. Chapitre 4.3.8.3 du présent document). Elles permettront de procéder aux travaux de construction du centre de stockage Cigéo sans craindre la destruction involontaire de vestiges dignes d'intérêt scientifique et patrimonial.

Sur la zone descenderie sera notamment réalisée une paroi étanche en sous-sol visant à protéger des remontées de nappe phréatique le bâtiment nucléaire EP1 et le terminal ferroviaire nucléaire associé. Des ouvrages de drainages des eaux sont associés à cette paroi pour permettre une réinjection directe dans le milieu naturel.

Sur la partie de la zone puits dédiée aux verses, seule une première zone est aménagée (cf. Chapitre 2.6.2.10 et 2.7.5 du présent document). Elle permet de gérer les déblais du Callovo-Oxfordien excavé lors du creusement des ouvrages souterrains nécessaires à la mise en service du centre de stockage. Elle sera étendue ultérieurement en lien avec l'extension progressive de l'installation souterraine.

L'ensemble des travaux d'aménagement préalables s'accompagne de la mise en œuvre des réseaux nécessaires aux installations de chantier, ainsi que des voiries structurantes permettant la circulation des flux des chantiers.

Des bassins et ouvrages d'assainissement permettront la gestion des eaux pluviales et des eaux de ruissellement durant les premières années des travaux avant la mise en fonctionnement des installations définitives. Des ouvrages d'assainissement seront réalisés pour la gestion des eaux usées des installations de chantier, dans l'attente de la mise en service des ouvrages prévus pour le fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

Certains de ces travaux, commencés pendant la phase d'aménagements préalables, pourront se terminer après l'obtention du décret d'autorisation, durant la phase de construction initiale, en particulier des travaux de terrassement des plateformes. Des activités de caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales seront également menées.

Les principaux travaux menés pendant la phase d'aménagements préalables en dehors du centre de stockage Cigéo visent principalement :

- l'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo ;
- la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 entre Nançois-Tronville et Gondrecourt-le-Château ;
- la déviation de la route départementale D60/960 ;
- l'adduction d'eau potable ;
- les activités de caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales (forages, mesures sur le milieu naturel, inventaires).

Les travaux les plus importants menés hors du centre de stockage Cigéo correspondent à la création du poste de transformation 400/90 kV. Ils nécessitent des terrassements, la construction de bâtiments et le montage d'équipements (transformateurs, jeux de barre…). La pose des liaisons souterraines 90 kV et les travaux sur la ligne 400 kV sont également réalisés pendant la phase d'aménagements préalables.

5.3.2 La phase de construction initiale du centre de stockage Cigéo

La phase de construction initiale du centre de stockage Cigéo débute à la délivrance du décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo et se termine à la mise en service de cette installation nucléaire.

Les principaux travaux menés pendant cette phase visent la construction des ouvrages permettant la mise en service de l'INB du centre de stockage Cigéo, c'est-à-dire la réception de premiers colis de déchets radioactifs. Ils comprennent la construction des premiers bâtiments de surface, des liaisons surface-fond, ainsi que des ouvrages souterrains permettant de stocker de premiers colis de déchets.

Les principaux ouvrages construits et équipés sont :

- l'installation de réception et de préparation des colis de déchets radioactifs avant leur stockage (EP1) et tous les bâtiments de surface liés à l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage ;
- les liaisons surface-fond (descenderies et puits) et les zones souterraines de soutien logistique ;

- les ouvrages souterrains du quartier pilote HA et les premiers ouvrages du quartier de stockage des colis de déchets MA-VL.

Pour permettre ces opérations de construction, différentes installations temporaires seront installées sur les sites.

Des activités de caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales sont menées pendant la phase de construction initiale (forages, mesures sur le milieu naturel, inventaires).

5.3.3 La phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo

La phase de fonctionnement débute à l'autorisation de mise en service de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo. Cette autorisation, délivrée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) permet de recevoir de premiers colis de déchets radioactifs qui sont d'abord pour des essais de démarrage, dits « en actif », et qui sont ensuite stockés.

La phase de fonctionnement dure une centaine d'années. Elle se termine à la délivrance du décret de démantèlement de l'INB du centre de stockage.

Pendant la phase de fonctionnement auront lieu des opérations de réception et de mise en stockage de colis et des travaux d'extension progressive de l'installation souterraine, par tranches successives, afin de poursuivre la réception des colis de l'inventaire. Des travaux de rénovation, de construction ou d'adaptation des bâtiments de surface seront également programmés.

Les principales périodes de stockage successives des colis envisagées sont :

- les premières années, réception et stockage de colis de déchets HA0 (colis peu exothermiques) et de colis de déchets MA-VL respectivement dans les ouvrages du quartier pilote HA et du quartier de stockage MA-VL, construits en phase de construction initiale ;
- puis, pendant environ 40 ans (jusqu'à l'horizon 2070-2080), réception et stockage de colis de déchets MA-VL dans les ouvrages construits en phase de construction initiale et dans de nouveaux alvéoles construits dans le quartier de stockage MA-VL ;
- puis, pendant environ 20 ans (jusqu'à l'horizon 2080-2100), réception de colis HA et de colis de déchets MA-VL dans les ouvrages construits précédemment et dans de nouveaux alvéoles construits dans le quartier de stockage HA et dans le quartier de stockage MA-VL. La réception des colis HA nécessitera de construire en surface de la zone descenderie une installation de réception et de préparation dédiée, dénommée « EP2 » ;
- enfin, pendant une durée de l'ordre de 50 ans (jusqu'à l'horizon 2150), poursuite de la réception et du stockage de colis de déchets HA dans les ouvrages déjà construits et dans de nouveaux alvéoles du quartier de stockage HA.

Cette chronologie est toutefois indicative et pourra être adaptée pour prendre en compte le retour d'expérience et les ajustements des chroniques de livraison des déchets à stocker, ainsi que les opérations qui seraient décidées dans le cadre de la réversibilité (cf. Chapitre 5.4 du présent document). Les travaux d'extension progressive de l'installation souterraine, par tranches successives, seront organisés en fonction des futurs besoins et de la délivrance des autorisations associées.

Pendant le fonctionnement du centre de stockage Cigéo, les études sont poursuivies pour l'optimisation des tranches successives.

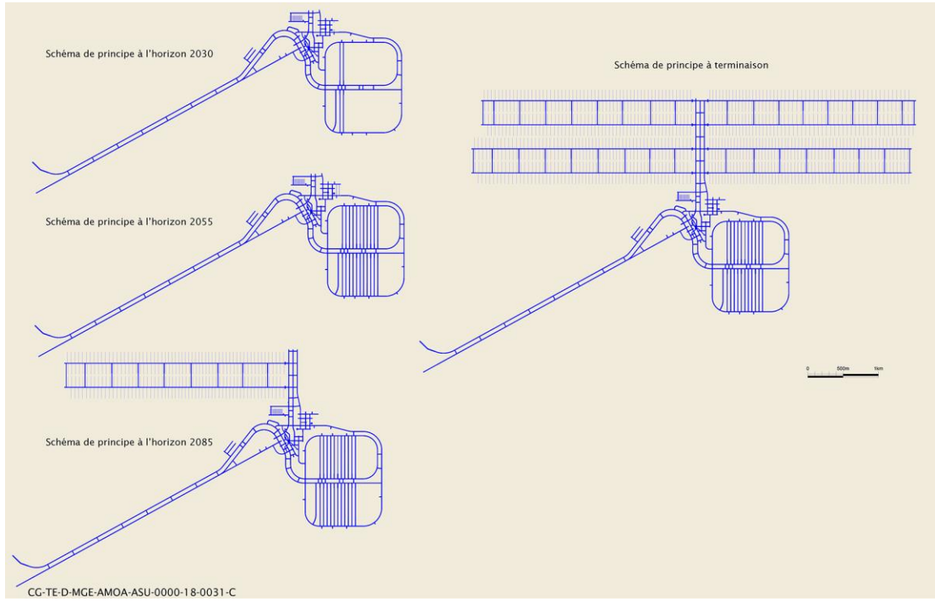


Figure 5-2 Illustration du développement progressif des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo

Le développement progressif du stockage et les creusements associés requièrent d'étendre progressivement la surface de la zone de gestion des déblais du Callovo-Oxfordien excavé (zone de verses), au-delà de celle préparée lors de la phase d'aménagements préalables. Une seconde partie du bois Lejuc sera défrichée et aménagée après investigations archéologiques (cf. Chapitre 2.6.2.10 et 2.7.5 du présent document). Pendant toute la durée de l'exploitation, les déblais du Callovo-Oxfordien qui ne seront pas réutilisés pour la fermeture de l'installation souterraine à l'issue de son fonctionnement (verses mortes) seront expédiées hors du centre de stockage Cigéo pour leur valorisation.

Des opérations de maintenance sont réalisées pendant toute la durée de fonctionnement. Les différents types de maintenance sont :

- les opérations de maintenance préventive qui permettent de maintenir les taux de disponibilité des équipements et comprennent les contrôles réglementaires ;
- les opérations de maintenance corrective qui permettent une remise en état suite à une défaillance. Elles peuvent être réalisées pendant le fonctionnement, en privilégiant les temps de non-occupation des équipements ou des moyens.

Les opérations de maintenance sont réalisées en dehors des périodes de fonctionnement des équipements concernés, sauf en cas de nécessité d'intervention après défaillance. Elles sont complétées par des opérations de jouvence qui correspondent à des travaux de rénovation d'ampleur sur un système ou un bâtiment dans son ensemble. Ces opérations sont nécessaires compte tenu de la durée séculaire de fonctionnement du centre de stockage, notamment pour répondre aux problèmes d'obsolescence ou de vieillissement. Elles concernent essentiellement les bâtiments de surface. La conception des bâtiments privilégie les matériaux et les équipements permettant la rénovation des bâtiments afin de limiter les opérations de reconstruction.

Le cas échéant et sous réserve d'autorisation, la phase de fonctionnement comportera également des travaux de démantèlement partiels de certaines installations de surface, d'obturation d'alvéoles de stockage et de fermeture de quartiers de stockage remplis (cf. Chapitre 5.4.4 du présent document).

Des activités de caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales seront également menées hors du centre Cigéo pendant la phase de fonctionnement (forages, mesures sur le milieu naturel, inventaires).

5.3.4 La phase de démantèlement et de fermeture

La phase de démantèlement et de fermeture débute à la délivrance du décret de démantèlement de l'INB du centre de stockage Cigéo et se termine par la décision d'autorisation de sa fermeture et de son passage en phase de surveillance. Cette phase comprend l'ensemble des activités permettant d'atteindre l'état final prédéfini et prescrit par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Les travaux menés en surface pendant la phase de démantèlement et de fermeture comprennent des opérations de démontage d'équipements, d'assainissement des locaux et des sols, de destruction de structures de génie civil. La totalité des substances dangereuses et radioactives présentes dans les installations de surface est évacuée. Les bâtiments et ouvrages devenus inutiles sont démantelés et si nécessaire déconstruits. Les zones de surface sont réaménagées selon des objectifs et des usages qui seront définis, en fonction des enjeux, à l'horizon 2150. Elles pourront par exemple être reboisées, remises en culture et faire l'objet d'aménagements paysagers adaptés à la topographie et à l'environnement du site à cet horizon.

Des ouvrages de surface nécessaires aux activités de surveillance ultérieures, après fermeture, seront maintenus. Les parties du bâtiment « mémoire » abritant les archives historiques et les dispositifs mémoriels seront préservées pendant les opérations de démantèlement et elles seront conservées le plus longtemps possible après la phase de démantèlement et de fermeture, sans limite de durée présagée (*a priori* durant plusieurs centaines d'années) dans le cadre de la phase de surveillance du centre de stockage Cigéo.

En souterrain, pour garantir la mise en sécurité des déchets stockés sur de très longues périodes de temps, les ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo devront être refermés. En effet, le milieu géologique est choisi et l'installation de stockage est conçue de telle sorte qu'après la fermeture définitive de l'installation (scellement et remblaiement des puits et des descenderies d'accès de l'installation souterraine), la sûreté est assurée de façon passive, c'est-à-dire que les personnes et l'environnement sont protégés des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir (cf. Chapitre 2 du présent document). L'article L. 542-10-1 du code de l'environnement dispose que seule une loi peut autoriser la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo.

Pendant la phase de démantèlement, les opérations de préparation à la fermeture définitive des parties souterraines du centre de stockage consistent principalement, d'une part à des démontages d'équipements ne pouvant être laissés en place, d'autre part à des opérations de construction d'ouvrages complémentaires à la barrière géologique existante, conçus pour assurer le bon fonctionnement du stockage à très long terme (construction d'ouvrages en béton, pose de remblais, mise en place de scellements). Le remblaiement des galeries se fait en réutilisant les déblais du Callovo-Oxfordien issus des creusements et conservés sous forme de verses sur la zone puits.

Une fois les opérations d'obturation d'alvéoles, de fermeture des quartiers et de remblaiement des galeries des zones de soutien logistique terminées, la fermeture définitive peut être engagée, si celle-ci est décidée par le Parlement (52). La fermeture définitive consiste à sceller et à combler définitivement les puits et les descenderies qui permettent l'accès aux zones de stockage. Elle est actuellement envisagée à l'horizon 2150. La demande d'autorisation de fermeture de l'installation et de passage en phase de surveillance auprès de l'ASN ne sera pas déposée avant la promulgation de cette loi (article R. 593-75 du code de l'environnement).

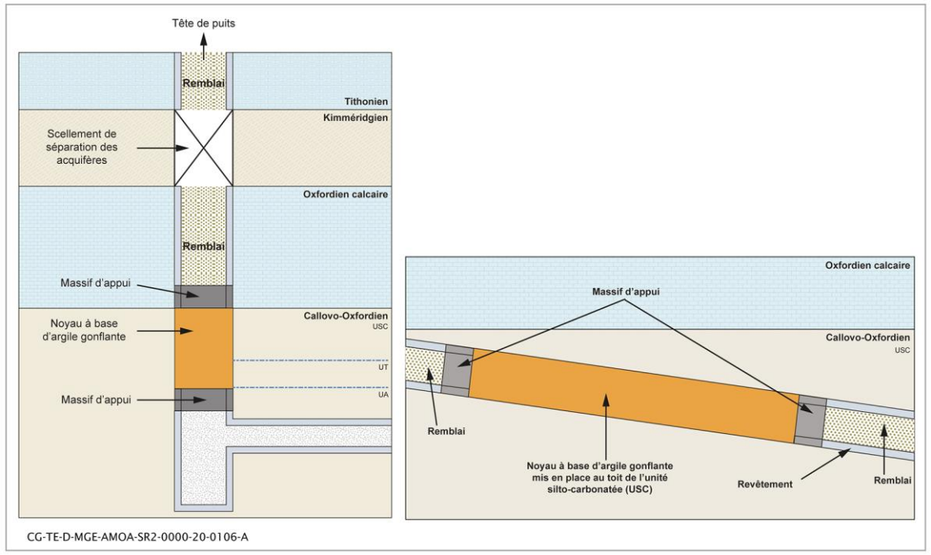


Figure 5-3 *Schéma illustratif de dispositifs de fermeture et de scellement des puits et des descenderies construits pour la fermeture définitive de centre de stockage Cigéo*

Durant la phase de démantèlement et de fermeture, les opérations des autres maîtres d'ouvrage (sauf l'expédition et le transport des déchets radioactifs) sont en fonctionnement et peuvent être utilisées par l'Andra. Le fonctionnement des opérations des autres maîtres d'ouvrage pourra être maintenu après la cessation des activités du centre si leur utilité perdure, notamment pour le territoire.

Des activités de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales seront également menées hors du centre Cigéo pendant la phase de démantèlement et de fermeture.

5.3.5 Les phases de surveillance et de post-surveillance du centre de stockage Cigéo

Après la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo, la phase de surveillance commence à la décision d'autorisation de fermeture et de passage en phase de surveillance de l'INB du centre de stockage Cigéo. Elle se termine avec la décision de déclassement de l'INB du centre de stockage.

Pendant la phase de surveillance, la sûreté du stockage est assurée de façon passive. Seules perdurent les activités de surveillance visant à vérifier, par des mesures physico-chimiques, le bon fonctionnement du stockage et le respect des obligations réglementaires en matière de protection de l'environnement (cf. Chapitre 4.4.6 du présent document).

Le fonctionnement du centre ayant cessé, il n'y a plus d'activité d'acheminement de matériaux et de colis. Le bâtiment mémoire et ses fonctions seront conservés.

La durée de la phase de surveillance sera précisée par les autorités. Elle couvrira plusieurs siècles, à l'instar de ce qui est prévu pour les centres de stockage de surface (cf. Chapitre 1.2.6 du présent document). Le déclassement du centre de stockage Cigéo pourra être envisagé par les services compétents en complément de la validation du programme de surveillance du secteur. Cette phase de surveillance pourra faire l'objet, au regard de la réglementation qui sera applicable à cette échéance, de procédures d'autorisations spécifiques.

La phase de surveillance est associée à une période de contrôle institutionnel qui comprend le maintien de servitudes d'utilité publique. Le contrôle institutionnel peut aller au-delà de la phase de surveillance en particulier pour renforcer le maintien de la mémoire du site après sa fermeture.

Après la décision de déclassement de l'INB du centre de stockage Cigéo commence la « post-surveillance ». Par définition elle n'a pas de fin. Elle correspond à la perspective temporelle visée par l'objectif de mise en sécurité définitive des déchets radioactifs fixé par le code de l'environnement[147]. Elle est utilisée notamment dans les évaluations de sûreté. Elle permet de caractériser les impacts radiologiques et chimiques à très long terme après le déclassement de l'installation. L'évaluation de sûreté prend pour hypothèse la fin de tout contrôle institutionnel et la perte de la mémoire de l'existence du stockage. Le centre de stockage Cigéo est conçu pour que la sûreté puisse être garantie de façon totalement passive pendant cette phase (cf. Chapitre 2.4 du présent document).

LE LONG TERME, LA SÛRETÉ PASSIVE ET LA MÉMOIRE DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO

Le centre de stockage Cigéo est conçu pour être fermé à la fin de son fonctionnement afin de protéger durablement les personnes et l'environnement sans plus nécessiter d'action. La sûreté sera alors réalisée de manière passive.

La sûreté passive n'implique en aucun cas d'oublier les déchets ou la présence de l'installation. Au contraire, sa mémoire constitue un élément qui contribue à la protection de l'homme et de l'environnement. Elle réduit par exemple les risques d'une intrusion involontaire dans le stockage, par exemple par un forage. Toutefois, même si un forage devait involontairement traverser le stockage, les conséquences à long terme resteraient limitées compte tenu de la conception du stockage (cf. Chapitres 2.2.6.1 et 2.4 du présent document)

La mémoire qui sera conservée de l'existence du centre de stockage, de sa fonction, de la dangerosité des déchets qu'il renferme et de sa conception dépend de la pérennité des mesures mises en œuvre lors de l'archivage des documents institutionnels et des dispositifs de transmission intergénérationnelle.

L'Andra travaille à développer des dispositifs pour favoriser la transmission intergénérationnelle des connaissances des déchets et de leur lieu de stockage, considérant ces connaissances comme un patrimoine collectif et mémoriel de ce que notre civilisation a créé.

Un bâtiment « mémoire », dédié à accueillir une partie des dispositifs mémoriels mis en œuvre par l'Andra, notamment pour la conservation et la consultation des archives historiques et intermédiaires de l'Andra, en redondance de sécurité par rapport aux versements également effectués aux archives nationales, sera créé sur le centre de stockage Cigéo. Il sera maintenu aussi longtemps que nécessaire sur l'emplacement du centre après la fermeture définitive.

Dans son guide relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde, l'ASN indique que la perte de mémoire de l'existence du stockage peut être raisonnablement située au-delà de 500 ans après sa fermeture définitive. En tout état de cause, après la fermeture définitive du centre de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée, même si elle couvre plusieurs siècles.

Le centre de stockage Cigéo est conçu de manière à protéger de manière passive les personnes et l'environnement, même si la mémoire de son existence venait à disparaître.

[147] L'article L. 542-1 du code de l'environnement indique que « *La recherche et la mise en œuvre des moyens nécessaires à la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs sont entreprises afin de prévenir ou de limiter les charges qui seront supportées par les générations futures* ».

5.3.6 Synthèse des phases de déploiement du projet global Cigéo

Les principales phases de déploiement du projet global Cigéo sont schématisées sur la figure 5-4 ci-après.

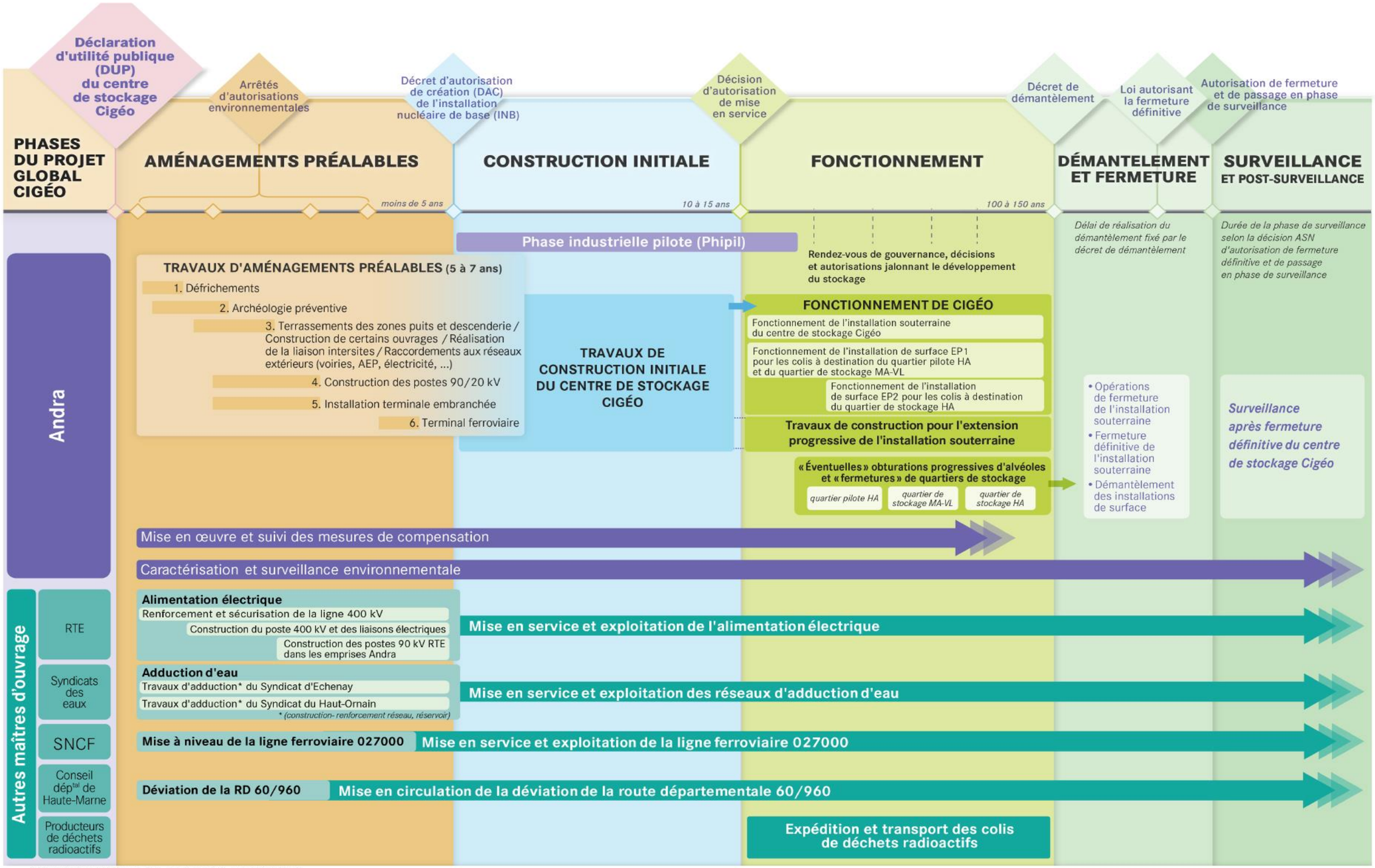


Figure 5-4 Synthèse des phases successives de déploiement du projet

5.4 La réversibilité du stockage

5.4.1 Le concept de la réversibilité et les exigences réglementaires associées

La préoccupation éthique de réversibilité trouve son origine dans l'échelle de temps qu'implique la gestion des déchets radioactifs HA et MA-VL. Compte tenu de la durée d'ordre séculaire prévue pour le fonctionnement du centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 5.3.3 du présent document), environ cinq générations successives devraient l'exploiter. Notre génération, qui envisage de créer cette installation, a donc le devoir de ne pas enfermer les générations futures dans des choix de conception faits au lancement du projet. La réversibilité des décisions est donc au cœur de l'approche technique et sociétale pour le développement du stockage géologique et c'est dans ce sens que l'Andra développe le centre de stockage Cigéo pour qu'il soit réversible.

L'article L. 542-10-1 du code de l'environnement précise que « *la réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion. La réversibilité est mise en œuvre par la progressivité de la construction, l'adaptabilité de la conception et la flexibilité d'exploitation du stockage permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets (suite notamment à une évolution de la politique énergétique). Elle inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée cohérente avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage*. »

Cette notion est également celle de la directive européenne de 2011 qui indique que « la réversibilité et la récupérabilité en tant qu'éléments d'exploitation et de conception peuvent servir à orienter la mise au point technique d'un système de stockage » ((10) considérant 23).

Le code de l'environnement fixe des objectifs en matière de réversibilité. Il définit le stockage de déchets radioactifs comme « *l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive* [...] *sans intention de les retirer ultérieurement* » (article L 542-1-1) et précise, pour le stockage géologique, qu'il est réalisé « *dans une installation souterraine spécialement aménagée à cet effet, dans le respect du principe de réversibilité* ».

Pour le stockage géologique, le code de l'environnement indique également que pendant la phase industrielle pilote, qui doit servir à conforter le caractère réversible de l'installation, tous les colis de déchets « *doivent rester aisément récupérables* » (article L. 542-10-1).

La loi qui déterminera les conditions de poursuite du projet sur la base des résultats de la phase industrielle pilote « *adaptera les conditions d'exercices de la réversibilité du stockage* ». De plus, « *des revues de la mise en œuvre du principe de réversibilité* [...] *sont organisées au moins tous les cinq ans* », en articulation avec les réexamens de sûreté et les mises à jour du plan directeur pour l'exploitation (PDE) du centre de stockage (article L. 542-10-1 du code de l'environnement).

La réversibilité du centre de stockage est caractérisée à sa capacité à évoluer, dans le futur, pour accompagner et faciliter les décisions qui seront prises en matière de gestion des déchets radioactifs. Elle fera l'objet d'un examen technique lors de l'instruction de la demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo (DAC) et constituera, avec la sûreté et l'impact environnemental, une des conditions fondamentales pour la délivrance de cette autorisation.

Les modalités d'information du public entre deux mises à jour du plan directeur d'exploitation (PDE), les jalons décisionnels du projet de centre de stockage Cigéo, ainsi que la gouvernance à mettre en œuvre afin de pouvoir réinterroger les choix effectués seront fixés par le plan national de gestion de matières et déchets radioactifs (PNGMDR) (article 8 de la décision de la ministre de la transition écologique et solidaire et du Président de l'Autorité de sûreté nucléaire sur les suites à donner au débat public PNGMDR (97)).

Le présent chapitre 5.4 a pour objectif de présenter au stade actuel de définition, les possibilités qu'elle offre en matière de déploiement du stockage et en termes de modification du contenu des phases présentées au chapitre 5.3 du présent document.

L'Andra a apporté des éléments complémentaires sur la réversibilité dans le mémoire en réponse à l'avis 2020-79 de l'Autorité environnementale, annexe 1 de la pièce 8 du dossier d'enquête publique préalable à la déclaration d'utilité publique du centre de stockage Cigéo (réponse Andra à la recommandation R25).

5.4.2 Les possibilités offertes par la progressivité de la construction du centre de stockage Cigéo

La construction progressive du centre de stockage Cigéo correspond à un enchaînement prudent d'opérations de construction et de mises en service successives de parties du centre de stockage sur toute la durée de son fonctionnement (cf. Figure 5-2 du présent document). La programmation de ces opérations pourra être revue pour accélérer, retarder ou modifier la construction et la mise en service de ces extensions.

Associé à l'adaptabilité de sa conception (cf. Chapitre 5.4.5 du présent document), le principe d'un développement progressif offre la possibilité aux générations futures d'adapter les ouvrages qui seront construits pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage à d'éventuelles évolutions d'inventaire.

La progressivité de la construction favorise l'intégration aux futures tranches de construction, de toutes les améliorations qui seront rendues possibles par les progrès scientifiques et techniques et par le retour d'expérience acquis sur la durée d'ordre séculaire du projet. Dès lors qu'une meilleure solution technique aura été développée et aura atteint un degré de maturité technologique suffisant, elle pourra, sous réserve de son autorisation, être intégrée aux ouvrages à construire du centre de stockage. À ce titre, la construction et l'exploitation du quartier pilote HA, dès la phase industrielle pilote (Phipil), permet de disposer d'un retour d'expérience précieux pour la définition technique, la construction, l'exploitation et la surveillance des quartiers de stockage HA qui seront mis en œuvre une quarantaine d'années après, à l'horizon 2070-2080.

De plus, la progressivité de la construction permet aux générations successives de modifier le programme de construction des extensions pour stocker les colis de déchets radioactifs en tenant compte des besoins industriels. Pendant la phase de fonctionnement, la construction des tranches sera programmée en lien avec les décisions systémiques relatives au maintien et au renouvellement de leurs capacités d'entreposage en surface, prises dans le cadre de la gouvernance de la gestion des déchets radioactifs.

Enfin, elle donne également le temps de lever prudemment les incertitudes résiduelles relatives à certains modes de conditionnement et à leurs modalités de mise en stockage. Ces incertitudes concernent notamment les colis de déchets bitumés (68) et des déchets MA-VL non encore conditionnés et dont le mode de conditionnement reste donc à confirmer. Les alvéoles seront construits et les colis de déchets seront mis en stockage progressivement, au fur et à mesure de la consolidation de leurs démonstrations de sûreté, de leurs autorisations par l'ASN et de la vérification de la conformité des colis de déchets aux spécifications d'acceptation du centre de stockage.

Les décisions de modification du programme de construction progressive de Cigéo seront intégrées au processus de gouvernance et intégrées aux revues périodiques de réversibilité et aux mises à jour du plan directeur de l'exploitation (PDE).

5.4.3 La flexibilité de l'exploitation du centre de stockage

La flexibilité de l'exploitation est définie comme la capacité du centre de stockage Cigéo, une fois construit, à absorber des variations de son programme industriel (chronique de réception des colis, flux de réception, date d'obturation d'alvéoles ou de quartiers de stockage) sans modification des infrastructures ou des équipements existants et sans construction d'ouvrages nouveaux.

Elle offre la possibilité aux générations futures de décaler ou d'accélérer (dans certaines limites liées aux performances des équipements, à leur taux d'utilisation et à la disponibilité des opérateurs) les flux de colis reçus sur le centre de stockage Cigéo. Cette situation pourrait par exemple être rencontrée si un producteur de déchets souhaitait expédier vers le centre de stockage Cigéo un type de colis de déchets à une échéance ou à un rythme différent que ceux initialement prévus.

En termes de flexibilité, l'installation est également conçue de telle sorte que sa sûreté ne soit pas dépendante de l'ordre dans lequel les colis lui sont livrés. Sous réserve de respect des spécifications d'acceptation et de conformité aux procédures qui seront mises en place pour la livraison, les colis d'une famille peuvent être reçus et stockés dans les alvéoles les concernant sans que l'exploitation soit contrainte par un ordre préétabli.

La flexibilité permet aussi de recevoir et de stocker des colis de déchets dans une gamme de formes, de dimensions et de masses variables. Elle permet de faire évoluer les modes de conditionnement prévus pour les colis de déchets, principalement MA-VL, dans la mesure où ceux-ci respectent les spécifications d'acceptation sur le centre de stockage Cigéo.

La flexibilité permet également d'offrir aux générations futures la possibilité de modifier le scénario de fermeture. Les conteneurs et les ouvrages de stockage sont conçus de façon suffisamment robuste pour que le calendrier de leur obturation puisse être retardé ou avancé, sans préjudice pour la sûreté.

5.4.4 Le scénario de fermeture du centre de stockage Cigéo

Un scénario de fermeture est une organisation et une représentation de la succession des opérations nécessaires à la mise en sécurité passive du stockage.

Les principales opérations d'un scénario de fermeture visent à obturer les alvéoles de stockage des colis de déchets, à fermer les quartiers de stockage et les zones de soutien logistique, et lors de la dernière étape, dite de « fermeture définitive », à sceller et à remblayer les accès depuis la surface (puits et descenderie). En pratique, ces opérations recouvrent des démontages d'équipements et la construction d'ouvrages et de composants (murs, remblais, scellements) qui participent à la sûreté à long terme du stockage en complément de la barrière géologique (cf. Chapitre 5.3.4 du présent document).

En phase d'avant-projet, différents scénarios de fermeture ont été étudiés afin d'établir un scénario de fermeture de référence de Cigéo.

Trois types d'échéances ont été considérées pour l'obturation des alvéoles de stockage :

- « au fil de l'eau » (au plus tôt après le remplissage ou par tranches de 10 ans) pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage ;
- à la fin du remplissage de chaque quartier pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage ;
- à l'issue du fonctionnement du centre de stockage Cigéo, pendant la phase de démantèlement et de fermeture du centre de stockage.

Chaque scénario a été analysé au regard des critères suivants :

- la sécurité/sûreté en exploitation qui appelle principalement la limitation des risques de coactivité entre les activités nucléaires (exploitation et mise en stockage des colis) et les travaux de réalisation des ouvrages de fermeture ;
- la préservation d'une durée de surveillance importante des alvéoles et des quartiers de stockage après leur construction (plusieurs dizaines d'années) ;
- la mise en œuvre d'une démarche progressive permettant d'acquérir de l'expérience sur les opérations de fermeture ;
- la limitation de la perturbation générée par les opérations de fermeture sur le service industriel (gestion des flux de mise en stockage). En effet, les opérations de fermeture d'alvéoles et de quartiers peuvent constituent des opérations lourdes qui ne sont pas toujours compatibles avec la poursuite des opérations de mise en stockage en parallèle dans d'autres parties de l'installation souterraine ;
- l'optimisation technico-économique, en particulier la recherche d'une efficacité des travaux de fermeture en évitant leur fractionnement.

Les scénarios correspondant à l'obturation des alvéoles au fil de l'eau présentent des inconvénients pour la sûreté en exploitation (introduction de risques liés aux travaux et à la coactivité), induisent une perturbation du service industriel de mise en stockage, conduisent à réduire la durée de la surveillance et rendent précocement plus complexe la récupérabilité.

Le scénario correspondant à une obturation de la totalité des alvéoles à la fin du fonctionnement ne permet pas d'acquérir un retour d'expérience des opérations d'obturation et de la surveillance des alvéoles et quartiers obturés.

L'Andra a mené une analyse de différents critères pour préciser un scénario de référence. Le scénario retenu est jalonné par trois grandes étapes d'obturation organisées par tailles et complexités croissantes.

Ainsi, le schéma de fermeture de référence (cf. Figure 5-5) actuellement envisagé est d'obturer les alvéoles et de fermer les quartiers suivants pendant la phase de fonctionnement :

- le quartier pilote HA après environ 30 ans à 40 ans de fonctionnement et de surveillance ;
- le quartier de stockage MA-VL à l'issue de son remplissage après environ 70 ans de fonctionnement et environ 30 ans après la fermeture du quartier pilote HA ;
- les quartiers de stockage HA à l'issue de leur remplissage (en fonction des quartiers jusqu'à 60 ans de fonctionnement) et environ 50 ans après la fermeture du quartier MA-VL.

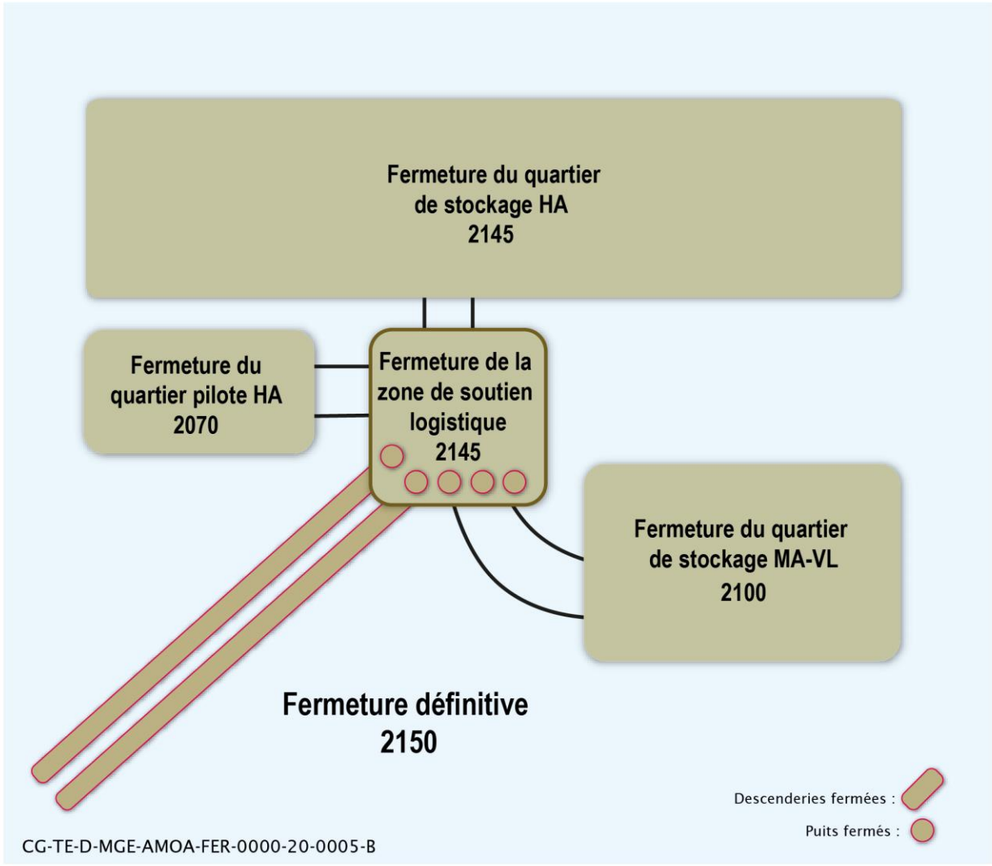


Figure 5-5 *Représentation schématique du scénario de fermeture de référence proposé par l'Andra sur dans la version de 2016 du plan directeur pour l'exploitation du centre de stockage Cigéo (66)*

Ainsi, l'obturation du quartier pilote HA permet d'acquérir du retour d'expérience qui sera mis à profit pour l'obturation du quartier de stockage MA-VL. Celle du quartier de stockage MA-VL procure de l'expérience pour le quartier de stockage HA. Les opérations d'obturation peuvent ainsi être améliorées en vue d'une efficacité et d'une performance croissantes. Chaque quartier est obturé en une seule et même opération regroupant le démontage des équipements, la construction des ouvrages d'obturation de tous les alvéoles et le remblaiement des galeries d'accès. Dans le scénario de référence actuel, la fermeture définitive du centre de stockage Cigéo interviendra pendant la phase de démantèlement, à l'horizon 2150.

La proposition de schéma de fermeture graduel, retenu par l'Andra à ce stade a été définie sur la base des études d'avant-projet menées à ce stade. Elle constitue, sur la base des études menées en avant-projet, un optimum du point de vue industriel. Des scénarios de fermeture différents pourront être menés si des éléments nouveaux sont identifiés, en particulier lors des études, pendant les essais, puis pendant toute la durée de vie de l'installation. Cette proposition sera approfondie tout au long de la vie du centre de stockage et bénéficiera du retour d'expérience du fonctionnement et de la surveillance du centre de stockage, ainsi que de l'exploitation des démonstrateurs de fermeture (cf. Chapitre 5.2.2 du présent document).

Les décisions de fermeture seront soumises à la gouvernance du projet à échéances périodiques dans le cadre des revues de périodiques de réversibilité prévues par le code de l'environnement (article. L 542-10-1). L'engagement des étapes de fermeture fera l'objet de procédures d'autorisation adaptée.

Quel que soit le scénario de fermeture qui apparaît le plus approprié à ce jour, le centre de stockage Cigéo est conçu pour que les opérations d'obturation puissent être décidées et engagées sur toute la période de fonctionnement du centre de stockage Cigéo. La proposition de scénario de référence est donc flexible. Elle sera nécessairement adaptée par les générations à venir pour répondre aux contraintes et aux enjeux qui apparaîtront naturellement.

Les décisions d'engager des opérations d'obturation d'ouvrages souterrains seront intégrées au processus de gouvernance et intégrées aux revues périodiques de réversibilité et aux mises à jour du plan directeur de l'exploitation (PDE). Dans le cas où le choix serait fait d'une obturation au plus tôt, de premiers alvéoles de stockage pourraient être fermés à l'horizon 2050. Inversement, s'il est décidé de reporter au maximum les décisions de fermeture, il est possible d'obturer l'ensemble des ouvrages souterrains et de procéder à la fermeture définitive du centre de stockage dans la foulée, à l'horizon 2150.

LES CRITÈRES ANALYSÉS PAR L'ANDRA POUR DÉFINIR LE SCÉNARIO DE FERMETURE DE RÉFÉRENCE

La démarche appliquée par l'Andra pour définir les étapes de fermeture du déroulement de référence a consisté en l'étude de différents scénarios d'obturation des alvéoles et de fermeture du quartier pilote HA, du quartier de stockage MA-VL et du quartier de stockage HA (« au fil de l'eau », au plus tôt après le remplissage ou par tranches de 10 ans) ;

Pour chaque scénario, des avantages et des inconvénients ont été identifiés par rapport à une liste de critères (cf. liste ci-après). À l'issue de cette analyse, un remontage global a été réalisé pour l'ensemble du stockage.

La sûreté en exploitation : la sûreté en exploitation appelle principalement à la limitation des risques de co-activité entre les opérations nucléaires de mise en stockage et les opérations d'obturation d'alvéoles et de fermeture de quartier. En effet, celles-ci mettent en œuvre des travaux relativement lourds qui nécessitent l'usage d'engins et de procédés spécifiques susceptibles de générer des risques. Or, il est, par principe et compte tenu de l'architecture, difficile de séparer physiquement les zones où seraient poursuivies les activités d'obturation de celles où sont réalisées les opérations de mise en stockage. En particulier, les liaisons surface/fond sont en nombre limitées et regroupées afin de minimiser les configurations qui seraient de nature à favoriser la circulation d'eau au sein du stockage. La volonté de limiter les risques et nuisances potentiels des chantiers d'obturation d'alvéoles sur les parties en exploitation sont une des principales raisons du choix d'un déroulement de référence privilégiant l'obturation des alvéoles à la fin du remplissage des quartiers.

L'obturation des alvéoles MA-VL implique l'arrêt de leur ventilation et l'arrêt de l'évacuation des gaz de la partie utile des alvéoles. L'arrêt de la ventilation en 2100 et la programmation de l'obturation du quartier MA-VL en une seule opération en 2100 contribue à limiter les risques liés à la présence éventuelle d'H2 de radiolyse dans les alvéoles MA-VL. En effet, la production d'hydrogène de radiolyse diminue en fonction du temps (épuisement de la matière organique et baisse de l'activité des radionucléides à vie courte) et le remblaiement du quartier limite le renouvellement de l'oxygène dans les alvéoles. Par ailleurs, il favorise l'utilisation éventuelle de gaz inerte lors de l'obturation dans un seul chantier spécifique.

Après l'obturation des alvéoles, la présence des ouvrages (murs, remblais, éventuels massifs d'appuis et scellements) pourra probablement être valorisée en termes de sûreté opérationnelle (réduction du débit de dose, limitation des risques de propagation d'incendie, limitation des risques de dispersion…), toutefois, ils ne portent pas à proprement parler, à ce stade de leur définition technique, de fonction de confinement. Leur conception est principalement orientée vers le long terme, après-fermeture définitive. De plus, leur présence limite les possibilités de surveillance de la partie utile de l'alvéole et du premier mur à l'entrée de celle-ci. En tout état de cause, il ressort de l'analyse de l'Andra que le confinement en phase de fonctionnement peut être assuré par des dispositions actives ou passives (succession de barrières physiques), mais il n'apparaît pas qu'une de ces solutions présenterait un avantage significatif en matière de sûreté. De même l'impact des rejets radioactifs gazeux sur le public étant négligeable, il n'apparaît pas à ce stade que sa réduction par l'obturation des ouvrages MA-VL puisse constituer un critère majeur de décision.

La surveillance et l'acquisition de connaissances : sans préjuger des dispositifs de surveillance qui seront utilisés dans le centre de stockage Cigéo, il peut être considéré que, tant que les alvéoles n'ont pas fait l'objet d'opérations d'obturation, ils sont dans l'état permettant au mieux leur surveillance par introduction de dispositifs d'auscultation. La mise en place des dispositifs d'obturation limitera forcément la possibilité de surveillance. Dans le cadre de sa démarche d'acquisition de connaissance, l'Andra a privilégié des scénarios facilitant le maintien de la surveillance pendant une durée longue (plusieurs dizaines d'années au minimum) dans l'objectif de garantir le contrôle des évolutions de l'installation avant l'engagement de travaux de fermeture définitive.

Le choix des étapes d'obturation permet de construire de premiers scellements à l'horizon 2100 pour la fermeture du quartier de stockage HA. Cette échéance permet d'envisager un retour d'expérience suffisant du comportement des démonstrateurs d'ouvrages d'obturation inactifs mis en place dès la phase industrielle pilote (scellement de galerie, obturation d'un alvéole HA, scellement de descenderie). L'évolution de ces ouvrages étant nécessairement lente, l'acquisition des données sur leur comportement nécessite un programme de mesures couvrant a priori plusieurs dizaines d'années.

Le service industriel : le centre de stockage Cigéo est conçu pour que les opérations d'obturation puissent être engagées sur toute la période de fonctionnement. Toutefois, les scénarios qui privilégient l'obturation d'alvéoles au plus tôt consomment en quasi-totalité la flexibilité du fonctionnement (augmentation des rythmes de fonctionnement en 3 × 8 ou 5 × 8, actions menées la nuit et les week-end, reports temporaires d'opérations de mise en stockage et reprises à des rythmes plus élevés plus tard). La proposition de schéma de fermeture graduelle permet de préserver au mieux la flexibilité. Par ailleurs, pour l'obturation du quartier pilote HA, la période 2080-2145 doit être évitée, car elle perturberait les opérations de stockage dans le quartier de stockage HA.

La récupérabilité : la récupérabilité est fondée sur une conception robuste des composants du stockage (colis de stockage et alvéoles) visant à préserver des conditions opérationnelles favorables au retrait, notamment les jeux de manutention. Dans les alvéoles en attente d'obturation, les conditions de retrait sont préservées. Une fois les alvéoles obturés et les quartiers fermés, les opérations de réouverture, puis de remise en fonctionnement de galeries et des alvéoles fermés nécessiteraient des efforts et des investissements significatifs qui constitueraient des freins à la décision. La proposition de schéma de fermeture permet de maintenir le niveau de récupérabilité des colis à un niveau élevé et donc de faciliter les choix pendant plusieurs dizaines d'années (environ 40 ans pour le quartier pilote HA et les colis HA0 qui y seront utilisés, 70 ans pour les colis MA-VL, 70 ans pour les colis HA).

L'optimisation technico-économique : le fait de mener un seul chantier d'obturation pour les alvéoles et les galeries d'un quartier permet d'optimiser sa réalisation par rapport à son fractionnement en plusieurs étapes (phases successives de mise en chantier et de repli de chantier pour reprise de fonctionnement). Les engins utilisés pourront ainsi être utilisés sur un seul chantier plutôt que d'avoir à réapprovisionner ou maintenir des équipements pour des chantiers séparés. Par ailleurs, les phases de mise en chantier et de replis sont potentiellement génératrices de risques spécifiques.

5.4.5 L'adaptabilité de la conception du centre de stockage Cigéo

L'adaptabilité des installations du centre de stockage Cigéo est définie comme la capacité à leur apporter des modifications pour les adapter à de nouvelles hypothèses de dimensionnement. Elle peut aller jusqu'à des modifications notables des équipements existants ou des constructions d'ouvrages nouveaux.

La principale hypothèse de dimensionnement de Cigéo susceptible d'être revue avec le temps concerne son inventaire, c'est-à-dire le nombre et le type des familles de colis de déchets pour lesquels il est conçu actuellement (dénommé « inventaire de référence ») (cf. Chapitres 3.2 et 3.3 du présent document). En effet, tout au long du fonctionnement de Cigéo, des décisions prises dans le cadre des politiques nationales de gestion des déchets pourraient orienter vers le centre de stockage Cigéo certains déchets non initialement prévus dans l'inventaire de référence. En fonction des volumes et des types de déchets concernés, de telles décisions présenteraient des enjeux techniques différents pour Cigéo, allant de simples ajustements de sa conception et de son exploitation[148], jusqu'à des modifications notables de son architecture, par exemple pour la prise en charge de combustibles usés.

À titre de précaution, depuis les premières étapes du projet dans les années 2000, l'Andra étudie la faisabilité du stockage d'une partie des déchets FA-VL et de combustibles usés dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien. De telles études de faisabilité ont été périodiquement instruites par l'ASN depuis 2005.

Dans le cadre de la préparation du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo, l'Andra approfondit actuellement ses études de conception et ses évaluations de sûreté menées sur un inventaire plus large que l'inventaire de référence du projet. Cet inventaire est dénommé « inventaire de réserve » (cf. Chapitre 3.4 du présent document). Les études relatives à l'éventuel stockage des déchets de cet inventaire de réserve sont dénommées « études d'adaptabilité ». Elles seront présentées dans le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo, sans pour autant que leur stockage dans le centre de stockage Cigéo ne soit considéré comme leur mode de gestion à privilégier. Au travers des études d'adaptabilité, l'Andra vérifie que la conception du centre de stockage Cigéo ne présente pas d'élément rédhibitoire à leur éventuelle prise en charge le cas échéant.

S'agissant des combustibles usés, l'Andra a conçu le centre de stockage Cigéo pour qu'il puisse être compatible avec leur éventuel stockage sous réserves de certaines adaptations. Celles-ci concerneraient principalement le processus de transfert dans l'installation souterraine pour la prise en charge des colis de combustibles. Toutefois, aucune opération de stockage de combustibles n'est, en tout état de cause, envisagée avant l'horizon 2100 afin de bénéficier d'une décroissance notable de leur dégagement thermique. Une des principales différences techniques entre le centre de stockage Cigéo sans ou avec combustibles usés est la substitution de quartiers de stockage HA par des quartiers de stockage de combustibles usés. En effet, si ceux-ci venaient à être stockés, les colis HA qui auraient été générés par leur traitement ne seraient pas produits.

La mise en œuvre des évolutions de conception nécessaires à l'adaptabilité, devra faire l'objet le moment venu de procédures d'autorisation adéquates selon le cadre réglementaire en vigueur. En particulier l'accueil de combustibles usés nécessitera une modification notable du décret de création de l'INB du centre de stockage Cigéo. Il induirait nécessairement une modification du déroulement de la phase de fonctionnement du centre de stockage décrit au chapitre 5.3.3 du présent document.

Les décisions de modifications effectives de l'inventaire des déchets à stocker dans Cigéo seront intégrées au processus de gouvernance et intégrées aux revues périodiques de réversibilité et aux mises à jour du plan directeur de l'exploitation (PDE).

[148] Les déchets considérés comme des déchets de faible activité à vie longue, actuellement destinés à un stockage à faible profondeur, pourraient être pris en charge par le centre de stockage Cigéo sans modification importante des conditions d'exploitation.

5.4.6 La récupérabilité

La récupérabilité est la capacité à retirer des colis de déchets d'une installation de stockage en couche géologique profonde. Cette définition a été proposée par l'Andra suite au débat public sur le projet Cigéo de 2013 (62).

La récupérabilité est un des outils qui offre des choix aux générations futures dans le cadre de la réversibilité. L'article L. 542-10-1 du code de l'environnement précise que la réversibilité « *inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée, cohérentes avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage.* »

La récupérabilité ne constitue pas un objectif en soi. En effet, le fait de retirer du stockage un ou des colis de déchets, qui y avaient initialement été acceptés sans l'intention de les en retirer ultérieurement, implique une réorientation de la décision initiale. La mise en œuvre de la récupérabilité doit donc avoir un but, une finalité qui procure un avantage par rapport à la décision initiale de stocker, y compris en termes de sûreté, en fonctionnement ou après-fermeture. Elle ne peut donc être exercée qu'associée à d'autres décisions dans le cadre de la gouvernance globale du stockage.

Du point de vue opérationnel, il faut noter que la récupérabilité, associée à la flexibilité de l'exploitation, offre de la souplesse pour la gestion du centre de stockage. Son exploitant pourrait ainsi retirer, de façon ponctuelle, un ou plusieurs colis de leurs alvéoles, sans perturber significativement les flux de mise en stockage. Ces opérations pourraient éventuellement être utiles pour des vérifications, des essais ou des réagencements d'alvéoles. Les colis de déchets seraient ensuite réintroduits en alvéole pour stockage. Dans le cadre de la demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base du centre de stockage Cigéo, l'Andra prévoit ainsi de demander l'autorisation de mener de telles opérations de retrait ponctuelles, qui ne sont pas associées à une remise en cause de la volonté initiale de stocker les colis de déchets.

En matière de gestion globale des déchets, la récupérabilité, associée à l'amélioration continue des connaissances, notamment par la poursuite des programmes de recherches et de développement (R&D) sur les déchets radioactifs, permettrait aux générations futures de retirer tout ou partie des colis de déchets stockés dans Cigéo, par exemple pour les orienter vers une autre filière de gestion. Il faut toutefois souligner que ces déchets sont des déchets ultimes et qu'il n'y a pas à l'heure actuelle d'utilisation prévue ou envisagée pour ces substances. Une telle décision de développement d'une nouvelle filière de gestion des déchets HA ou MA-VL et de réorientation de déchets stockés vers cette filière devra donc procurer des avantages en termes globaux. Elle serait donc nécessairement de portée nationale. Sa mise en œuvre demanderait un volet d'autorisations spécifiques.

Si une décision était prise de retirer du centre de stockage Cigéo des colis stockés, les colis retirés du centre de stockage Cigéo seraient réexpédiés hors du centre vers la filière de gestion alternative choisie. Il n'y a pas d'entreposage pérenne de gestion des déchets prévu parmi les installations de surface du centre de stockage Cigéo (cf. Chapitre 2.7.7 du présent document).

Les principales options techniques permettant d'assurer le retrait des colis de déchets stockés avant l'obturation des galeries sont intégrées dès la conception. Ces dispositions visent à rendre possible les opérations de retrait sans préjudice pour la sûreté et l'environnement. Elles recouvrent des dispositions de conception robustes des composants du stockage et de ses équipements, des essais pour vérifier leur bon fonctionnement et des dispositions prudentes de fonctionnement et de surveillance. Leur performance est justifiable sur la période séculaire prévue pour le fonctionnement du stockage. Ces options de récupérabilité ont été formalisées dans un dossier spécifiques en 2016 et ont fait l'objet d'une instruction par l'ASN en parallèle du dossier d'options de sûreté (avis n° 2016-AV-0267 ASN du 31 mai 2016 (128)).

LES DISPOSITIONS TECHNIQUES LIÉS À LA RÉCUPÉRABILITÉ

Les principales dispositions techniques prises pour permettre le retrait des colis stockés dans le centre de stockage Cigéo sont les suivantes :

- les composants jouant un rôle important pour le retrait (colis, équipements de manutention, alvéoles) sont conçus de façon robuste et durable. Par exemple, les alvéoles dans lesquels seront stockés les colis de déchets sont revêtus d'une structure, en béton ou en acier, pour limiter leurs déformations. Sur la durée du fonctionnement du centre de stockage, les jeux fonctionnels et les conditions de fonctionnement des équipements utilisés pour le retrait des colis de déchets sont préservés ;
- les moyens de manutention utilisés pour stocker les colis de déchets MA-VL dans les alvéoles peuvent également les en retirer. Pour les colis HA, des robots spécifiques permettant de les retirer des alvéoles HA sont développés et opérationnels dès les premières opérations de stockage des colis HA0. Des tests à l'échelle 1 ont d'ores et déjà été réalisés avec des prototypes pour les deux types de colis. En fonction de la date de l'éventuelle opération de retrait, les moyens de manutention utilisés pourront être renouvelés (équipements éventuellement obsolètes) ou adaptés aux conditions opérationnelles ;
- la position précise de chaque colis stocké et son contenu seront enregistrés afin de disposer de toutes les informations permettant de préparer un éventuel retrait ;
- les alvéoles de stockage seront surveillés pour suivre l'évolution des conditions de retrait (jeux fonctionnels, conditions de fonctionnement des équipements de retrait, colis…) ;
- des essais de retrait de colis seront réalisés avant la mise en service des alvéoles pour vérifier la performance des équipements de retrait ;
- les conditions de retrait feront l'objet de réévaluations périodiques (réexamens de sûreté, revues de réversibilité, mise à jour du plan directeur pour l'exploitation) ;
- des emprises seront laissées libres à proximité des installations nucléaires de surface pour permettre la construction d'éventuels ouvrages qui pourraient être nécessaires aux opérations de retrait quelle que soit l'échéance à laquelle elles seraient décidées (entreposage « tampon » complémentaire, préparation des expéditions, soutien aux activités de réouverture…).

La faisabilité des opérations de retrait fait l'objet de développements techniques de l'Andra intégrés à la conception du centre de stockage Cigéo. À titre d'exemple, la figure 5-6 montre le banc d'essais de récupérabilité de conteneurs HA. Les essais menés ont permis de valider la possibilité du retrait d'un colis de stockage HA, y compris dans des conditions plus difficiles que celles attendues en conditions opérationnelles réelles (déformation importante, présence de produits de corrosion, hygrométrie élevée…).



Figure 5-6 Banc d'essai de récupérabilité de colis de stockage HA. Source : Andra

La récupérabilité est associée à des dispositions techniques dont la performance est justifiable techniquement sur la durée d'ordre séculaire prévue pour le fonctionnement du centre de stockage (fermeture définitive prévue à l'horizon 2150). Compte tenu des conditions d'environnement induites par la roche du Callovo-Oxfordien, l'évolution du stockage exclut l'apparition de désordres rapides ou d'altérations soudaines des ouvrages souterrains construits dans cette roche. Quelques années après leur creusement et leur construction, le comportement des ouvrages devient asymptotique (comportement confirmé au Laboratoire souterrain). Leur déformation progressive, liée à leur mise en charge, est très limitée. Elle sera surveillée sur toute la durée d'ordre séculaire du fonctionnement du centre de stockage. Ce comportement très durable des ouvrages est prévu sur toute cette durée et même au-delà. L'atteinte effective de ce régime durable pourra être vérifiée au cours de la phase industrielle pilote (Phipil). Le comportement durable des ouvrages sur toute la durée du fonctionnement de Cigéo, qui est une des conditions principales pour la sûreté de leur exploitation et pour les opérations de retrait, pourra donc être confirmé en conditions réelles dans les premières années après leur construction conformément aux exigences du code de l'environnement.

Le centre de stockage Cigéo est conçu pour que, sur toute la période allant de sa mise en service jusqu'à la décision de sa fermeture définitive, les colis puissent en être retirés. Le centre de stockage Cigéo offre de fait, pendant plus de 100 ans, aux générations futures, des fonctions analogues à celles d'une installation d'entreposage centralisé (surveillance, retrait éventuel, réexpédition éventuelle).

Si au cours de la phase de fonctionnement du centre de stockage, une décision était prise d'en retirer tout ou partie des colis de déchets déjà stockés et de les diriger vers une autre filière de gestion, jugée avantageuse, y compris au plan de la sûreté à long terme, alors elle induirait nécessairement une modification du déroulement de la phase de fonctionnement du centre de stockage décrit au chapitre 5.3.3 ci-avant.

La conception du centre de stockage Cigéo prévoit que les colis peuvent être retirés pendant toute la durée du fonctionnement, de façon similaire à leur mise en stockage. Le procédé s'effectue en sens inverse depuis l'alvéole jusqu'à la surface. Les incidences des opérations de retrait et de réexpédition sont donc équivalentes à celles des opérations de réception et de mise en stockage. Elles sont couvertes par l'évaluation des impacts de la phase de fonctionnement (cf. volume 4 de la présente étude d'impact).

Les temps unitaires des opérations de mise en stockage des colis et des opérations de retrait des colis stockés sont donc très proches. La durée totale nécessaire au retrait d'un colis est du même ordre que la durée de sa mise

en stockage. De façon plus globale, la durée des opérations de retrait d'un groupe de colis peut être significativement réduite par rapport à la durée prévisionnelle actuelle de leur mise en stockage grâce à la flexibilité de l'exploitation (cf. Chapitre 5.4.3 du présent document). En augmentant les cadences d'exploitation, des colis mis en stockage sur 10 ans pourraient en moyenne en être retirés en moins de 7 ans. Des optimisations supplémentaires des rythmes de retrait sont envisageables en fonction des capacités d'expédition des colis hors du centre. S'agissant des colis stockés en phase industrielle pilote, dans l'hypothèse où le Parlement mettrait fin au stockage géologique sur le centre de stockage Cigéo après 6 années de fonctionnement, les colis stockés pourraient en être retirés en environ deux ans.

Si des filières de gestion des déchets HA et MA-VL alternatives au stockage venaient un jour à être mises en œuvre, la durée de leur développement et leur rythme de prise en charge des colis déstockés seraient nécessairement longs. Les opérations de retrait des colis de Cigéo pourraient être progressivement programmées et optimisées. La durée du retrait ne constituerait pas un frein à la mise en œuvre de filières alternatives au stockage.

Les décisions de retrait de colis stockés sur le centre de stockage Cigéo pour réorientation vers une autre voie de gestion seront intégrées au processus de gouvernance et intégrées aux revues périodiques de réversibilité et aux mises à jour du plan directeur de l'exploitation (PDE).

Synthèse

Le déploiement du centre de stockage Cigéo est envisagé selon plusieurs phases temporelles successives :

- La phase d'aménagements préalables incluant ;
  - ✓ le défrichement de la zone puits ;
  - ✓ l'archéologie préventive ;
  - ✓ les travaux d'aménagements pour préparer la construction de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo (sécurisation, viabilisation, organisation des zones de surface, terrassements, paroi étanche en sous-sol de la zone descenderie, préparation d'une première zone de gestion des déblais du Callovo-Oxfordien excavé) ;
- La phase de construction initiale qui vise la construction des ouvrages permettant la mise en service de l'INB du centre de stockage. Ils comprennent des installations en surface et des ouvrages souterrains pour stocker de premiers colis de déchets.
- La phase de fonctionnement qui se déroule sur une centaine d'années pendant lesquelles ont lieu des opérations de réception et de mise en stockage de colis et des travaux d'extension progressive de l'installation souterraine, par tranches successives, afin de poursuivre la réception des colis. Le cas échéant, s'il en est décidé ainsi dans le cadre de la gouvernance du projet, de premières opérations d'obturation d'alvéoles ou de fermeture de quartier de stockage pourront être engagées.
- La phase de démantèlement et de fermeture qui commence à la délivrance du décret de démantèlement de l'INB du centre de stockage Cigéo (démontage d'équipements, assainissement des locaux et des sols, destruction de structures de génie civil, obturation des ouvrages souterrains du centre de stockage). La fermeture définitive du centre de stockage peut être engagée, si celle-ci est décidée par le Parlement.
- La phase de surveillance qui débute avec la décision d'autorisation de fermeture et de passage en phase de surveillance. Elle pourra couvrir plusieurs siècles, à l'instar de ce qui est prévu pour les centres de stockage de surface. Elle est associée à une période de contrôle institutionnel ;
- La phase de post-surveillance qui débute avec la décision de déclassement de l'INB du centre de stockage Cigéo et qui n'a pas de fin. Elle correspond à l'horizon de la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs visée par le code de l'environnement.

Une phase complémentaire, dénommée « phase industrielle pilote », est prévue par le code de l'environnement pour le centre de stockage Cigéo (article L. 542-10-1). L'Andra propose que la phase industrielle pilote :

- commence après la délivrance du décret de création de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo ;
- se poursuive pendant quelques années après la mise en service du centre de stockage Cigéo.

Cette proposition fera l'objet de concertations et pourra naturellement être modifiée sur la base des échanges avec les parties prenantes et le public.

Ainsi proposée, la phase industrielle pilote couvre la phase de construction initiale et de premières années de la phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo.

La phase industrielle pilote prendra fin dans des conditions qui seront décidées par le Parlement. En effet, le vote d'une future loi pour décider des conditions de la poursuite du projet est déjà prévu par le code de l'environnement (article L. 542-10-1).

Du point de vue des impacts environnementaux, la phase industrielle pilote n'entraîne pas d'impact spécifique ou supplémentaire par rapport à ceux de la phase de construction initiale et de la phase de fonctionnement.

Compte tenu de la durée d'ordre séculaire prévue pour le fonctionnement du centre de stockage, environ cinq générations successives devraient l'exploiter. Notre génération a donc le devoir de ne pas enfermer les générations futures dans des choix de conception faits au lancement du projet. C'est dans ce sens que l'Andra développe un projet de stockage réversible.

La réversibilité du centre de stockage est fondée sur la progressivité de la construction, l'adaptabilité de la conception et la flexibilité d'exploitation du stockage permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets. Elle inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée cohérente avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage.

La mise en œuvre de la réversibilité pourra modifier le phasage et le déroulement des opérations prévues actuellement.

6

La consommation des ressources et l'estimation des émissions et résidus attendus

6.1 L'utilisation d'énergie et la consommation des matériaux et des ressources 234
6.2 Les types et estimations des émissions et résidus attendus 236

6.1 L'utilisation d'énergie et la consommation des matériaux et des ressources

Sont présentées dans ce chapitre : la demande et l'utilisation d'énergie ainsi que la nature et les quantités des matériaux principaux et des ressources naturelles estimées pour la phase de fonctionnement du projet global Cigéo. Des éléments indicatifs sont également précisés pour les phases d'aménagements préalables et de construction initiale. Ces éléments seront affinés et prendrons en compte la démarche d'amélioration de la conception au cours des actualisations ultérieures de la présente étude d'impact.

6.1.1 L'énergie

Les consommations des installations de raccordement aux réseaux, notamment alimentation électrique et adduction d'eau, sont négligeables par rapport à celles du centre de stockage Cigéo.

Les différentes solutions techniques envisagées pour répondre aux besoins en énergie sont présentés dans le chapitre 2.7.2 du présent document.

Les principes d'utilisation rationnelle de l'énergie retenus sur le centre de stockage Cigéo sont présentés pour les différentes phases dans le volume IV.

6.1.1.1 Hydrocarbures pour moteurs thermiques

Pendant les phases d'aménagements préalables et de construction initiale, des engins et véhicules à moteur thermique utiliseront environ 1 000 à 4 000 mètres cubes par an de carburant, soit, en ordre de grandeur, un approvisionnement d'un à deux camion-citerne par semaine. La demande en carburant est surtout liée aux mouvements de terre qui nécessitent l'utilisation d'engins de chantier puissants.

Pendant la phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo, du fioul est utilisé pour l'alimentation des groupes électrogènes de secours. Ils sont mis en marche régulièrement pour garantir leur fonctionnement en cas d'accident. La consommation annuelle moyenne de fioul estimée en phase de fonctionnement est comprise entre 100 à 200 mètres cubes par an.

La consommation de gazole des trains circulant sur l'ITE et la ligne ferroviaire 027000 est marginal compte tenu du faible nombre de trains acheminant les colis de déchets radioactifs (1 à 3 par semaine). Au-delà de Nançois-Tronville, les trains peuvent circuler avec une locomotive diesel ou électrique.

6.1.1.2 L'énergie électrique

Le fonctionnement des équipements du centre de stockage (outils de creusement, funiculaires, outils de manutention, ventilateurs…) induit une consommation importante d'énergie électrique. La consommation annuelle maximale estimée est de l'ordre de 200 GWh.

À titre de comparaison la consommation annuelle de l'usine de retraitement de la Hague est de l'ordre de 550 GWh, celle du centre de stockage en surface de déchets de faible et moyenne activité à vie courte (Centre de stockage de l'Aube de l'Andra) est de l'ordre de 5,3 GWh.

Comme le montre la figure 6-1, le besoin prévisionnel en puissance évolue lors des trois phases successives « aménagements préalables », « construction initiale » et « fonctionnement ».

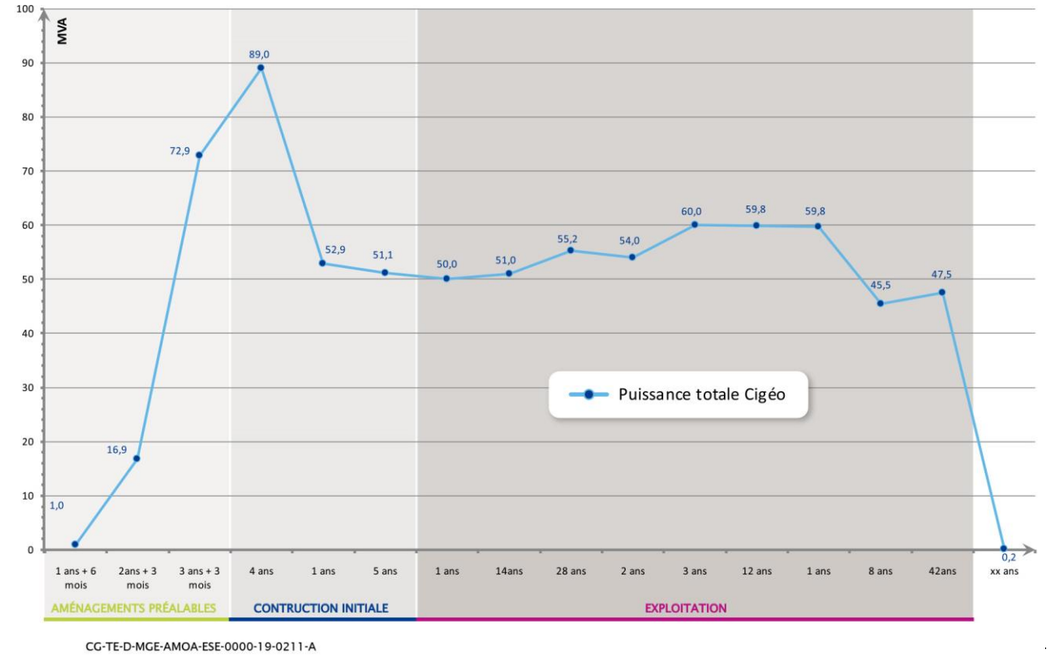


Figure 6-1 *Estimation puissance électrique maximale nécessaire au centre de stockage Cigéo*

DÉFINITION

Le voltampère (VA) mesure la puissance électrique dite apparente, c'est-à-dire la puissance maximale que pourra prendre la puissance active exprimée en watt (W). C'est l'unité de référence pour dimensionner les équipements électriques industriels

La puissance nécessaire au centre de stockage Cigéo augmente pendant toute la phase d'aménagements préalables du fait du déploiement progressif des engins de travaux. Le pic de puissance apparente est atteint en début de construction initiale, il est de 89 MVA. Ce pic est induit par l'importante activité de creusement des galeries souterraines. La puissance en phase exploitation s'échelonne entre 50 MVA et 60 MVA.

L'énergie électrique provenant du réseau national est privilégiée compte tenu de sa fiabilité et sa disponibilité et surtout afin de minimiser le potentiel calorifique dans les installations.

6.1.1.3 Énergie thermique pour le traitement d'air

Les besoins en énergie thermique pour le traitement de l'air (chauffage, régulation de l'hydrométrie) n'interviennent que pendant la phase de fonctionnement. Ils s'élèvent à environ 16 000 MWh par an utilisés dans les installations nucléaires souterraine et de surface, équivalent au chauffage annuel d'environ 1 800 logements.

» LA RESSOURCE EN BOIS POUR LES CHAUDIÈRES

La loi relative à la transition énergétique du 17 août 2015 se traduit dans la région Grand Est par la montée de la filière biomasse énergie.

S'agissant de la ressource en « bois énergie », la région Grand Est dispose d'une ressource forestière abondante et variée. La croissance annuelle de cette ressource y est élevée par rapport à l'accroissement moyen du pays.

Dans l'hypothèse du choix d'une chaudière biomasse utilisant le bois pour le centre de stockage Cigéo, les scénarios d'utilisation du bois énergie consommeraient une part relativement faible du potentiel de la région. Localement, elle représenterait moins de 10 % de la capacité accessible pour les projets de chaufferies et industriels sur le pays Barois seul (moins de 6 000 tonnes de bois/an pour Cigéo pour un potentiel actuel réel de 68 000 tonnes/an).

6.1.2 L'eau

Les pics de besoin en eau du centre de stockage sont estimés à :

- 500 m³/j pendant la phase d'aménagements préalables ;
- 500 m³/j pendant la phase de construction initiale ;
- 200 m³/j en phase de fonctionnement.

La consommation des phases d'aménagements préalables et de construction initiale est liés aux besoins en eau du chantier, notamment la fabrication du béton pour les installations de surface.

Il est prévu la mise en fonctionnement dès la phase de construction initiale de stations d'épuration permettant le traitement des eaux générés dans le centre de stockage Cigéo (eaux usées, eaux industrielles, eaux d'exhaure...). Ces eaux traitées seront réutilisées pour les usages internes ne nécessitant pas une eau de qualité eau potable : arrosage, fabrication du béton, lavage des engins.

Les besoins en eau potable ainsi optimisés ne remettent pas en cause l'équilibre local de la ressource en eau, comme le démontre les chapitres 2.4.4 et 2.5.4 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les besoins en eau des opérations d'adduction d'eau, de raccordement électrique, de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et de déviation de la route départementale D60/960 sont minimes en comparaison des besoins du centre de stockage. Ils ne sont pas de nature à modifier l'ordre de grandeur de ces estimations.

6.1.3 Les terres et matériaux excavés

6.1.3.1 Les déblais issus du terrassement des installations de surface du centre de stockage Cigéo et du creusement des liaisons surface fond de l'installation souterraine

Pendant la phase d'aménagements préalables, les déblais issus des nivellements pour les installations de surface représentent un volume de terre en place de l'ordre de sont estimés à :

- 5 millions de m³ pour la zone descenderie ;
- 4 millions de m³ pour la zone puits.

Pendant la phase de construction initiale et de fonctionnement, les déblais issus des nivellements complémentaires pour les installations de surface, principalement EP1 et EP2, les creusements des liaisons surface fond et l'extension des zones de verses (Z2 et Z3) représentent un volume de terre en place de l'ordre de sont estimés à :

- 1,6 millions de m³ pour la zone descenderie
- 2,8 millions de m³ pour la zone puits.

Les exigences principales en matière de gestion des terres et des matériaux excavés sont un tri en fonction de leur qualité et une recherche de l'équilibre des bilans déblais/remblais pour leur réutilisation optimale sur les zones remaniées. La prise en compte du relief pour la composition spatiale du site, l'optimisation du phasage du chantier et la recherche de solutions de réemplois, détaillées au chapitre 2.2.4 du volume IV de la présente étude d'impact, sont les clefs de l'équilibre du bilan déblais/remblais.

Les matériaux terreux sont conservés et réutilisés pour les besoins d'aménagements paysagers des installations. Les déblais produits en surface ont des caractéristiques permettant, pour la majorité, leur réutilisation pour les aménagements dans le cadre du projet global et sont utilisés comme remblais. Ainsi, les estimations actuelles concluent à l'absence d'importation de terre.

Les opérations d'adduction d'eau, de raccordement électrique, de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et de déviation de la route départementale D60/960 sont susceptibles de créer des excédents de déblais dans des proportions usuelles pour ce type de réalisation. Ils seront précisés par leurs maîtres d'ouvrages dans les versions ultérieures de l'étude d'impact.

6.1.3.2 Les verses

Les déblais du Callovo-Oxfordien extraits lors du creusement des galeries et des alvéoles de l'installation souterraine représentent un volume de l'ordre de 11 millions de m³ produits sur plus de 100 ans. À titre de comparaison, lors du creusement des grands tunnels, réalisés sur une dizaine d'années (soit une durée environ 10 fois plus courte que le creusement de l'installation souterraine de Cigéo), le volume de matériaux générés est du même ordre de grandeur : par exemple, environ 7 millions de mètres cubes pour le tunnel sous la Manche, environ 15 millions de mètres cubes prévus pour le futur tunnel de base de la liaison ferroviaire Lyon-Turin.

Ces matériaux extraits sont regroupés sur la zone puits (cf. Chapitres 2.7.5 et 4.3.4.2 du présent document). Une partie (environ 40 %) sera réutilisée pour le remblaiement de l'installation souterraine lors de sa fermeture. Cette partie des matériaux est entreposés sous forme de verses. Ils sont dénommés verses « vives ». Pour la partie qui ne sera pas utilisée pour la fermeture de l'installation souterraine, l'Andra recherche des solutions de valorisation hors du centre de stockage (cf. Chapitres 2.6.2.6 et 2.7.5 du présent document).

6.1.4 Les matériaux de construction

La construction des installations nécessite des volumes importants de matériaux (bétons et aciers essentiellement).

Selon les premières estimations, les besoins en matériaux de construction du centre de stockage sont de l'ordre de :

- 5,7 millions de tonnes de granulats,
- 1,4 millions de tonnes de ciment,
- 4,9 millions de tonnes de sables.

Un peu plus de la moitié de ces matériaux (51,6 %) est utilisé en phase de construction initiale pour les installations de surface, les liaisons surfaces/fond. Environ 45,6 % de ces matériaux servent principalement pour l'extension de l'installation souterraine pendant le siècle de phase de fonctionnement et de manière anecdotique pour les opérations de jouvence. Les 2,7 % restants sont mis en œuvre au moment de la phase des aménagements préalables.

Des éléments complémentaires sur l'approvisionnement en matériaux pour la construction du centre de stockage sont présentés au chapitre 4.5.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

L'alimentation électrique, l'adduction d'eau, la mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000, la déviation de la route départementale D60/960 auront des besoins minimes en comparaison au centre de stockage :

- pour le passage de la fibre optique et le renforcement des pylônes le long de la ligne 400 kV, la construction du transformateur et les câbles électriques, leurs gaines et leur stabilisation dans le sol pour les liaisons souterraines ;
- pour les tuyaux et leur stabilisation dans le sol pour l'opération d'adduction d'eau ;

- pour la réfection de la plateforme, la rénovation des ouvrages d'art et la construction des éventuels ouvrages de rétablissement des voiries en cas de fermeture de passages à niveau le long de la ligne ferroviaire ;
- pour la création d'ouvrages d'art et de la plateforme de la déviation de la route départementale D60/960.

6.2 Les types et estimations des émissions et résidus attendus

Les émissions attendues (dans les milieux air, eau, sol) sont majoritairement induites par la construction des installations de surface et infrastructures du centre de stockage Cigéo et le déploiement progressif de l'installation souterraine de stockage. Le projet ne comprend aucun procédé de transformation. En fonctionnement normal, les émissions induites par les procédés de fonctionnement du centre de stockage sont faibles.

Des éléments complémentaires sur les émissions du centre de stockage Cigéo en fonctionnement normal sont présentés au chapitre 2.3.3 du volume IV de la présente étude d'impact.

Les évaluations de ces émissions et de leurs impacts sont détaillées tout au long du volume IV. Elles respecteront les arrêtés et décrets d'autorisation pris par les autorités compétentes. Des actions de surveillance des émissions sont mises en œuvre pendant la durée des différentes phases de travaux et de fonctionnement afin d'obtenir un suivi et de réaliser toute adaptation éventuelle des mesures préventives retenues.

Les émissions des opérations d'adduction d'eau, de raccordement électrique, de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 et de déviation de la route départementale D60/960 sont minimes en comparaison des besoins du centre de stockage. Elles ne sont pas de nature à modifier l'ordre de grandeur des estimations relatives au centre de stockage Cigéo.

6.2.1 Les émissions atmosphériques

6.2.1.1 Les polluants et poussières

a) En phase d'aménagements préalables et de construction initiale

En phase d'aménagements préalables et de construction initiale, les opérations de terrassements ainsi que le trafic des véhicules et engins de chantier sont à l'origine des principales émissions de polluants. Les polluants principalement émis sont des poussières et des gaz d'échappement de moteurs thermiques (NO_x, SO_2, CO…) (cf. Volume IV chapitre 2.1).

Les quantités ne sont pas estimées à ce stade. Elles dépendent du phasage précis des travaux qui sera détaillé dans les actualisations ultérieures de l'étude d'impact.

b) En phase de fonctionnement

En phase de fonctionnement, les polluants sont principalement émis par le trafic extérieur et la ventilation de l'installation souterraine. Il s'agit pour la plupart de poussières et de gaz d'échappement de moteurs thermiques (NO_x, SO_2, CO…).

Des éléments radioactifs gazeux (^{3}H, ^{14}C, ^{85}Kr) et particulaires (émetteurs alpha et bêta) entrainés par l'air de la ventilation, filtrés (pour les particules) et rejetés dans l'atmosphère par des émissaires canalisés et surveillés (du bâtiment nucléaire de surface ou du puits de ventilation de la zone en exploitation souterraine). Ces rejets sont très faibles et leur incidence sur l'environnement et la santé humaine sont extrêmement faibles, imperceptibles au regard de l'exposition annuelle due à la radioactivité naturelle de la population française, même la moins exposée.

Les quantifications annuelles maximales des polluants atmosphériques conventionnels et radioactifs générés par le projet global Cigéo en phase de fonctionnement sont indiquées respectivement dans le tableau 6-1 et le tableau 6-2.

Tableau 6-1 Quantité de polluants atmosphériques conventionnels émise en phase de fonctionnement (kg/an)

Polluants	Quantité émise (T/an)
Monoxyde de carbone (CO)	970
Dioxyde de soufre (SO_2)	85
Dioxyde d'azote (NO_x)	520
Poussières totales	690
Hydrocarbure (HC)	25

Le détail des sources considérées dans cette estimation se trouvent au volume IV chapitre 2.1.4.4 et au volume VII au chapitre 3.1.5.

6.2.1.2 Les émissions atmosphériques radioactives

Les rejets radioactifs sont exprimés en becquerel ou giga becquerel par an.

GIGA

Giga (symbole G) est le préfixe du Système international d'unités (SI) qui représente 10^9, soit un milliard de fois l'unité qui suit.

Tableau 6-2 Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation souterraine

Cheminée de l'installation souterraine	Rejets radioactifs atmosphériques annuels maximaux
Tritium	de l'ordre de 300 GBq/an
^{14}C	de l'ordre de 300 GBq/an
^{85}Kr	de l'ordre de 6 000 GBq/an
Émetteurs beta	de l'ordre de 300 000 Bq/an
Émetteurs alpha	de l'ordre de 30 000 Bq/an

Les rejets radioactifs sont globalement inférieurs ou du même ordre de grandeurs que les demandes et autorisations de rejets d'autres installations nucléaires françaises (cf. Tableau 3.3 du paragraphe 3.3.2 du volume VI de la présente étude d'impact).

6.2.2 Les effluents liquides

6.2.2.1 Les émissions dans les eaux

À chaque phase du projet Cigéo correspond des quantités et des natures d'effluents liquides conventionnels traités, recyclés ou rejetés (rejets compatibles avec les critères de bon état chimique et écologique des eaux superficielles). Les équipements sont évolutifs de la phase d'aménagements préalables, jusqu'à la mise en œuvre des dispositifs définitifs. Les rejets dits conventionnels comprennent :

- les eaux pluviales ;
- les eaux usées ;
- les eaux industrielles (ou effluents conventionnels issus des installations en surface et en fond et transitant par les stations d'épuration) ;
- les eaux de fond (ou eaux d'exhaure lors de la réalisation des liaisons surface-fond ou les ouvrages souterrains de stockage).

Dès le début du fonctionnement du centre de stockage Cigéo, l'arrivée des colis de déchets radioactifs pourrait être à l'origine d'un rejet d'eau contenant des traces de contamination radioactive (rejet dit non conventionnel) et produites dans certaines zones de l'installation nucléaire dites « zones à production possible de déchets nucléaires ».

Différents traitements et modes de gestion sont entrepris selon la nature des effluents.

6.2.2.2 Les eaux pluviales

En zone descenderie et en zone puits, elles sont collectées, puis stockées au sein d'un bassin qualitatif (traitement par décantation – dimensionnement décennale pour la phase d'aménagements préalables, puis en centennale à partir de la phase de construction initiale), puis transitent vers un bassin quantitatif dimensionné pour une pluie centennale pour la phase de construction initiale (dimensionnement décennale pour la phase d'aménagements préalables) pour permettre un rejet régulé vers le milieu naturel.

À partir de la phase de construction initiale, les eaux pluviales ruisselant sur la zone de dépôt des verses de la zone puits sont collectées au sein de bassins qualitatifs. Leur qualité diffère des eaux pluviales collectées par ailleurs sur le centre de stockage Cigéo, en raison de la nature du matériaux stocké (Callovo-Oxfordien) et par le déroulement des travaux sur la zone de dépôt. En effet, au démarrage de la construction initiale, les dépôts des verses sont non végétalisés, la végétalisation est ensuite progressive. Les eaux de ruissellement des verses font donc l'objet d'un mode de gestion spécifique avant rejet vers le milieu naturel : réduction de leur teneur en sulfates au sein d'un bâtiment de traitement puis transitent vers des bassins quantitatifs dimensionnés pour la pluie centennale avant rejet régulé par des ouvrages de diffusion vers l'Ormançon.

Les eaux pluviales ruisselant sur la liaison intersites sont gérées qualitativement et quantitativement au moyen de deux bassins de collecte multifonction dimensionnés pour la pluie décennale avec un rejet à débit régulé vers le milieu naturel.

Les eaux pluviales ruisselant sur la plateforme ferroviaire de l'installation terminale embranchée sont gérées grâce à trois bassins de collecte multifonction dimensionnés pour la pluie décennale. Le rejet vers le milieu naturel se fait à débit régulé.

Une réhabilitation du dispositif actuel de gestion des eaux pluviales est prévue pour la plateforme logistique de Gondrecourt-le-Château (en attente de la définition technique des futures installations/activités implantés sur la plateforme logistique), avant rejet dans le réseau d'eaux pluviales urbain.

6.2.2.3 Les eaux usées et industrielles

Les eaux usées sont collectées pour rejoindre la station d'épuration de la zone descenderie ou la zone puits. Les installations sont dimensionnées et équipées pour obtenir un rejet d'eau compatible avec les critères de bon état écologique et chimique des eaux superficielles au sens de la directive cadre sur l'eau (DCE).

La plateforme logistique de Gondrecourt-le-Château comprend un dispositif d'assainissement des eaux usées (fosse de 6 m^3) qui est conservé en l'état, mais qui pourra être adapté au cours du temps en fonction des besoins.

6.2.2.4 Les eaux de fond

Les eaux de fond font l'objet d'un pré-traitement (décantation par floculation, neutralisation physico-chimique des eaux) avant d'être remonté à la surface vers les bassins quantitatifs.

6.2.2.5 Les effluents non conventionnels

Ce type d'effluents est géré de façon spécifique, totalement séparée des effluents conventionnels. Tous ces effluents sont collectés, puis contrôlés radiologiquement et le cas échéant traités via une unité de traitement mobile (technologie existante et éprouvée). Les effluents non conventionnels, traités ou non, sont ensuite transférés sous forme de déchets liquides vers une autre installation agréée pour leur élimination.

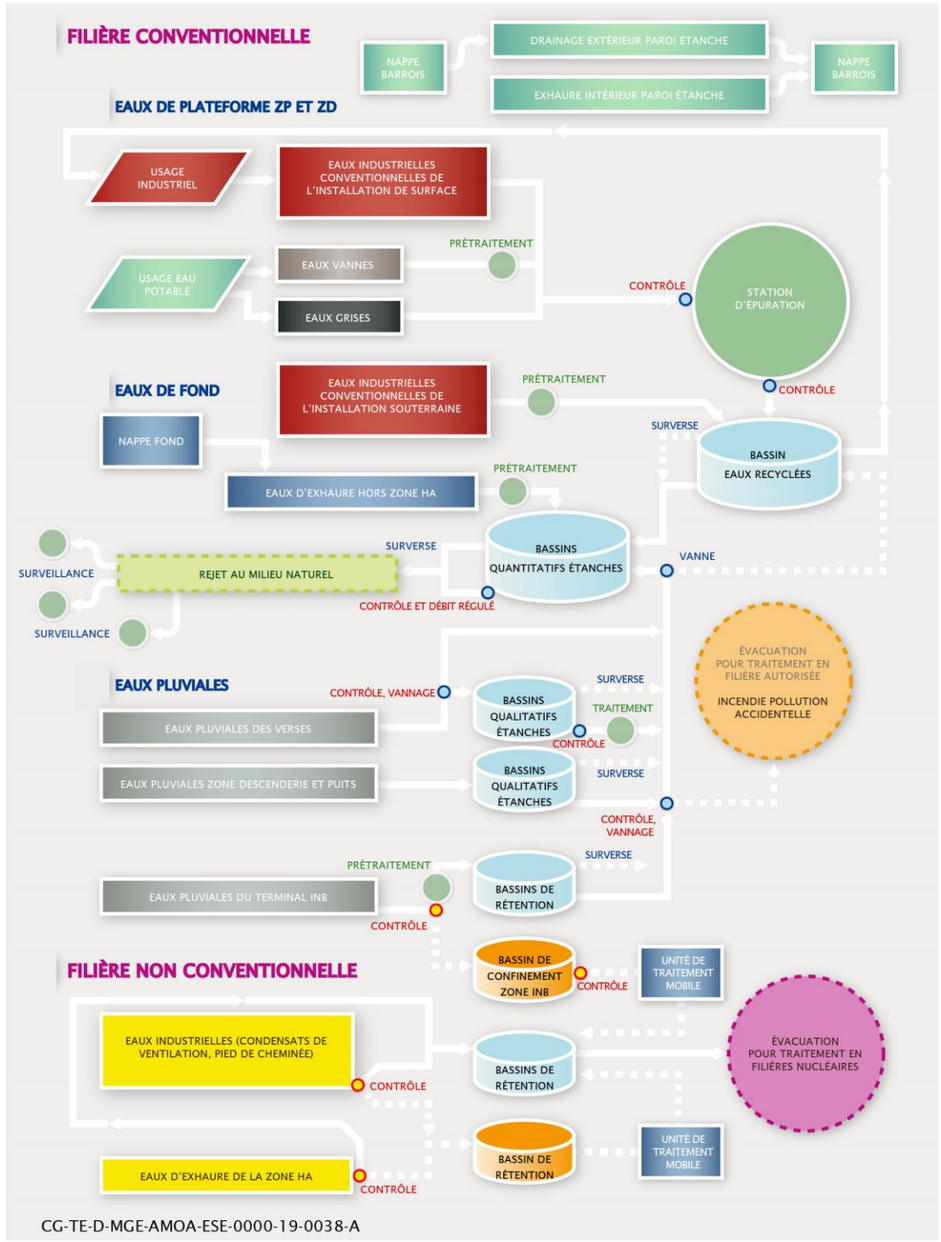


Figure 6-2 *Schéma de principe de la gestion de l'eau au droit de la zone descenderie et de la zone puits du centre de stockage Cigéo*

L'objectif de ce dispositif de traitement différencie des eaux selon leur nature est de réduire les besoins en eau du projet en limitant la consommation d'eau uniquement pour un usage d'eau potable. Ceci implique un dispositif de traitement performant au sein des stations d'épuration en zone descenderie et en zone puits, puis des réservoirs de stockage des eaux dites « eaux recyclées », permettant le stockage de 3 jours de consommation pour un usage non alimentaire (arrosage, eau de lavage des engins/matériel, eau de gâchage des bétons, refroidissement, ...). Passé le délai de trois jours, les eaux sont rejetées vers le milieu naturel. Le nombre de réservoirs et le volume de stockage sont adaptés à la phase du projet global Cigéo considéré.

Les différentes émissions liquides du centre de stockage Cigéo bien que chargées de polluants de nature différente font l'objet d'un traitement adapté à leur nature avant un réemploi pour les activités du centre de stockage Cigéo ne nécessitant pas une eau potable ou rejeter dans le milieu naturel local. Seuls les rejets non conventionnels font l'objet d'un traitement spécifique et ne sont pas rejetés dans le milieu local.

6.2.3 Les émissions pouvant affecter le cadre de vie

6.2.3.1 En phase d'aménagements préalables et construction initiale

Les émissions **de bruit** pour les deux phases sont liées aux engins de terrassement, à la circulation d'engins et de véhicules, auxquelles il faut ajouter la circulation des trains et dans une moindre mesure le fonctionnement du poste électrique 400/90 kV et les installations fixes (ventilation, centrale béton...) en phase de construction initiale. Des dispositions d'aménagement permettent de réduire les émissions sonores lors de la phase de construction. Une fois en fonctionnement, l'installation terminale embranchée, la liaison intersites, le poste électrique 400/90 kV et la déviation de la route départementale D60/960 en phase de construction initiale présentent des émissions sonores inférieures aux seuils règlementaires.

Les émissions de **vibrations** lors des phases de construction sont liées principalement à l'utilisation d'explosifs pour le creusement des puits et aux opérations de terrassements. Les vibrations liées aux passages de véhicules et engins sur les voies publiques sont très faibles.

Des émissions **d'odeurs** pourraient être générées en particulier lors de certains travaux (par exemple lors de la pose des enrobés de voiries), par la gestion des eaux (bassins, station d'épuration des eaux usées) ou le stockage de déchets putrescibles. Les dispositions constructives permettent de réduire ces émissions et de les rendre non perceptibles pour les riverains.

Concernant les émissions **de lumière**, au-delà des phares des engins et des éventuels projecteurs ponctuels, certaines zones peuvent être éclairées de nuit pour des raisons de sécurité. Des technologies récentes permettant de limiter l'impact visuel et la pollution lumineuse, en particulier pour la faune locale, sont mises en œuvre.

Les **émissions électromagnétiques** susceptibles d'être générées par les systèmes de communication sont prises en compte dans le cadre de la santé des travailleurs. Elles ne sont pas perceptibles dans l'environnement. Les champs électriques et magnétiques associés aux lignes et installations électriques sont également sans effet notable sur le cadre de vie et la santé des riverains.

6.2.3.2 En phase de fonctionnement

Les émissions de **bruit** sont liées à la circulation routière, au déchargement des trains et, dans une moindre mesure, aux installations fixes (ventilation, centrale béton...). Les mesures de réduction mises en œuvre permettent de réduire les émissions sonores afin qu'elles soient conformes à la réglementation.

Les émissions de **vibrations** sont principalement induites par la circulation des convois ferroviaires sur l'ITE et sur le terminal ferroviaire nucléaire (TFN), localisé sur la zone descenderie. Ces émissions sont très faibles en phase de fonctionnement (vitesse et fréquence faibles).

En fonctionnement, les émissions d'**odeurs** sont identiques à celles en construction initiale.

Concernant les émissions de **lumière**, comme pour les phases de construction, certaines zones peuvent être éclairées de nuit pour des raisons de sécurité. Les technologies récentes et les mesures paysagères mises en œuvre permettent de limiter l'impact visuel et la pollution lumineuse, en particulier pour la faune locale.

Les **émissions électromagnétiques** susceptibles d'être générées par les systèmes de communication sont prises en compte dans le cadre de la santé des travailleurs. Elles ne sont pas perceptibles dans l'environnement. Les champs électriques et magnétiques associés aux lignes et installations électriques sont également sans effet notable sur le cadre de vie et la santé des riverains.

Les niveaux d'exposition aux **rayonnements ionisants** liés à la présence de déchets radioactifs et au fonctionnement des installations du centre de stockage sont extrêmement faibles, voire nuls, et sans incidence sur la santé et l'environnement. En effet, plusieurs écrans isolent en permanence les déchets radioactifs de leur environnement et atténuent très fortement les rayonnements des éléments radioactifs (conteneurs dans lesquels

sont placés les déchets par les producteurs, emballages dédiés à leur transport jusqu'au centre de stockage Cigéo, génie civil cellules blindées et parois) du bâtiment de surface, hotte pour leur acheminement vers les ouvrages souterrains de stockage…).

6.2.4 Les déchets conventionnels

6.2.4.1 En phases des aménagements préalables et construction initiale

La majeure partie des déchets conventionnels du projet global est produite durant la construction initiale du centre de stockage Cigéo. La quantité est estimée à environ 250 000 tonnes réparties sur 10 ans à ce stade des études, avec des pics certaines années. Les déchets inertes représentent environ 90% de ces déchets conventionnels (déchets de béton, dépose des voussoirs liés à la création de carrures lors du creusement du souterrain). Les autres déchets de chantier sont classiques, avec des déchets non dangereux et, pour une faible part, des déchets dangereux. Ces déchets ne sont pas quantifiés à ce stade des études.

La première phase de défrichement devrait engendrer de 20 000 m³ à 25 000 m³ de bois.

6.2.4.2 En phase de fonctionnement

Les estimations préliminaires de déchets pour la phase de fonctionnement sont indiquées dans le tableau suivant.

Tableau 6-3 Estimation annuelle des déchets induits conventionnels lors du fonctionnement (hors jouvence) en moyenne annuelle

Catégories	Type de déchets	Estimation en tonnes (moyenne annuelle)
Déchets inertes	Bétons, ciments, matériaux inertes divers	3 500
Déchets non dangereux	Bois	110
	Papier/Carton	170
	Métaux	700
	Autres déchets (plastiques, plâtre…)	240
	Bio déchets (déchets verts, déchets de restauration)	120
Déchets dangereux	Tous déchets dangereux y compris déchets de soins et DEEE	240
	Total	**Environ** 5 080 t.an-1

Pour toutes les phases du projet, des règles de tri, selon la nature des déchets, sont établies. Des bennes de tri sont installées en fonction des besoins.

La priorité pour la gestion des déchets est la valorisation et le réemploi en prenant en compte l'évolution des filières et des technologies, tout particulièrement pour les déchets induits par les opérations de construction (bâtiments - travaux publiques) du projet. S'ils ne peuvent être réutilisés sur site, les déchets sont envoyés vers des filières agréées de gestion des déchets, avec une priorité aux filières locales.

6.2.5 Les déchets radioactifs

6.2.5.1 Nature des déchets induits radioactifs

Les grands types de déchets radioactifs induits par le fonctionnement du centre de stockage Cigéo correspondront à :

- des déchets technologiques, très faiblement radioactifs (catégorie TFA) : consommables (vinyle, gants, tenues d'intervention…), outillages, pots décanteurs d'aspirateur de nettoyage, frottis de contrôle sur emballage… ;
- des déchets de procédé de très faible et faibles et moyenne activité en particulier les filtres de ventilation (catégorie FMA) ;
- des déchets issus de matériaux ou matériels contaminés lors d'opérations de contrôles ou de maintenance dans les zones nucléaires, présentant de très faibles activités (catégorie TFA);
- des effluents présentant de faibles activités, induits en particulier lors les opérations de nettoyage et les analyses d'échantillon prélevés dans le cadre de la surveillance de l'installation ou correspondant à des condensats de ventilation ou des eaux d'exhaures de la zone d'ouvrage HA.

6.2.5.2 Estimations des quantités de déchets radioactifs générés

Les déchets radioactifs sont produits dans les zones dites « zones à production possible de déchets nucléaires » définies dans un plan de zonage déchets qui sera soumis à l'Autorité de sûreté nucléaire dans le cadre de la demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo.

Le tableau suivant présente une première estimation des quantités moyennes de déchets radioactifs issus des opérations de fonctionnement y compris maintenance. Les conceptions des colis (qui assurent le confinement de la radioactivité) et des installations (sectorisation des zones nucléaires) permettent une production réduite de déchets radioactifs par le centre de stockage Cigéo.

Comme indiqué dans le chapitre 6.2.2 ci-dessus, les effluents non conventionnels, traités ou non, sont ensuite transférés sous forme de déchets liquides vers une autre installation agréée pour leur élimination.

Tableau 6-4 Estimation des déchets radioactifs produits lors du fonctionnement en moyenne annuelle

Activité	Type de déchets	Estimation
Fonctionnement	Déchets solides très faible activité (TFA)	<40 tonnes/an
	Déchets solides faible ou moyenne activité (FMA)	<1 tonne/an
	Déchets liquides (TFA)	0,15 m³/jour

Synthèse

- **Consommation d'énergie**

  Les principales énergies utilisées pour le projet global Cigéo sont :

  ✓ les hydrocarbures en phase d'aménagements préalables : 1000 à 3000 m³/an seront utilisés pour le fonctionnement des engins ;

  ✓ l'énergie électrique pour le fonctionnement des équipements du centre de stockage (outils de creusement, funiculaires, outils de manutention, ventilateurs…) avec un pic de consommation de 200 GWh/an les premières années de la phase de construction initiale ;

  ✓ l'énergie thermique en phase de fonctionnement : 16 000 MWh/an pour le traitement de l'air (chauffage, régulation de l'hygrométrie).

- **Consommation d'eau**

  Les pics de besoin en eau du projet global Cigéo sont estimés à :

  ✓ 500 m³/j pendant la phase d'aménagements préalables ;

  ✓ 500 m³/j pendant la phase de construction initiale ;

  ✓ 200 m³/j en phase de fonctionnement.

  Le pic de consommation de la phase de construction initiale est lié aux besoins en eau du chantier du centre de stockage Cigéo, notamment la fabrication du béton pour les installations de surface.

  Les stations d'épuration mises en place dès la phase de construction initiale permettront la réutilisation des eaux traité pour les usages internes ne nécessitant pas une eau de qualité eau potable : arrosage, fabrication du béton, lavage des engins.

- **Consommation de terres et verses**

  Environ 13,5 millions de m³ de déblais sont générés pendant les phases d'aménagements préalables, de construction initiale et de fonctionnement du centre de stockage Cigéo. Grâce à la prise en compte du relief pour la composition spatiale du centre de stockage et grâce à la réutilisation maximale des terres les estimations actuelles concluent à l'absence d'importation de terre.

  Les volumes de Callovo-Oxfordien extraits lors du creusement de l'installation souterraine représenteront un volume de l'ordre de 11 millions de mètres cubes produits sur plus de 100 ans. 40 % environ seront réutilisés pour le remblaiement de l'installation souterraine lors de sa fermeture définitive. Des solutions de réemploi sont recherchées pour les 60 % restants.

- **Consommation de matériaux de construction**

  Selon les premières estimations, les besoins en matériaux de construction du centre de stockage sont de l'ordre de :

  ✓ 4 millions de tonnes de granulat ;

  ✓ 2,6 millions de tonnes de ciment ;

  ✓ 3 millions de tonnes de sables.

  15 % de ces matériaux sont utilisés en phase de construction initiale pour les installations de surface, les liaisons surfaces/fond et les premiers alvéoles. Les 75 % restant servent principalement pour l'extension de l'installation souterraine pendant le siècle de phase de fonctionnement et de manière anecdotique pour les opérations de jouvence. L'Andra réfléchit à plusieurs procédés de réduction des besoins en béton.

- **Émissions atmosphériques**

  Les émissions atmosphériques en phase d'aménagement préalables seront principalement induites par les opérations de terrassements effectuées sur le centre de stockage Cigéo. Les polluants émis seront des poussières et des gaz de combustion (dioxyde d'azote, monoxyde de carbone hydrocarbures, notamment COV…

  En phase de construction initiale, les terrassements sont terminés pour la plupart, les émissions seront alors principalement liées au trafic, à la ventilation des liaisons surface fond en cours de réalisation.

  En phase de fonctionnement, les sources d'émissions principales sont le trafic extérieur (Lis et hors site) et les émissions issues des installations de surface et de l'installation souterraine, y compris des radionucléides (^{3}H, ^{14}C, ^{85}Kr) sous forme gazeuse ou particulaire. Ces rejets sont très faibles et leur incidence sur l'environnement et la santé humaine sont imperceptibles au regard de l'exposition annuelle due à la radioactivité naturelle.

- **Effluents liquides**

  Les effluents liquides conventionnels sont produits majoritairement par le centre de stockage Cigéo au sein du projet global Cigéo. Les besoins en eau potable en phase d'aménagements préalables et les effluents liquides produits par les autres opérations du projet global Cigéo sont insignifiants en volume par rapport à ceux émis par le centre de stockage Cigéo.

  Le centre de stockage Cigéo met en place dès la phase de construction initiale un traitement adapté à la nature des eaux considérées (eaux usées et des eaux industrielles de surface et en fond), puis leur recyclage Ceci permet à la fois de réduire les consommations en eau potable du centre de stockage Cigéo (pic de consommation en eau potable de 500 m³/j en phase de construction initiale, puis pic de 200 m³/j en phase de fonctionnement) et d'autre part d'assurer les besoins en eau non potable pour certains usages du centre de stockage (irrigation, lavage engin, utilisation tunnelier, …). Le surplus est restitué au milieu naturel grâce aux bassins quantitatifs (rejet avec un débit régulé assurant la non-aggravation des risques d'inondation en aval).

  Pour les effluents liquides non conventionnels (eau produite dans certaines zones de l'installation nucléaire dites « zones à production possible de déchets nucléaires »), le centre de stockage Cigéo est conçu pour ne rejeter aucun effluent non conventionnel dans le milieu local.

- **Émissions pouvant affecter le cadre de vie**

  Le centre de stockage Cigéo, et dans une moindre mesure les opérations des autres maîtres d'ouvrage sont à l'origine d'émissions de bruit, de vibrations, d'odeurs, de lumière et de champs électriques et électromagnétiques. Ces émissions sonores et les vibrations sont prépondérantes en phase de construction et notamment de construction initiale. Les émissions lumineuses et les odeurs sont moindres en phase d'aménagements préalables par rapport aux autres phases. Seuls les émissions sonores et lumineuses sont perçues par les riverains. Les émissions sonores sont conformes aux seuils réglementaires pour les différentes opérations du projet global Cigéo.

- **Déchets**

  Des **déchets conventionnels** sont produits, majoritairement par le centre de stockage Cigéo pour les phases d'aménagements préalables et de construction initiale. Il s'agit essentiellement de déchets inertes (les volumes pourraient être de plusieurs milliers de tonnes certaines années) et dans une moindre mesure de déchets non dangereux et dangereux. La priorité est donnée à la valorisation et les filières locales de gestion des déchets sont privilégiées.

  Des **déchets radioactifs** sont produits lors de la phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo. Il s'agit de déchets de très faible activité ou de faible et moyenne activité qui sont envoyés vers des filières autorisées, dont les quantités ont été estimées au maximum à 40 tonnes par an de déchets solides très faible activité, 1 tonnes par an de déchets solides faible ou moyenne activité et 0,15 m³ par jour d'effluents liquides.

7

Pourquoi engager la réalisation du centre de stockage Cigéo maintenant ?

7.1 Le stockage géologique est le seul mode de gestion à maturité pour la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs les plus dangereux (déchets HA et MA-VL) 242

7.2 Le projet de centre de stockage Cigéo permet d'avancer prudemment et d'offrir aux générations suivantes un mode de gestion durable des déchets HA et MA-VL 242

7.3 Le risque de la perte de compétence 243

7.4 La construction et l'exploitation du centre de stockage Cigéo ne s'oppose pas aux autres voies de gestion 243

7.5 Le projet de centre de stockage Cigéo ne préempte pas les décisions des générations futures 244

7.1 Le stockage géologique est le seul mode de gestion à maturité pour la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs les plus dangereux (déchets HA et MA-VL)

Les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) sont très dangereux pour l'homme et l'environnement. Un individu qui se placerait au voisinage immédiat de déchets HA sans protection aurait une espérance de vie de quelques minutes du fait de leur rayonnement. Les déchets MA-VL sont en général moins irradiants, mais ils restent dangereux. Une ingestion ou une inhalation de particules de déchets HA et MA-VL pourrait entraîner une irradiation interne de l'organisme et des risques mortels.

Même si la radioactivité des déchets HA et MA-VL décroit, les échelles de temps associées à la dangerosité des déchets HA et MA-VL sont très longues. En ordre de grandeur, ce n'est qu'au bout de plusieurs centaines de milliers d'années que la radioactivité des déchets MA-VL approchera la radioactivité initiale des déchets de faible activité qui peuvent être stockés en surface ou à faible profondeur.

Il existe actuellement environ 3 900 m³ de déchets HA et environ 42 000 m³ de déchets MA-VL français entreposés en attente d'une filière durable de gestion. Si l'on considère les volumes qui seront encore générés par les installations nucléaires existantes, cela représente environ 40 % des déchets HA et 60 % des déchets MA-VL totaux prévisibles.

La dangerosité de ces déchets HA et MA-VL nécessite de mettre en place, à toutes les étapes de leur gestion, des dispositifs appropriés de sécurité et de protection de la santé des personnes et de l'environnement. De tels dispositifs sont mis en œuvre actuellement dans les installations d'entreposage des déchets HA et MA-VL. Ces entreposages sont utilisés pour conserver à titre temporaire les déchets déjà produits. Toutefois, ils ne présentent pas un caractère pérenne et doivent, pour des raisons de sûreté, être renouvelés périodiquement.

Selon le code de l'environnement, la gestion durable des déchets a pour objectif leur mise en sécurité définitive pour prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations suivantes. En effet, ce sont les générations actuelles qui ont exercé les activités nucléaires et qui en ont bénéficié. Il est donc de leur responsabilité de déployer les options techniques permettant d'assurer la gestion durable et sûre des déchets HA et MA-VL produits, sans en reporter indéfiniment la charge, de générations en générations.

De nombreuses solutions techniques ont été imaginées et étudiées pour la gestion des déchets HA et MA-VL. À l'exception du stockage géologique, aucun des modes de gestion alternatifs envisagés actuellement n'est susceptible d'apporter une mise en sécurité durable pour l'ensemble des déchets HA et MA-VL existants et pour ceux qui restent à produire. Dans son avis du 1er décembre 2020 (21), l'ASN rappelle que « *les perspectives de transmutation à une échelle industrielle des déchets déjà conditionnés de l'inventaire de référence de Cigéo ne sont pas crédibles* ». Dans ses avis du 1er février 2006 (28) et du 1er décembre 2020 (21), l'ASN estime « *qu'il ne serait pas raisonnable de retenir comme solution de référence la solution consistant à renouveler plusieurs fois un entreposage de longue durée, car elle suppose le maintien d'un contrôle de la part de la société et la reprise des déchets par les générations futures, ce qui semble difficile à garantir sur des périodes de plusieurs centaines d'années* ». Toutes les solutions alternatives demanderaient encore des recherches et des investissements très importants dans l'espoir, non garanti, de lever des verrous technologiques aujourd'hui rédhibitoires à leur utilisation pour la gestion durable des déchets (cf. Chapitres 2.2.2 à 2.2.8 du présent document). Elles sont par ailleurs nécessairement associées à une forme de stockage géologique pour la gestion des déchets déjà produits qu'elles ne peuvent pas gérer (transmutation et stockage en forages très profonds) et des nouveaux déchets qu'elles ne manqueraient pas de produire (transmutation et entreposage de longue durée en fonction de la filière suivante retenue). Dans son avis du 1er décembre 2020 (21), l'ASN estime que, « *si des études sur la transmutation devaient être poursuivies, il conviendrait* […] *qu'elles soient menées dans l'optique du développement de filières complètes, intégrant le stockage des déchets issus de la transmutation et présentant un haut niveau de sûreté* ».

Le centre de stockage Cigéo est, à ce jour, la seule option de mise en sécurité définitive dont la faisabilité a été démontrée et qui dispose d'un site d'implantation, d'un mode de financement et d'études menées jusqu'au stade de l'avant-projet.

De plus, le centre de stockage Cigéo est un mode de gestion qui est conçu pour prendre en charge l'ensemble des déchets HA et MA-VL, quelles que soient leurs natures, sous réserve qu'ils respectent les spécifications d'acceptation.

Cigéo est donc la seule solution accessible pour engager une gestion durable des déchets produits par les installations actuelles et pour permettre aux générations qui ont bénéficié des avantages des industries nucléaires d'assumer leurs responsabilités vis-à-vis des générations futures. Elle permet de stocker l'ensemble des déchets radioactifs français sur un peu plus d'un siècle.

Toutes les autres pistes de gestion (forages, transmutation, lasers…) nécessiteraient des temps de mise en œuvre de filières industrielles beaucoup plus longs et des investissements encore inconnus, pour des résultats incertains.

7.2 Le projet de centre de stockage Cigéo permet d'avancer prudemment et d'offrir aux générations suivantes un mode de gestion durable des déchets HA et MA-VL

En 2000, la construction du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne a été engagée par l'Andra. La couche argileuse du Callovo-Oxfordien, identifiée pour étudier la faisabilité d'une installation de stockage des déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), a été atteinte en 2004. Les travaux scientifiques et techniques menés dans ce Laboratoire souterrain et dans des laboratoires de surface, ainsi que les études de conception au stade d'avant-projet, confirment la faisabilité et la sûreté d'un centre de stockage dans cette roche.

Des expériences complémentaires, menées ou préparées actuellement au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, ont pour objectif de tester des dispositifs pour le centre de stockage Cigéo dans des conditions aussi proches que possible de la réalité industrielle (alvéole de stockage, remblais, scellements…). Néanmoins, ces essais sont contraints par les dimensions et les conditions opérationnelles du Laboratoire. Celui-ci aura bientôt atteint des limites en termes de dimensions des ouvrages et équipements testés et de représentativité des conditions de stockage. De plus, il n'est pas conçu pour mener des essais avec des colis de déchets radioactifs.

Une alternative, pour progresser au-delà de ce que permettent les capacités techniques du Laboratoire souterrain, consisterait en la création d'un nouveau laboratoire ou d'une installation pilote dont on interdirait qu'elle puisse ensuite être transformée en centre de stockage. Pour y réaliser des essais complètement représentatifs, cette installation devrait néanmoins posséder des équipements techniques comparables, en taille et en conception, à ceux prévus pour le centre de stockage Cigéo (en surface et en souterrain). Elle devrait pouvoir faire des essais avec des colis de déchets radioactifs pour éprouver les procédés en situation réelle (mise en hotte, funiculaire, alvéoles de vraies dimensions). Une telle installation représenterait un investissement financier important qui serait à renouveler si ses résultats confirmaient la pertinence du stockage. De plus, cette alternative pose une question de localisation. Si, pour être représentatif, ce nouveau laboratoire était implanté à l'intérieur de la zone prévue pour le stockage, il en gèlerait une partie pour la réalisation ultérieure du centre de stockage Cigéo. Dans le cas d'une implantation plus éloignée, elle devrait faire l'objet d'un nouveau travail avec le territoire pour son identification au sein de la zone de transposition du Laboratoire souterrain et sa représentativité serait toujours questionnable.

L'intégration de la phase industrielle pilote (Phipil) dans le projet de centre de stockage Cigéo propose une meilleure utilisation des ressources et parvient à satisfaire les mêmes objectifs (cf. Chapitre 5.2 du présent document). En effet, la première étape de développement du centre de stockage Cigéo correspond à une phase d'acquisition de connaissance, de test de l'ensemble des procédés et équipements et de démarrage progressif du fonctionnement. Cette phase industrielle pilote (PHIPIL) permettra de *« conforter le caractère réversible et la démonstration de sûreté de l'installation »,* comme le prévoit la loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 (12) précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde.

La Phipil permettra ainsi, progressivement, en menant des essais à taille et en environnement réels, y compris avec des colis de déchets radioactifs, de confirmer les données et les connaissances utilisées pour la conception du stockage et pour sa démonstration de sûreté.

La Phipil sera aussi l'occasion de tester et de roder, avec l'ensemble des parties prenantes et le public, le schéma de gouvernance du centre de stockage Cigéo qui sera mis en place après concertation avec les parties prenantes et le public.

La phase industrielle pilote comporte deux principales étapes clefs :

- la mise en service du centre de stockage qui correspond à la réception de premiers colis de déchets radioactifs ;
- la loi qui fixera les conditions de poursuite éventuelle du stockage.

L'Andra propose donc que la phase industrielle pilote comporte deux parties.

Pendant la première partie de la Phipil, sont réalisés les travaux de construction des ouvrages de l'installation nucléaire de base (INB) du centre de stockage Cigéo visant sa mise en service. Des essais en « inactif » (c'est-à-dire avec des maquettes de même forme et de même masse que les colis de déchets, mais sans radioactivité) sont menés dans le centre de stockage Cigéo. En fonction de l'avancée des travaux, cette première partie de la phase industrielle pilote, en « inactif », pourrait durer de 10 à 15 ans. Si le retour d'expérience de la construction ou si les essais ne sont pas concluants, le centre de stockage ne sera tout simplement pas mis en service. Aucun colis ne sera reçu et stocké. Des décisions de réorientation technique seront prises, voire un changement de la stratégie de gestion prévue pour les colis de déchets HA et MA-VL.

Si les travaux et les essais sont concluants, le centre de stockage sera mis en service. La seconde partie de la phase industrielle pilote pourra débuter. Des essais « actifs », avec des colis de déchets, seront menés. Dans la même logique, si cette seconde phase d'essais est concluante, de premières opérations de stockage seront engagées. La phase industrielle pilote pourra alors se poursuivre pendant quelques années permettant d'acquérir un retour d'expérience sur le fonctionnement du centre de stockage, sur son évolution, sa surveillance, ses impacts environnementaux, sa sûreté (inspections, modifications, événements et éventuels incidents) et sa réversibilité. Cette seconde partie de la phase industrielle pilote, en « actif », pourrait durer entre 5 à 10 ans.

Cette proposition sera soumise à concertation et pourra naturellement être modifiée sur la base des échanges avec les parties prenantes et le public.

Pour décider des conditions de poursuite éventuelle du stockage, le Parlement disposera d'un retour d'expérience important incluant l'ensemble des aspects de la technique et de la gouvernance du centre de stockage Cigéo.

La loi du 25 juillet 2016 dispose que tous les colis de déchets doivent rester aisément récupérables durant la phase industrielle pilote. Ainsi, si les premières années de fonctionnement pour le stockage des colis venaient à mettre en cause les principes et le fonctionnement prévu du stockage, les colis déjà stockés seront simplement retirés du stockage et réexpédiés vers les sites des producteurs.

Ainsi, le projet de centre de stockage Cigéo permet de progresser sur la voie du stockage géologique au-delà de ce que permet le Laboratoire souterrain, sans pour autant la rendre intangible.

7.3 Le risque de la perte de compétence

Compte tenu des déchets HA et MA-VL déjà produits, la question de leur gestion durable est indépendante du fait que leur production perdure ou cesse à l'avenir. Elle n'est pas liée aux décisions concernant l'avenir des programmes militaires ou de la filière électronucléaire. La mise en œuvre d'un mode de gestion durable est d'ores et déjà nécessaire.

Poursuivre la progression de la voie du stockage géologique permet de bénéficier des acquis, savoir-faire et compétences actuels sur ce sujet et plus généralement de mobiliser les ressources disponibles de l'industrie nucléaire en termes de moyens techniques et humains, développés et encadrés par des politiques nationales sur plusieurs décennies.

À contrario, repousser la création du centre de stockage Cigéo, ou y renoncer, engendrerait des risques de perte de savoir-faire et de manques de ressources et de compétences le jour où un nouveau programme de gestion durable des déchets devra être relancé.

Comparativement aux années de lancement des programmes électronucléaires et militaires, l'avenir de l'industrie nucléaire est probablement plus incertain de nos jours. Aujourd'hui, plus encore qu'en 2006 (au moment du vote de la loi ayant engagé le projet industriel de centre de stockage pour les déchets HA et MA-VL), l'avenir de la filière nucléaire n'est pas tracé avec certitude. Celle-ci ne représente en effet qu'une option parmi d'autres dans le « mix » énergétique. Or, dans l'hypothèse où la filière nucléaire aurait moins ou n'aurait plus d'avenir, il est risqué de considérer que la société soit capable de maintenir durablement les ressources et les compétences très spécialisées nécessaires au développement d'un programme global de gestion de ces déchets. Il est également questionnable que des recherches nucléaires soient poursuivies durablement et que des investissements massifs soient réalisés dans l'unique objectif de gérer des déchets légués par des générations précédentes. Des besoins d'investissements sur d'autres enjeux apparaissent progressivement (le climat, les ressources en eau…) qui constitueront certainement les enjeux de recherches de demain et concentreront les besoins en ressources. Le risque que des aléas de toute nature frappent et fragilisent nos sociétés augmente pendant une longue période d'attente ou de report de l'engagement d'une voie de gestion durable. Inversement, les moyens et les compétences disponibles actuellement constituent un contexte favorable pour avancer.

La prudence invite donc à ne pas parier uniquement sur les développements futurs de la recherche, de l'industrie ou des sciences nucléaires pour fournir, dans un avenir nécessairement lointain, les compétences et les ressources pour leur reprise et leur hypothétique élimination complète par des techniques encore non maîtrisées scientifiquement et industriellement ou par une filière non encore imaginée à ce jour.

Par ailleurs, la surveillance et le renouvellement des entreposages d'attente nécessaires à la conservation des déchets radioactifs, dans l'intervalle, requièrent également le maintien de moyens et de compétences spécialisés.

Corollairement, il ne serait pas prudent de donner un coup d'arrêt au développement du stockage, mode de gestion dont la faisabilité et la capacité de mise en œuvre sont les plus avancés.

7.4 La construction et l'exploitation du centre de stockage Cigéo ne s'oppose pas aux autres voies de gestion

Aujourd'hui, les déchets HA et MA-VL sont principalement entreposés sur le site Orano de La Hague et sur les centres CEA de Marcoule et Cadarache. La mise en service de l'installation d'entreposage ICEDA sur le site EDF de Bugey a été autorisée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) le 28 juillet 2020 (décision ASN 2020-DC-0691). Cette étape d'entreposage est nécessaire en attente de la disponibilité du stockage (cf. Chapitre 2.7.7 du présent document).

Pour autant, la création du centre de stockage Cigéo, si elle est autorisée, ne supprime pas le besoin d'entreposages pendant toute la durée séculaire de son fonctionnement. En effet, les entreposages permettent de préparer, d'organiser et de réguler les flux d'expédition des colis depuis les installations des producteurs vers le centre de stockage Cigéo. Les colis ne sont expédiés que lorsqu'il a été montré qu'ils respectent les spécifications d'acceptation du centre de stockage Cigéo et lorsque l'Andra dispose de la capacité à les stocker[149].

Pour les déchets MA-VL, le transfert depuis les entreposages vers l'installation de stockage permettra, dès la première moitié du siècle de réduire les charges de gestion en surface. Si les déchets MA-VL recèlent une part relativement faible de la radioactivité totale des déchets les plus dangereux, ils en représentent le plus grand volume (le volume des déchets MA-VL est environ 7 fois celui des déchets HA).

Pour les déchets HA, la chaleur dégagée par la plupart d'entre eux impose un décalage de leur stockage dans le temps. Ils doivent encore majoritairement rester entreposés pendant plusieurs décennies, jusqu'à ce leur dégagement thermique résiduel soit compatible avec leur stockage. La phase industrielle pilote permettra de

[149] Le terme de « capacité » désigne ici le volume de stockage (la place) disponible dans les alvéoles de stockage pour les colis expédiés.

stocker de premiers déchets HA0 (ceux qui dégagent le moins de chaleur) pour vérifier *in situ*, à l'échelle réelle, leur comportement en stockage et les évolutions liées à l'échauffement transitoire de la roche et des alvéoles. Ces données contribueront à conforter la démonstration de la sûreté du stockage des déchets HA quand ils auront suffisamment refroidi pour pouvoir être stockés, c'est-à-dire à l'horizon 2080. Ce n'est qu'à cet horizon que leur transfert depuis les entreposages vers l'installation de stockage permettra de réduire les charges de leur gestion en surface.

Les entreposages de déchets vont donc perdurer encore au moins un siècle et la décision d'engager ou non Cigéo ne se pose donc pas en termes de choix immédiat entre le stockage ou la recherche d'autres voies de gestion. Tous les modes de gestion envisagés pour les déchets HA et MA-VL, y compris le centre de stockage Cigéo, impliquent des périodes de fonctionnement inhabituellement longues, supérieures au siècle. Pendant de telles durées, de nouvelles connaissances et données viendront nécessairement enrichir la palette des solutions techniques disponibles. Si des techniques nouvelles présentant un avantage décisif par rapport au stockage viennent à apparaître, elles seront naturellement utilisées pour la gestion des déchets radioactifs les plus dangereux. La récupérabilité offre aux générations futures la possibilité de changer de voie de gestion pour tout ou partie des colis stockés, si une voie plus avantageuse, y compris en termes de sûreté à long terme, venait à être découverte.

7.5 Le projet de centre de stockage Cigéo ne préempte pas les décisions des générations futures

Les installations du centre de stockage Cigéo se développent et stockent des colis de déchets de manière progressive, par étapes successives, sur une durée d'environ 120 ans. Cette progressivité laissera toute sa place à la prise en compte d'études et de recherches sur d'autres voies, tout comme aux progrès technologiques susceptibles de s'appliquer, y compris aux installations du centre de stockage Cigéo.

Compte tenu de la durée d'ordre séculaire prévue pour le fonctionnement du centre de stockage Cigéo, environ cinq générations successives devraient l'exploiter. Il est de la responsabilité de notre génération, qui bénéficie de l'électricité d'origine nucléaire, de concevoir et de léguer aux générations suivantes une installation sûre et qu'elles seront en mesure de modifier et d'améliorer en fonction de leurs propres objectifs et contraintes, voire de la remplacer par d'autres installations de gestion des déchets, si d'autres choix venaient à apparaître, notamment en lien avec les progrès techniques. Notre génération a donc le devoir de ne pas enfermer les générations futures dans des choix faits au lancement du projet. C'est dans ce sens que l'Andra développe un projet de stockage réversible.

La réversibilité du stockage est définie à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement. Celui-ci précise que « la réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion. La réversibilité est mise en œuvre par la progressivité de la construction, l'adaptabilité de la conception et la flexibilité d'exploitation du stockage permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets (suite notamment à une évolution de la politique énergétique). Elle inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée cohérente avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage. »

Longtemps associée uniquement aux aspects techniques permettant sa mise en œuvre pratique dans le stockage, la réversibilité est désormais mieux comprise comme une façon d'aborder les décisions qui jalonnent le stockage et la gestion des déchets qui lui sont destinés.

Les résultats de la phase industrielle pilote feront l'objet d'un rapport de l'Andra. L'instruction de ce rapport fera l'objet d'un processus décisionnel aboutissant à une loi et à la poursuite éventuelle du projet.

Si le Parlement décide de poursuivre le stockage géologique des déchets dans le centre de stockage Cigéo, ses infrastructures pourront être progressivement étendues pour accueillir de nouveaux colis de déchets tout en bénéficiant des améliorations issues du retour d'expérience de l'exploitation et du développement technologique prévisible.

Les extensions successives seront mises à profit pour adapter Cigéo aux décisions de la politique nationale en matière de gestion des déchets. Chacune fera donc l'objet d'une autorisation particulière. Ainsi, la vie du projet de centre de stockage Cigéo sera jalonnée de décisions techniques et stratégiques permettant de réinterroger le bien-fondé des décisions précédentes et éventuellement de les faire évoluer dans le respect du principe de réversibilité. Parmi les grandes décisions jalonnant le projet après la Phipil, on peut citer les décisions d'étendre l'installation souterraine par tranches pour y poursuivre le stockage des déchets MA-VL, la préparation puis la décision d'y stocker des colis HA, l'adaptation de Cigéo à des décisions de politique énergétique nationale (par exemple le stockage de combustibles usés), l'obturation de parties du stockage et sa fermeture définitive. De plus, des rendez-vous périodiques pour des revues de réversibilité, des réexamens de sûreté du centre de stockage et des révisions de son plan directeur pour l'exploitation (PDE), prévus par la réglementation, seront des opportunités périodiques complémentaires d'analyse collective du fonctionnement de Cigéo et d'orientation du projet dans le cadre de la gouvernance.

Avec son démarrage par une phase pilote et le jalonnement de son développement par grandes étapes, le projet global Cigéo s'inscrit dans la continuité du processus par étapes engagé en 1991 sur la gestion à long terme des déchets, dans lequel chaque étape donne lieu à des évaluations indépendantes avant de décider de passer à l'étape suivante, sous le contrôle du Parlement. L'entreposage actuel des déchets MA-VL et HA dans des installations sûres évite de contraindre et de mettre sous pression le processus décisionnel progressif.

Ainsi, l'engagement du projet de centre de stockage Cigéo ne constitue donc pas un « blanc-seing » pour le choix de ce mode de gestion. De nombreux rendez-vous de gouvernance jalonneront le projet au fil desquels il pourra être accéléré, temporisé, réorienté, voire arrêté.

La gestion à long terme des déchets MA-VL et HA a pour objectif de réduire la charge des déchets et les risques transmis aux générations futures. Mettre en œuvre aujourd'hui le projet de centre de stockage Cigéo permet d'assurer cette responsabilité intergénérationnelle en avançant prudemment vers une option de gestion des déchets durable et accessible dès aujourd'hui. La temporalité de la mise en œuvre de ce projet, sur plus d'un siècle, et sa réversibilité, voulue par la loi, laissent ouverts les droits et le libre-arbitre des générations successives.

ANNEXES

Annexe 1 Les différentes catégories de déchets radioactifs et leur mode de gestion

Conformément à la classification française présentée dans le cadre du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (95), sont différentiés :

- **les déchets à vie très courte** (inférieure à 100 jours) qui correspondent principalement à des radionucléides utilisés pour les besoins de diagnostic en médecine. Leur radioactivité atteint très rapidement des niveaux très faibles.
- **les déchets de très faible activité** (TFA) qui sont majoritairement issus du fonctionnement, de la maintenance et du démantèlement des centrales nucléaires, des installations du cycle du combustible et des centres de recherche. Le niveau d'activité de ces déchets est en général inférieur à 100 becquerels par gramme ($Bq.g^{-1}$).
- **les déchets de faible activité et moyenne activité à vie courte**, majoritairement inférieure à 31 ans (FMA-VC) qui sont essentiellement issus du fonctionnement, de la maintenance et du démantèlement des centrales nucléaires, des installations du cycle du combustible, des centres de recherche et pour une faible partie des activités de recherche médicale. L'activité de ces déchets se situe entre quelques centaines et un million de $Bq.g^{-1}$.
- **les déchets de faible activité à vie longue** (FA-VL) qui sont des déchets de graphite provenant du démantèlement des réacteurs de la filière uranium naturel graphite gaz (UNGG) et des déchets radifères. Cette catégorie FA-VL comprend également d'autres types de déchets tels que d'anciens objets radioactifs (montres au radium par exemple), paratonnerres, détecteurs incendie... ainsi que des déchets contenant de l'uranium et du plutonium issus des programmes de recherche et des activités liées à la Défense nationale. Leur activité est comprise entre quelques dizaines et quelques milliers de $Bq.g^{-1}$.
- **les déchets de moyenne activité à vie longue** (MA-VL) qui sont constitués des éléments de structure des combustibles usés et des déchets liés au fonctionnement, et au démantèlement des installations nucléaires. L'activité de ces déchets est de l'ordre d'un million à un milliard de $Bq.g^{-1}$.
- **les déchets de haute activité** (HA), principalement constitués des colis de déchets vitrifiés qui sont issus des combustibles usés après retraitement. Ces colis de déchets concentrent la grande majorité de la radioactivité contenue dans l'ensemble des déchets, le niveau d'activité de ces déchets est de l'ordre de plusieurs milliards de $Bq.g^{-1}$ au moment de leur production et conditionnement.

Les déchets à vie très courte (inférieure à 100 jours) sont généralement gérés par décroissance, au sein des hôpitaux.

Les déchets de très faible activité et les déchets de faible et moyenne activité (TFA et FMA à vie courte sont pris en charge par l'Andra dans des centres de stockage de surface déjà existants.

Les déchets FA-VL sont entreposés de manière sûre dans les installations spécifiques en attendant la mise en œuvre d'une filière de gestion actuellement à étude.

Les déchets destinés au centre de stockage Cigéo correspondent, selon la classification française des déchets radioactifs, à des déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) et des déchets de haute activité (HA).

Annexe 2 Les déchets de haute activité (HA) et moyenne activité vie longue (MA-VL) : description synthétique

Les déchets déjà produits sont entreposés sur les sites des producteurs.

Colis de déchets de haute activité (HA)

Les combustibles nucléaires utilisés dans les réacteurs d'EDF sont constitués d'une part de pastilles de matière fissile dans lesquelles s'effectue la réaction nucléaire et de structures métalliques renfermant ces pastilles et permettant la manipulation des combustibles.

Les colis de déchets de haute activité correspondent essentiellement aux déchets vitrifiés issus du retraitement des combustibles usés. Il s'agit de produits de fission[150] et d'actinides mineurs[151] formés par réaction nucléaire au sein du combustible lors de son utilisation en réacteur. Ils ont été séparés de l'uranium et du plutonium, matières radioactives valorisables, lors du retraitement. Ils sont calcinés et incorporés dans une matrice de verre. Le verre ainsi élaboré est coulé en température dans un conteneur en acier inoxydable.

D'autres colis de déchets de haute activité, en quantité très limitée, contiennent notamment des déchets technologiques produits lors du fonctionnement des ateliers de vitrification ou certaines sources scellées usagées du CEA.

- **Déchets vitrifiés**

  La vitrification a été développée dans plusieurs installations pilotes exploitées par le CEA, puis mise en œuvre industriellement dans trois ateliers : l'atelier de vitrification de Marcoule, démarré en 1978 et les ateliers de vitrification R7 et T7 de La Hague, démarrés respectivement en 1989 et 1992.

  ✓ **Colis de déchets vitrifiés entreposés par Orano à La Hague :**

  Dans ces colis de déchets vitrifiés, sont conditionnées les solutions de produits de fission et d'actinides mineurs issus du retraitement des combustibles usés, calcinées et incorporées dans une matrice de verre, dans les ateliers de vitrification de La Hague.

  Les colis de déchets vitrifiés proviennent principalement du retraitement des combustibles usés d'EDF, mais également du retraitement de combustibles usés du CEA.

  Le conteneur utilisé pour ces colis est un conteneur en acier inoxydable.

  ✓ **Colis de déchets vitrifiés entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule** :

  Ces colis de déchets résultent de la vitrification des produits de fission et des actinides mineurs issus de la mise au point et du développement du procédé de vitrification dans un atelier pilote (production entre 1969 et 1980), ainsi que du retraitement des combustibles usés des réacteurs nucléaires à l'uranium naturel graphite gaz (UNGG). Ces colis ont été produits dans l'atelier de vitrification de Marcoule entre 1978 et 2008.

  Le conteneur utilisé pour cette famille est un conteneur en acier inoxydable.

  ✓ **Colis de déchets vitrifiés d'Atalante entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule :**

  Les recherches menées dans Atalante[152] sur des combustibles génèrent des effluents radioactifs qui seront vitrifiés à l'horizon 2030 et mis en conteneur en acier inoxydable.

- **Autres déchets HA (sources scellées usagées, déchets technologiques…)**

  ✓ **Colis de déchets technologiques issus des ateliers de vitrification entreposés par Orano sur le site de La Hague** :

  Dans les premières années de fonctionnement du premier atelier de vitrification de l'usine de retraitement de la Hague, des déchets technologiques de fonctionnement ont été conditionnés dans des conteneurs standards en acier inoxydable de géométrie extérieure identiques à ceux utilisés pour les colis de déchets vitrifiés de La Hague. Ce même conditionnement est envisagé pour des paniers contenant des déchets technologiques tels que des morceaux de verre et des découpes d'équipements des ateliers de vitrification.

  ✓ **Capsules de titanate de strontium entreposées par Orano sur le site de La Hague :**

  L'atelier pilote pour la fabrication de sources scellées de césium ^{137}Cs et de ^{90}Sr était situé à La Hague. Le strontium arrivait conditionné dans des étuis métalliques (capsules) et subissait des opérations de fractionnement, compactage et conditionnement. La production a été arrêtée à partir de 1973. Quinze capsules de titanate de strontium sont actuellement entreposées à La Hague.

  Le procédé actuellement envisagé pour le conditionnement de ces capsules consisterait à les bloquer dans un conteneur standard en acier inoxydable : Cinq capsules seraient placées dans une galette métallique centrale, deux galettes en verre massif, une au-dessus et une en dessous, assurant le remplissage du colis.

  ✓ **Sources scellées usagées (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{238}Pu) entreposées par le CEA :**

  Il s'agit de sources de forte activité au césium et au strontium, dont certaines proviennent de générateurs isotopiques, ainsi que d'un lot de sources de stimulateurs cardiaques (plutonium 238). Ces sources seront conditionnées dans un colis en acier inoxydable.

Colis de déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL)

Les déchets MA-VL sont essentiellement constitués des éléments de structure des combustibles usés et des déchets liés au fonctionnement et au démantèlement des installations nucléaires. Lorsqu'ils sont produits, ces déchets radioactifs se trouvent sous forme solide ou liquide. Pour pouvoir les manipuler, les entreposer, les transporter et les stocker, ils sont conditionnés sous forme de colis de déchets. Depuis une vingtaine d'années, cette mise en colis est systématiquement réalisée au fur et à mesure de la production des déchets. Auparavant, les déchets étaient entreposés sous forme brute en attente d'un procédé de conditionnement. Ces déchets, que l'on qualifie « d'anciens », doivent faire l'objet d'opérations de reprise et de conditionnement pour être mis sous forme de colis. Certaines de ces opérations sont déjà en cours.

Pour constituer des colis de déchets, trois méthodes sont couramment utilisées :

1. Certains déchets solides sont directement placés dans un conteneur et immobilisés par un liant hydraulique qui est coulé dans ce conteneur. Ce procédé, qualifié d'enrobage, est très largement utilisé pour les déchets solides notamment les déchets métalliques issus du fonctionnement ou du démantèlement des installations nucléaires.
2. D'autres déchets présentent une géométrie telle que les compacter par une presse permet d'en réduire significativement le volume (gaines de combustibles ou tubes par exemple). Les blocs ainsi obtenus sont alors placés dans un conteneur.
3. Les déchets liquides, quant à eux, doivent être traités puis mélangés à un matériau pour les solidifier avant d'être introduits dans un conteneur. Par le passé, c'est le bitume qui était le matériau le plus largement employé pour le conditionnement de ces déchets des différents sites. Il est de plus en plus remplacé par du ciment (cimentation) ou du verre (vitrification). La vitrification est notamment mise en œuvre pour conditionner les effluents produits lors du rinçage des installations avant démantèlement.

Les conteneurs employés pour le conditionnement des déchets MA-VL sont de natures et gabarits variés. Ils peuvent être en acier non allié, en acier inoxydable, en béton armé ou fibré. Le plus petit colis a un volume de 180 litres et est couramment utilisé sur le site de La Hague (conteneur standard de déchets). Le colis le plus imposant à un volume de 5 m^3 et contient des déchets anciens entreposés sur le centre de Cadarache.

[150] Les produits de fission sont des atomes « légers » formés en réacteur nucléaire par la fission (scission) d'atomes lourds (uranium et plutonium).

[151] Les actinides sont des métaux lourds constituant une famille du tableau périodique des éléments de Mendeleïev. Ils comportent 15 éléments allant de l'actinium (numéro atomique 89) au lawrencium (n° 103). Les combustibles nucléaires irradiés d'EDF comportent de l'uranium, des actinides de masses atomiques supérieures à celle de l'uranium (dits transuraniens) et des produits de fission. Parmi les actinides, les actinides dits « mineurs » correspondent à l'américium, au curium et au neptunium.

[152] « Atelier Alpha et Laboratoire pour les Analyses de Transuraniens et Études de retraitement ».

- **Déchets de structure issus du retraitement des combustibles usés**

  Avant de pouvoir retraiter les combustibles usés pour en extraire la part valorisable, le combustible proprement dit, est séparé des structures métalliques (coques et embouts) qui l'entourent. Ces structures métalliques deviennent alors des déchets.

  - ✓ **Colis de coques et embouts cimentés en fûts métalliques entreposés par Orano sur le site de La Hague :**

    Entre 1990 et 1995, les déchets de structure des combustibles étaient placés dans des fûts en acier inoxydable et bloqués par une matrice cimentaire. Une faible part de ces colis (environ 10 %) contient, en outre, des filtres chargés de fines (petites particules) d'alliage de zirconium (matériau de constitution des structures de combustibles) ou des déchets de maintenance provenant du procédé de retraitement des combustibles.

  - ✓ **Colis de déchets compactés entreposés par Orano sur le site de La Hague :**

    Depuis 2002, les déchets de structure des combustibles usés de réacteurs sont compactés et conditionnés en conteneur standard de déchets compactés en acier inoxydable. Un faible nombre de ces colis contient également des déchets solides métalliques de fonctionnement compactés.

  - ✓ **Déchets de structure métallique entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule :**

    Des déchets de structure métalliques ont été générés par le retraitement de combustibles expérimentaux sur le site de Marcoule. La production de colis pour ces déchets n'a pas commencé. Ces déchets de structure métalliques se présentent actuellement en vrac ou conditionnés de manière provisoire dans des conteneurs. Ces déchets seront repris en l'état, selon l'hypothèse actuellement retenue par le CEA, placés en conteneurs métalliques. Les déchets pourront être bloqués dans une matrice avant expédition sur le centre de stockage Cigéo.

  - ✓ **Déchets de structure magnésiens entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule :**

    Les déchets de structure magnésiens sont constitués des gaines et des bouchons (ou queusots) des combustibles des réacteurs de première génération qui ont été retraités sur le centre de Marcoule. La production de ces colis n'a pas commencé. Ces déchets se présentent sous forme broyée, compactée ou en vrac.

- **Déchets de fonctionnement et de démantèlement des réacteurs nucléaires de production d'électricité**

  - ✓ **Déchets activés des réacteurs EDF hors déchets sodés entreposés par EDF sur les centrales :**

    Les déchets activés correspondent aux divers composants qui ont été exposés au flux de neutrons lors de leur séjour en réacteur. Il s'agit de déchets activés provenant des réacteurs à eau pressurisée (REP) du parc actuel, de déchets activés de déconstruction des réacteurs de première génération (réacteurs UNGG de Bugey, Saint-Laurent, Chinon, réacteur EL4 de Brennilis, réacteur Chooz A) ainsi que des déchets de déconstruction non sodés du réacteur à neutrons rapides Superphénix.

    Les déchets déjà produits sont actuellement entreposés dans les piscines des centrales.

    La production des colis de déchets activés s'effectuera sur le site de Bugey. Les déchets seront conditionnés dans des paniers déposés dans des conteneurs en béton et bloqués avec du ciment.

  - ✓ **Aiguilles des barres de commande des réacteurs à neutrons rapides (RNR) entreposées par EDF :**

    Les aiguilles de carbure de bore proviennent des assemblages de commande des réacteurs à neutrons rapides : Superphénix d'une part, Phénix et Rapsodie d'autre part. Ces aiguilles sont susceptibles de contenir du sodium résiduel qui n'aurait pas été éliminé lors des opérations de lavage des barres de commande. Une réflexion sur la problématique spécifique posée par ces déchets dans l'optique de leur prise en charge en stockage géologique profond Cigéo est en cours.

  - ✓ **Crayons sources primaires et secondaires des réacteurs à eau pressurisée (REP) et sources scellées usagées diverses entreposés par EDF :**

    Une petite quantité de déchets de fonctionnement des réacteurs à eau pressurisée (REP) est constituée par des grappes sources, qui contiennent quelques crayons dans lesquels sont introduits des produits radioactifs.

    Le mode de conditionnement des crayons sources n'est pas défini au stade actuel. L'option de référence, retenue pour le dimensionnement de Cigéo, est une mise en conteneur métallique après découpe et tri des crayons.

  - ✓ **Déchets de l'Atelier de Matériaux irradiés de Chinon entreposés par EDF sur le site de Chinon :**

    Il s'agit de déchets entreposés dans les puits de l'Atelier des Matériaux Irradiés sur le site EDF de Chinon. Ils proviennent principalement d'activités d'expertises. Ils se composent d'une grande diversité de déchets issus des filières REP et UNGG. L'hypothèse de conditionnement retenue est une mise en conteneur métallique.

  - ✓ **Déchets activés de déconstruction (DAD) des réacteurs à eau pressurisée (REP) :**

    Il s'agit de déchets qui seront produits lors du démantèlement des réacteurs à eau pressurisée (REP). Le scénario actuel retenu par EDF est un conditionnement dans des paniers déposés dans des conteneurs en béton et bloqués avec du ciment. Sont concernés tous les déchets MA-VL liés à la déconstruction des réacteurs en service, de l'EPR de Flamanville et les déchets de la BCOT (Base Chaude Opérationnelle du Tricastin). Ces déchets seront conditionnés dans l'installation ICEDA sous réserve d'autorisations complémentaires.

- **Déchets de fonctionnement et de démantèlement des usines du cycle du combustible**

  - ✓ **Colis de déchets solides de fonctionnement cimentés produits avant 1994 entreposés par Orano sur le site de La Hague :**

    Ces colis contiennent des déchets générés entre 1990 et mars 1994 dans les ateliers du site de la Hague, lors du fonctionnement, d'opérations de maintenance ou de démantèlements (outillages, équipements métalliques...) conditionnés dans des conteneurs en amiante-ciment.

  - ✓ **Colis de déchets solides de fonctionnement cimentés produits depuis 1994 entreposés par Orano sur le site de La Hague :**

    Depuis mars 1994, certains déchets générés lors du fonctionnement, d'opérations de maintenance ou de démantèlements (outillages, équipements métalliques...) à La Hague sont conditionnés dans des conteneurs en béton-fibres en remplacement du conteneur précédemment utilisé.

  - ✓ **Déchets technologiques compactés d'Orano sur le site de La Hague :**

    Le procédé de compactage mis en œuvre à La Hague pour le conditionnement des déchets de structure de combustibles usés sera aussi utilisé dans les années à venir pour conditionner certains déchets de fonctionnement et de démantèlement Les déchets compactés seront conditionnés en fût en acier inoxydable.

  - ✓ **Déchets issus de l'atelier de fabrication de sources scellées, entreposés par Orano sur le site de La Hague :**

    L'atelier pilote pour la fabrication de sources scellées de césium 137 et de strontium 90 était situé à La Hague. Le césium était transporté depuis le CEA/Marcoule dans des colonnes d'élution sur un échangeur minéral puis élué, concentré et calciné. Quatre colonnes d'élution sont actuellement entreposées à La Hague, contenant l'échangeur minéral appelé Phomix. Le Phomix est contenu dans des réservoirs internes aux châteaux de transports constituant les colonnes d'élution.

    Le scénario actuellement étudié par Orano est le conditionnement du Phomix dans son château de transport.

  - ✓ **Déchets contaminés en émetteurs alpha conditionnés par incinération/vitrification entreposés par Orano sur le site de La Hague :**

    Ces déchets solides sont essentiellement des déchets contaminés par du plutonium lors des opérations de fabrication de combustibles MOX ou de retraitement de combustibles dans les usines de La Hague et des déchets issus des opérations préalables à la cessation définitive de fonctionnement et au démantèlement d'installations de la première usine de retraitement de La Hague. Il s'agit de déchets divers de natures métalliques (équipements mécaniques et électriques défectueux, organes mécaniques d'usure, outillages liés à la production ou à la maintenance, filtres) ou organiques (gants, plastiques...).

    Le conditionnement actuellement envisagé par Orano est un conditionnement basé sur un procédé d'incinération/fusion/vitrification.

  - ✓ **Colis de déchets vitrifiés : effluents de rinçage entreposés par Orano sur le site de La Hague :**

    Le conditionnement retenu pour certains effluents de moyenne activité produits lors des opérations de rinçage effectuées dans le cadre de la mise à l'arrêt définitif de la première usine de retraitement de la Hague est une vitrification et un conditionnement dans des conteneurs en acier inoxydable identiques à ceux utilisés pour les déchets vitrifiés de haute activité.

- **Colis d'enrobés bitumineux produits à partir d'effluents traités dans la Station de traitement des effluents n° 2 entreposés par Orano sur le site de La Hague :**

  Les effluents provenant du fonctionnement de la première usine de retraitement de La Hague entre 1966 et 1997 étaient traités par coprécipitation afin de fixer la radioactivité qu'ils contenaient puis entreposés sous forme de boues dans des silos de la station de traitement des effluents n° 2. Une partie des boues a été enrobée dans du bitume et conditionnée dans des fûts en acier inoxydable entre 2002 et 2007, lors de campagnes de reprise des boues, produisant 340 colis de boues bitumées.

- **Boues séchées et compactées entreposés par Orano sur le site de la Hague :**

  Le procédé actuellement retenu pour le conditionnement des boues encore entreposées dans les silos de la station de traitement des effluents n° 2 est le séchage avant compactage des boues sous forme de pastilles qui seront ensuite conditionnées dans des fûts en acier inoxydable.

- **Colis d'enrobés bitumineux produits à partir d'effluents traités dans la Station de traitement des effluents n° 3 d'Orano entreposés par Orano sur le site de La Hague :**

  Les effluents moyenne activité, issus des usines de retraitement de l'établissement de La Hague, sont enrobés dans une matrice bitumineuse dans la station de traitement d'effluents n° 3 (installation démarrée en 1989) et conditionnés en fûts en acier inoxydable.

- **Fines et résines d'Orano entreposées par Orano sur le site de La Hague :**

  Ces déchets sont actuellement entreposés en silo sur le site de la Hague. L'hypothèse actuellement retenue par Orano pour le conditionnement de ces déchets de procédé de faible granulométrie (fines de cisaillage, fines de clarification et résines) est une cimentation dans des fûts en acier inoxydable.

- **Colis de déchets solides de fonctionnement entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule :**

  Ces colis contiennent des déchets solides issus de la maintenance de l'installation de vitrification du centre de Marcoule produits depuis son démarrage en 1980. Ces déchets (morceaux de pots de fusion, résidus de verre, outillage en acier) sont conditionnés dans des conteneurs en acier inoxydable.

- **Déchets de procédé entreposés par le du CEA sur le centre de Marcoule**

  Des déchets de procédé d'origines diverses ont été générés lors du fonctionnement de l'usine de retraitement de Marcoule et d'opérations de mise à l'arrêt définitif et de démantèlement de cette usine : systèmes de filtration des eaux de piscines (résines échangeuses d'ions, zéolithes...), graphite pulvérulent provenant des combustibles des réacteurs de la filière Uranium Naturel-Graphite-Gaz (UNGG) et dépôts de fond de cuves.

  La définition de leur conditionnement et du matériau de blocage fait l'objet d'études au CEA.

- **Déchets de fonctionnement et de démantèlement des installations de recherche du CEA**
  - **Déchets technologiques métalliques entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule :**

    Ces déchets technologiques métalliques et organiques ont été produits entre 1960 et 1992 lors des phases de fonctionnement courantes des ateliers et d'opérations de maintenance (outillages, équipements métalliques) des installations de Marcoule. Ils sont actuellement entreposés sur le centre de Marcoule, et leur spectre radiologique est à dominante bêta-gamma. Le démantèlement d'installations de Marcoule (notamment des cuves de solutions de produits de fission) conduira également à la production de déchets technologiques métalliques. Le conditionnement retenu à ce stade par le CEA est une mise en conteneur en acier inoxydable, avec blocage des déchets au moyen d'un liant hydraulique.

  - **Déchets issus du cœur du réacteur Phénix entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule :**

    Les déchets du cœur du réacteur Phénix correspondent aux assemblages en acier entourant le cœur du réacteur, à une partie des protections neutroniques latérales, aux éléments qui supportent le cœur ainsi qu'aux capsules de cobalt insuffisamment irradiées pour être utilisées en tant que sources. Ces objets, qui sont irradiants, sont actuellement encore en place dans le cœur du réacteur Phénix. Ces déchets seront mis en conteneurs d'entreposage (sans blocage) puis entreposés. Le conditionnement des déchets en vue de leur stockage reste à définir.

  - **Colis vitrifiés d'effluents de rinçage des cuves de solutions de produits de fission entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule :**

    Les effluents produits lors des opérations d'assainissement de certaines installations de Marcoule ainsi que certains effluents provenant d'autres centres du CEA (Valduc, Fontenay-aux-Roses, Cadarache) ont été vitrifiés puis conditionnés dans des conteneurs en acier inoxydable.

  - **Déchets de structure et déchets de démantèlement des premières installations de retraitement de combustibles usagés entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule :**

    Les déchets de structure qui ont été produits entre 1974 et 1997 dans les installations de retraitement de combustibles usés du centre de Marcoule sont actuellement entreposés sur le centre. Les déchets de démantèlement de ces installations devraient être produits dans les prochaines années. Le conditionnement des déchets en vue de leur stockage reste à définir.

  - **Colis de sulfates de plomb radifères entreposés par le CEA sur le centre de Cadarache :**

    L'usine CEA du Bouchet (Essonne) a traité entre 1958 et 1970 du minerai importé, l'uranothorianite, pour en extraire de l'uranium et du thorium. Elle a produit des résidus radioactifs qui ont été conditionnés sur place en fûts métalliques puis ont subi des reconditionnements successifs. Actuellement, ils sont entreposés à Cadarache dans des caissons en béton de 5 m^3 ou des conteneurs en béton de 500 litres.

    Pour leur stockage, la plus grande partie de ces déchets sera reprise et conditionnée en fûts en acier inoxydable. Les autres fûts resteront en caissons béton de 5 m^3.

  - **Colis de boues de filtration et de concentrats cimentés, en conteneurs béton entreposés par le CEA sur le centre de Cadarache :**

    Ces colis résultent d'une part du conditionnement des boues de filtration issues de la station de traitement des effluents des installations du CEA du centre de Cadarache, d'autre part du conditionnement des concentrats d'évaporation issus du traitement d'effluents liquides à la station de traitement des effluents du centre de Fontenay-aux-Roses. Ces boues ont été traitées chimiquement, mélangées à du ciment, puis conditionnées en fûts métalliques en acier non allié. Ces fûts ont ensuite été eux-mêmes placés en conteneurs béton. On distingue les fûts bloqués dans les conteneurs de 500 litres avec du béton et ceux placés dans les conteneurs sans blocage. Les concentrats ont été enrobés dans une matrice cimentaire et conditionnés en fûts en acier non allié. Ces fûts ont ensuite été bloqués dans des conteneurs en béton pour leur entreposage.

  - **Conteneur métallique 870 litres contenant un fût de 700 litres de concentrats cimentés entreposés par le CEA sur le centre de Cadarache :**

    Les concentrats d'évaporation sont principalement issus du traitement d'effluents liquides à la station de traitement des effluents liquides de Fontenay-aux-Roses et à la station de traitement des effluents de Cadarache. Ces concentrats ont été enrobés dans une matrice à base de ciment et conditionnés en fûts métalliques de 700 litres sur la station de traitement des effluents du CEA Cadarache entre 1972 et 1982. Les fûts de 700 litres ont été reconditionnés et bloqués au moyen d'un mortier dans des conteneurs en acier non allié de 870 litres.

  - **Colis de déchets solides cimentés (ciment ou ciment-bitume) en fûts métalliques entreposés par le CEA sur le centre de Cadarache :**

    Ces colis contiennent des déchets solides de fonctionnement, de maintenance ou de démantèlement d'installations du CEA, faiblement irradiants. Ces déchets sont constitués essentiellement de matières métalliques et plastiques. En fonction de leur provenance, ils sont susceptibles d'être fortement contaminés en alpha. Les déchets proviennent du centre de Cadarache et d'autres centres du CEA civil ou du CEA/DAM. Compactés ou non, ils sont bloqués dans des fûts métalliques en acier non allié de 870 litres. Les premières productions ont démarré en 1972. Durant la période 1972-1990, le matériau de blocage était à base de ciment et de bitume. Depuis 1990, ce matériau est à base de ciment.

  - **Colis de déchets solides de fonctionnement moyennement irradiants, en fûts de 500 litres entreposés par le CEA sur le centre de Cadarache :**

    Ces colis contiennent des déchets solides de fonctionnement, de maintenance, d'assainissement ou de démantèlement, moyennement irradiants provenant des différents centres du CEA (Fontenay-aux-Roses, Saclay, Cadarache, Valduc...). Ces déchets sont conditionnés en fût métallique de 500 litres ; ils sont essentiellement constitués de matières métalliques, cellulosiques ou plastiques, de caoutchouc, de plâtres, de peintures et de verreries.

    Les premières productions remontent à 1970. Durant la période 1970-1990, le matériau de blocage était à base d'un mélange de ciment et de bitume. Depuis 1990, ce matériau est uniquement constitué de ciment. Parallèlement, le fût a lui aussi évolué ; d'abord constitué d'acier non allié, il est en acier inoxydable depuis 1994.

- ✓ **Colis en béton de déchets solides cimentés (ciment ou ciment-bitume) entreposés par le CEA sur le centre de Cadarache :**

  Ces colis en béton (coques) contiennent des déchets de maintenance ou de démantèlement d'anciennes installations bloquées dans un matériau à base de ciment ou d'un mélange ciment-bitume) ou des boues de filtration cimentées introduits dans des conteneurs en béton.

- ✓ **Colis de boues et concentrats cimentés en fûts métalliques entreposés par le CEA sur le centre de Valduc :**

  Ces colis résultent du conditionnement des boues et des concentrats produits à la station de traitement des effluents de Valduc depuis 1984. Ces déchets ont été enrobés dans un matériau à base de ciment et conditionnés en fûts de 200 litres en acier inoxydable et en acier non allié. Cette production est terminée.

- ✓ **Effluents radioactifs issus du recyclage du Pu entreposés par le CEA sur le centre de Valduc :**

  Le traitement de résidus de production contenant du plutonium produit des effluents contenant de l'américium, du plutonium et de l'uranium. Ces effluents sont actuellement entreposés sur le centre de Valduc. L'hypothèse retenue pour leur conditionnement est une vitrification dans une installation à construire sur le centre de Valduc puis un conditionnement dans un conteneur standard en acier inoxydable du type de ceux utilisés sur le site de La Hague.

- ✓ **Colis « blocs sources » entreposés par le CEA sur le centre de Cadarache :**

  Ces colis sont constitués à partir de sources scellées usagées (solides, liquides ou gazeuses) qui ont été collectées auprès des petits producteurs de déchets (hôpitaux, industries agro-alimentaires, papeteries, industries pétrochimiques...) et qui contiennent des substances radioactives de natures, d'activités et de périodes très diverses. Ces sources ont été livrées au centre de stockage de la Manche entre les années 1972 et 1985 et y ont été conditionnées en conteneurs en béton. En 1994, avant la fermeture de ce centre de stockage, ces colis, qui ne satisfaisaient pas aux spécifications pour y être stockés, ont été transférés au centre CEA de Cadarache pour entreposage. Avant leur transfert, ces colis en béton ont été reconditionnés en conteneurs en acier non allié.

- ✓ **Colis d'enrobés bitumineux produits depuis janvier 1995 entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule :**

  Le procédé de traitement de la station de traitement des effluents liquides de Marcoule consiste à bitumer les effluents. Des colis de boues bitumées sont produits depuis 1995. Une partie de ces colis est conditionnée dans des fûts en acier non allié, l'autre (depuis 1996) dans des fûts en acier inoxydable. Lors des opérations de reprise, l'ensemble de ces colis seront placés dans des surfûts en acier inoxydables de 380 litres. Le procédé de traitement des effluents par bitumage va être remplacé par un traitement par cimentation

- ✓ **Colis d'enrobés bitumineux produits avant janvier 1995 entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule :**

  La présente famille regroupe l'ensemble des colis de boues bitumées produits à la station de traitement des effluents de Marcoule entre 1966 et 1995. Ces colis sont conditionnés dans des fûts en acier non allié. Lors des opérations de reprise, l'ensemble de ces colis seront placés dans des sur fûts en acier inoxydables de 380 litres.

- ✓ **Colis de déchets alpha entreposés par le CEA sur le centre de Marcoule**

  Les colis contiennent des déchets technologiques solides produits par la première installation de retraitement de combustibles et contaminés en émetteurs alpha purs. Les déchets ont été vinylés sous double enveloppe, conditionnés dans des fûts de 100 litres ou de 118 litres puis compactés sous la forme de galettes. Ces galettes sont conditionnées dans des fûts en acier noir ou acier inoxydable de 200 litres et bloquées par du gravier et immobilisées par un coulis de mortier. Il est prévu de placer ces fûts de 200 litres, de façon réversible, dans des coques béton de 500 litres.

- ✓ **Déchets divers de fonctionnement et de démantèlement des installations du CEA entreposés sur les installations du CEA**

  Il s'agit de déchets qui sont ou seront produits par le fonctionnement, l'assainissement et le démantèlement de certaines installations du CEA.

- ✓ **Sources radioactives fabriquées par le CEA**

  Il s'agit notamment de sources des générateurs isotopiques, diverses sources alpha et bêta/gamma de faible activité dont les sources de détecteurs ioniques de fumée, des sources neutroniques ainsi que des sources bêta/gamma de forte activité issues d'appareils dits « indémontables ». Ces sources sont actuellement entreposées dans différentes installations du CEA dans l'attente de leur conditionnement en fûts de 870 litres.

- **Déchets de fonctionnement, de maintenance et de démantèlement des nouvelles installations**

  - ✓ **Déchets du réacteur ITER (International thermonuclear experimental reactor) :**

    Les déchets d'ITER seront produits par le remplacement de composants lors du fonctionnement et par leur retrait après mise à l'arrêt définitif. On retient à ce stade l'hypothèse d'un conditionnement de ces déchets dans deux types de colis : pour moitié des déchets dans des fûts métalliques de 700 L et pour moitié dans un colis 1,43 m³ cubique optimisé. Ces déchets se caractérisent par leur contenu en Tritium et en produits d'activation et par les natures de certains des déchets.

- **Déchets provenant de l'industrie non électronucléaire :**

  - ✓ **Les déchets collectés ou à collecter par l'Andra comprennent notamment :**

    - des objets au Radium à usage médical (ORUM), constitués d'aiguilles et de tubes métalliques de très petites dimensions. Le Radium est incorporé sous une forme généralement soluble et pulvérulente (sulfates ou chlorures) ;
    - des sources de détecteurs ioniques ;
    - des sources de paratonnerres, à l'Américium ou au Radium ;
    - des déchets de la Défense : sources et objets contaminés au radium et au Tritium ;
    - des sources scellées usagées collectées par l'Andra, notamment dans le cadre de sa mission de service public.

    Ces déchets sont actuellement entreposés sur le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) de l'Andra à Morvilliers dans l'Aube.

    L'hypothèse de conditionnement retenue à ce stade pour ces déchets par l'Andra est un conteneur 870 litres.

    Par ailleurs, l'Andra pourrait être amenée à collecter les quelques fûts de silice contaminée par du Carbone 14 provenant de la société Isotopchim, fûts actuellement entreposés à Cadarache.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1-1 Isotopes de l'hydrogène 8
Figure 1-2 Illustration de différents types de rayonnements pouvant être émis par les radionucléides 8
Figure 1-3 Schéma de l'atténuation par des écrans de différents rayonnements ionisants 9
Figure 1-4 Schéma des voies d'exposition à la radioactivité 10
Figure 1-5 Valeurs moyennes d'expositions aux sources de radioactivité en France (4) 10
Figure 1-6 Répartition par secteur économique du volume de déchets (en équivalent conditionné) déjà stockés ou destinés à être pris en charge par l'Andra à fin 2017 (7) 12
Figure 1-7 Coulée de verre en fusion contenant des déchets de haute activité (Source Orano) 13
Figure 1-8 Exemples de colis de déchets - déchets de haute activité (HA) vitrifiés à gauche et déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) cimentés à droite 13
Figure 1-9 Filières de gestion développées pour les différentes catégories de déchets 14
Figure 1-10 Répartition des déchets radioactifs en France (7) 15
Figure 1-11 Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES) dans l'Aube - en exploitation 15
Figure 1-12 Centre de stockage de la Manche (CSM) – centre exploité de 1969 à 1994 – en phase de démantèlement et de fermeture 15
Figure 1-13 Centre de stockage de l'Aube (CSA) – en exploitation 16
Figure 2-1 Hall d'entreposage de l'atelier de vitrification R7 UP2 800 d'Orano à La Hague © Orano 22
Figure 2-2 Exemple d'installation d'entreposage de déchets MA-VL : installation STE3 du site Orano de La Hague (photo prise à travers un hublot de protection) ©Orano 23
Figure 2-3 Exemple d'installation d'entreposage de déchets HA : installation E-EV-SE du site Orano de La Hague (Source : Orano) 23
Figure 2-4 Transmutation par fission (à gauche) ou par capture de neutron (à droite) (26) 25
Figure 2-5 Fabrication par voie sèche (broyage, pressage, frittage et gainage) de combustibles d'études, cibles de transmutation et matrices de confinement. © A. Gonin/CEA 26
Figure 2-6 Principe de la réaction nucléaire en chaîne de fission de noyaux d' 235U et de la formation de 239Pu initiée par la capture d'un neutron par un atome d' 238U 26
Figure 2-7 Schéma de principe d'un système hybride associant un accélérateur de particules et un réacteur 27
Figure 2-8 Lanceur spatial de forte capacité 29
Figure 2-9 Campagne d'immersion de déchets radioactifs en mer dans les années 1960 29
Figure 2-10 Principes de deux concepts d'enfouissement de déchets dans les sédiments des fonds sous-marins (26) 30
Figure 2-11 Principe de stockage de déchets radioactifs dans une zone de subduction 30
Figure 2-12 Principe du stockage en forages profonds verticaux dans le socle cristallin 32
Figure 2-13 Principe du stockage en forages profonds verticaux dans le sel (34) 33
Figure 2-14 Principe du stockage en forages profonds dirigés en formation sédimentaire 33
Figure 2-15 Photographie du camion incendié au WIPP (37) 34
Figure 2-16 Galerie de sel : laboratoire souterrain d'Asse (Allemagne) 35
Figure 2-17 Exemple de roche granitique 36
Figure 2-18 Concept suédois KBS-3 de stockage de combustibles usés (Source : SKB) 37
Figure 2-19 Lieux d'installations scandinaves liées à la gestion des déchets de haute activité 37
Figure 2-20 Visite du laboratoire de recherche souterrain suédois à Aspö : démonstrateur de conteneur de stockage en cuivre dans une galerie souterraine 38
Figure 2-21 Gros plan sur une paroi de Callovo-Oxfordien dans une galerie du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne 38
Figure 2-22 Laboratoire souterrain du Mont-Terri : maquette d'une alvéole de stockage pour le combustible usé 39
Figure 2-23 Le site de Yucca Mountain dans le désert du Nevada 39
Figure 2-24 Dossier de demande d'autorisation d'installation et d'exploitation du Laboratoire de recherche souterrain de l'Est 50
Figure 2-25 La niche expérimentale à -445 m 51
Figure 2-26 Déploiement du Laboratoire de recherche souterrain entre 2004 et 2019 52
Figure 2-27 Carrefour GCR2/GVA2 52
Figure 2-28 Schéma de boulonnage 52
Figure 2-29 Répartition des accidents et des soins bénins survenus sur le carreau de fonçage et le laboratoire souterrain par famille de dangers sur les neuf années du chantier 3 54
Figure 2-30 Répartition des accidents et soins bénins survenus sur le carreau de fonçage et le laboratoire souterrain par famille de dangers sur les neuf années du chantier 3 par siège de lésions 54
Figure 2-31 Expérimentation de mesures potentiométriques dans le Callovo-Oxfordien (expérimentation TER) 55
Figure 2-32 Photographie d'une sur-carotte de roche en fin d'une expérience DIR (expérience DIR2002) et profils d'activités massiques en ^{134}Cs dans une sur-carotte de roche depuis la paroi de la chambre d'injection (expérience DIR1002) 56
Figure 2-33 Différentes techniques de creusement testées au Laboratoire souterrain : le brise roche hydraulique, la machine à attaque ponctuelle et le tunnelier à attaque ponctuelle 57
Figure 2-34 Les expérimentations menées dans le laboratoire souterrain de recherche depuis 2004 58
Figure 2-35 Forage de suivi géologique autour du Laboratoire Souterrain (Démanges aux Eaux) 59
Figure 2-36 Loi du 28 juin 2006 sur la gestion des matières et des déchets radioactifs 61
Figure 2-37 Débat public sur le centre de stockage Cigéo : réunion inaugurale à Bure le 23 mai 2013 62
Figure 2-38 Réunion de présentation du point d'avancement du projet d'implantation de stockage géologique aux élus de la Meuse. 63
Figure 2-39 Illustration du processus itératif reliant acquisition de connaissances, conception et sûreté 65
Figure 2-40 Des itérations de Sûreté/Conception/Connaissances qui se sont échelonnées depuis 1991 67
Figure 2-41 Du dossier d'options de sûreté vers l'autorisation de création de l'installation nucléaire (INB) du centre de stockage Cigéo 72
Figure 2-42 Le développement progressif du projet de centre de stockage Cigéo 74
Figure 2-43 Disque saphir étudié comme support de la mémoire à long terme 76
Figure 2-44 Illustration des quartiers HA et MA-VL, séparés et borgnes 76
Figure 2-45 Illustration des composants d'un colis de stockage HA 77
Figure 2-46 Ordre de grandeur de l'épaisseur de la couche de Callovo-Oxfordien dans la ZIOS 77
Figure 2-47 Schéma illustrant les processus de décroissance, atténuation et retard des radionucléides vis-à-vis de leur migration dans le temps 78
Figure 2-48 Illustration des atténuations apportées par les différents composants du stockage et son environnement en évolution normale 78
Figure 2-49 Photographie d'une radiographie très haute énergie d'un colis contenant un fût de déchets technologiques placé dans un conteneur en béton 80
Figure 2-50 Photos d'emballages de transport sur train 80
Figure 2-51 Photo d'une salle de conduite centralisée 81

Figure 2-52 Illustration de colis de stockage déchets radioactifs MA-VL placés en hotte pour leur transfert vers les alvéoles de stockage 81
Figure 2-53 Hexagone de l'exposition : les 6 conditions qui doivent être simultanément réunies pour présenter un risque 82
Figure 2-54 Illustration du principe de ventilation en alvéole MA-VL 83
Figure 2-55 Illustration des principes de conception de l'alvéole HA 83
Figure 2-56 Illustration des dispositifs du transfert incliné par funiculaire 84
Figure 2-57 Photographie de la construction du banc d'essai du prototype du funiculaire 85
Figure 2-58 Illustration de la manutention des colis de déchets radioactifs MA-VL à faible hauteur 85
Figure 2-59 Illustration des essais de résistance au feu des colis 86
Figure 2-60 Illustration des principes de gestion de la co-activité 88
Figure 2-61 Zonage sismique en France et cartographie des séismes enregistrés entre 1962 et 2009 89
Figure 2-62 Première réunion du CLIS le 15 novembre 1999 92
Figure 2-63 Feuille de route de la concertation post-débat public 94
Figure 2-64 Ateliers de concertation autour du projet Cigéo 95
Figure 2-65 Proposition de zones souterraines d'intérêt pour une reconnaissance approfondie (2009) 98
Figure 2-66 ZIRA : zone souterraine d'intérêt pour une reconnaissance approfondie 99
Figure 2-67 Principe physique des mesures sismiques 100
Figure 2-68 Camion vibrateur utilisé lors de la campagne de mesure sur la ZIRA 100
Figure 2-69 Modélisation de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA (en m) issue de la campagne de reconnaissance géologique approfondie 101
Figure 2-70 Zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) – vue de dessus 101
Figure 2-71 Zone d'implantation des ouvrages souterrains de Cigéo (en orange) 102
Figure 2-72 Périmètre d'implantation possible pour l'entrée de la descenderie présenté en 2009 aux acteurs locaux 103
Figure 2-73 Carte de synthèse des contraintes pour implanter les installations de surface (2009) 105
Figure 2-74 Proposition de scénarios d'implantation pour les installations de surface (Débat public de 2013) 107
Figure 2-75 Zone d'intervention potentielle retenue pour l'implantation de la zone descenderie 108
Figure 2-76 Localisations des zones potentielles de dépôt des déblais sous forme de verses étudiées en 2012 110
Figure 2-77 Localisations possibles de zones de verses économisant l'espace agricole 110
Figure 2-78 Zone d'intervention potentielle retenue pour l'implantation de la zone puits 112
Figure 2-79 Zone d'intervention potentielle pour l'implantation de la liaison intersites (LIS) 113
Figure 2-80 Zone d'intervention potentielle pour l'implantation de l'installation terminale embranchée 114
Figure 2-81 Localisation des emprises réservées pour d'éventuelles extension du bâtiment EP1 pour la réversibilité 117
Figure 2-82 Localisation de l'emprise réservée pour le bâtiment EP2 à l'Est de la tête de descenderie 117
Figure 2-83 Localisation de la zone fluide et utilité au nord du tracé actuel de la route départementale D69/960 118
Figure 2-84 Origine de production d'électricité - Région Grand Est – 2018 120
Figure 2-85 Les différentes options de production de chaleur par énergie thermique 121
Figure 2-86 Carte de localisation des points de rejets liquide du centre de stockage Cigéo 125
Figure 2-87 Schéma illustratif de principe de la gestion des eaux au droit de la zone descenderie en fin d'aménagements préalables et en phase de construction initiale 128
Figure 2-88 Schéma illustratif de principe de la gestion des eaux au droit de la zone descenderie en phase de fonctionnement (les effluents non conventionnels correspondent aux eaux alvéoles HA sur ce schéma) 128
Figure 2-89 Schéma illustratif de principe de la gestion des eaux au droit de la zone puits en fin d'aménagements préalables et en phase de construction initiale 128
Figure 2-90 Schéma illustratif de principe de la gestion des eaux au droit de la zone puits en phase de fonctionnement 128
Figure 2-91 Principe de construction des puits pour éviter la mise en communication des aquifères traversés 129
Figure 2-92 Carte de localisation du projet global Cigéo et des cours d'eaux à la proximité du centre de stockage Cigéo 131
Figure 2-93 Schéma de principe du déploiement des verses 132
Figure 2-94 Schéma de principe du déploiement de l'éventuelle troisième tranche de verses 132
Figure 2-95 Scénarios 1 à 3 (de gauche à droite) : scénarios de raccordement sur la ligne 225 kV Froncles-Épizon-Muremont (rouge 400 kV, vert 225 kV, orange 90 kV) 135
Figure 2-96 Scénarios 4 (à gauche) et 5 (à droite) : scénarios de raccordement sur la ligne 400 kV Mery-Houdreville (rouge 400 kV, vert 225 kV, orange 90 kV) 135
Figure 2-97 Localisation des 24 emplacements proposés par RTE pour l'implantation du poste 400/90 kV 137
Figure 2-98 Plan de localisation des installations d'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo 139
Figure 2-99 Adduction d'eau - principes de raccordement envisagés 140
Figure 2-100 Desserte du centre de stockage - Extrait du SIDT présenté au débat public « Cigéo » de 2013 142
Figure 2-101 Ligne ferroviaire 027000 entre l''ITE et le réseau ferré national 143
Figure 2-102 Opération de déviation de la route départementale D60/960 - solutions soumises à concertation 143
Figure 2-103 Illustration de l'acheminement des colis de déchets radioactifs vers Cigéo 144
Figure 3-1 Estimation des volumes de déchets HA et MA-VL à stocker dans Cigéo 150
Figure 4-1 Les opérations du projet global Cigéo 154
Figure 4-2 Localisation du projet global Cigéo 154
Figure 4-3 Implantation des différentes opérations du projet global Cigéo – Vue rapprochée 155
Figure 4-4 Représentation illustrative du centre de stockage Cigéo 156
Figure 4-5 Localisation des installations du centre de stockage Cigéo 157
Figure 4-6 Cheminement des colis de déchets jusqu'à leur emplacement de stockage 158
Figure 4-7 Exemple illustratif d'opérations de contrôle d'un emballage de transport menées sur une installation nucléaire 159
Figure 4-8 Illustration de la mise en conteneur de stockage de colis de déchets MA-VL 159
Figure 4-9 Vue éclatée d'une hotte pour colis de déchets MA-VL 159
Figure 4-10 Illustration du funiculaire transportant une hotte MA-VL dans la descenderie 160
Figure 4-11 Illustration du système de transfert automatisé d'une hotte MA-VL 160
Figure 4-12 Illustration d'un alvéole de stockage de déchets MA-VL 160
Figure 4-13 Illustration de conteneur de stockage de colis de déchets HA 160
Figure 4-14 Illustration du système de transfert automatisé d'une hotte HA 161
Figure 4-15 Illustration d'un alvéole de stockage de déchets HA 161
Figure 4-16 Représentation schématique de l'organisation de la zone descenderie 162
Figure 4-17 Organisation générale de la zone descenderie (ouvrages non représentés) 162
Figure 4-18 Exemple d'aménagement et d'insertion paysagère possibles de la zone descenderie 162
Figure 4-19 Localisation des installations liées à l'exploitation de la zone descenderie 163
Figure 4-20 Principe d'organisation spatiale du bâtiment EP1 et de la tête de descenderie colis 164
Figure 4-21 Exemple de configuration possible du bâtiment EP1 et de la tête de descenderie 164
Figure 4-22 Exemple de configuration possible du bâtiment dédié aux fonctions de sécurité et environnement 164
Figure 4-23 Localisation des installations liées à la zone administrative de la zone descenderie 166
Figure 4-24 Localisation des installations liées à l'accueil du public 167
Figure 4-25 Exemple de configuration possible du bâtiment d'accueil du public 167
Figure 4-26 Localisation de la zone utilités 168
Figure 4-27 Localisation de la zone terminal ferroviaire fret de la zone descenderie 169
Figure 4-28 Identification des principaux ouvrages en terre en zone descenderie 170
Figure 4-29 Représentation schématique de l'organisation de la zone puits 171
Figure 4-30 Organisation générale de la zone puits (ouvrages non représentés) 172

Figure 4-31 Exemple d'aménagement et d'insertion paysagère possibles de la zone puits (vision en fin de phase de fonctionnement) 172
Figure 4-32 Localisation des installations de la zone puits travaux et verses 172
Figure 4-33 Exemple de configuration possible du puits « ventilation air frais travaux » (VFT) 173
Figure 4-34 Exemple de configuration possible du puits « matériels et matériaux travaux » (MMT) 173
Figure 4-35 Plan de principe de localisation du déploiement des verses en zone puits 174
Figure 4-36 Localisation des installations liées à la zone exploitation de la zone puits 175
Figure 4-37 Exemple de configuration possible du puits de ventilation air frais exploitation (VFE) 176
Figure 4-38 Exemple de configuration possible du puits de ventilation air vicié exploitation (VVE) 176
Figure 4-39 Localisation des installations liées à la zone administrative de la zone puits 177
Figure 4-40 Localisation de la zone utilités 178
Figure 4-41 Identification des principaux ouvrages en terre en zone puits 179
Figure 4-42 Localisation de la zone d'implantation des ouvrages souterrains (ZIOS) 181
Figure 4-43 Organisation générale des ouvrages souterrains à terminaison 181
Figure 4-44 Illustration du principe de séparation des différentes zones et liaisons surface-fond (dimensions et proportions des zones non représentatives) 182
Figure 4-45 Vue d'ensemble des descenderies service et colis 182
Figure 4-46 Vue d'ensemble d'un puits (principe) 183
Figure 4-47 Principe d'organisation de la zone de soutien logistique travaux et de la zone de soutien logistique exploitation 183
Figure 4-48 Plan général du quartier de stockage MA-VL à T 1 (à gauche) et illustration à terminaison (à droite) 184
Figure 4-49 Principe de recoupe et évacuation/secours entre les galeries de liaison exploitation 184
Figure 4-50 Coupe longitudinale schématique d'un alvéole MA-VL 185
Figure 4-51 Plan général du quartier pilote HA 185
Figure 4-52 Coupe longitudinale schématique d'un alvéole HA0 185
Figure 4-53 Vue d'ensemble du quartier de stockage HA 186
Figure 4-54 Localisation de la liaison intersites 188
Figure 4-55 Exemple de convoyeur à bande en caisson béton 188
Figure 4-56 Localisation de l'installation ferroviaire terminale embranchée 189
Figure 4-57 Vue aérienne de la plateforme logistique de Gondrecourt-le -Château 190
Figure 4-58 Périmètre des installations de la zone puits situées en zone boisée 191
Figure 4-59 Principe d'un diagnostic archéologique 192
Figure 4-60 Localisation du raccordement électrique du centre de stockage Cigéo sur le réseau 400 kV 193
Figure 4-61 Plan de localisation des installations d'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo 195
Figure 4-62 Plan de localisation de la portion de la ligne 400 kV faisant l'objet de travaux de sécurisation 196
Figure 4-63 Illustration de piste provisoire d'accès au pylône avec décapage de la terre végétale et mise en place d'un géotextile recouvert de cailloux (source : RTE - juin 2020) (125) 198
Figure 4-64 Illustration de piste provisoire d'accès au pylône constitué de plaques de roulement (source : RTE, juin 2020) (125) 198
Figure 4-65 Travaux de renforcement des fondations (source RTE - juin 2020) (125) 199
Figure 4-66 Représentation schématique du remplacement du câble de garde actuel par un câble de garde avec fibre optique incorporée (en cours de création) (source RTE - juin 2020) (125) 199
Figure 4-67 Illustration d'une poulie de déroulage (source RTE - juin 2020) (125) 199
Figure 4-68 Illustration d'une freineuse au niveau du couloir de servitude de la ligne 400 kV (source RTE - juin 2020) (125) 200
Figure 4-69 Illustration de pylônes pour ligne 400 kV (source RTE - juin 2020) (125) 201
Figure 4-70 Représentation schématique du poste de transformation 400/90 kV 201
Figure 4-71 Exemple de transformateur 400/90 kV 201
Figure 4-72 Illustration d'un poste de transformation 400/90 kV 202
Figure 4-73 Illustration des opérations de raccordement sur la ligne électrique 400 kV (Source RTE) 202
Figure 4-74 Schéma de principe d'installation des deux liaisons électriques enterrées 90 kV en tranchées parallèles 203
Figure 4-75 Exemple du poste de transformation 90/20 kV de Pouxeux (Vosges) 203
Figure 4-76 Localisation de l'opération d'adduction d'eau 204
Figure 4-77 Trancheuse pour pose de canalisation 204
Figure 4-78 Canalisation en encorbellement 205
Figure 4-79 Tête de foreuse pour fonçage 205
Figure 4-80 Localisation de la ligne ferroviaire 027000 205
Figure 4-81 Profil en travers type d'une voie ferrée 206
Figure 4-82 Passage à niveau à Abainville 207
Figure 4-83 L'ancienne gare de Ligny-en-Barrois 207
Figure 4-84 Ligne ferroviaire 027000 à Nançois-Tronville 207
Figure 4-85 Ouvrage d'art de la ligne ferroviaire 027000 207
Figure 4-86 Enlèvement de portions d'ancienne voie ferrée 208
Figure 4-87 Opération de déviation de la route départementale D60/960 – options étudiées en vue de la concertation 208
Figure 4-88 Illustration de l'acheminement des colis de déchets radioactifs vers Cigéo 209
Figure 4-89 Convoi de déchets radioactifs 210
Figure 4-90 Centrale d'acquisition de données dans un cabanon de protection de forage (à gauche) et tête de piézomètre (à droite) 212
Figure 4-91 Plateforme de forage profond 212
Figure 5-1 Les phases temporelles successives de déploiement du centre de stockage Cigéo 218
Figure 5-2 Illustration du développement progressif des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo 222
Figure 5-3 Schéma illustratif de dispositifs de fermeture et de scellement des puits et des descenderies construits pour la fermeture définitive de centre de stockage Cigéo 223
Figure 5-4 Synthèse des phases successives de déploiement du projet 225
Figure 5-5 Représentation schématique du scénario de fermeture de référence proposé par l'Andra sur dans la version de 2016 du plan directeur pour l'exploitation du centre de stockage Cigéo (66) 227
Figure 5-6 Banc d'essai de récupérabilité de colis de stockage HA. Source : Andra 230
Figure 6-1 Estimation puissance électrique maximale nécessaire au centre de stockage Cigéo 234
Figure 6-2 Schéma de principe de la gestion de l'eau au droit de la zone descenderie et de la zone puits du centre de stockage Cigéo 238

Tableaux

Tableau 1-1 Centres de stockage de déchets radioactifs existants en France 15
Tableau 2-1 Tableau comparatif des différents modes de gestion envisagés pour les déchets HA et MA-VL selon les critères : capacité à prendre en charge tous les déchets HA de l'inventaire actuel/capacité à prendre en charge tous les déchets MA-VL de l'inventaire actuel/production de nouveaux déchets radioactifs/nécessité d'une filière suivante 43
Tableau 2-2 Tableau comparatif de la maturité technologique des différents modes de gestion selon les critères : faisabilité technique/nombre d'installations nouvelles à créer 45
Tableau 2-3 Tableau comparatif des différents modes de gestion envisagés pour les déchets HA et MA-VL selon les critères liés à la réversibilité : progressivité de la construction, flexibilité de l'exploitation et adaptabilité de la conception/récupérabilité 46
Tableau 2-4 Tableau comparatif des différents modes de gestion envisagés pour les déchets HA et MA-VL selon les critères : Impact environnemental brut de la construction - du fonctionnement et du démantèlement - à long terme/impact sur les transports de colis de déchets/sur la santé humaine/risques à long terme 47
Tableau 2-5 Le Laboratoire de recherche souterrain – des dates clés 58

Tableau 2-6 Liste des captages d'adduction en eau potable présents dans un rayon de 10 km des points de raccordements du centre de stockage Cigéo 122
Tableau 2-7 Nombre et le volume des réservoirs de stockage des eaux pluviales, des effluents traités au sein des stations d'épuration et des dispositifs de traitement 127
Tableau 2-8 Liens internet présentant des informations sur les installations des sites des producteurs 144
Tableau 3-1 Volume des colis primaires de déchets HA destinés au centre de stockage Cigéo 150
Tableau 3-2 Volume des colis primaires de déchets MA-VL destinés au centre de stockage Cigéo 150
Tableau 4-1 Communes d'implantation de la zone descenderie 161
Tableau 4-2 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone exploitation de la zone descenderie 165
Tableau 4-3 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone administrative de la zone descenderie 166
Tableau 4-4 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone d'accueil du public de la zone descenderie 167
Tableau 4-5 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone utilités de la zone descenderie 168
Tableau 4-6 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone accueillant le terminal ferroviaire fret de la zone descenderie 169
Tableau 4-7 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone descenderie 170
Tableau 4-8 Communes d'implantation de la zone puits 171
Tableau 4-9 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone puits travaux et verses de la zone puits 175
Tableau 4-10 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone exploitation de la zone puits 177
Tableau 4-11 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone administrative de la zone puits 178
Tableau 4-12 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone utilités de la zone puits 179
Tableau 4-13 Récapitulatif des ouvrages les plus importants de la zone puits 179
Tableau 4-14 Communes à l'aplomb de la zone possible de déploiement des ouvrages souterrains de stockage 181
Tableau 4-15 Région, département et communes traversés par le projet de liaison intersites 188
Tableau 4-16 Région, départements et communes traversés par l'infrastructure ferroviaire de l'installation terminale embranchée 189
Tableau 4-17 Commune d'implantation de la plateforme logistique 189
Tableau 4-18 Communes actuellement identifiées pour l'implantation du poste 400 kV et des lignes enterrées de l'opération d'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo 194
Tableau 4-19 Communes actuellement identifiées pour les travaux de sécurisation de la ligne 400 kV de l'opération d'alimentation électrique du centre de stockage Cigéo 197
Tableau 4-20 Travaux envisagés au niveau des sites Natura 2000 traversés par la ligne électrique 400 kV 200
Le Tableau 4-21 Communes actuellement identifiées pour l'implantation des ouvrages de l'opération d'adduction d'eau du centre de stockage Cigéo 204
Tableau 4-22 Communes actuellement identifiées pour l'opération de mise à niveau de la ligne ferroviaire 027000 206
Tableau 4-23 Communes concernées actuellement identifiées pour l'opération de déviation de la route départementale D60/960 208
Tableau 4-24 Communes actuellement identifiées pour les installations liées à l'opération d'expédition et de transport 209
Tableau 4-25 Besoins de surveillance du stockage par forages 213
Tableau 4-26 Communes actuellement identifiées par les opérations caractérisation, de surveillance environnementale et de suivi des mesures environnementales 214
Tableau 6-1 Quantité de polluants atmosphériques conventionnels émise en phase de fonctionnement (kg/an) 236
Tableau 6-2 Rejets radioactifs annuels maximaux de l'installation souterraine 236
Tableau 6-3 Estimation annuelle des déchets induits conventionnels lors du fonctionnement (hors jouvence) en moyenne annuelle 239
Tableau 6-4 Estimation des déchets radioactifs produits lors du fonctionnement en moyenne annuelle 239

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Le principe de proportionnalité dans l'évaluation environnementale. Ministère de la transition écologique et solidaire (2019). Disponible à l'adresse : https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-33914-evaluation-environnementale-principe-proportionnalite.pdf.

2 Les essais atmosphériques. Les essais atmosphériques d'armes nucléaires : des retombées radioactives à l'échelle planétaire. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2015). 23 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/surveillance-environnement/resultats/retombees-tirs-armes-nucleaires/Documents/IRSN_serie_fiches_tirs_08-2015.pdf.

3 Exposition de la population française aux rayonnements ionisants. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2015). IRSN/2015-00001. 22 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/radioprotection/IRSN-Exposition-Population-Rayonnements-Ionisants_2015-00001.pdf.

4 Constat Radiologique « Rémanence de la radioactivité d'origine artificielle ». Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2016). PRP-ENV/SESURE 2015-41. 130 p. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/surveillance-environnement/Documents/IRSN_Constat-Remanence-France_201604.pdf.

5 Quelle est la dose de radioactivité dangereuse pour la santé ? Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2019). Consulté le 31/10/2019. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/faq/Pages/Quelle-est-la-dose-de-radioactivite-dangereuse-pour-la-sante_faibles-doses.aspx.

6 Décision n° 2009-DC-0153 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 18 août 2009 relative aux niveaux d'intervention en situation d'urgence radiologique. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2009).

7 Inventaire national des matières et déchets radioactifs. Les essentiels 2019. Andra (2019). Disponible à l'adresse : https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/inventaire_national-essentiels-2019.pdf.

8 La sûreté des centrales nucléaires : les rejets. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2018). Consulté le 31/10/2019. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/La-surete-des-centrales-nucleaires/Radioprotection-et-protection-de-l-environnement/Les-rejets.

9 Stockage définitif des déchets radioactifs. IAEA (2011). SSR 5. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1449f_Web.pdf.

10 Directive n°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. Conseil de l'Union Européenne (2011). Journal officiel de l'Union européenne, N°L199, pp.48–56.

11 Décret n°2008-357 du 16 avril 2008 pris pour l'application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et fixant les prescriptions relatives au Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Premier ministre (2008).

12 Loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (2016). Journal officiel de la République française.

13 Proposition de loi précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue. Sénat (2016), N°522.

14 Loi n°2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (2006). Journal officiel de la République française, N°93, pp.9721.

15 Loi n°2013-1279 du 29 décembre 2013 de finances rectificative pour 2013. Version consolidée (2019), N°EFIX1327237L.

16 Loi n°99-1172 du 30 décembre 1999 de finances pour 2000. Version consolidée (2019), N°ECOX9900112L.

17 ICRP Publication 60. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP (1990). Vol 21, N°1-3.

18 Directive n°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. Commission Européenne (2014). Journal officiel de l'Union européenne, N°L 13.

19 Rieu, J., Niel, J.-C., Bodenez, P. Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2008). 32 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/guide_RFSIII_2_fV1_2_.

20 Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018. Autorité de sûreté nucléaire (ASN); Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer (2017). DICOM_DGEC/BRO/16308. 282 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/PNGMDR-2016-2018/PNGMDR-2016-2018-Rapport-complet?

21 Avis n°2020-AV-0369 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 1er décembre 2020 sur les études concernant la gestion des déchets radioactifs 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 2016-2018, en vue de l'élaboration du cinquième plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2020).

22 Bilan des études et recherches sur l'entreposage - Déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Andra (2013). Document N°CRPADPG130001.

23 Recommandations pour la conception d'installations d'entreposage s'inscrivant dans la complémentarité avec le stockage - Document remis au ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie dans le cadre du Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs 2013-2015. Andra (2015). Document N°CGNTADPG140038/B. Disponible à l'adresse : https://meusehautemarne.andra.fr/sites/meuse/files/2018-04/recommandations-pour-la-conception-d-installations-d-entreposage.pdf.

24 Goguel, J. Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques. Critères techniques de choix de site. Juin 1985-Mai 1987. Ministère de l'industrie, des postes et télécommunications et du tourisme (1987). 245 p. Disponible à l'adresse : https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/106/47106427.pdf.

25 Le rapport Goguel - Stockage des déchets radioactifs en formations géologique : critères techniques de choix de site - Mini dossier. CIDN; CEN Cadarache (1998). 27 p. Disponible à l'adresse : http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/049/20049714.pdf.

26 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. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2019). IRSN/2019-00318. Disponible à l'adresse : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN_Rapport-2019-00318_Alternatives-Stockage-Geologique-Dechets-HAMAVL.pdf.

27 Rapport global d'évaluation des recherches conduites dans le cadre de la loi du 30 Décembre 1991. Commission nationale d'évaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE) (2006). 38 p. Disponible à l'adresse : https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/064000240.pdf.

28 Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire sur les recherches relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, et liens avec le PNGDR-MV. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2006). Disponible à l'adresse : https://www.cigeo.gouv.fr/sites/default/files/2018-08/AVIS-ASN-dechets-2006-02-01.pdf.

29 Loi n°91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (1992). Journal officiel de la République française, N°1.

30 Avis n°2013-AV-0187 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 4 juillet 2013 sur la transmutation des éléments radioactifs à vie longue. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2013).

31 Convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter (London Convention) (1972). Convention de Londres.

32 Traité sur l'Antarctique (1959).

33 Deep Borehole Disposal Research: Demonstration Site Selection Guidelines, Borehole Seals Design, and R&D Needs. Fuel Cycle Research & Developement. Sandia National Laboratories (2013). SAND2013-9490P. 221 p. Disponible à l'adresse : https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/12/f5/DeepBorehDisposalRDDemoSiteGuideDesignSealsNeeds.pdf.

34 Minkley, W.; Ludeling, C. Deep Borehole Disposal in Salt Rocks (2016). 50th ARMA Symposium, Houston, 23 p.

35 Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). Bunderministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2017).

36 Laboratoire souterrain HADES. SKE CEN (2019). Consulté le 02/12/2019. Disponible à l'adresse : https://www.sckcen.be/fr/Research/Infrastructure/HADES.

37 Où en est l'évacuation des déchets radioactifs en formations géologiques ? Une évaluation internationale des progrès récents. Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (1999). Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/1999/ouenest.pdf.

38 Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA (2011). SSG-14. 104 p. Disponible à l'adresse : https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1483_web.pdf.

39 Bataille, C., Longuet, G., Barnier, M. Rapport du médiateur. Mission de médiation sur l'implantation de laboratoires de recherches souterrain; Ministère de l'industrie; Ministère de l'environnement (1993). 35 p. Disponible à l'adresse : http://christian.bataille.pagesperso-orange.fr/html/act_parl/dossiers/nucleaire/mediation.htm.

40 Réunion interministérielle de l'Industrie Santé Recherche Education Environnement - questions nucléaires - relevé de conclusions (1998).

41 Dossier 2005 Granite. Andra (2005). Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2017-12/267.pdf.

42 Rapport d'évaluation n°2. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (2008). 151 p. Disponible à l'adresse : https://www.cne2.fr/telechargements/cne2/rapport%202%20-%20juin%202008.pdf?phpMyAdmin=XFyEwTnpqXv9qwtMxyZ8gJA7yIe.

43 Rapport d'évaluation n°3. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (1997). 248 p. Disponible à l'adresse : https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/154000535.pdf.

44 Décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique (2010).

45 Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français (2011).

46 Boisson, P., Huet, P., Mingasson, J. Rapport à Madame la ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement, à Monsieur le ministre de la recherche, à Monsieur le secrétaire d'Etat auprès du ministre de l'économie, des finances et de l'industrie, chargé de l'industrie : Article 1er du décret n°99-687 du 3 août 1999. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement; Mission collégiale de concertation granite (2000). 62 p. + annexes.

47 Dossier 2005. Les recherches de l'ANDRA sur le stockage géologique des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Résultats et perspectives. Andra (2006). Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/265.pdf.

48 Décret n°2011-1910 du 20 décembre 2011 autorisant l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs à exploiter sur le territoire de la commune de Bure (Meuse) un laboratoire souterrain destiné à étudier les formations géologiques profondes où pourraient être stockés des déchets radioactifs. Version consolidée. Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (2012).

49 Enquêtes publiques DAIE - ICPE - IOTA du mardi 26 octobre 2010 au mardi 30 novembre 2010 relatives aux demandes en vue du renouvellement des autorisations d'exploitation et de fonctionnement du laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne, situé au lieu-dit "La Voie Gasselle" sur le territoire de la commune de Bure (55) présentées par l'Andra. Conclusions de la commission d'enquête et avis sur l'enquête DAIE. Département de la Meuse; Département de la Haute-Marne (2011).

50 Résumé du compte-rendu du débat public sur les options générales en matières de gestion des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Septembre 2005 - Janvier 2006. Commission Nationale du Débat Public (CNDP) (2006). 13 p. Disponible à l'adresse : https://www.uarga.org/downloads/Documentation/resum-compte-rendu.pdf.

51 Séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue - Loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs : bilan des recherches conduites sur la séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue et sur le développement de réacteurs nucléaires de nouvelle génération. CEA (2012). 88 p. Disponible à l'adresse : http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/rapports/rapport-gestion-durable-matieres-nucleaires/Tome%202.pdf.

52 Sûreté du stockage géologique de déchets radioactifs HAVL en France : examen international par des pairs du "Dossier 2005 Argile" concernant le stockage dans la formation du Callovo-Oxfordien. OCDE; Nuclear Energy Agency (NEA) (2006). NEA 6179. 81 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2006/nea6179-havl.pdf.

53 Birraux, C. Rapport fait au nom de la commission des affaires économiques, de l'environnement et du territoire sur le projet de loi, après déclaration d'urgence, de programme relatif à la gestion des matières et des déchets radioactifs (n°2977). Assemblée nationale (2006). 3003. 141 p. Disponible à l'adresse : http://www.assemblee-nationale.fr/12/pdf/rapports/r3003.pdf.

54 Birraux, C. Rapport fait au nom de la commission des affaires économiques, de l'environnement et du territoire sur le projet de loi, modifié par le Sénat, après déclaration d'urgence (N°3121), de programme relatif à la gestion durable des matirèes et des déchets radioactifs. Assemblée nationale (2006). 3154. 57 p. Disponible à l'adresse : http://www.assemblee-nationale.fr/12/pdf/rapports/r3154.pdf.

55 Suites données par l'Andra au projet CIGEO à l'issue du débat public. Centre industriel de stockage géologique de déchets radioactifs. Andra (2014). Document N°DCOM/14-0107. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2017-12/dcom-14-0107.pdf.

56 Raison, M. Rapport fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable sur la proposition de loi de MM Gérard Longuet, Christian Namy et plusieurs de leurs collègues précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue. Sénat (2016). 594. 36 p. Disponible à l'adresse : http://www.senat.fr/rap/l15-594/l15-5941.pdf.

57 Bouillon, C. Rapport fait au nom de la commission du développement durable et de l'aménagement du territoire sur la proposition de loi, adoptée par le Sénat, précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (N°3755). Assemblée nationale (2016). 3894. Disponible à l'adresse : http://www.assemblee-nationale.fr/14/pdf/rapports/r3894.pdf.

58 Règle n°III.2.f du 10 juin 1991 - Définition des objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stock. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (1991). Règles fondamementales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que réacteurs.

59 Post-closure safety case for geological repositories: nature and purpose. OCDE; Nuclear Energy Agency (NEA) (2004). NEA 3679. 56 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2004/nea3679-closure.pdf.

60 Décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007 relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives (Article 8) (2007).

61 Décret n°2019-190 du 14 mars 2019 codifiant les dispositions applicables aux installations nucléaires de base, au transport de substances radioactives et à la transparence en matière nucléaire. Journal officiel de la République française (2019).

62 Délibération du conseil d'administration de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs du 5 mai 2014 relative aux suites à donner au débat public sur le projet CIGEO. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2014). Journal officiel de la République française, N°108, pp.7851-4.

63 Options de sûreté du projet Cigéo. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2014), N°CODEP-DRC-2014-039834.

64 Dossier d'options de sûreté - partie exploitation (DOS-Expl). Andra (2016). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-exploitation.pdf.

65 Dossier d'options de sûreté - partie après fermeture (DOS-AF). Andra (2016). Document N°G-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-04/dossier-options-surete-apres-fermeture_0.pdf.

66 Proposition de plan directeur pour l'exploitation de Cigéo. Version 1 pour consultation. Andra (2016). Document N°CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-15-0063. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-08/proposition%20PDE%20avril%202016.pdf.

67 Dossier d'options techniques de récupérabilité (DORec). Andra (2016). Document N°CGTEDNTEAMOARV00000150059. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-11/CG-TE-D-NTE-AMOA-RV0-0000-15-0059-A%20DOREC.pdf.

68 Avis n°2018-AV-0300 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 11 janvier 2018 relatif au dossier d'options de sûreté présenté par l'Andra pour le projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2018). Disponible à l'adresse : http://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Installations-nucleaires/Avis/Avis-n-2018-AV-0300-de-l-ASN-du-11-janvier-2018.

69 Lettre ASN CODEP-DRC-2018-001635 du 12 Janvier 2018 relative au Dossier d'options de sûreté pour le projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2018).

70 Analyse des documents Cigéo 2016 et recommandations. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2) (2016). 22 p. Disponible à l'adresse : https://www.cne2.fr/telechargements/avis/Analyse-DOS-DOREC-PDE-Vfinal.pdf.

71 The French R&D Programme on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: An International Peer Review of the “Dossier 2001 Argile”. OCDE; Nuclear Energy Agency (NEA) (2003). 77 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2003/nea4432-andraeng.pdf.

72 Stockage réversible profond. Etape 2009. Proposition de zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation de surface. Andra (2010). Document N°C.RP.ADP.09.0035. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/391.pdf.

73 Avis n°2010-AV-0084 du 5 janvier 2010 de l’ASN sur le dossier de l’agence nationale de gestion des déchets radioactifs (ANDRA) relatif à la proposition d’une zone d’intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d’implantation en surface pour un stockage réversible en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2010). 5 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Installations-nucleaires/Avis/Avis-n-2010-AV-0084-du-5-janvier-2010-de-l-ASN.

74 Accord sur poursuites investigations ZIRA (Zone Implantation Reconnaissance Approfondie) (2010).

75 Stockage réversible profond. Etape 2009. Options de conception du stockage en formation géologique profonde. Andra (2010). Document N°394. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-01/394.pdf.

76 Stockage réversible profond. Etape 2009. Options de réversibilité du stockage en formation géologique profonde. Andra (2010). Document N°393. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-01/393.pdf.

77 Stockage réversible profond. Etape 2009. Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde. Andra (2010). Document N°392. Disponible à l'adresse : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-01/392.pdf.

78 Avis n°2011-AV-129 du 26 juillet 2011 de l’Autorité de sûreté nucléaire sur le dossier relatif au stockage réversible profond des déchets de haute et moyenne activité à vie longue déposé par l’Andra conformément à l’article 11 du décret n° 2008-357 du 16 avril 2008 (2011). 3 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Installations-nucleaires/Avis/Avis-n-2011-AV-129-de-l-ASN-du-26-juillet-2011.

79 Avis n°2013-AV-0179 de l’Autorité de sûreté nucléaire du 16 mai 2013 sur les documents produits par l’Andra depuis 2009 relatifs au projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2013). 6 p. Disponible à l'adresse : http://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Installations-nucleaires/Avis/Avis-n-2013-AV-0179-de-l-ASN-du-16-mai-2013.

80 Dossier « Projet Cigéo – Esquisse Jesq03 (2012) – Document de synthèse des évolutions par rapport au Dossier 2009 et impact sur la sûreté ». Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2013), N°CODEP-DRC-2013-033414.

81 Dossier "projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde - ouvrages de fermeture". Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2014), N°CODEP-DRC-2014-039040.

82 Dossier « projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde –maîtrise des risques en exploitation au niveau esquisse du projet Cigéo ». Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2015), N°CODEP-DRC-2015-004834.

83 Revue internationale par les pairs sur le "Dossier d'options de sûreté" du projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde : CIGEO - Rapport de la revue par les pairs. AIEA (2016). Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-Publications/Rapport-de-la-revue-par-les-pairs-CIGEO-dec-2016?

84 L'ASN estime que les options de sûreté de Cigéo constituent une avancée significative. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2018). Consulté le 10/06/2021. Disponible à l'adresse : asn.fr/Informer/Actualites/Avis-de-l-ASN-sur-les-options-de-surete-de-Cigeo.

85 Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement (2012). Journal officiel de la République française.

86 Directive 2006/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 1996 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE (refonte). Commission Européenne (2006). Journal officiel de l'Union européenne, N°L 157, pp.24-86.

87 Avis techniques du CSIN n° 15 : Gestion du vieillissement des installations du cycle du combustible nucléaire. AEN; OCDE (2012). NEA/CSNI/R(2012)7. 44 p. Disponible à l'adresse : https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2012/6991-top-15-fr.pdf.

88 Laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne : Étude de dangers : DAIE : pièce n° 6 / ICPE : pièce n° 10. Andra (22/06/2009). Document N°A.RP.AMHM.09.0031.

89 Fiche climatologique - Statistiques 1981-2010 et records - St-Dizier (52). Météo France (2020). Disponible à l'adresse : https://donneespubliques.meteofrance.fr/FichesClim/FICHECLIM_52448001.pdf.

90 Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base. Version consolidée au 21 octobre 2019 (2019).

91 Avis délibéré de l'Autorité environnementale sur le centre de stockage Cigéo (52-55). Autorité environnementale (2021), N°Ae 2020-79.

92 Loi n°2006-686 du 13 juin 2006 modifiée relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire. Version consolidée au 12 juillet 2014 (2006).

93 Communiqué des décisions de la CNDP du 2 Mars 2005. Commission Nationale du Débat Public (CNDP) (2005).

94 Décision n°2013/16/CIGEO/4 : Projet de création d'un centre de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne (projet CIGEO). Commission Nationale du Débat Public (CNDP) (2013).

95 Décision n°2018/25/PNGMDR/1 du 4 avril 2018 relative à la cinquième édition du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs. Commission Nationale du Débat Public (CNDP) (2018). Journal officiel de la République française. Vol 83, N°CNPX1809564S.

96 Recommandations relatives à la participation du public au projet Cigéo. Haut Comité sur la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) (2020). Disponible à l'adresse : http://www.hctisn.fr/IMG/pdf/Avis_adopte_HCTISN_Concertation_Cige_o_28_09_20_cle0c16fb.pdf.

97 Décision consécutive au débat public dans le cadre de la préparation de la cinquième édition du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Ministère de la transition écologique et solidaire; Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2020).

98 Réunion du 29 juin 2009 - Assemblée générale du Clis à Poissons, le 29 juin 2009. Comité local d'information et de suivi (CLIS) du laboratoire de Bure (2009). 72 p. Disponible à l'adresse : http://clis-bure.fr/wp-content/uploads/2019/03/retranscription-29-06-09.pdf.

99 Projet de centre de stockage HAVL : le périmètre se précise. Est Républicain; Journal de la Haute-Marne (2009).

100 Courrier du Ministre au Président de l'Andra sur le choix de la ZIRA. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer en charge des technologies verte et des négociations sur le climat (2010).

101 Rapport d'évaluation n°4. Tome 1. Commission nationale d'évaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE) (2010). Disponible à l'adresse : https://www.cne2.fr/telechargements/Rapport-CNE2-2010.pdf.

102 Bilan des suivis de la biodiversité au sein des quatre Zones d'Intérêt pour les Installations de Surface. Andra (2015). Document N°DRD/GES/15-0049.

103 Concertation post-débat public sur Cigéo. Thème : Cycle de l'eau. Bilan Andra de la concertation sur les rejets d'effluents liquides. Mars 2018 à juin 2018. Andra (2019). Document N°DICOD/19-0108. Disponible à l'adresse : https://meusehautemarne.andra.fr/sites/meuse/files/2019-12/concertation%20post%20debat%20public%20cigeo_eau%20VF.pdf.

104 Arrêté du 9 août 2013 portant homologation de la décision n° 2013-DC-0360 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2013). Journal officiel de la République française, N°193, pp.14278.

105 Arrêté du 5 décembre 2016 portant homologation de la décision n° 2016-DC-0569 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 29 septembre 2016 modifiant la décision n° 2013-DC-0360 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base (2016). Journal officiel de la République française. Vol 0297, N°6.

106 Décision n°2016-DC-0569 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 29 septembre 2016 modifiant la décision n°2013-DC-0360 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement d. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2016).

107 Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes - Guide n°13. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2013). 44 p. Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/content/download/100753/733560/version/1/file/Guide-de-l-ASN-13.pdf.

108 Décision n°2015-DC-0508 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 21 avril 2015 relative à l'étude sur la gestion des déchets et au bilan des déchets produits dans les installations nucléaires de base. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2015).

109 Arrêté du 23 août 2019 portant homologation de la décision n° 2019-DC-0676 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 9 juillet 2019 fixant les valeurs limites de rejet dans l'environnement des effluents des installations nucléaires de base n° 103, n° 104, n° 1 (2019). Journal officiel de la République française. Vol 0202, N°9.

110 Arrêté du 21 août 2006 autorisant l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) à effectuer des rejets d'effluents liquides et gazeux et des prélèvements d'eau pour le centre de stockage de l'Aube (installation nucléaire de base n°149). Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (2006). Journal officiel de la République française, N°217, pp.13722.

111 Circulaire du 9 septembre 2002 relative au développement des réseaux de transport et de distribution d'électricité. Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (2002).

112 Circulaire CAB n°47498 MZE Développement des réseaux publics de transport et de distribution de l'électricité. Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie; Ministère délégué à l'industrie (2002).

113 Raccordement au Réseau de transport d'électricité (RTE) à 400kV pour le Centre industriel de stockage géologique de déchets radioactifs (Cigéo) de l'Agence nationale pour la gestio des déchets radioactifs (Andra). Andra (2016). Document N°DG-CA-16-0094.

114 Ordonnance n°2016-1060 du 3 août 2016 portant réforme des procédures destinées à assurer l'information et la participation du public à l'élaboration de certaines décisions susceptibles d'avoir une incidence sur l'environnement (2016).

115 Stievenard, J.-M. Bilan du garant - Raccordement au réseau de transport d'électricité du projet Cigéo : Concertation préalable - 13 janvier au 12 février 2020. Commission Nationale du Débat Public (CNDP) (2020). Disponible à l'adresse : https://www.raccordement-cigeo-rte.fr/documents/20.pdf.

116 Transport des colis de déchets HA-MAVL depuis les sites expéditeurs vers Cigéo - PNGMDR 2016-2018. CEA; AREVA; EDF (2018). Disponible à l'adresse : https://www.asn.fr/Media/Files/00-PNGMDR/PNGMDR-2016-2018/Transport-des-colis-de-dechets-HA-MAVL-depuis-les-sites-expediteurs-vers-Cigeo-CEA-EDF-Orano?

117 Décret n°2017-231 du 23 février 2017 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 (2017). Journal officiel de la République française, N°48.

118 Inventaire national des matières et déchets radioactifs. Les essentiels 2018. Andra (2018). Disponible à l'adresse : https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/andra-synthese-2018-web.pdf.

119 Rapport préalable au débat public sur le projet de stockage géologique profond de déchets radioactifs Cigéo. Haut Comité sur la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) (2013). 30 p. Disponible à l'adresse : http://www.hctisn.fr/IMG/pdf/Rapport_GT_Cigeo_vf_cle8a687d.pdf.

120 Arrêté du 23 avril 2012 pris en application du décret n° 2012-542 du 23 avril 2012 pris pour l'application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (2012). Journal officiel de la République française, N°0097.

121 Décision n° 2017-DC-0587 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 23 mars 2017 relative au conditionnement des déchets radioactifs et aux conditions d'acceptation des colis de déchets radioactifs dans les installations nucléaires de base de stockage. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2017).

122 L'archéologie préventive en France : les étapes du diagnostic. INRAP (2020). Consulté le 26/05/2020. Disponible à l'adresse : https://www.inrap.fr/les-etapes-du-diagnostic-9721%20.

123 L'archéologie préventive en France : les étapes de la fouille. INRAP (2020). Consulté le 26/05/2020. Disponible à l'adresse : https://www.inrap.fr/les-etapes-de-la-fouille-9722.

124 Lignes électriques aériennes dépassant 1 kV en courant alternatif - Partie 1 : exigences générales - Spécifications communes. AFNOR (2015), NF EN 50341-1.

125 Sécurisation de la ligne à 400 000 volts Houdreville - Mery : étude environnementale. Réseau de transport d'électricité (RTE) (2020).

126 Étude de restructuration du SIAEP de la région d'Echenay pour une alimentation depuis les sources de Thonnance (rapport d'étude, version définitive). Artélia (2018).

127 Décret n°2010-402 du 23 avril 2010 autorisant Electricité de France à créer, sur le territoire de la commune de Saint-Vulbas (département de l'Ain), une installation nucléaire de base dénommée Installation de conditionnement et d'entreposage de déchets activés (ICEDA) (2010). Journal officiel de la République française, N°97, pp.7561.

128 Avis n°2016-AV-0267 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 31 mai 2016 relatif à la réversibilité du stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2016). 3 p. Disponible à l'adresse : http://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Installations-nucleaires/Avis/Avis-n-2015-AV-0227-de-l-ASN-du-10-fevrier-2015.

© Andra • 2021 • Création graphique : Agence Les Récréateurs • Crédits photos : Andra

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00

www.andra.fr